

Umweltforschungsplan
Des Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz und Reaktorsicherheit

Klimawandel und Anpassung

Förderkennzeichen (UFOPLAN) 3709 41 123

Methode einer integrierten und erweiterten

Vulnerabilitätsbewertung:

Konzeptuell-methodische Grundlagen und exemplarische Umsetzung für
Wasserhaushalt, Stromerzeugung und energetische Nutzung von Holz
unter Klimawandel

von

Univ-Doz. Dr. Helga Weisz, Dr. Hagen Koch, Petra Lasch, Oliver
Walkenhorst,

Vera Peters, Dr. Stefan Vögele (FZ Jülich),

Dr. Fred F. Hattermann, Shaochun Huang, Valentin Eich, Matthias
Büchner, Martin Gutsch, Dr. Peter-Paul Pichler, Dr. Felicitas Suckow

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.

Institutsleiter

Prof. Dr. Hans Joachim Schellnhuber

IM AUFTRAG

DES UMWELTBUNDESAMTES

Jänner 2013

Inhaltsverzeichnis

1. <u>EINLEITUNG UND FRAGESTELLUNG</u>	12
2. <u>KONZEPTUELLE UND TERMINOLOGISCHE GRUNDLAGEN: VULNERABILITÄT, RESILIENZ, RISIKO</u>	20
HINTERGRUND: ZUM BEGRIFF DER VULNERABILITÄT	20
VULNERABILITÄT IN DER GLOBAL-CHANGE- UND KLIMAFOLGENFORSCHUNG.....	22
DISASTER-RISK-FORSCHUNG	28
RESILIENZ	31
ZWISCHENFAZIT	33
SOZIOLOGISCHE RISIKOFORSCHUNG.....	39
3. <u>KONZEPTUELLE HERANGEHENSWEISE</u>	48
DEFINITION VON VULNERABILITÄT FÜR DAS VORLIEGENDE PROJEKT	48
DEFINITION DER BEGRIFFE REGIONEN- UND SEKTORÜBERGREIFEND	57
KONZEPTUELLER ANSATZ EINER INTEGRIERTEN UND ERWEITERTEN VULNERABILITÄTSMANAGEMENTS	58
GESAMTGESELLSCHAFTLICHE RELEVANZ DER DREI MODULE	64
4. <u>DAS ENERGIESYSTEM: STRUKTUR UND JÜNGSTE ENTWICKLUNGEN</u>	73
PRIMÄRENERGIEVERBRAUCH UND IMPORTANTEIL DER ENERGIETRÄGER	73
ENDENERGIEVERBRAUCH NACH ENERGIETRÄGERN, VERBRAUCHSBEREICHEN UND ANWENDUNGSZWECKEN	75
ENERGIEPREISE UND -KOSTEN.....	80
ENERGIE UND UMWELT	81
5. <u>AUSWIRKUNGEN MÖGLICHER KLIMAÄNDERUNGEN AUF DIE STROMPRODUKTION IN DEUTSCHLAND</u>	82

ÜBERSICHT.....	82
STROMPRODUKTION DURCH THERMISCHE (KALORISCHE) KRAFTWERKE.....	83
EINFÜHRUNG	83
DATEN UND METHODEN	88
ATOMKRAFTWERKE	91
BESCHREIBUNG DES MODELLANSATZES	91
ERGEBNISSE FÜR DIE AKW	96
GESAMTER THERMISCHER KRAFTWERKSPARK	99
METHODE.....	99
ERGEBNISSE DES VEREINFACHTEN MODELLANSATZES FÜR DIE THERMISCHEN KRAFTWERKE	104
ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION	116
STROMPRODUKTION DURCH WASSERKRAFTANLAGEN	119
EINFÜHRUNG	119
DATEN UND METHODEN	121
ERGEBNISSE.....	126
ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION	133
STROMPRODUKTION DURCH WINDKRAFTANLAGEN.....	136
EINFÜHRUNG	136
DATEN UND METHODEN	139
ERGEBNISSE.....	143
ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION	151
SIMULATION DER ÄNDERUNG DES SOLARSTROMPOTENZIALS	153
<u>6. AUSWIRKUNGEN MÖGLICHER KLIMAÄNDERUNGEN AUF</u>	
<u>HOLZENERGIEPOTENZIAL UND WASSERHAUSHALT</u>	<u>155</u>
ENTWICKLUNG UND STRUKTUR DER HOLZWIRTSCHAFT IN DEUTSCHLAND	155
SCENARIO 1 - WALD: NETTOPRIMÄRPRODUKTION, ENERGIEPOTENZIALE UND	
VERSICKERUNGSRATEN UNTER KLIMAWANDEL	158
STAND DES WISSENS, DATEN UND METHODEN	159

ERGEBNISSE.....	163
SZENARIO 2 - ENERGIEHOLZPLANTAGEN: NETTOPRIMÄRPRODUKTION, ENERGIEPOTENZIALE UND VERSICKERUNGSRATEN UNTER KLIMAWANDEL	172
ENERGIEHOLZPLANTAGEN (KURZUMTRIEBSPLANTAGEN)	172
STAND DES WISSENS, DATEN UND METHODEN	173
ERGEBNISSE.....	175
<u>7. ZUR MACHBARKEIT ERWEITERTER SEKTOREN UND REGIONEN ÜBERGREIFENDER VULNERABILITÄTSABSCHÄTZUNGEN FÜR DEUTSCHLAND: SYNTHESE UND AUSBLICK</u>	186
<u>8. LITERATUR</u>	202
<u>9. ANHANG.....</u>	223
A. SZENARIEN MIT STAR (STATISTISCHES REGIONALISIERUNGSMODELL)	223
METHODIK.....	223
ERSTELLUNG DER STARII-SZENARIEN IN 0.5°-STUFEN FÜR DEUTSCHLAND.....	226
B. SZENARIEN MIT CCLM	228
C. DAS ÖKO-HYDROLOGISCHE MODELL SWIM.....	229
DATEN ZUR KALIBRIERUNG UND VALIDIERUNG DER MODELLE	229
METHODIK.....	230
D. TEST DES KOMPLEXEN MODELLS FÜR AUSGEWÄHLTE AKW	233
AUSGEWÄHLTE ERGEBNISSE FÜR DIE AKW	236
E. DAS WALDWACHSTUMSMODELL 4C	238
WASSER- UND NÄHRSTOFFBILANZIERUNG	239
ASSIMILATION UND ALLOKATION.....	241
PHÄNOLOGIE	242
MORTALITÄT	242
REGENERATION UND MANAGEMENT	243
ZEITREGIME.....	244

PARAMETER, INITIALISIERUNG UND TRIEBKRÄFTE	244
VALIDIERUNG UND ANWENDUNG	245
F. ENERGIESZENARIOEN	247

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1: Komponenten der Vulnerabilität für verschiedene Sektoren und Skalen	19
Abb. 2: Visualisierung des IPCC-Vulnerabilitätskonzepts	36
Abb. 3: Konzeptuelle Grundlagen: Gesellschaft, Teilsysteme, Treiber und Wirkungspfade.....	59
Abb. 4: Struktur des Primärenergieverbrauchs in Deutschland 2011.....	73
Abb. 5: Beitrag erneuerbarer Energiequellen zum Primärenergieverbrauch 1990-2009	74
Abb. 6: Energieflussbild Deutschland 2008	77
Abb. 7: Endenergieverbrauch in Deutschland nach Energieträgern 1990-2009	79
Abb. 8: Auslastung der AKW für die stratifizierten Klimaszenarien.....	97
Abb. 9: Jahresproduktion der AKW für die stratifizierten Klimaszenarien	99
Abb. 10: Produktionsreduktion bei Kraftwerken mit Durchlaufkühlung	101
Abb. 11: Jahresauslastung des AKW Grohnde, simuliert mit dem komplexen Modell	101
Abb. 12: Jahresauslastung des AKW Grohnde, simuliert mit dem vereinfachten Modell.....	103
Abb. 13: Lage der Wassertemperaturpegel und Kraftwerke mit Durchlaufkühlung und Kühlturm.....	108
Abb. 14: Mittlere Jahresauslastung thermischer Kraftwerke mit Durchlaufkühlung	110
Abb. 15: Mittlere Jahresauslastung thermischer Kraftwerke mit Durchlaufkühlung für 2055.	112
Abb. 16: Mittlere Jahresauslastung thermischer Kraftwerke mit Kreislaufkühlung für 2010 und 2055.....	113
Abb. 17: Mittlere Jahresauslastung thermischer Kraftwerke mit Kreislaufkühlung für 2055.	115
Abb. 18: Änderung der mittleren Jahresauslastung thermischer Kraftwerke bis 2055 gegenüber 2010 (2K-Szenario)	75
Abb. 19: Lage, Typ und installierte Kapazität der Wasserkraftanlagen in Deutschland.	125
Abb. 20: Prozentuale Änderung des Wasserkraftpotenzials bis 2055 gegenüber 2010 unter Verwendung der Minimum-Funktion.....	128
Abb. 21: Prozentuale Änderung des Wasserkraftpotenzials bis 2055 gegenüber 2010 unter Verwendung der mittleren Funktion.....	129
Abb. 22: Prozentuale Änderung des Wasserkraftpotenzials bis 2055 gegenüber 2010 unter Verwendung der Maximum-Funktion.....	130

Abb. 23: Prozentuale Änderung des Wasserkraftpotenzials bis 2055 gegenüber 2010 unter Verwendung der mittleren Funktion (2k-Szenario)	88
Abb. 24: Räumliche Verteilung der Windkraftnutzungseignung im Zeitraum 1981-2000.....	138
Abb. 25: Installierte Windkraftleistung je Bundesland	139
Abb. 26: Änderung der Lufttemperatur für Deutschland in den CCLM-Läufen	141
Abb. 27: Mittlere monatliche Auslastung der Windkraftanlagen für die beiden CCLM-Läufe.....	145
Abb. 28: Mittlere monatliche Produktion der Windkraftanlagen für die beiden CCLM-Läufe	145
Abb. 29: Differenz zwischen der Auslastung des Periodenmittels 2011-2040 und der Mittelwerte der Kontrollläufe 1970-2000	148
Abb. 30: Differenz zwischen der Auslastung des Periodenmittels 2041-2070 und der Mittelwerte der Kontrollläufe 1970-2000	149
Abb. 31: Differenz zwischen der Auslastung des Periodenmittels 2071-2100 und der Mittelwerte der Kontrollläufe 1970-2000	150
Abb. 32: Potenzial von Windkraftanlagen, Änderung 2055 gegenüber 2010 (2 K-Szenario)	101
Abb. 33: Veränderung der NPP ohne CO ₂ -Effekt als Weiser für die Produktivität für die Waldbestände	166
Abb. 34: Veränderung der NPP mit CO ₂ -Effekt als Weiser für die Produktivität für die Waldbestände	1662
Abb. 35: Veränderung der Versickerung unter Waldbeständen.....	171
Abb. 36: Jährliche Hektarerträge für die vier Klimaszenarien für den Zeitraum 2041-2060 jeweils ohne und mit CO ₂ -Effekt.	175
Abb. 37: Relative Änderungen der mittleren jährlichen Versickerungsraten für den Zeitraum 2041-2060 jeweils ohne und mit CO ₂ -Effekt.	177
Abb. 38: Lage der KUP-Flächen bei Nutzung von 1 Million Hektar Ackerfläche (graue Flächen).....	182
Abb. 39: Relative Änderungen der mittleren jährlichen Versickerungsraten	184
Abb. 40: Simulierte Änderung der Jahresproduktion der betrachteten Teile der drei Stromsektoren bis 2055 und Gesamtsumme für alle Szenarien.	191
Abb. 41: Hochgerechnete Änderungen der Jahresproduktion in den drei Stromsektoren bis 2055 und Gesamtsumme für alle Szenarien.	192

Abb. 42: Relative Änderungen der mittleren jährlichen Versickerungsraten.	195
Abb. A.1: Entwicklung von Szenarien im Statistischen Regionalisierungsmodell STAR	131
Abb. D.1: Veröffentlichter und simulierter Jahresgang der elektrischen Leistung des AKW Krümmel in 2003.	233
Abb. D.2: Veröffentlichter und simulierter Jahresgang der elektrischen Leistung des AKW Unterweser in 2003.	235
Abb. D.3: Veröffentlichter und simulierter Jahresgang der elektrischen Leistung des AKW Philippsburg 1 in 2003.	235
Abb. D.4: Jahresauslastung des AKW Unterweser für die stratifizierte Klimaszenarien	236
Abb. E. 1: Modellschema 4C	161
Abb. F.1: Primärenergieverbrauch in Deutschland 1990-2050	167
Abb. F.2: Anteil der Erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch in Deutschland 1990-2050	168
Abb. F.3: Importquote des Primärenergieverbrauch in Deutschland 1990-2050.....	169

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 1: Kühlwasserbedarf thermischer Kraftwerke im Elbegebiet unterteilt nach Kühlsystemen.....	88
Tabelle 2: Mittlere Jahresproduktion, mittlere Jahresauslastung und mittlere jährliche Fehlzeiten der thermischen Kraftwerke für 2010 und – unter drei verschiedenen Klimaszenarien – für 2055	106
Tabelle 3: Mittlere Jahresauslastung und Jahresproduktion von Wasserkraftanlagen in Deutschland unter Klimawandel	131
Tabelle 4: Mittlere Jahresauslastung und Jahresproduktion von Windkraftanlagen in Deutschland unter Klimawandel.	143
Tabelle 5: Beispiel für die Verringerung der Stromausbeute in Abhängigkeit von der Solarzellen-Temperatur	154

Tabelle 6: Mittlere Biomasseerträge und deren relative Änderung auf den Waldflächen nach Bundesländern jeweils ohne und mit CO ₂ -Effekt	164
Tabelle 7: Mittlere Versickerungsraten und deren relative Änderung (gegenüber dem Basiszeitraum) auf den Waldflächen nach Bundesländern, simuliert für den Basiszeitraum (1977-2006) und die stratifizierte Klimaszenarien (2031-2060), jeweils ohne und mit CO ₂ -Effekt.....	169
Tabelle 8: Biomasseerträge, Energiepotenziale, Versickerungsraten und relative Änderungen von Erträgen und Versickerungsraten	178
Tabelle 9: Installierte Leistung (Brutto) und Bruttostromerzeugung im öffentlichen Stromnetz im Jahr 2010.....	189
Tabelle 10: Simulierte Änderung der Jahresproduktion der betrachteten Teile der drei Stromsektoren bis 2055 und Gesamtsumme für alle Szenarien.	191
Tabelle 11: Hochgerechnete Änderungen der Jahresproduktion in den drei Stromsektoren bis 2055 und Gesamtsumme für alle Szenarien.....	192

Abkürzungsverzeichnis

AKW	Atomkraftwerk
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BMU	Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMELV	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz
BMBF	Bundesministeriums für Bildung und Forschung
BÜK	Bodenübersichtskarte
CCLM	COSMO-ClimateLimited-areaModelling
CCS	Carbon Dioxide Capture and Storage
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EWI	Energiewirtschaftliches Institut an der Universität zu Köln
GWS	Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung.
IFEU	Institut für Energie- und Umweltforschung
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISDR	International Strategy for Disaster Reduction
IWF	Internationaler Währungsfond
KUP	Kurzumtriebsplantagen
NPP	Nettoprimärproduktion
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development
PEV	Primärenergieverbrauch
STAR	STATistical Regional climate model
StMWIVT	Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie
SWIM	Soil and Water Integrated Model
UBA	Umweltbundesamt
VGB	Vereinigung der Großkesselbesitzer
WI	Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie

4C

FORESEE - FORESt Ecosystems in a Changing Environment.

1. Einleitung und Fragestellung

Für Deutschland gibt es mittlerweile mehr als hundert Studien, die sich mit den Folgen des Klimawandels, mit der Verwundbarkeit gegenüber dem Klimawandel und mit Anpassungsnotwendigkeiten, -möglichkeiten und -kosten befassen (Fleischhauer u. a. 2012). Dennoch fällt es schwer, aus der Fülle des Materials eine umfassende Bewertung der Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel vorzunehmen. Dies liegt zum einen daran, dass sich fast alle verfügbaren Studien auf einzelne Regionen oder Sektoren konzentrieren, und zum anderen daran, dass für die Bewertung der Vulnerabilität gegenüber Klimawandel keine einheitlichen Methoden existieren, so dass die Einzelergebnisse nur bedingt oder gar nicht integrierbar sind.

Dazu kommt, dass eine Reihe von nicht klimabedingten Entwicklungen vor allem in den letzten Jahren, einige davon im Ausmaß globaler oder zumindest großräumiger Krisen, in Politik und Öffentlichkeit eine ähnlich hohe, wenn nicht höhere Aufmerksamkeit als die Folgen des Klimawandels erfahren haben. Beispiele sind die Finanzkrise, die Schuldenkrise der EU-Länder, Preissteigerungen an wichtigen Rohstoffmärkten, der durch einen Tsunami ausgelöste GAU im japanischen

Kernkraftwerk Fukushima, hohe Jugendarbeitslosigkeit in vielen Regionen der EU, Alterung und teilweiser Rückgang der Bevölkerung in den Industriestaaten.

Diese Entwicklungen haben unter anderem dazu geführt, dass die durch den Klimawandel zu erwartenden Zukunftsrisiken zunehmend im Kontext anderer risikoreicher Entwicklungen gesehen werden. In welchem Verhältnis steht, so lautet eine der Fragen, der Klimawandel zu anderen nicht klimabedingten systemischen Risiken? Wie können ihrer Natur nach so verschiedene Risiken, wie zum Beispiel Finanzmarktrisiken, Klimarisiken, Risiken der Rohstoffversorgungen, Risiken, die durch strukturelle Jugendarbeitslosigkeit bei gleichzeitiger Überalterung der Bevölkerung entstehen, überhaupt vergleichend bewertet werden? Auf welcher Basis sollen politische Entscheidungsträger Prioritäten setzen und die begrenzten Ressourcen allozieren?

Dies sind Fragen, die in grundsätzlicher Weise die Bedingungen der Möglichkeit einer nachhaltigen Gesellschaft ansprechen. In der Forschung ist die Behandlung beider Themen, also der integrierten, sektor- und regionenübergreifenden Darstellung von Klimarisiken und der vergleichenden Darstellung klimainduzierter Risiken mit anderen risikoreichen gesellschaftlich relevanten Makrodynamiken, weitgehend Neuland.

Die Schwierigkeiten einer wissenschaftlichen Analyse derart umfangreicher und komplexer Fragen liegen auf der Hand. Gleichzeitig steigt aber die Dringlichkeit, mit der solche Analysen benötigt werden, und zwar aus mehreren Gründen. Die Euro-Schuldenkrise und die damit in Zusammenhang stehende Konsolidierung öffentlicher Haushalte zwingen diese zu einer stärkeren Prioritätensetzung auf der Ausgabenseite. Diese Prioritätensetzung wird durch das Auftreten multipler Krisen und Gefährdungslagen zusätzlich erschwert. Die bisher erfolglos gebliebenen Bemühungen, ein international verbindliches und wirksames Kyoto-Folgeabkommen zum Klimaschutz abzuschließen, haben zu vermehrten Anstrengungen im Bereich der Klimaanpassung geführt, was wiederum den Bedarf nach integrierten Bewertungen von Klimafolgen erhöht.

Der vorliegende Bericht ist das Ergebnis einer Pilotstudie, mit der das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) vom Umweltbundesamt (UBA) beauftragt wurde. Die Ziele dieser Studie laut Leistungsbeschreibung waren:

1. die Bestandsaufnahme und Weiterentwicklung von Kriterien, Methoden und Instrumenten für eine integrierte Bewertung von regional differenzierten Klimafolgen,

2. die Untersuchung von Klimaänderungen und Klimafolgen als Querschnittsphänomene in verschiedenen Handlungsfeldern und deren Wirkung – im Vergleich zur Wirkung nicht-klimatischer Einflussfaktoren – auf Vulnerabilität,
3. die Entwicklung eines Ansatzes, der eine räumlich und sektoral übergreifende Abschätzung der Vulnerabilität Deutschlands ermöglicht.

Der Schwerpunkt sollte dabei nicht auf umfassende Bewertung, sondern auf die Entwicklung von neuen Konzepten und Methoden und deren exemplarische Umsetzung gelegt werden, daher firmiert diese Studie auch unter dem Namen „Vulnerabilität - Methodenstudie“. Das Forschungsdesign ist somit stärker grundlagenorientiert als dies bei vergleichbaren Projekten üblicherweise der Fall ist. Angesichts der Komplexität des Sachverhaltes und der spärlichen und über unterschiedlichste Disziplinen verstreuten Wissensbasis scheint diese Vorgangsweise nicht nur gerechtfertigt, sondern notwendig.

Trotzdem bleiben die Fragestellungen zunächst überkomplex und zu unpräzise, um in einem Einzelprojekt sinnvoll bearbeitet werden zu können. Die Reduktion von Komplexität und eine Eingrenzung der empirisch zu untersuchenden Sachverhalte waren daher die ersten Schritte in der Bearbeitung des Projektes. In der ersten

Projektphase wurden, in enger Absprache mit dem Auftraggeber, die in der Leistungsbeschreibung genannten Ziele folgendermaßen eingeschränkt und konkretisiert:

1. Die Bestandsaufnahme konzentriert sich auf eine kritische Diskussion wichtiger Konzepte und Methoden aus unterschiedlichen Disziplinen (wie Vulnerabilität, Resilienz oder Risiko), die eine integrierte Bewertung unterschiedlicher Schadensrisiken vornehmen.
2. Darauf aufbauend wird ein eigener konzeptueller Ansatz entwickelt, der
 - a. die Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel sektoren- und regionenübergreifend vergleichbar macht (integrierte Vulnerabilitätsbewertung);
 - b. die Vulnerabilität Deutschlands gegenüber den Folgen des Klimawandels mit der Vulnerabilität gegenüber anderen nicht-klimabedingten Dynamiken vergleichbar macht (erweiterte Vulnerabilitätsbewertung).
3. Der Ansatz soll exemplarisch an einem Beispiel erprobt werden. Als Beispiel wurde der Systemkomplex Energie-Wasser-Biomasse ausgewählt.

In einem Folgeprojekt, das zurzeit am PIK bearbeitet wird, soll der Ansatz für weitere Beispiele – ausgewählt wurden Außenhandel und soziale Ungleichheit – umgesetzt werden.

Trotz seiner Grundlagenorientierung hat dieses Projekt das erklärte Ziel, zur Wissensfundierung relevanter nationaler Strategien der Bundesregierung beizutragen. Das ist zunächst die Deutsche Anpassungsstrategie (DAS), die seit 2008 die notwendige Anpassung an den Klimawandel bundesweit strukturiert. Die DAS hat einen Rahmen für einen mittelfristigen nationalen Anpassungsprozess in Kooperation mit den Ländern geschaffen, der 2011 im Aktionsplan Anpassung weiter konkretisiert wurde. Einer der Schwerpunkte des Aktionsplans ist der Ausbau der Wissensgrundlagen und eine der dort beschriebenen Kernfragen greifen wir in diesem Projekt direkt auf. Konkret wollen wir zu den Wissensgrundlagen der DAS, neben den entwickelten Methoden einer integrierten und erweiterten Vulnerabilitätsanalyse, durch Empfehlungen zur Priorisierung von konkreten Forschungsfragen insbesondere im Bereich Anpassung und durch eine sektorübergreifende, vergleichbare Quantifizierung erwartbarer Beeinträchtigungen ausgewählter Komponenten des Gesellschaftssystems durch Klimawandel und andere Treiber beitragen.

Mit dem im Juni 2011 beschlossenen Gesetzespaket zur Energiewende hat die Bundesregierung ambitionierte Ziele zum Umbau des gesamten Energiesystems vorgelegt, mit dem primären Ziel des Klimaschutzes. Damit ist in der Projektlaufzeit für eines der Kernsysteme, das in diesem Projekt untersucht wurde, nämlich das Energiesystem, eine neue Makrodynamik entstanden, auf die wir bei der Diskussion der Ergebnisse eingehen werden.

Der Bericht ist folgendermaßen gegliedert:

Kapitel 2 enthält eine literaturbasierte Diskussion von Konzepten und Methoden, die in verschiedenen Disziplinen angewandt werden, um eine große Bandbreite von Gefährdungslagen integriert und auf makroskaliger Ebene zu analysieren. Das Kapitel diskutiert auch die Unterschiede in den Begriffsdefinitionen und schlägt eine den Aufgaben des Projektes angemessene Terminologie vor.

Kapitel 3 beschreibt den im Projekt entwickelten konzeptuellen und methodischen Ansatz und erläutert die wichtigsten Annahmen und Analyseschritte, die das Projekt strukturieren. Außerdem stellt es die gesamtgesellschaftliche Relevanz der ausgewählten empirischen Beispiele dar.

Kapitel 4 gibt einen Überblick über die Struktur und Bedeutung des Energiesystems.

Kapitel 5 beschreibt die modellbasierten Simulationen von Kapazitätsengpässen in der inländischen Stromproduktion unter Klimawandel.

Kapitel 6 beschreibt die modellbasierten Simulationen und Szenarien zur Entwicklung der Holzwirtschaft unter Klimawandel.

Kapitel 7 enthält eine erste Synthese und einen Ausblick auf weiterführende Forschungsfragen.

2. Konzeptuelle und terminologische Grundlagen: Vulnerabilität, Resilienz, Risiko

Dieses Kapitel stellt einen Literaturreview dar, der eine Einführung in bisherige Forschungsansätze gibt und dabei auch konzeptuelle Probleme aufzeigt. Die Diskussion konzentriert sich insbesondere auf die Frage, inwieweit die verschiedenen Ansätze für die gegenständlichen Forschungsfragen anwendbar sind, und begründet die vorgenommenen konzeptuellen Entscheidungen.

Hintergrund: zum Begriff der Vulnerabilität

Vulnerabilität, vom lateinischen *vulnus* (Verletzung, Wunde), bedeutet soviel wie Verwundbarkeit. Als Konzept wird es in den unterschiedlichsten Disziplinen und Forschungstraditionen verwendet.

So wird z.B. in der klinischen Psychologie Vulnerabilität folgendermaßen bestimmt: Für ein definiertes System (in diesem Fall einzelne Menschen oder Gruppen von Menschen) werden zunächst unerwünschte Systemzustände (hier Psychosen) definiert. Mit Vulnerabilität ist eine messbare Eigenschaft von Menschen oder Gruppen von Menschen gemeint, die sie anfällig dafür macht, Psychosen auszubilden. Der Schadenseintritt jedoch ist nicht allein durch die Vulnerabilität

bestimmt, sondern es wird davon ausgegangen, dass Psychosen durch die Kombination von Stress (der in der Umwelt der Person verortet wird) und Vulnerabilität (die als eine Eigenschaft der Person begriffen wird) ausgelöst werden (Vulnerabilitäts-Stress-Modell oder auch Diathese-Stress-Modell). Da sowohl „Vulnerabilität“ als auch „Stress“ allgemeine, abstrakte Begriffe sind, die noch nicht etwas direkt Messbares bezeichnen, kommen weitere Konzepte wie Risiko, Risikofaktoren, Sensibilität, Disposition usw. zur Anwendung, die dann weiter spezifiziert werden, bis man es mit einer empirisch messbaren Größe zu tun hat. Wichtig sind auch noch die Begriffe Resilienz und Anpassungskapazität, deren Abgrenzung zwar unscharf ist, die jedoch beide als Komplementärbegriffe zu Vulnerabilität verstanden werden. Eine Person mit hoher Resilienz hat folglich eine geringe Vulnerabilität und umgekehrt.

Kurz zusammengefasst haben wir hier also eine klare Systemreferenz (einzelne Menschen oder Gruppen von Menschen), ein klares Bild des antizipierten Schadens (Psychose) und ein Erklärungsmodell, das den Schadenseintritt aus einem Zusammenspiel systeminterner Eigenschaften (hohe Vulnerabilität bzw. niedrige Resilienz) und systemexterner Faktoren (Stress) erklärt. Diese Konzeptualisierung allein ist jedoch nicht ausreichend, um Vulnerabilität messbar zu machen. Dazu

bedarf es weiterer Spezifizierungen und empirischer Methoden wie zum Beispiel dem Diathese-Stress-Test.

Für das vorliegende Forschungsvorhaben, das Vulnerabilität durch klimatische und nicht-klimatische (etwa sozio-ökonomische) Gefährdungen berücksichtigt, betrachten wir im Folgenden die verschiedenen Ansätze zur Risiko- und Vulnerabilitätsabschätzung in der Klimafolgen- und Global-Change-Forschung sowie der Disaster-Risk-Forschung und vergleichen diese mit dem Ansatz der Resilienz in der Umweltforschung und des Risikos in der soziologischen Forschung.

Vulnerabilität in der Global-Change- und Klimafolgenforschung

Obwohl Vulnerabilität bereits seit langer Zeit einer der Zentralbegriffe der Global-Change- und Klimafolgenforschung ist, gibt es nach wie vor verschiedene Schulen, Interpretationen, Ansätze und Definitionen von Vulnerabilität (Brooks, Adger und Kelly 2005; O'Brien, Sygna und Haugen 2004). Ähnlich wie in der klinischen Psychologie wird Vulnerabilität in der Klimafolgenforschung unter Zuhilfenahme zahlreicher Zusatzkonzepte zu präzisieren versucht wie z.B. Resilienz, Anpassung, Anpassungskapazität, Exposition, Sensitivität, externe, interne, soziale,

sozioökonomische, biophysische Faktoren usw., die jedoch meist unscharf definiert sind und höchst unterschiedlich verwendet werden (Füssel 2007).

In der neueren Forschung ist die am häufigsten verwendete Konzeptualisierung von Vulnerabilität diejenige nach McCarthy und Koautoren (2001), die Vulnerabilität durch die drei Faktoren Exposition, Sensitivität und Anpassungskapazität bestimmt sieht. Sie wird auch im vierten Sachstandsbericht des IPCC übernommen (IPCC 2007, 883): "Vulnerability is the degree to which a system is susceptible to, or unable to cope with, adverse effects of climate change, including climate variability and extremes. Vulnerability is a function of the character, magnitude, and rate of climate variation to which a system is exposed, its sensitivity, and its adaptive capacity".

Vulnerabilität stellt demgemäß eine Funktion aus Exposition (physische Betroffenheit), Sensitivität (Anfälligkeit) und Anpassungskapazität dar. Die Verknüpfung zwischen den Elementen ist nicht spezifiziert.

(1) Unter **Exposition** werden Art und Grad verstanden, inwieweit ein System signifikanten klimatischen Veränderungen ausgesetzt ist (Adger 2006). Damit umfasst Exposition einerseits die Beschaffenheit der klimatischen Veränderung, andererseits die potenziell betroffenen Bestandteile des Systems. Demgemäß

bezeichnen Turner und Koautoren (2003) Exposition als Interaktion zwischen Systemcharakteristika und Stressorkomponenten. Zwei Eigenschaften ergeben sich aus diesem Verständnis von Exposition in der Klimafolgen- und Global-Change-Forschung: erstens wird angenommen, dass der Stressor oder Stressfaktor von außerhalb des Systems kommt (Kasperson u. a. 2005); zweitens erscheint Exposition als physische, räumliche Veränderung; der Stressfaktor ist damit relativ spezifisch definiert – im Vergleich zum „Hazard“ (Gefährdung) in der Disaster-Risk-Forschung, die später behandelt wird.

(2) **Sensitivität** ergibt sich aus den sozioökonomischen, politischen, technischen und ökologischen Merkmalen eines Systems, die das Ausmaß der Auswirkungen auf das System determinieren. Mit Sensitivität wird also beschrieben, wie ein System auf einen Reiz (Exposition) reagiert. Die Sensitivität wird in vielen Studien durch sogenannte „Vulnerabilitätsindikatoren“ operationalisiert (Brooks, Adger, und Kelly 2005). Dabei werden sehr verschiedene Merkmale auf unterschiedlichen Ebenen berücksichtigt. So könnte sich beispielsweise die Anfälligkeit einer Region gegenüber dem Klimawandel aus ökologischen Merkmalen (z.B. Bodenarten und Fruchtarten), sozialen Merkmalen wie der Sozialstruktur (z.B. Bildungsniveau oder auch die Verteilung sozialen Kapitals), infrastrukturellen Merkmalen wie der Lage des

Gebäudebestands (z.B. Ufernähe) und Eigenschaften ihrer politisch-ökonomischen Ordnung (z.B. Grad der Tertiarisierung) zusammensetzen.

Durch diese Konzeptualisierung von Sensitivität kommt nicht-klimatischen Einflussfaktoren eine zentrale Stellung bei der Erfassung der Vulnerabilität zu: „An important element in second-generation vulnerability assessments is the explicit consideration of relevant non-climatic drivers (e.g., demographic, economic, sociopolitical, technological, and biophysical drivers). These drivers affect relevant non-climatic factors (e.g., the degree of economic diversification, the level of education, and the strength of social networks) that, in turn, determine the sensitivity of a system or community to climate change” (Füssel und Klein 2006, 320).

(3) **Anpassungskapazität** bezeichnet in der Definition des IPCC die Fähigkeit eines Systems, geplante Anpassungsmaßnahmen durchzuführen und die Auswirkungen des Klimawandels zu begrenzen, indem es potenzielle Schäden abschwächt, sich Veränderungen nutzbar macht oder die Konsequenzen bewältigt. Wie die Sensitivität stellt sich auch die Anpassungskapazität durch ein umfangreiches Set von Merkmalen des Systems selbst sowie dessen Umwelt dar: Füssel unterscheidet exogene und endogene Merkmale, wobei je nach Systembezug exogene Faktoren beispielsweise den nationalen, institutionellen Kontext umfassen, während mit

endogenen Faktoren die für die Anpassungskapazität relevanten Merkmale des Systems, z.B. seiner Bevölkerung (z.B. Bildungsniveau, verfügbare Ressourcen) bezeichnet werden (Füssel 2007).

Die Ähnlichkeit zu Merkmalen der Sensitivität ist offensichtlich. Tatsächlich ist es konzeptionell problematisch, dass sich die Merkmale von Anpassungskapazität und Sensitivität schwer abgrenzen lassen. So werten beispielsweise O'Brien und Koautoren (2004) die Ausprägung des sozialen Kapitals in der Bevölkerung als Anpassungskapazität, während dieser Indikator in anderen Studien für die Sensitivität des betroffenen Systems steht. Auch geplante Anpassungsmaßnahmen können je nach Zeithorizont der Sensitivität oder Anpassungskapazität eines Systems zugerechnet werden. Der Unterschied zwischen beiden Komponenten wird sehr verschieden interpretiert: für Brooks, Adger und Kelly (2005) wird die Sensitivität durch Merkmale, die für die Abwehr kurzfristiger Gefährdungen konstitutiv sind, definiert (z.B. Gesundheitszustand), während sich Charakteristika der Anpassungskapazität auf den längerfristigen Prozess der Anpassung (z.B. Governance und Bildung) beziehen. Dieselben Autoren berichten allerdings, dass es den von ihnen befragten Experten schwer fiel, Indikatoren konsistent den Faktoren Sensitivität oder Anpassungskapazität zuzuordnen.

Turner und Koautoren (2003) benutzen in ihrer Vulnerabilitätsdefinition statt der Anpassungskapazität das Konzept der Resilienz: Resilienz stellt die Fähigkeit eines Systems dar, zu einem gegebenen Referenzzustand nach einer Störung zurückzukehren und dabei bestimmte Strukturen und Funktionen beizubehalten. Auch hier wird Vulnerabilität als die Summe der verbleibenden Konsequenzen, denen nicht durch potenzielle Anpassung vorgebeugt werden kann (vgl. Villagrán de León 2006), verstanden. Diese Auffassung stellt ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zu anderen Vorstellungen von Vulnerabilität dar. O'Brien und Koautoren (2004) und Füssel (2010) bezeichnen diese Form von Vulnerabilität als „end-point vulnerability“ im Gegensatz zur „starting-point vulnerability“, wie Vulnerabilität vor allem in der Disaster-Risk-Forschung verstanden wird. Generell liegt einer solchen Konzeptualisierung von Vulnerabilität das Ziel zugrunde, die Vulnerabilität von Regionen oder Sektoren gegenüber dem Klimawandel und anderen Stressfaktoren (grundsätzlich lassen sich kontinuierlich steigender Druck und abrupte Störungen unterscheiden) realistisch abzuschätzen. Durch die Komponenten der Sensitivität und Anpassungskapazität bekommen die Fähigkeiten einer Gesellschaft, auf den Klimawandel zu reagieren, einen zentralen Stellenwert (Ionescu u. a. 2009). Füssel und Klein (2006) fassen dieses Forschungsverständnis im Bild des „realistischen Bauern“ – zwischen den Extremen

des „dummen Bauern“ (bar jeglicher Anpassungskapazität) und des „hellseherischen Bauern“ (verfügt über alle Mittel um sich anzupassen) – zusammen.

Disaster-Risk-Forschung

Auch in der Disaster-Risk-Forschung wird Vulnerabilität sehr unterschiedlich konzeptualisiert und verwendet. Generell nimmt Vulnerabilität dort aber die Stellung eines Bestandteils von Risiko ein.

Der Risk-Hazard-Ansatz ist charakteristisch für die technische Analyse im Bereich des Disaster- und Risiko-Managements beispielweise in Bezug auf Überflutung, Dürre oder Chemikalien. Die Internationale Strategie zur Reduzierung von Katastrophen (*International Strategy for Disaster Reduction, ISDR*) definiert Vulnerabilität als „set of conditions and processes determined by physical, social, economic, and environmental factors, which increase the susceptibility of a community to the impact of hazards“ (ISDR 2004, 16).

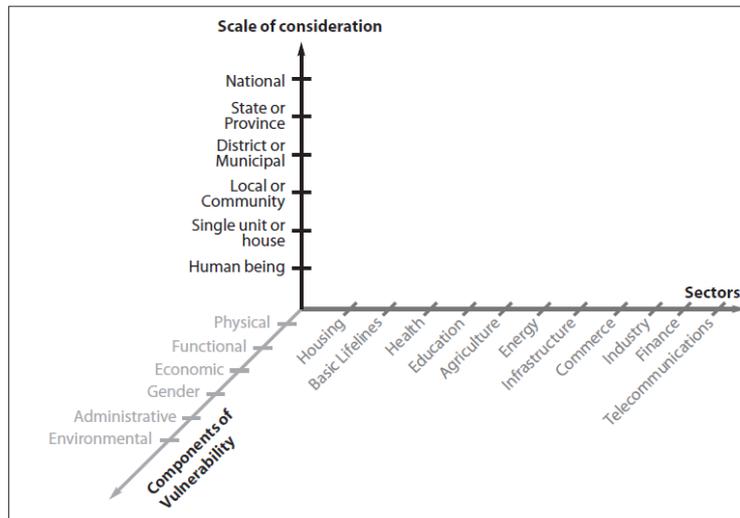
Das Risiko wird durch die Interaktion zweier Faktoren bestimmt: Gefahr („Hazard“) – die Wahrscheinlichkeit und Größe der (natürlichen oder menschlich hervorgerufenen) Gefährdung – und vorliegende Vulnerabilität (ISDR 2004;

Villagrán de León 2006). Damit bezeichnet Vulnerabilität also die interne Dimension eines Risikos, während Hazard die Gefährdung, also die externe Dimension darstellt (Watts und Bohle 1993).

Dieser Vulnerabilitätsbegriff ist dem Element der Sensitivität in der Global-Change- und Klimafolgenforschung sehr ähnlich: er umfasst die sozioökonomischen und ökologischen Charakteristika eines Systems, die den Grad der Auswirkungen bestimmen (Costa und Kropp 2012). In der Disaster-Risk-Forschung wird Vulnerabilität allerdings eher als eine generelle Verfassung oder Disposition des Systems gesehen, die unabhängig von der Gefährdung existiert (Kelly und Adger 2000; Brooks, Adger, und Kelly 2005): um die Vulnerabilität einer Gemeinschaft oder Gruppe einzuschätzen muss nicht das genaue Ausmaß der potenziellen Belastung oder der Anpassungskapazität dargestellt werden.

Generell sind sowohl Vulnerabilität als auch Sensitivität Konzepte, die eine Reihe von Komponenten umfassen, die nicht einheitlich spezifiziert sind. Villagrán de León (2006) schlägt zum Beispiel vor, die Vulnerabilität jedes Sektors durch sechs Komponenten zu differenzieren (Abbildung 1).

Abbildung 2: Komponenten der Vulnerabilität für verschiedene Sektoren und Skalen nach Villagrán de León (2006, 22).



Auch in der Disaster-Risk-Forschung wird teilweise die Fähigkeit, mit Gefährdungen zurechtzukommen, in der Risikobewertung mitberücksichtigt: „coping capacity“ (Bewältigungskapazität) bezeichnet die Fähigkeit von Menschen, während oder nach einem Disaster negative Konsequenzen bewältigen zu können (Scheuer, Haase und Meyer 2011). Der konzeptuelle Unterschied zwischen Bewältigungskapazität und Anpassungskapazität ist eher graduell – erstere bezieht sich eher auf kurzfristige, vorläufige Maßnahmen, während letztere eher für die langfristige, nachhaltige Ausrichtung gegenüber den negativen Konsequenzen steht (Smit und Wandel 2006).

Resilienz

Wie die Vulnerabilitätsforschung befasst sich die Resilienzforschung mit Reaktionen von Systemen auf Störungen und Belastungen. In der Global-Change-Forschung ist der Resilienzansatz stark naturwissenschaftlich und vor allem durch die Ökologie geprägt (Folke 2006). Anfangs wurden in der Resilienzforschung vor allem biophysikalische Systeme untersucht, während der Vulnerabilitätsbegriff stärker interdisziplinär geprägt ist. Jüngere Arbeiten versuchen allerdings das Konzept der Resilienz auf die Nachhaltigkeit von Interaktionen zwischen gesellschaftlichen und ökologischen Systemen anzuwenden, die dann zusammen als „sozio-ökologische Systeme“ (SES) bezeichnet werden (Nelson, Adger und Brown 2007; Gallopín 2006).

Walker und Koautoren definieren die Resilienz eines Systems folgendermaßen (Walker u. a. 2004, online): “the capacity of a system to absorb disturbance and reorganize while undergoing change so as to still retain essentially the same function, structure, identity, and feedbacks – in other words, stay in the same basin of attraction”. Der Zusatz „basin of attraction“ (Einflussbereich) weist auf das Verständnis der Resilienzforschung von dynamischen Systemzuständen hin: ein System befindet sich in einem bestimmten Einflussbereich, der, um einen

Systemzustand zu erhalten, eine gewisse Flexibilität der Systemfunktionen erlaubt (Walker und Koautoren nehmen als Beispiel die Systemzustände eines Körpers, „lebendig“ und „tot“). Aber ab einem bestimmten Punkt geht das System in einen anderen Einflussbereich und damit Systemzustand über. Resilienz bezeichnet also im Sinne dieses „ökologischen“ Resilienzverständnisses (Holling 1973; Holling 1996) die Fähigkeit des Systems, innerhalb der Grenzen des (Referenz-)Einflussbereichs zu bleiben (Gallopín 2006). Letztlich liegt dem Resilienzkonzept die Vorstellung eines Gleichgewichtssystems zugrunde. Geht ein System nach erfolgter Störung wieder in dasselbe Gleichgewicht zurück, ist es resilient. Ein nicht-resilientes System verlässt bei Störung die Grenzen seines (Referenz-)Einflussbereichs. Es kommt zu einem Phasenübergang und zur Herausbildung eines neuen Gleichgewichts mit fundamental anderen Systemeigenschaften.

Gesellschaft wird aber gemeinhin nicht als Gleichgewichtssystem gesehen. Dies ist einer der Gründe, warum die Anwendung des Resilienzkonzepts auf gesellschaftliche Systeme kritisiert wird (Adger 2000).

Zwischenfazit

Zu den generellen Problemen aller hier vorgestellten Ansätze gehört, dass sich aufgrund der verschiedenen Definitionen, Operationalisierungen und Systembezüge sehr unterschiedliche Forschungsansätze unter dem Begriff „Vulnerabilitätsbewertung“ finden. Vor allem der IPCC-Definition wird oft vorgeworfen, zu komplex und gleichzeitig zu vage zu sein:

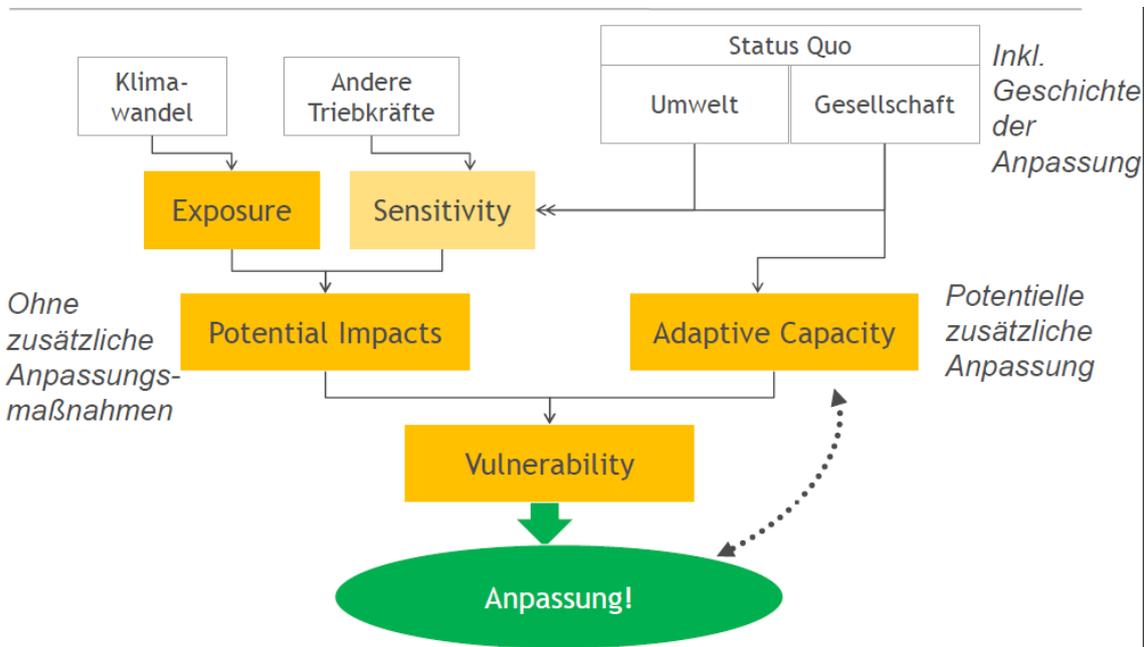
- Die Möglichkeit der zeitlichen Veränderung der drei Komponenten macht die Analyse sehr komplex, worunter die Robustheit der Ergebnisse leiden kann.
- Es werden zu viele Begriffe offen gelassen, um sie operationalisieren zu können, und zudem wird die Beziehung zwischen den Komponenten nicht spezifiziert (Hinkel 2011). So divergiert die Interpretation des IPCC-Konzepts – bezogen auf unterschiedlichste Systeme, Skalen und Forschungsfragen – stark und die Operationalisierungen sind nur lose mit der theoretischen Definition verbunden.
- Die Abgrenzung der einzelnen Komponenten ist unklar. Im Speziellen ist die Bestimmung der Anpassungskapazität problematisch, da ihr Inhalt unklar und quantitativ schwer darstellbar ist (Zebisch 2012). Aufgrund der vagen Definition geschieht die Auswahl der Indikatoren recht willkürlich, und wenn

sie statistisch begründet ist, wie bei Brooks, Adger und Kelly (2005), sind die Indikatoren so stark generalisiert, dass sie der lokalen Situation nicht gerecht werden können. Darüber hinaus stellt sich die Frage nach dem Zeithorizont: soll auch der zukünftige Raum potenzieller Anpassung abgebildet werden?

Zur Frage der zeitlich veränderlichen Bedeutung von Anpassungskapazität macht Zebisch (2012) den in Abbildung 2 dargestellten Vorschlag. Er unterscheidet hier historische Anpassungen, die im Status Quo des Systems implizit berücksichtigt sind und damit automatisch in die Bewertung von Exposition und Sensitivität einfließen, wobei er letztere beiden Komponenten zusammen potenzielle Folgen nennt. Wird ein Maß für die potenzielle zusätzliche Anpassung dazu genommen, spricht er von Vulnerabilität, aus der dann konkrete Anpassungen abgeleitet werden können. Dies ist ein nützlicher Beitrag zur konzeptuellen Diskussion, der insbesondere die verschiedenen zeitlichen und Bedeutungsebenen von Anpassung herausarbeitet. Es bleibt hier allerdings unklar, warum man Vulnerabilität überhaupt noch braucht. Zu den Folgen und zur potenziellen Anpassung kommt man hier auf getrennten analytischen Wegen, und die Kombination von potenziellen Folgen und potenziellen zusätzlichen Anpassungen bleibt auch die alleinige Informationsgrundlage für

Anpassung in diesem Diagramm. Vulnerabilität ist hier eine nicht näher spezifizierte Zusammenfassung von Folgen und Anpassungskapazität, kein eigener analytischer Schritt. Auch die oben angesprochenen Probleme der Operationalisierung von Anpassungskapazität sind damit nicht gelöst. Diese Konzeptualisierung ist also letztlich der Versuch, einige der Probleme der IPCC-Definition zu lösen, ohne diese selbst grundlegend zu verändern.

Abbildung 3: Visualisierung des McCarthy und Koautoren/IPCC-Vulnerabilitätskonzepts nach Zebisch 2012.



Desweiteren ergeben sich bezogen auf eine erweiterte Vulnerabilitätsbewertung Probleme, da die behandelten Ansätze stark auf biophysische Gefährdungsarten ausgerichtet sind: sozioökonomische Charakteristika werden zwar für die Abschätzung der Auswirkungen auf ein System berücksichtigt, aber erstens geschieht dies meist nicht in ausreichendem Umfang (z.B. werden Veränderungen und Dynamiken nicht eingeschlossen) und zweitens werden sozioökonomische Faktoren konzeptionell nicht als Exposition, also eigenständiger Stressor, gefasst. Tatsächlich gibt es fast keine Studien aus der Vulnerabilitäts- oder Disaster-Risk-Forschung, die nicht-klimatische Dynamiken als Treiber in die Analyse

mitaufnehmen. Eine der Ausnahmen ist der von O'Brien und Leichenko propagierte Ansatz der „Doppelten Exposition“ (O'Brien, Leichenko u. a. 2004; Leichenko und O'Brien 2008; Leichenko, O'Brien und Solecki 2010): Die Vulnerabilität einer Region gegenüber dem Klimawandel wird zusammen mit ihrer Vulnerabilität gegenüber der Globalisierung analysiert, vor allem um die Interaktionen zwischen diesen beiden globalen Dynamiken zu verstehen (Leichenko und O'Brien 2008). Nachdem für beide Stressfaktoren Vulnerabilitätsprofile erstellt und übereinandergelegt werden, richten die Autorinnen ihren Fokus auf diejenigen Regionen, Gruppen oder Sektoren, die „zweifach betroffen“ erscheinen. Dadurch können die kombinierten Effekte, die dadurch entstehenden „doppelten Verlierer“, systematisch untersucht werden („outcome double exposure“). Allerdings liegt der Fokus dieses Ansatzes und seiner bisher wenigen Umsetzungen (Hjerpe und Glaas 2012) letztlich auf der Anpassung gegenüber dem Klimawandel, der Identifizierung von veränderten Kontexten, Ressourcenkonflikten und Synergien (z.B. im Sinne einer „green economy“). Es handelt sich nicht – zumindest nicht eindeutig – um eine Vulnerabilitätsbewertung, die verschiedene Dynamiken vergleichend und gleichwertig untersucht und so bei der Priorisierung von politischen Maßnahmen in verschiedenen Feldern hilft. Die ökonomischen Stressfaktoren erscheinen doch eher als Kontext der Auswirkungen des Klimawandels. Außerdem kann man den

bisherigen Forschungen zur doppelten Exposition wohl vorwerfen, dass sie die Globalisierung sehr vereinfacht durch wenige Indikatoren und einen ungewichteten Index fassen (O'Brien, Leichenko u. a. 2004; Hjerpe und Glaas 2012). Vielversprechend ist allerdings, dass O'Brien und Leichenko die sozioökonomischen Faktoren in der Vulnerabilitätsbewertung dynamisch konzeptualisieren; gleichzeitig sieht man aber, wie schwer es ihnen in ihrem quantitativen Fallbeispiel fällt, Szenarien für die mögliche Entwicklung der Anpassungskapazität einzubeziehen – schließlich nehmen sie in ihrer Analyse doch nur Indikatoren für den Stand von 1991 auf (O'Brien, Leichenko u. a. 2004).

Diese Arbeiten verdeutlichen auch, dass sich die Konzepte Exposition und Sensitivität nur schwer auf interne Systemdynamiken wie sozioökonomische Stressfaktoren übertragen lassen (Kasperson u. a. 2005): Exposition ist definiert als eine physische, räumliche Veränderung; außerdem steht sie zur Sensitivität in einem System-Umwelt-Verhältnis, was auf systeminhärente, gesellschaftliche Dynamiken nicht zutrifft.

Im Folgenden wird das Verständnis von Risiko in der soziologischen Risikoforschung erläutert, das sich zwar zu keinem operationalisierbaren Framework fügt, aber einen

passenden Rahmen für unsere Konzeption einer erweiterten Vulnerabilitätsbewertung bietet.

Soziologische Risikoforschung

In der Soziologie wird das Thema Risiko seit etwa drei Jahrzehnten behandelt, den Anstoß dafür gaben vor allem die Kontroversen um ökologische und technische Risiken. Es geht um die Rolle von Risiko und Unsicherheit in modernen Gesellschaften und dem sozialen Umgang mit ihnen (Renn and Keil 2008).

Als Gesellschaftstheorie sind es vor allem die Systemtheorie (Luhmann 1993; Japp 1996) und die Theorie der reflexiven Moderne (Beck, Giddens und Lash 1996), die Risiken einen besonderen Stellenwert in der Analyse der Gegenwartsgesellschaft zuweisen. Beide Richtungen teilen die These, dass durch die Dynamiken der gegenwärtigen Gesellschaften Risiken eine zunehmend größere Rolle spielen (Beck 1986; Zinn 2008).

Unter den bei Beck weitgehend synonym verwendeten Begriffen Risiko und Gefahr wird ein breites Spektrum moderner Gefährdungen der Gesellschaft zusammengefasst, von ökologischen (z.B. Schadstoffbelastung) bis zu sozialen (z.B. Arbeitslosigkeit). Beck sieht im Problem der sozialen Verteilung von Risiken sogar das Kernmerkmal moderner Gesellschaften und postuliert, das zentrale

Problem der Verteilung von Reichtum, kennzeichnend für die industrielle Gesellschaft, sei in der gegenwärtigen Risikogesellschaft durch das zentrale Problem der Verteilung von Risiken abgelöst worden (Beck 1986).

Luhmann (1991) baut zunächst auf einer Analyse der historischen Semantik des Risikobegriffs auf und zeigt, dass der Begriff Risiko in Europa erst recht spät – im Übergang zwischen Mittelalter und Neuzeit – sprachliche Verbreitung fand. Bis dahin wurden andere Begriffe verwendet, um das Problem der Zukunftsungewissheit, speziell des zukünftigen Unheils, auszudrücken. Luhmann stellt nun die Frage, warum im Übergang zur Neuzeit die traditionellen Begriffe wie Gefahr, Wagnis, Zufall, Glück nicht mehr ausreichen, um über das Problem der Zukunftsunsicherheit ausreichend präzise kommunizieren zu können. Seine Antwort lautet: Weil mit der Neuzeit eine neue Erfahrung gemacht wurde, nämlich die Erfahrung, dass manche Vorteile nur zu erreichen sind, wenn etwas aufs Spiel gesetzt wird: „Dabei geht es nicht um das Problem der Kosten, die man vorher kalkulieren und gegen den Nutzen verrechnen kann. [...] Es [geht] um Entscheidungen, mit denen man Zeit bindet, *obwohl man die Zukunft nicht hinreichend kennen kann; und zwar nicht einmal die Zukunft, die man durch die eigenen Entscheidungen erzeugt* [...]. Es geht, mit

anderen Worten, um die kontrollierte Extension rationalen Handelns“ (Luhmann 1991, 21f.).

Das Annehmen von Risiko, die Vorstellung, dass man trotz unsicherer Zukunft die richtigen Entscheidungen treffen kann, sind Ausdruck des wachsenden Anspruchs des Könnens und der Kalkulation in einer immer weiter „entzauberten Welt“ (Max Weber nach Zinn 2008, 10): “Risk implies that an uncertain future can be made available to human action foremost with the help of positivist science and technique” (Zinn 2008, 10).

Der Differenzbegriff zu Risiko ist bei Luhmann der Begriff Gefahr und nicht, wie in der Risikoliteratur üblich, der Begriff Sicherheit, da Sicherheit in realen Situationen nie erreicht werden kann. Sicherheit bezeichnet lediglich die gesellschaftliche Festlegung eines vertretbaren Risikos (Jaeger u. a. 2001). Mit Gefahr bezeichnet Luhmann einen möglichen Schaden, der nicht auf eigene Entscheidung zurückzuführen ist. „Von Risiko sollte man dagegen nur sprechen, wenn die Nachteile der eigenen Entscheidung zugerechnet werden können. Das Risiko ist mithin, anders als die Gefahr, ein Aspekt von Entscheidungen, eine einzukalkulierende Folge der eigenen Entscheidung“ (Luhmann 1997, 327).

Für die Moderne kann dann festgestellt werden, dass es zunehmend zu einer Verlagerung von Gefahren zu Risiken kommt (Luhmann 1991), und zwar durch zunehmende und vermehrt hochskalige Eingriffe in physikalische, chemische und biologische Prozesse, deren mögliche Folgen für Umwelt und Gesundheit auf gesellschaftliche Entscheidungen zurückgehen, und dadurch, dass die gesellschaftlichen Systeme selbst immer komplexer, vernetzter und dadurch opaker werden. Klimawandel und Finanzkrise sind dafür Paradebeispiele.

In dieser Konzeption wird allerdings auch klar, dass derselbe Sachverhalt als Risiko oder als Gefahr aufgefasst werden muss, je nachdem, ob die betroffenen Personen, Bevölkerungsgruppen oder sozialen Systeme an den Entscheidungen beteiligt waren oder nicht. Ein Risiko unterscheidet sich daher von einer Gefahr „durch den Grad der wahrgenommenen Steuerungsmöglichkeit von einem Selbst oder den Organisationen, denen man angehört“ (Renn u. a. 2007, 162).

Das Konzept der systemischen Risiken (Renn, Klinke und van Asselt 2011) führt das soziologische Verständnis von Risiko als eingebettet in der modernen Gesellschaft weiter aus und grenzt es noch einmal deutlich ab von der quantitativ-technischen Risikoabschätzung: letztere ist nicht auf die gesellschaftlich besonders

relevanten systemischen Risiken anwendbar und führt im Bereich des Risikomanagements zu kontraproduktiven Effekten.

Renn und Koautoren argumentieren, dass "einfache" Risiken durchaus sinnvoll über Wahrscheinlichkeitsverteilungen bestimmt werden können. Einfache Risiken stellen beispielsweise saisonale Überflutungen und Autounfälle dar: die Ursache des Risikos ist bekannt, das Schadenspotenzial klar, die Unsicherheit gering und es gibt kaum Uneindeutigkeit bei der Interpretation der Risiken. Für diese Art von Risiken existieren aussagekräftige statistische Daten, jedenfalls solange sie periodisch auftreten und nicht deutlichen Veränderungen in Häufigkeit und Amplitude unterliegen.

Aber gerade die mit der modernen Gesellschaftsform verflochtenen systemischen Risiken können nicht kalkuliert werden: „The term 'systemic' describes the extent to which a risk is embedded in the larger contexts of societal processes. Systemic risks require a more holistic approach to hazard identification, risk assessment, and risk management“ (Renn, Klinke und van Asselt 2011, 234). Systemische Risiken wie Viren, Schadstoffe oder technische Mängel entstehen unmittelbar aus der Produktions- und Reproduktionsweise moderner Gesellschaften: vor allem durch die hohe Vernetzung und Verdichtung sind Gesellschaften mit Risiken neuer Qualität

konfrontiert, die Systeme in ihrer Funktionsfähigkeit gefährden können. Ähnlich auch die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung: „A systemic risk [...] is one that affects the systems on which society depends – health, transport, environment, telecommunications etc.” (OECD 2003, 30). Renn und Keil (2008) konstatieren folgende allgemeinen Eigenschaften systemischer Risiken:

- a. Ausstrahlung auf andere Systeme: systemübergreifende Auswirkungen.
- b. Komplexität der Ursache-Wirkungs-Kette: Schwierigkeit der Bestimmung wegen Multikausalität, intervenierenden Variablen oder auch zeitlicher Verzögerungen.
- c. Unsicherheit durch eingeschränktes oder nicht vorhandenes wissenschaftliches Wissen (u.a. durch fehlende Daten).
- d. Ambiguität/ Mehrdeutigkeit bei der Interpretation des Risikos, z.B. der Bewertung der Konsequenzen als akzeptabel oder tolerabel (Bouder, Slavin und Lofstedt 2007).

Mit Ausstrahlung auf andere Systeme ist gemeint, dass die Risiken weit über den Ort ihres Ursprungs hinaus wirken und neben ihrer unmittelbaren Wirkung negative Effekte auf die Funktionen und Leistungen anderer zeigen. Durch eine Verlagerung der Risiken können sich diese noch verstärken. Ein Beispiel für ein

solches Risiko sind die in der Finanzkrise 2007/08 „systemisch relevanten“ Ereignisse, wie die Insolvenz der Lehman Brothers, die zu einem Domino-Effekt von Risiken für Hausbesitzer, Anleger, Banken, Versicherungen und schließlich den staatlichen Haushalten führten.

Die drei weiteren Eigenschaften – Komplexität, Unsicherheit und Uneindeutigkeit – treffen nicht nur auf systemische Risiken zu und entwickeln erst in der Kombination mit der Entgrenzung ihr systemisches Bedrohungspotenzial. Fallstudien zeigen beispielsweise, dass „systemische Risiken durch ihre transnationale Reichweite eine potenzierte Ambiguität besitzen“ (Renn u. a. 2007, 175). Die systemübergreifenden und oft transnationalen Auswirkungen erhöhen naheliegenderweise die Vielzahl der unterschiedlichen und umstrittenen Interpretationen des Risikos, z.B. bezüglich seiner Relevanz und Implikationen, wodurch Verunsicherung verstärkt wird und sich insgesamt die Bewertung von Risiken deutlich erschwert. Die drei Merkmale hängen auch miteinander zusammen: so führt zum Beispiel die Komplexität der Erklärung des Risikos zu einer Pluralität wissenschaftlicher Erklärungsansätze. Dies wiederum wird tendenziell als Ausdruck von Unsicherheit wahrgenommen und kann schließlich zu einer von Interessen und Wertkonflikten dominierten öffentlichen Risikodebatte führen. Insgesamt stellen systemische Risiken keine einzelnen,

berechenbaren Risiken dar, sondern beeinträchtigen die soziale Robustheit – oder auch Resilienz – einer Gesellschaft.

Huber (2009) kritisiert am Konzept der Systemrisiken, dass die Merkmale sehr allgemein sind und nicht die Qualität des Risikoereignisses reflektieren, sondern eher die Schwierigkeiten, mit denen Risikomanager umgehen müssen. Trotz der Ungenauigkeit und konzeptuellen Schwäche stellt der Ansatz eine Konkretisierung und Integration verschiedener Merkmale des soziologischen Risikoverständnisses dar: bei systemischen Risiken handelt es sich nicht um einfache, technische Risiken, die nach der Formel Schadensausmaß mal Eintrittswahrscheinlichkeit berechnet werden können, sondern um solche, die Systemfunktionen betreffen, die zentral genug sind, systemübergreifend zu wirken und sich darüber hinaus durch hohe Komplexität, Unsicherheit und Mehrdeutigkeit auszeichnen. Nicht zuletzt diese Eigenschaften machen das hohe Konfliktpotenzial von Risiken in modernen Gesellschaften aus und fordern einerseits ein tiefgehendes Verständnis einzelner Systeme und andererseits die weitere Analyse von Systemzusammenhängen, Kaskaden- und Übertragungseffekten (Aven und Renn 2010).

Im Gegensatz zu den vorherigen Ansätzen der Vulnerabilitätsbewertung muss der Schwerpunkt also auf Verflechtungen und die grundlegende systeminhärente Natur

der Risiken gelegt werden; die funktionalen Zusammenhänge, die weitreichenden Auswirkungen auf unterschiedliche Systemfunktionen müssen darstellbar sein. Bezogen auf den Bevölkerungsrückgang drückt es Kaufmann so aus: „Die Gewichtung des Faktors Bevölkerungsrückgang ist als gravierender zu veranschlagen, als die Untersuchung einzelner Zusammenhänge nahelegt. Die verhängnisvolle Wirkung eines langfristigen Bevölkerungsrückgangs resultiert aus dem Umstand, dass er sich nahezu in allen gesellschaftlichen Teilbereichen in gleichsinniger Weise auswirkt und dadurch auch geeignet ist, Wechselwirkungen auszulösen oder zu verstärken“ (Kaufmann 2005, 62). Das Beispiel des Ansatzes der „Doppelten Exposition“ zeigt, dass der Untersuchung mehrerer, gleichwertiger Stressoren, ihren komplexen Dynamiken und Auswirkungen auf mehrere Systemfunktionen im Rahmen des Vulnerabilitätsansatzes zu enge Grenzen gesetzt sind. In Kapitel 3 wird also eine eigene Konzeption von Vulnerabilität vorgestellt, die auf dem Konzept der Systemrisiken aufbaut: fundamental für unser Verständnis von Risiken ist, dass sie fest mit der Funktionsweise moderner Gesellschaften verwoben sind und sich deshalb auf grundlegende Weise auf ihre Funktionsfähigkeit auswirken können.

3. Konzeptuelle Herangehensweise

Definition von Vulnerabilität für das vorliegende Projekt

Eine entscheidende Voraussetzung, um Vulnerabilität gegenüber verschiedenen Systemrisiken zu bewerten und vergleichbar zu machen, ist eine einheitliche Systemreferenz. In diesem Projekt ist die Systemreferenz das Gesamtsystem Gesellschaft. Wir wollen Vulnerabilität in dieser Studie zunächst als Ausmaß der Gefährdung der Funktionsfähigkeit der Gesamtgesellschaft ansehen, wobei wir hier die nationalstaatliche deutsche Gesellschaft meinen. Soziologisch korrekt würde man sagen, Vulnerabilität bezeichnet das Ausmaß der Gefährdung gesellschaftlicher Selbstreproduktion. Wir benutzen mit „Gefährdung“ bewusst nicht Luhmanns Begrifflichkeiten, da zu diesem Zeitpunkt nicht festgelegt werden soll, ob die zu untersuchenden Dynamiken als systemverursachte Risiken oder systemunabhängige, externe Gefahren zu behandeln sind.

Box: Gesellschaft, gesellschaftliche Selbstreproduktion und Vulnerabilität:

„Wenn es einen *common sense* soziologischer Gesellschaftstheorie gibt, dann besteht dieser ohne Zweifel in der Annahme, dass moderne Gesellschaften differenzierte Einheiten sind“ (Nassehi 2008). Diese Gesellschaftsdiagnose findet

man bereits in den Anfängen der Soziologie bei Spencer, Marx, Durkheim und Weber und sie gilt bis heute nicht nur in der Soziologie, sondern sie ist im Mainstream des gesellschaftlichen Selbstverständnisses angekommen.

Der alte Begriff für Differenzierung lautete Arbeitsteilung (aus heutiger Sicht würde man sagen: Arbeitsteilung ist eine Spezialform von funktionaler Differenzierung, sie ist also nur ein Fall unter anderen). Ein Grundcharakteristikum von Gesellschaft ist also Arbeitsteilung. Eine der Grunddynamiken der Modernisierung, damit ist die Entwicklung westlicher Gesellschaften europäischer Prägung seit dem 18. Jahrhundert gemeint, besteht in einer Zunahme der Arbeitsteilung. Dies hat zwei Folgen, die ebenfalls sehr früh erkannt wurden. Zum einen bedeutet Arbeitsteilung, dass eine Person, eine Firma, ein Staat oder auch zunehmend ein Staatenbund nicht alle gesellschaftlich notwendigen, relevanten, erwünschten oder auch nur möglichen Funktionen erfüllen muss, sondern sich auf bestimmte Aufgaben spezialisieren kann. Damit werden enorme Effizienzgewinne erreicht und Innovationspotenziale erschlossen. So gesehen sind die modernen Gesellschaften – damit sind im Wesentlichen die hochindustrialisierten Länder des globalen Nordens gemeint, zu denen auch Deutschland gehört – die effizientesten und innovativsten, die es jemals gab. Gleichzeitig jedoch erhöht Arbeitsteilung die Abhängigkeit der

einzelnen Personen und Teilsysteme voneinander und dies erzeugt zwei Probleme: Koordinationsprobleme und Integrationsprobleme (Luhmann 1997; Willke 1995; Nassehi 1997). Damit ist bereits in einer sehr grundsätzlichen Weise eine inhärente Gefährdung der modernen Gesellschaft angesprochen, die wir im Modul „Soziale Ungleichheit“ näher untersuchen werden.

Funktionale Differenzierung bedeutet auch, dass die Reproduktion der Gesamtgesellschaft von der Funktionsfähigkeit zahlreicher Teilsysteme abhängt, wie z.B. dem politischen System, dem Rechtssystem, der Realwirtschaft, dem Finanzmarkt, dem Gesundheitssystem, dem Ausbildungssystem, dem Gesundheitszustand, der Alterstruktur und Dynamik der Bevölkerung, den physischen Eigenschaften, der räumlichen Verteilung von Menschen, Gebäuden und der gebauten Infrastruktur, der Ressourcenversorgung usw. (Durkheim 1973; Galtung 1982; Luhmann 1997; Luhmann 1986; Luhmann, Krohn, und Krücken 1993; Baecker 2004).

Jedes dieser Teilsysteme unterliegt spezifischen Veränderungen, die sich sowohl aus systeminternen als auch aus externen Dynamiken ergeben können (Bertalanffy 1969; Foerster und Schmidt 1993; Baecker 2005; Luhmann 1984). Die Pointe ist nun, und hier kommen wir zum Begriff von Vulnerabilität als Gefährdung der

gesellschaftlichen Selbstreproduktion, dass alle essenziellen Teilsysteme funktionieren müssen, damit die Gesamtgesellschaft funktioniert.

Die Frage ist dann zunächst: Was sind essenzielle Teilsysteme der Gesellschaft?

Auch hier muss man feststellen, dass innerhalb der Sozialwissenschaften keine eindeutige Beschreibung existiert, was Gesellschaft ist und was ihre essenziellen Teilsysteme sind (Nassehi 2004). Ungeachtet dieser fachinternen Diskussionen, die uns hier nicht weiter interessieren müssen, gibt es aber in der Systemtheorie einen Konsens darüber, dass Politik, Wirtschaft, Recht, Erziehung, Wissenschaft und Gesundheitssystem zu diesen essenziellen Teilsystemen einer modernen Gesellschaft gehören, ebenso wie die physische Reproduktion der Bevölkerung, der Gebäude und der gebauten Infrastruktur und ihre dafür notwendigen Ressourcenflüsse. Natürliche Ressourcen wie beispielsweise Wasser, Luft, Böden oder Energieträger gehören zur Umwelt der Gesellschaft und sind somit zwar nicht Teil der Gesellschaft, aber zentrale Bedingungen für die Funktionsfähigkeit der Teilsysteme.

Nun zum Begriff der gesellschaftlichen Selbstreproduktion. Produktion bedeutet Herstellung, Reproduktion bedeutet Wiederherstellung, aber auch Aufrechterhaltung sowie Vermehrung. Der Reproduktionsprozess kann, aber muss nicht mit

Vermehrung einhergehen. Selbstreproduktion bedeutet nichts anderes als dass ein System sich selbst wiederherstellt, erhält oder vermehrt und dies nicht von außen durch jemanden anderen geschieht. Varela und Maturana hatten dafür den Begriff *Autopoiesis* (vom altgriechischen *autós* = selbst und *poiein* = herstellen) geprägt, den auch Luhmann verwendet (Varela, Maturana und Uribe 1974; Luhmann 1984).

Um den Begriff der gesellschaftlichen Selbstreproduktion nun näher zu erläutern, soll zunächst daran erinnert werden, dass Gesellschaft aus unzähligen gleichzeitig ablaufenden Handlungen und Prozessen besteht. Das entspricht unserer alltäglichen Erfahrung. Während Sie diesen Bericht lesen, werden Parlamentsreden gehalten, Verträge unterzeichnet, Kinder geboren, Studenten unterrichtet und geprüft, Erze und Erdöl gefördert, Autos produziert und vieles mehr. Durch die Summe all dieser Handlungen reproduziert sich Gesellschaft als Ganzes. All diesen Handlungen ist gemein, dass sie nicht ein für allemal gesetzt werden, sondern kontinuierlich wiederholt werden müssen, und genau das ist mit gesellschaftlicher Reproduktion gemeint. Reproduktion heißt dabei sowohl Neuherstellung als auch Aufrechterhaltung. Da alle Elemente der Gesellschaft kurzlebig sind (inklusive der Menschen), müssen sie immer wieder neu hergestellt werden, um den Staus Quo aufrechtzuerhalten. Das heißt, die Tatsache, dass Menschen sterblich sind, bedroht

nicht die gesellschaftliche Selbstreproduktion, wohl aber eine zu hohe oder zu geringe Geburtenrate. Auch die Tatsache, dass Firmen in Konkurs gehen, bedroht nicht die wirtschaftliche Selbstreproduktion, solange neue entstehen und die Bedürfnisse der Bevölkerung nach Gütern, Dienstleistungen und Arbeitsplätzen befriedigt werden können. Gesellschaftliche Selbstreproduktion bezieht sich also nicht auf einzelne Elemente von Gesellschaft, zum Beispiel einzelne Menschen, Firmen, Gesetze usw., sondern auf die jeweiligen Funktionssysteme insgesamt, z.B. das Wirtschaftssystem, das Energiesystem, die Bevölkerung. Wir sprechen daher auch von systemischen Risiken. Die Finanzkrise 2008, die gegenwärtige Währungskrise des Euro, die Krise in Japan nach dem Erdbeben vom 11. März 2011 oder die größer werdende Wahrscheinlichkeit von global signifikanten Ernteaussfällen durch den Klimawandel sind Beispiele dafür, was mit systemischen Risiken, die eine Gefährdung der gesellschaftlichen Selbstreproduktion bedeuten, gemeint ist. An diesen Beispielen sieht man auch, dass es nicht eines Totalausfalls eines Teilsystems bedarf, um von einer Gefährdung gesellschaftlicher Selbstreproduktion zu sprechen; es reicht, dass genügend große Teile betroffen sind. An Japan kann man desweiteren lernen, wie das gleichzeitige Auftreten mehrerer Schadensfälle Gefährdungslagen potenziert. Was „genügend groß“ allerdings genau heißt, ist eine Frage, die nicht von der Wissenschaft, sondern nur von der Gesellschaft beantwortet

werden kann. Für das Projekt bedeutet dies, dass wir geeignete Metriken und quantitative Abschätzungen bereitstellen, auf deren Basis eine vergleichende Vulnerabilitätsbewertung erfolgen kann, aber nicht eine Gesamtbewertung selbst vornehmen, in der unterschiedliche Vulnerabilitäten gegeneinander abgewogen werden. Ein aktuelles Beispiel bietet die EU-Entscheidung vom 28.3.2011, in der die Grenzwerte für radioaktiv belastete Lebensmittel aus Japan angehoben wurden. Dies kann als eine Interessensabwägung zwischen Gesundheitsvulnerabilität der Bevölkerung und ökonomischer Vulnerabilität des Wirtschaftssystems angesehen werden, die beide durch die Ereignisse in Japan erhöht wurden.

Da aber das Neue nie eine identische Kopie des Alten ist, beinhaltet Reproduktion auch immer Veränderung und, vor allem in modernen Gesellschaften, Vermehrung bzw. Wachstum. In der positiv konnotierten Version heißt das dann Entwicklung, technischer Fortschritt, Wirtschaftswachstum oder Zunahme der Wohlfahrt. In der kritischen Variante heißt das Überbevölkerung, Überkonsum, Globaler Wandel, Klimawandel, nicht-nachhaltige Entwicklung oder Übernutzung natürlicher Lebensgrundlagen. In diesem Spannungsfeld bewegt sich eine Vulnerabilitätsbewertung, die sowohl klima- als auch nicht-klimaspezifische Treiber berücksichtigen will.

Ausgangspunkt ist die Beobachtung, dass eine ausreichend starke Beeinträchtigung eines Teilsystems das gesamte Gesellschaftssystem gefährden kann (z.B. Finanzkrise). Um essenzielle Teilsysteme definieren zu können, berufen wir uns hier auf ein sozial-ökologisches Gesellschaftsmodell, das sowohl physische Dimensionen (z.B. Klimafolgen) als auch symbolisch-kommunikative (z.B. politische, rechtliche und ökonomische Änderungen) abbilden kann (Fischer-Kowalski und Weisz 1999; Latour 1998; Winiwarter und Knoll 2007), denn nur dadurch können Klimafolgen und z.B. gesellschaftsstrukturelle Dynamiken auf ein einheitliches Gesamtsystem bezogen werden.

Für eine quantitative und vergleichende Bewertung von Vulnerabilität müssen zumindest folgende vier Elemente sinnvoll und vergleichbar bestimmt werden (modifiziert nach Füssel 2007):

1. Systemreferenz (welches System wird als gefährdet betrachtet?): Die Systemreferenz ist für uns die Gesellschaft als Ganzes, um deren Funktionsfähigkeit es letztlich geht, einschließlich aller wesentlichen – die Funktionsfähigkeit betreffenden – Teilsysteme.

2. Gefährdungsart (welcher Art ist die Gefährdung?): Neben ausgewählten Klimafolgen samt unterschiedlicher Ausprägungen (= Richtung und Stärke der Klimafolgen) sollen weitere variable Einflussfaktoren untersucht werden wie z.B. die Dynamiken in den Bereichen Demographie, Bildung (Lutz, Cuaresma und Sanderson 2008), Einkommen, Stabilität globaler Märkte und Ressourcenverfügbarkeit. Eine konkrete Auswahl wird im Laufe des Projekts auf Basis von Datenverfügbarkeit und Expertengesprächen erfolgen. Im Folgenden als Treiber bezeichnet.

3. Schützenswerte Funktionen und Strukturen (welche Attribute/Elemente des Systems sollen geschützt werden?): Als schützenswert wird die Funktionsfähigkeit der gesellschaftlichen Subsysteme angesehen. Entscheidend für die Möglichkeit einer quantitativen Vulnerabilitätsbewertung ist eine nachvollziehbare Auswahl der zu untersuchenden Subsysteme nach den Kriterien Relevanz, Plausibilität von Gefährdungspotenzialen, Datenverfügbarkeit, vorhandenes Wissen über Systemdynamiken, klimatische Vulnerabilität und Potenzial für sektor- und regionenübergreifende Vulnerabilitätsbewertung. Eine erste Abwägung dieser Kriterien hat uns bewogen, uns zunächst und exemplarisch auf das inländische

Energiesystem, den Außenhandel (d.h. die Vulnerabilität durch die Integration Deutschlands in globale Märkte) sowie sozial-staatliche Institutionen (d.h. deren Vulnerabilität aufgrund sozialer und demographischer Entwicklungen) zu konzentrieren.

4. Zeithorizont: etwa 2050.

Definition der Begriffe regionen- und sektorübergreifend

Mit regionenübergreifend ist gemeint, dass die Vulnerabilitätsindikatoren räumlich explizit und flächendeckend für Deutschland erhoben werden, sodass regionale Hot Spots identifiziert werden können. Welche konkrete räumliche Auflösung letztlich angestrebt werden soll, hängt sowohl von den Interessenlagen der Stakeholder ab als auch von der Struktur der Primärdaten sowie von den methodischen Möglichkeiten, die gewählten Vulnerabilitätsmetriken räumlich auf- bzw. abzuskalieren.

Mit Sektor sind hier die Sektoren der deutschen Anpassungsstrategie (DAS) gemeint: menschliche Gesundheit; Biodiversität und Naturschutz; Landwirtschaft; Forstwirtschaft; Fischerei; Bodenschutz; Wasserwirtschaft, Hochwasserschutz; Küstenschutz; Verkehr, Verkehrsinfrastruktur; Energiewirtschaft, Industrie und Gewerbe; Tourismuswirtschaft; Raum- und Regionalplanung; Bauwesen;

Finanzwirtschaft, Versicherungswirtschaft; Bevölkerungsschutz inkl. Katastrophenschutz.

Um zu einer sektorübergreifenden Vulnerabilitätsbewertung zu kommen, haben wir einen eigenen Ansatz entwickelt, der im Folgenden dargestellt wird. Die Grundüberlegung besteht darin, den funktionalen Zusammenhang der einzelnen Sektoren zu berücksichtigen und funktional eng verwobene Sektoren als gesellschaftliche Teilsysteme zu konzeptualisieren, sodass Gruppen von DAS-Sektoren als Elemente eines Teilsystems analysierbar werden. Obwohl es unser Bestreben ist, so viele DAS-Sektoren wie möglich zu erfassen, kann hier kein Anspruch auf Vollständigkeit gestellt werden.

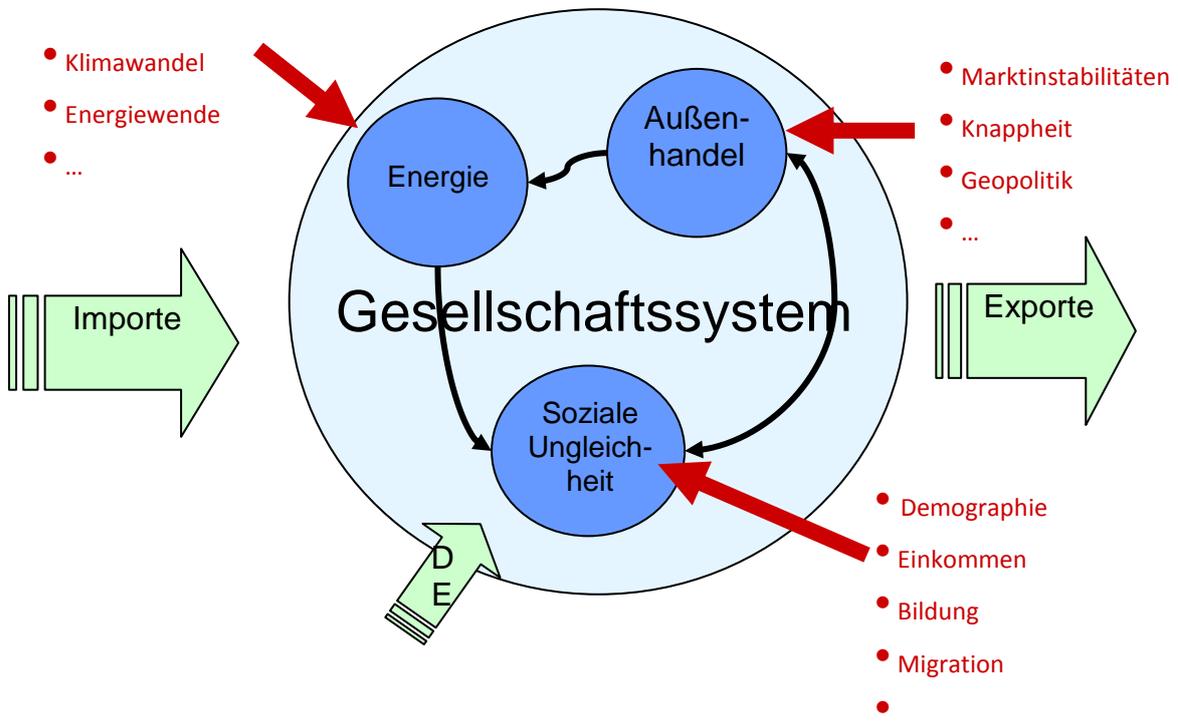
Konzeptueller Ansatz einer integrierten und erweiterten Vulnerabilitätsbewertung

Der Ausgangspunkt ist eine Konkretisierung unserer Analyseeinheit, nämlich der deutschen Gesellschaft.

Da es um eine Vulnerabilitätsstudie für Deutschland geht, wählen wir ein nationalstaatliches Gesellschaftskonzept, in dem Gesellschaften als territorial begrenzte Einheiten angesehen werden, zu denen eine bestimmte Bevölkerung, bestimmte Gebäude und gebaute Infrastruktur gehören.

Diese Bestände werden biophysisch, das heißt über einen konstanten Input an Energie, Rohstoffen und Wasser reproduziert. In Abbildung 3 ist der Territorialstaat als großer hellblauer Kreis symbolisiert. Die grünen Blockpfeile zeigen Herkunft und Destination der sozial-metabolischen Ströme an, die stets aus der Umwelt des Gesellschaftssystems stammen und in diese zurückführen. In anderen Worten: Gesellschaft wird hier als ein thermodynamisch offenes System konzipiert.

Abbildung 4: Konzeptuelle Grundlagen: Gesellschaft, Teilsysteme, Treiber und Wirkungspfade.



In Abbildung 3 ist dies durch die grünen Blockpfeile dargestellt. Ressourcen können dem eigenen Territorium entnommen werden (symbolisiert durch das Kürzel DE, das

für „domestic extraction“ steht, dem international gebräuchlichen Begriff für inländische Ressourcenentnahmen, siehe Eurostat 2001) oder sie können importiert werden. Auf der stofflichen Ebene werden Materialien entweder als Abfälle oder Emissionen wieder in die Umwelt entlassen (nicht dargestellt in Abbildung 3) oder als Exportgüter auf ausländischen Absatzmärkten verkauft (grüner Exportpfeil). Diese Prozesse zusammen ermöglichen die sozial-metabolische Reproduktion von Gesellschaft. Dieser Primärprozess gesellschaftlicher Selbstreproduktion wird arbeitsteilig organisiert, gesteuert, ermöglicht, weiterentwickelt und aufrechterhalten durch die gesellschaftlichen Funktionssysteme Wirtschaft, Politik, Recht etc.

In dieser Projektphase unterscheiden wir drei gesellschaftliche Teilsysteme (wir nennen sie im Weiteren Module), die wir im Hinblick auf ihre Vulnerabilität gegenüber unterschiedlichen Treibern, die extern oder intern sein können, empirisch und (semi-)quantitativ untersuchen wollen. Die Teilsysteme sind in Abbildung 3 als kleine dunkelblaue Kreise symbolisiert. Eine exemplarische und noch zu korrigierende und ergänzende Auswahl teilsystemspezifischer Treiber wird durch die roten Bulletpoints dargestellt. Bei der Auswahl der Module wurden die Kriterien Datenverfügbarkeit, vorhandene Expertise und Vorarbeiten am PIK, Klimasensitivität, Potenzial für eine sektor- und regionenübergreifende Vulnerabilitätsbewertung sowie

gesamtgemeinschaftliche Relevanz zugrundegelegt. Für eine literaturbasierte Darstellung der gesamtgemeinschaftlichen Relevanz der ausgewählten Module siehe den nächsten Abschnitt dieses Kapitels.

1. Modul Energie: Der Energie kommt insofern eine zentrale Rolle für Gesellschaften zu, als es keinen Gesellschaftsbereich gibt, der nicht auf die kontinuierliche Zufuhr von Energie angewiesen wäre. Energieknappheit ist daher für alle traditionellen und alle gegenwärtigen Gesellschaften ein Bedrohungsszenario und entsprechend hoch ist der politische Stellenwert, den Energiesicherheit in allen Ländern weltweit hat. Wir verwenden hier einen umfassenden Energiebegriff, der nicht nur technische Energie (Treibstoffe, Strom etc.) berücksichtigt, sondern auch die Nahrungsenergie, die Menschen und Nutztiere benötigen, sowie alle Arten technischer Biomasseenergienutzung. Damit umfasst unsere Definition des Energiesystems die Sektoren Energiewirtschaft, Landwirtschaft und Forstwirtschaft der DAS. Von den sozialen und naturalen Bedingungen, die zur Aufrechterhaltung des Energiesystems notwendig sind, konzentrieren wir uns zunächst auf Wasser, da Energie und Landwirtschaft die mit Abstand größten Wassernutzer sind und weil Klimawandel über den Wasserhaushalt

die Reproduktionsbedingungen des gesamten Energiesystems ändern kann. Das Teilsystem Energie umfasst nur die inländischen Elemente der Energieversorgung, deren mögliche Gefährdung durch Klimawandel in Deutschland und andere Treiber. Die Abhängigkeit des Energiesystems von Importen wird in Modul 2 Außenhandel untersucht.

2. Modul Außenhandel: Die Integration in den globalen Markt ermöglicht der deutschen Wirtschaft den Zugang zu Rohstoff- und Absatzmärkten. Deutschland importiert einen Großteil der von der Wirtschaft benötigten Rohstoffe. Gleichzeitig tragen ausländische Absatzmärkte in zunehmendem Ausmaß zur Wirtschaftsleistung Deutschlands bei. Der Gesamtwert deutscher Exporte wies in der vergangenen Dekade höhere Wachstumsraten auf als der Inlandskonsum, 2011 betrug die Exportquote bereits mehr als 40% der gesamten inländischen Verwendung (Statistisches Bundesamt 2012). Dies unterstreicht die zentrale Bedeutung, die der Außenhandel für Deutschland hat. In diesem Modul werden wir spezifische Vulnerabilitäten, die sich aus der starken Integration in globale Märkte ergeben, untersuchen, mit besonderer Berücksichtigung von strategisch wichtigen mineralischen Rohstoffen (siehe unten) und Energierohstoffen.

3. Modul Soziale Ungleichheit: Wie bereits oben ausgeführt hat jede hochdifferenzierte Gesellschaft nicht nur den Vorteil hoher Effizienzgewinne und steigender Innovationspotenziale, sondern auch die inhärenten Probleme der Koordination und Integration der einzelnen Teile – diese Problematiken betreffen die soziale Kohäsion einer Gesellschaft. Die Erforschung dieser Probleme hat eine lange Tradition sowohl in der theoretischen als auch in der empirischen Sozialforschung. Das hohe Interesse an dieser Fragestellung erklärt sich dadurch, dass in diesem Problem eines der fundamentalen systemischen Risiken für moderne Gesellschaften überhaupt gesehen wird (siehe z.B. Tainter 1988, Horster 1997, Nassehi 1997).

Schließlich sind in Abbildung 3 schwarze Pfeile eingezeichnet, die zwischen den Teilsystemen verlaufen. Diese symbolisieren Wirkungspfade, die die Einzeldynamiken der Teilsysteme verbinden. Sie sollen in einer späteren Phase des Projekts analysiert werden. Ein Beispiel für solche Wirkungspfade wäre die Auswirkung von Knappheiten von Energierohstoffen am Weltmarkt, die zu hohen Energiepreisen und möglicherweise Engpässen in der Versorgung führen würden. Hohe Energiepreise bedeuten wirtschaftliche Einbußen besonders in den

energieintensiven Sektoren und ein geringeres BIP. Hohe Energiepreise können dazu führen, dass armutsgefährdete Bevölkerungsgruppen sich essenzielle Energiedienstleistungen nicht mehr leisten können und dadurch z.B. aus dem Arbeitsmarkt herausfallen (ein Phänomen, das 2008, als der Ölpreis sein historisches Hoch erreichte, sowohl in den USA als auch in England beobachtet wurde und als „energy poverty“ bezeichnet wird). In einer solchen Situation sind Transferleistungen des Staates erforderlich, die dieser jedoch unter erschwerten Bedingungen erbringen muss, weil mit dem Rückgang des BIP auch die Steuereinnahmen zurückgehen und damit weniger Geld für Transferleistungen zur Verfügung steht.

Gesamtgesellschaftliche Relevanz der drei Module

Die Sicherstellung einer „zuverlässigen, wirtschaftlichen und umweltverträglichen Energieversorgung“ wird von der Bundesregierung als „eine der größten Herausforderungen des 21. Jahrhunderts“ angesehen (BMWi/ BMW 2010, 3). Die Angebotsknappheit, die erhöhte globale Nachfrage und die notwendige Senkung der Emissionen haben es unausweichlich gemacht, langfristig zu einer kohlenstoffarmen Wirtschaft überzugehen. Nicht zuletzt durch Fukushima hat die Energiewende

mittlerweile eine gewaltige Dynamik erfahren. Der damit verbundene Umbau des Energiesystems wird alle Bereiche von Wirtschaft und Gesellschaft erfassen: Stromerzeugung, Gebäudesektor und Straßenverkehr sind dabei zentrale Handlungsfelder, aber auch die Landwirtschaft und Landnutzung müssen einbezogen werden. Gleichzeitig ist das Energiesystem als eine der wesentlichen kritischen Infrastrukturen anfällig gegenüber externen Störungen. Eine Gefährdung entsteht durch die erwartbaren Auswirkungen des Klimawandels, u.a. aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit von Kühlwasser für thermische Kraftwerke und der unmittelbaren Wetter- und Klimaabhängigkeit der Nutzung erneuerbarer Energien (Wasser, Wind usw.), die für Deutschland noch nicht systematisch beforscht wurde. Dass heutige Gesellschaften über ihr Energiesystem enorm verletzlich sind, zeigt eine Studie des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag am Beispiel der gravierenden Folgen eines langandauernden und großräumigen Ausfalls der Stromversorgung (Petermann u. a. 2010). Eine weitere Gefährdung des Energiesystems resultiert aus der hohen Importquote der Primärenergieträger und besteht in möglichen Störungen des Außenhandels. Wie ernst diese Problematik genommen wird, lässt sich einer Studie der Bundesakademie für Sicherheitspolitik zum Thema Energiesicherheit entnehmen, in der die weltweit zunehmende „Sorge um eine zuverlässige und nachhaltige Energieversorgung“ betont und darauf

hingewiesen wird, dass „Energiesicherheit nicht nur eine ökonomische und ökologische, sondern auch eine sicherheitspolitische Dimension aufweist“ (Bundesakademie für Sicherheitspolitik 2008, 10).

Der Außenhandel ist für Deutschland von vitalem Interesse. Einerseits muss Deutschland einen Großteil der benötigten Rohstoffe importieren, insbesondere Energierohstoffe und Metalle. Der starke Anstieg der Rohstoffpreise in der letzten Jahren und die wachsende Sorge um die – angesichts des global steigenden Verbrauchs – ausreichende Verfügbarkeit haben dazu geführt, dass zuletzt verschiedene hochrangige internationale politische Initiativen zur Sicherung der Rohstoffversorgung entstanden sind (z.B. Europäische Kommission 2008a; OECD 2008a). Die Gefährdung aufgrund von Störungen der Rohstoffversorgung ist – trotz ihres hohen politischen Stellenwerts – wissenschaftlich bislang kaum systematisch erforscht. Eine vom BMWi in Auftrag gegebene Pilot-Studie, in der untersucht wurde, welche Zukunftstechnologien auf welche Rohstoffe angewiesen sind, kommt allerdings zu dem Schluss, dass die global hochvernetzte Rohstoffversorgung als ein „vulnerables System“ aufgefasst werden muss, wobei die „Empfindlichkeit der Rohstoffe verbrauchenden Wirtschaftssektoren“ dort besonderes groß ist, „wo die Möglichkeit fehlt, knappe und teure Rohstoffe zu substituieren“ (Angerer u. a. 2009,

14). Andererseits ist Deutschland als weltweit – nach China – zweitgrößter Exporteur mit einem sehr hohen Anteil des Exportvolumens am BIP (2010 knapp 30%) stark von globalen Rezessionen oder lokalen Veränderungen der Absatzmärkte betroffen. Die daraus resultierenden Gefährdungen für die deutsche (und auch die globale) Wirtschaft sind enorm. So betonte angesichts der jüngsten globalen Finanz- und Wirtschaftskrise etwa der Internationale Währungsfond (IWF), dass sich zur Stabilisierung der Weltwirtschaft die „Struktur der globalen Nachfrage ändern“ müsse, wobei insbesondere „Länder, die exportorientierte Strategien verfolgten und hohe Leistungsbilanzüberschüsse erzielten, mehr auf Binnennachfrage setzen müssen – namentlich die Schwellenländer, Deutschland und Japan“ (IWF 2009, 13).

Ein Mindestmaß an sozialer Kohäsion ist die Voraussetzung für das Funktionieren einer Gesellschaft, vor allem einer modernen, funktional differenzierten Gesellschaft (Durkheim 1893). Soziale Kohäsion bezeichnet die Anwesenheit von strukturellen und einstellungsbasierten Mechanismen der Solidarität, Kooperation und Austausch zwischen Angehörigen einer Gesellschaft (Berger-Schmitt 2000). Zentral sind die Qualität und Dichte sozialer Netzwerke und das Vertrauen in die Mitmenschen,

gesellschaftliche Institutionen und Wirkungsweisen (auch „soziales Kapital“, vgl. Putnam 2001).

Diese Merkmale der Qualität einer Gesellschaft hängen eng mit dem Ausmaß ökonomischer Ungleichheit, sozialer Ausgrenzung und Marginalisierungserfahrungen (Merton 1949; Sen 1992; Berger-Schmitt 2000; Vergolini 2011) zusammen.

So wird die soziale Kohäsion in Deutschland durch einige besorgniserregende und vieldiskutierte Entwicklungen bedroht:

- durch die in Deutschland besonders rasch zunehmende Einkommens- und Vermögensungleichheit – sie zeigt sich in Form einer schrumpfenden Mittelschicht und zunehmender Armutsgefährdung (Bourcarde und Schütte 2010; Europäische Kommission 2011; OECD 2008b; OECD 2011a),
- die verhältnismäßig schwach ausgeprägte soziale Mobilität (Klieme u. a. 2010; Lörz und Krawietz 2011; Hochschul-Informationssystem 2011) und die damit zusammenhängende strukturelle Benachteiligung von Menschen mit Migrationshintergrund (OECD 2011b)
- und die Verfestigung von prekären oder sogar entkoppelten Lebenslagen durch Arbeitslosigkeiten und Niedriglohnbeschäftigungen (Kalina und Weinkopf 2012), aber auch anderweitigen Abbau des

Normalarbeitsverhältnisses (Castel 2009) und weitgehender Lohnstagnation bei den unteren Einkommens- und Bildungsschichten (Brenke und Grabka 2011).

Soziale Dynamiken dieser Art haben Auswirkungen auf die soziale Kohäsion einer Gesellschaft und damit auch auf politische und ökonomische Systemfunktionen. In verschiedenen Forschungsdisziplinen wird untersucht, wie sich eine Schwächung der sozialen Kohäsion auf das politische, wirtschaftliche und allgemein soziale Funktionieren einer Gesellschaft auswirkt.

In der politikwissenschaftlichen Forschung weisen empirische Studien auf abnehmende politische Teilhabe (Böhnke 2006; Jesuit 2003; Solt 2008; Solt 2010; Steiner und Martin 2012), verstärkt gewalttätigen politischen Konflikt (Caruso und Schneider 2010), schlechtere Voraussetzungen für effektive Regierungsführung (Putnam 2001) und politische Reformfähigkeit (Ritzen, Easterly und Bayer 2000) hin. In der soziologischen und epidemiologischen Forschung wird außerdem auf den Zusammenhang zwischen erhöhter sozialer Ungleichheit, abnehmender Lebensqualität (Uslaner und Brown 2005; Delhey 2012) und zunehmenden gesundheitlichen Risiken und Kriminalität hingewiesen. Für die Systemfunktionen des Wirtschaftssystems stellt sie ein Risiko in Form abnehmender Produktivität

(Cohn, Fehr und Goette 2008; Abgrall 2010), generell weniger Wirtschaftsdynamik (Breen 1997; Putnam 2001; Deutschmann 2010; Kumhof u. a. 2012), einer erhöhten finanziellen Fragilität (Rajan 2010; Kumhof und Ranciere 2010; Mistral 2011) und höherer Staatsverschuldung (Azzimonti, De Francisco und Quadrini 2012) dar.

Zusätzlich zu sozialer Kohäsion werden im Modul „Soziale Ungleichheit“ die Wirkungen des demographischen Wandels analysiert, der in Deutschland einerseits zu einer starken Bevölkerungsschrumpfung, andererseits zu weitreichenden Veränderungen in der Alters-, Beschäftigungs- und Familienstruktur („Vereinzelung“, vgl. Mäding 2009) sowie der ethnischen Zusammensetzung führt (Europäische Kommission 2010). Neben den fiskalischen Konsequenzen der Alterung (vgl. Jackson, Howe und Nakashima 2010) hat die demographische Struktur einer Gesellschaft unter anderem Konsequenzen für die Binnennachfrage (Kaufmann 2005), das Arbeitskräftepotenzial (Anger und Plünnecke 2006), potenziell die technisch-ökonomische Innovationsrate und den Produktivitätszuwachs (Klasen und Nestmann 2006; Deutschmann 2010), was letztlich die Wirtschaftsdynamik (Deutsche Bank Research 2003; Simon 1998; Siebert 2010) signifikant beeinträchtigen dürfte.

Wegen der ungleichen räumlichen Verteilung von Bevölkerungsschrumpfung und Alterung zählen regionale Polarisierungen als interdependenter Prozess von sinkender Wirtschaftskraft, Abwanderung und Abbau bzw. Veralten öffentlicher Einrichtungen zu den heute schon wirkenden Folgen (Oswalt 2004; Berlin Institut 2004). Auch weisen Soziologen auf das Wirken von Bevölkerungswachstum als Stimulans für sozialen Wandel hin, dessen Wegfall mit einer „fortschrittshemmenden Mentalitätsveränderung“ einhergehen kann (Kaufmann 2005). Schließlich kann verstärkte Zuwanderung wiederum die soziale Kohäsion beeinträchtigen (McLaren 2011) und im Zusammenspiel mit ökonomischen Ungleichheiten zu ethnischen Fraktionalisierungen und Konflikten innerhalb der Gesellschaft führen (Esteban und Ray 2008; Esteban und Ray 2011).

Diese drei Bereiche sind also offensichtlich von herausragender gesellschaftlicher und politischer Bedeutung. Dass sie – ergänzt um den Klimawandel – auch auf europäischer Ebene in sehr ähnlicher Weise als Kernproblematiken wahrgenommen werden, zeigt ein Arbeitspapier der EU-Kommission, in dem vier Herausforderungen „besondere Relevanz“ für die europäischen Regionen bescheinigt wird: Globalisierung (insbesondere die Öffnung neuer Märkte), demographischer Wandel, Klimawandel und Energiesicherheit (Europäische Kommission 2008b, 3f.). Das

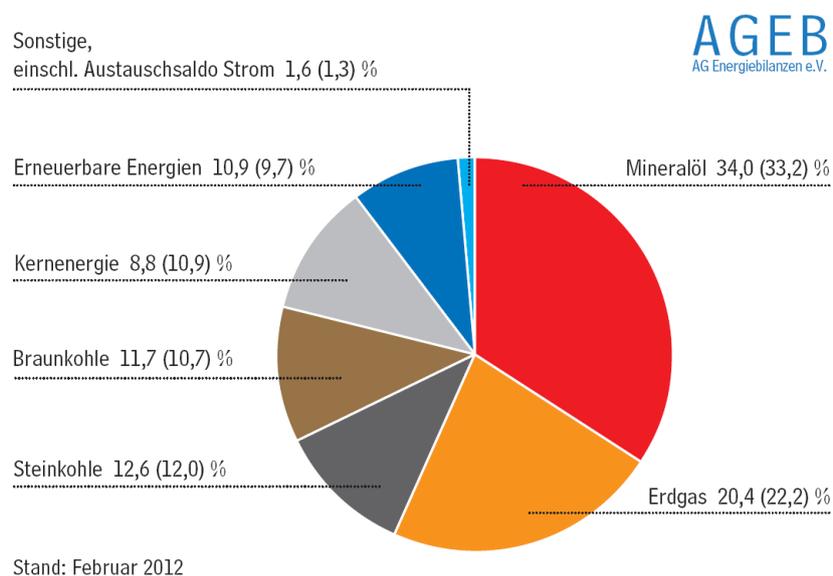
Arbeitspapier enthält einen Versuch, die Auswirkungen dieser vier Herausforderungen auf die europäischen Regionen indikatorbasiert und räumlich explizit bis 2020 darzustellen. Eine angelagerte Studie von ISMERI Europa fügt den vier Herausforderungen mit den „neuen sozialen Risiken“ noch eine fünfte hinzu (ISMERI Europa 2009).

4. Das Energiesystem: Struktur und jüngste Entwicklungen

Primärenergieverbrauch und Importanteil der Energieträger

Der Primärenergieverbrauch (PEV) in Deutschland beträgt 13374 PJ (2011). Die Anteile am PEV nach Energieträgern sind in Abbildung 4 dargestellt. Gegenüber 1990 ist v. a. der Anteil der Braunkohle (1990: 22%) stark zurückgegangen, während der Anteil von Erneuerbaren Energien (1990: 1%) und Erdgas (1990: 15%) stark zugenommen hat (BMW 2010, 4).

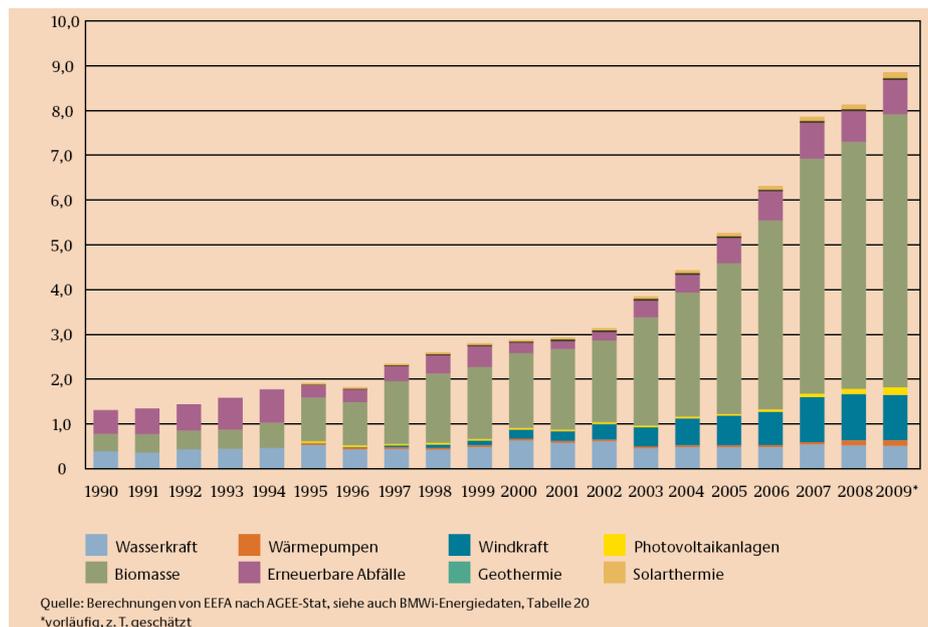
Abbildung 5: Struktur des Primärenergieverbrauchs in Deutschland 2011; Zahlen in Klammern sind die Werte von 2010 (Quelle: AGEB Pressedienst 2012).



Der Gesamtbeitrag der Erneuerbaren Energien zum PEV ist ungleich auf die einzelnen Erneuerbaren Energien verteilt. Die größten Anteile am PEV innerhalb der

Erneuerbaren Energien haben (Daten von 2008): Biomasse (68%), Windkraft (13%), Erneuerbare Abfälle (9%) und Wasserkraft (6%). 1990 trugen nahezu ausschließlich und zu etwa gleichen Teilen Erneuerbare Abfälle, Biomasse und Wasserkraft zur Primärenergieproduktion innerhalb der Erneuerbaren Energien bei (AGEB 2010, 6). Die zeitliche Entwicklung der Beiträge der einzelnen Erneuerbaren Energien ist in Abbildung 5 dargestellt.

Abbildung 6: Beitrag erneuerbarer Energiequellen zum Primärenergieverbrauch 1990-2009 in Prozent (Quelle: BMWi 2010, 17)



Die Primärenergiegewinnung in Deutschland beträgt 4025 PJ (2010), woran Braunkohle (38%) und Brennholz, Brenntorf, Klärschlamm, Müll, Abhitze zur Strom- und Fernwärmeerzeugung (33%) die größten Anteile haben. Die

Primärenergiegewinnung beträgt 2010 nur noch 65% des Werts von 1990 (BMWi 2011, 3).

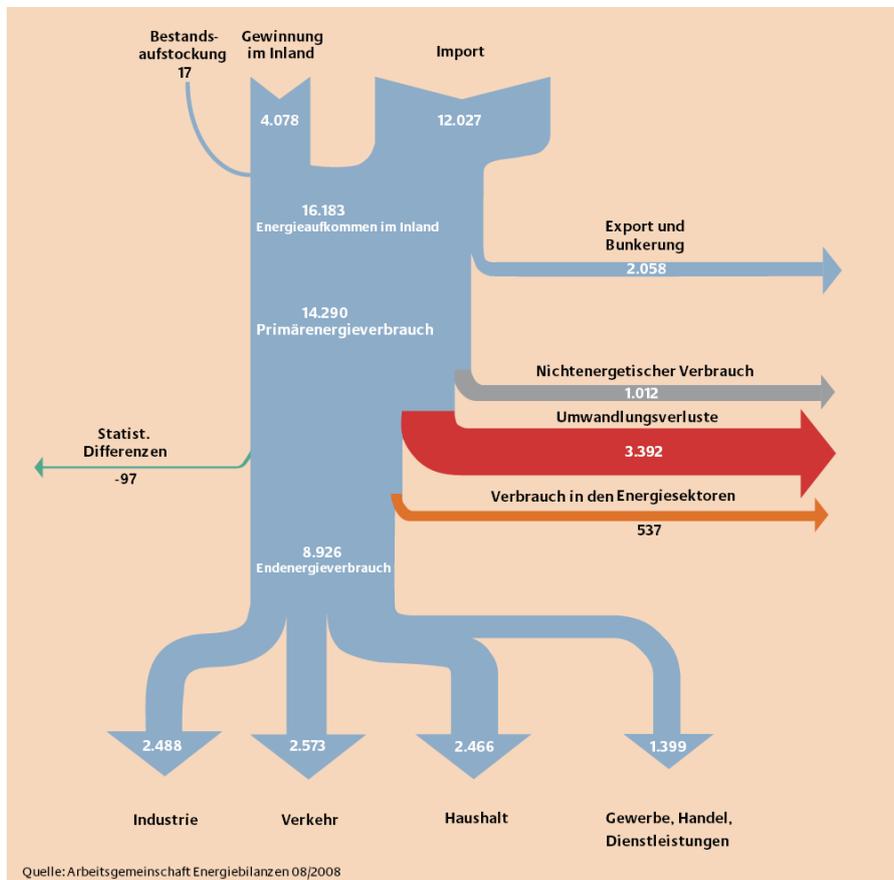
Entsprechend beträgt der Importanteil des Primärenergieverbrauchs etwa 70% (2010). Er betrug 1990 noch 57% und ist seit 1996 nahezu unverändert. Die Importanteile der einzelnen Energieträger betragen 2010: Mineralöl 98%, Erdgas/Erdölgas/Grubengas 82%, Steinkohle 77%, Braunkohle 0% und Kernenergie 100%. Die Importanteile sind seit 1990 im Wesentlichen unverändert – mit Ausnahme der Steinkohle, deren Importquote 1990 lediglich 8% betrug (BMWi 2011, 3).

Endenergieverbrauch nach Energieträgern, Verbrauchsbereichen und Anwendungszwecken

Die Primärenergieträger können meist nicht unmittelbar genutzt werden, sondern müssen Umwandlungsprozesse durchlaufen, um in veredelter Form als Endenergie zum Antrieb von Maschinen, Fahrzeugen und Produktionsanlagen, als Prozessenergie oder zur Beheizung von Wohnungen und Gebäuden genutzt werden zu können (BMWi 2010, 17). Der Endenergieverbrauch beträgt 9060 PJ (2010) und damit lediglich 65% des Primärenergieverbrauchs (die Differenz geht v. a. auf

Verbrauch und Verluste im Energiesektor und zu einem kleineren Teil auf nichtenergetischen Verbrauch zurück). Abbildung 6 veranschaulicht dies anhand eines Energieflussbilds für Deutschland. Der Endenergieverbrauch ist seit 1990 um 4% gesunken, sein Anteil am Primärenergieverbrauch ist bei leichten Schwankungen nahezu unverändert geblieben (BMWi 2011, 5).

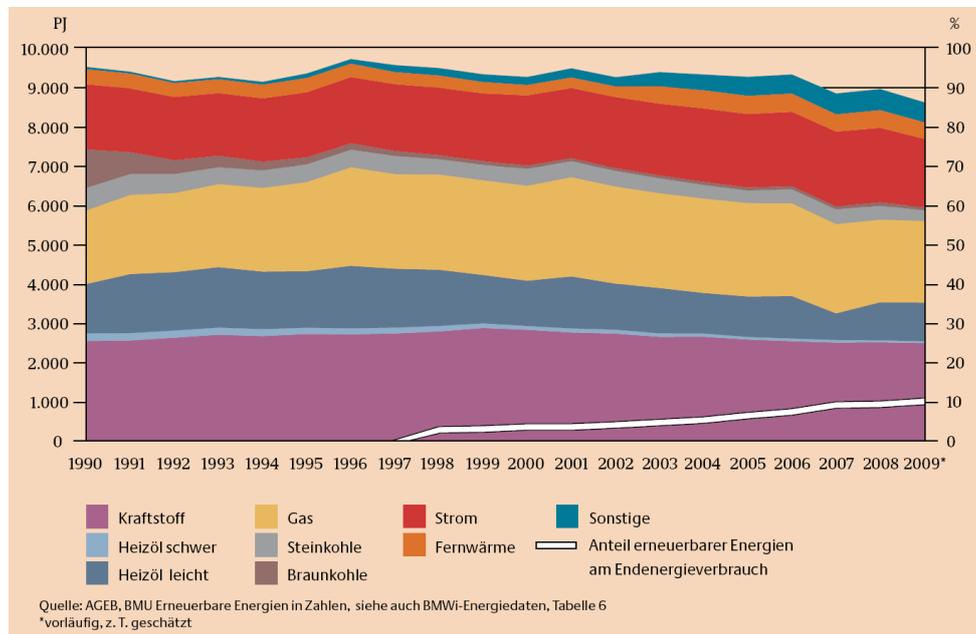
Abbildung 7: Energieflussbild Deutschland 2008 (Quelle: BMWi 2010, 18)



Die Anteile der Energieträger am Endenergieverbrauch betragen 2010: Kraftstoff (27%), Gas (25%), Strom (20%), Heizöl (10%), Brennholz, Brenntorf, Klärschlamm und Müll (7%), Fernwärme (5%), Steinkohle (4%) und Braunkohle (1%). Im Vergleich zu 1990 sind v. a. die Anteile von Braunkohle, Steinkohle und Heizöl zurückgegangen, während die Anteile von Gas, Strom und Brennholz u. a. zunahmen (BMWi 2011, 6). Heizöl und Kohle werden also v. a. durch Erdgas ersetzt. Kohle wird v. a. noch für die Stahlproduktion verwendet, in den Haushalten

spielt es kaum eine Rolle mehr. Abbildung 7 zeigt die zeitliche Entwicklung der Anteile der Energieträger am Endenergieverbrauch.

Abbildung 8: Endenergieverbrauch in Deutschland nach Energieträgern 1990-2009
 (Quelle: BMWi 2010, 21)



Die Bruttostromerzeugung beträgt 625 TWh = 2249 PJ (2010) und ist seit 1990 um 14% gestiegen (BMWi 2011, 22). Etwa 40% (2010) der Primärenergie werden zur Stromerzeugung verwendet (BMWi 2010, 19; BMWi 2011, 23). Die Anteile des Einsatzes verschiedener Energieträger zur Stromerzeugung betragen 2010: Kernenergie (28%), Braunkohle (25%), Steinkohle (18%), Erneuerbare Energien (15%) und Gase (12%). Im Vergleich zu 1990 haben die Anteile von Braunkohle, Steinkohle und Kernenergie abgenommen, während die Anteile von Erneuerbaren Energien und Gasen zugenommen haben (BMWi 2011, 23). Die größten Anteile am inländischen Stromverbrauch von 509 TWh = 1832 PJ (2010) haben: Industrie

(44%), Haushalte (28%) und Handel und Gewerbe (15%). Die größten Zuwächse des Stromverbrauchs im Zeitraum 1991-2010 weisen Handel und Gewerbe (+32%) und Haushalte (+15%) auf (BMW 2011, 21).

Die Anteile der Verbrauchsbereiche am Endenergieverbrauch betragen 2010: Haushalte (29%), Verkehr (28%), Industrie (28%) und Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD, 15%) (vgl. Abbildung 6). Im Vergleich zu 1990 haben die Anteile von Haushalten und Verkehr leicht zugenommen, während die Anteile von Industrie und GHD leicht abgenommen haben (BMW 2011, 5).

Energiepreise und -kosten

Die Einfuhrpreise wichtiger Energieträger sind zwischen 1998 und 2010 stark angestiegen: für Rohöl um +513% auf 446 Euro/t = 10,65 Euro/GJ, für Erdgas um +292% auf 5,73 Euro/GJ und für Steinkohle um +228% auf 85 Euro/t SKE = 2,90 Euro/GJ (BMW 2011, 26). Dabei ist der Erdölpreis nach wie vor der Leitpreis für viele andere Energieprodukte (BMW 2010, 12).

Energie und Umwelt

Die gesamten THG-Emissionen (inklusive Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft) betragen 988 Mio. t CO₂-Äquivalent (2008), die THG-Emissionen ohne Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft betragen 959 Mio. t CO₂-Äquivalent. Gegenüber 1990 sind die THG-Emissionen ohne Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft um 22% gesunken (Kyoto-Ziel: 2008-2012 -21% gegenüber 1990). Die Anteile der wichtigsten Treibhausgase an den gesamten THG-Emissionen betragen 2008: CO₂ (87%), N₂O (6%) und CH₄ (5%). Gegenüber 1990 ist v. a. der Anteil von CH₄ gesunken (BMWI 2011, 10).

Die Anteile der wichtigsten Quellkategorien an den gesamten THG-Emissionen betragen 2008: Energie (78%), Industrieprozesse (11%) und Landwirtschaft (7%).

Die Anteile der wichtigsten Quellkategorien haben sich seit 1990 nicht wesentlich verändert (BMWI 2011, 10).

5. Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Stromproduktion in Deutschland

Übersicht

In diesem Kapitel werden die Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Stromproduktion durch thermische Kraftwerke, Wasserkraftwerke und Windkraftanlagen in Deutschland abgeschätzt. Der Grundansatz besteht darin, das derzeitige System der Stromproduktion dieser drei Bereiche simulierten Klimaänderungen auszusetzen. Dabei werden sogenannte stratifizierte Klimaszenarien genutzt, die jeweils einer Erhöhung der mittleren Lufttemperatur um 0 K, +1 K, +2 K bzw. +3 K bis 2055 gegenüber 2003 entsprechen. Für die Stromproduktion durch thermische Kraftwerke und Wasserkraftwerke werden mit dem statistischen regionalen Klimamodell STAR erzeugte Klimadaten genutzt. Für die Abschätzung des Windkraftpotenzials wird hingegen auf Ergebnisse des dynamischen regionalen Klimamodells CCLM zurückgegriffen.

Stromproduktion durch thermische (kalorische) Kraftwerke

Einführung

Die Auswirkungen des Klimawandels auf thermische Kraftwerke wurden weltweit bereits in zahlreichen Studien untersucht. Wassermangel und rechtliche Einschränkungen hinsichtlich der zugelassenen Aufwärmspanne führen zu ökonomischen Verlusten bei den Kraftwerksbetreibern. So analysieren Feeley und Koautoren (2008) Szenarien für thermische Kraftwerke mit unterschiedlichen Kühlsystemen und unterschiedlicher Energiebedarfsentwicklung in den USA. Je nach Szenario steigt der Wasserbedarf bis 2030 um bis zu 30% an. Koch und Koautoren (2012) analysieren Szenarien mit unterschiedlicher ökonomischer Entwicklung und entsprechend 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. Förster und Lilliestam (2010) simulieren die Auswirkungen erhöhter Wassertemperaturen und verminderter Abflüsse am Beispiel des Atomkraftwerks (AKW) Krümmel und erhalten je nach Szenario einen Rückgang der durchschnittlichen jährlichen Auslastung um bis zu 11,8%. Linnerud und Koautoren (2011) leiten aus einer statistischen Analyse

vorhandener Daten die Auswirkungen der klimatischen Variabilität auf Atomkraftwerke in Europa ab. Dabei stellen sie fest, dass eine Luft-Temperaturerhöhung um 1°C – im Mittel über alle Kraftwerke – aufgrund der sich verschärfenden Kühlwasserproblematik und unter Zugrundelegung der bestehenden wasserrechtlichen Vorgaben zu einem Rückgang der Jahresproduktion um etwa 2% führt; zusätzlich sinkt allein aufgrund der steigenden Temperatur die thermische Effizienz um 0,5%. Beim Absinken der thermischen Effizienz ist allerdings u. a. die „Ausgangstemperatur“ von großer Bedeutung: die thermische Effizienz sinkt umso stärker, je höher die Ausgangstemperatur (da Linnerud und Koautoren keine hohen Temperaturen betrachten, gilt ihre Abschätzung allenfalls für niedrige Temperaturen). Van Vliet und Koautoren (2012) simulieren für den Sommer einen durchschnittlichen Rückgang der Kapazität thermischer Kraftwerke um 6,3 bis 19% in Europa (wo sie insgesamt 35 Kraftwerke erfassen, allerdings keine deutschen) und um 4,4 bis 16% in den USA in Abhängigkeit vom Kühlsystem und dem verwendeten Klimaszenario für den Zeitraum 2031-2060 gegenüber der Periode 1971-2000.

Diese Studien belegen, dass die Frage nach den Auswirkungen des Klimawandels auf thermische Kraftwerke in den letzten Jahren erheblich an Bedeutung gewonnen

hat. Eine umfassende quantitative Analyse für ganz Deutschland wurde bislang allerdings noch nicht durchgeführt. Dies wird in der vorliegenden Studie erstmals versucht.

Die thermischen Kraftwerke stellen einen zentralen Punkt in der Betrachtung der Klimawirkungen auf die Stromproduktion dar. Frischwasser wird in Kraftwerken vorwiegend für Kühlzwecke benötigt, der Wasserbedarf für andere Nutzungen ist relativ gering. Die Menge des benötigten Kühlwassers hängt maßgeblich von der anfallenden Abwärmemenge sowie vom eingesetzten Kühlverfahren ab. Die abzuführende Wärmemenge wird wesentlich von anlagenspezifischen Faktoren wie z. B. Brennstoffausnutzungsgrad und Auslastung des Kraftwerks bestimmt. Der Abtransport des nicht als Nah- oder Fernwärme genutzten Teils der Abwärme erfolgt grundsätzlich über Kühlsysteme, bei denen vorwiegend Wasser als Kühlmedium eingesetzt wird. Zu unterscheiden ist dabei zwischen folgenden Kühlverfahren:

- a. bei der Durchlaufkühlung wird das entnommene Wasser zur Kühlung im Kondensator benutzt und danach wieder vollständig an das Einleitgewässer abgeführt (der Wasserbedarf für diese Kühlsysteme ist sehr hoch);

- b. bei der Ablaufkühlung wird das Kühlwasser vor der Rückleitung in einem Kühlturm abgesenkt, wodurch sich die Wärmebelastung des entsprechenden Gewässers verringert;
- c. bei der Kreislaufkühlung wird das im Kondensator erwärmte Wasser in einem Kühlturm rückgekühlt und wieder dem Kondensator zugeleitet (der Wasserbedarf für diese Kühlsysteme ist gering).

Bei den aufgeführten Kühlverfahren wird das Gewässer entweder durch erhöhte Wassertemperaturen (Durchlaufkühlung) oder hohe Verdunstungsverluste (Betrieb mit Kühlturm) belastet. Bei der Analyse der Wassernutzung thermischer Kraftwerke sind – neben kraftwerksspezifischen Faktoren – die Umweltbedingungen sowie die gesetzlichen Bestimmungen hinsichtlich der für den Standort gültigen Grenzwerte zur maximal zulässigen Wasserentnahmemenge, zur Kühlwasseraufwärmung und zur Einleit- bzw. Mischtemperatur zu berücksichtigen. Da Strömung, Wassertiefe und weitere Faktoren entlang der Flüsse unterschiedlich sind, gelten für Kraftwerke verschiedene Grenzwerte. Steigt die Temperatur des Gewässers, so muss, falls die vorgeschriebene maximale Aufwärmspanne 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.

Unterschiedliche Kühlsysteme, Umweltbedingungen, gesetzliche Vorgaben u. a. führen zu unterschiedlichen Werten für Wasserbedarf und Wasserverbrauch (Entnahme minus Rückleitung). Tabelle 1 zeigt beispielhaft die – teilweise sehr großen – Spannbreiten der Werte für thermische Kraftwerke im Elbegebiet (basierend auf Erhebungen im Projekt des BMBF GLOWA-Elbe). Eine genaue Abschätzung der Klimafolgen erfordert daher eine Einzelfallbetrachtung. Falls diese z. B. aufgrund mangelnder Daten nicht möglich ist, kann nur eine grobe Abschätzung erfolgen.

Tabelle 1: Kühlwasserbedarf thermischer Kraftwerke im Elbegebiet unterteilt nach Kühlsystemen (basierend auf Erhebungen innerhalb des Projekts GLOWA Elbe).

Brennstoff (Anzahl der KW)	Kühlsystem-Typ	Wasserbedarf (m ³ /s/GWh)		Wasserverbrauch (m ³ /s/GWh)	
		Min	Max	Min	Max
Braunkohle/ Steinkohle (3)	Durchlauf	24,15	38,62	0,121	0,193
Braunkohle/ Steinkohle (2)	Ablauf	10,93	24,89	0,055	0,124
Braunkohle/ Steinkohle (20)	Kreislauf	0,430	1,427	0,194	0,928
Uran (1)	Durchlauf	46,43		0,232	
Uran (-)	Ablauf				
Uran (1)	Kreislauf	0,833		0,583	
Erdgas/-Öl (6)	Durchlauf	2,88	21,03	0,014	7,35
Erdgas/-Öl (-)	Ablauf				
Erdgas/-Öl (1)	Kreislauf	0,496		0,422	

Daten und Methoden

Zunächst wurden entsprechend dem von Koch und Grünwald (2010) beschriebenen Verfahren für die Standorte der 17 Atomkraftwerke (AKW) in Deutschland Wassertemperaturmodelle parametrisiert bzw. wo notwendig Erweiterungen vorgenommen. Seitens des FZ Jülich wurden über einen Unterauftrag Funktionen zu Wasserbedarf und wassertemperaturabhängigen Produktionseinschränkungen für die AKW bereitgestellt. Diese sind abhängig sowohl vom Kühlsystem (Durchlauf-, Ablauf- oder Kreislaufkühlung) als auch von der

Wassertemperatur bzw. den gesetzlichen Vorgaben zu Aufwärmspanne, Einleittemperatur usw. Neben diesem datenaufwändigen Ansatz wird ein vereinfachter Ansatz genutzt, bei dem nur Wassertemperatur und Kühlsystem berücksichtigt werden. Da der vereinfachte Ansatz zumindest für Mittelwertbetrachtungen ausreichend genaue Ergebnisse liefert, kann dieser auf andere thermische Kraftwerke (Kohle, Gas usw.) übertragen werden, um so Kühlsysteme bzw. Regionen (Flussgebiete) auszuweisen, die besonders anfällig gegenüber dem Klimawandel sind. Dabei müssen Kraftwerke mit autarker Wasserversorgung, z. B. Kraftwerke im Lausitzer Revier, die Sümpfungswasser aus Tagebauen nutzen, ausgeschlossen werden. Gleiches gilt für Kraftwerke in stark bewirtschafteten, stauregulierten Gebieten wie z. B. in Berlin sowie für Kraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), bei denen ein Großteil der Abwärme für Heiz- oder Produktionszwecke genutzt wird.

Das UBA stellte uns eine Tabelle mit Datensätzen zu thermischen Kraftwerken in Deutschland zur Verfügung (Stand 2007). Die installierte Kapazität der in dieser Tabelle erfassten thermischen Kraftwerke beträgt 100 692 MW (Brutto). Zieht man die Leistung der Kraftwerke ab, die 2010 bereits still gelegt bzw. noch im Bau waren oder kein Kühlwasser verwenden, verbleiben 91 565 MW. Von diesen entfallen

22 333 MW (24%) auf Kraftwerke mit Durchlaufkühlung und 69 232 MW (76%) auf Kraftwerke mit Kühlturm. Die installierte AKW-Leistung beträgt insgesamt 20 470 MW auch hier entfallen 24% auf Durchlaufkühlung und 76% auf Kühltürme.

Neben der UBA-Kraftwerkstabelle wurden v. a. Angaben von Strauch (2011) verwendet, um die Kühlsysteme der Kraftwerke bzw. die Herkunft des Kühlwassers zu kategorisieren. Kraftwerke, die Sumpfungswasser oder Grundwasser nutzen, wurden ausgeschlossen. Auch Kraftwerke mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) wurden ausgeschlossen, da diese teilweise nur im Winter voll gefahren werden und ein Großteil der Abwärme für Heiz- oder Produktionszwecke genutzt wird. Sie sind somit weniger anfällig gegenüber erhöhten Wassertemperaturen. Dies betraf etwa 40% (36 626 MW) der installierten Kapazität. Weiterhin mussten Kraftwerke ausgeschlossen werden, die an Gewässern liegen, für die keine Wassertemperaturen vorlagen bzw. die zu weit von Messstellen entfernt liegen. Dies betraf weitere 10% der installierten Kapazität.

Von der verbleibenden installierten Leistung entfallen 16 792 MW (75% der 22 333 MW) auf Kraftwerke mit Durchlaufkühlung und 28 829 MW (42% der 69 232 MW) auf Kraftwerke mit Kühlturm. Die deutliche Differenz beim verbleibenden prozentualen Anteil zwischen Kraftwerken mit Durchlaufkühlung und

Kraftwerken mit Kühlturm resultiert daraus, dass Kraftwerke mit Durchlaufkühlung wegen des hohen Kühlwasserbedarfs eher an großen Flüssen liegen und Kraftwerke mit Kühltürmen häufiger Sumpfungswasser bzw. Grundwasser nutzen. Insgesamt beträgt die berücksichtigte installierte Kapazität 45 621 MW, also etwa 50% der gesamten installierten Kapazität (91 565 MW).

Atomkraftwerke

Die Atomkraftwerke werden im Bestand von 2010 betrachtet. Für Atomkraftwerke sind mehr technische Daten öffentlich zugänglich als für andere Kraftwerkstypen und zudem werden Daten zu Einschränkungen der Produktion, z. B. aufgrund hoher Wassertemperaturen, regelmäßig veröffentlicht (vgl. Jahresberichte des Deutschen Atomforums). Sie bieten sich somit als Ausgangspunkt für die Abschätzung der Klimawirkungen auf thermische Kraftwerke an.

Beschreibung des Modellansatzes

Der Frischwasserbedarf von thermischen Kraftwerken lässt sich durch folgende Gleichung abschätzen (vgl. Koch/Vögele 2009):

$$Q^F = \frac{KW \cdot h \cdot 3,6 \cdot \frac{1 - \eta_{total}}{\eta_{elec}} \cdot (1 - \alpha) \cdot (1 - \beta) \cdot \omega}{\varrho \cdot c \cdot AS} \cdot EZ \quad (1)$$

mit	Q^F	Frischwasserbedarf im Betrachtungszeitraum [m ³]
	KW	installierte Leistung [kW]
	h	Auslastung im Betrachtungszeitraum in Volllaststunden [h]
	3,6	Umrechnungsfaktor von kWh in MJ
	η_{total}	Brennstoffausnutzungsgrad der Anlage [%]
	η_{elec}	elektrischer Wirkungsgrad [%]
	α	Korrekturfaktor, mit dem die Abwärme erfasst wird, die nicht über das Kühlmedium Wasser abgeführt wird [%]
	β	Anteil der Abwärme, die über den Kühlturm abgegeben wird [%]
	ω	jahreszeitlicher Korrekturfaktor, der den Einfluss von Lufttemperatur und -feuchtigkeit berücksichtigt [-]
	ϱ	Dichte des Wassers [t/m ³]
	c	spezifische Wärmekapazität des Wassers [MJ/t K]
	AS	zulässige Aufwärmspanne des Kühlwassers [K]
	EZ	Eindickungszahl [-]

Der Bedarf an Frischwasser hängt grundsätzlich von der Menge der anfallenden Abwärme ab. Diese kann aus der produzierten Strommenge und den Brennstoffausnutzungsgraden ermittelt werden. Ein Teil der anfallenden Abwärme wird direkt oder über Nebenkühlstellen o. ä. an die Umwelt abgegeben (Korrekturterm α). Wird ein Kühlturm eingesetzt, so wird ein Großteil der Abwärme über diesen abgeführt (Korrekturterm β). Der Term ω berücksichtigt den Einfluss von Lufttemperatur und -feuchtigkeit auf die Verdunstungsmenge.

Entsprechend Gleichung (1) können für jedes AKW auf der Basis der Tageswerte der Lufttemperatur und -feuchte aus den STAR-Klimaszenarien die Bedarfswerte berechnet werden. Die Entnahmemenge kann bei hohen Wassertemperaturen solange erhöht werden, bis die maximal erlaubte Entnahmemenge bzw. die maximale Verlustmenge (Verdunstung über Kühlturm) erreicht ist.

Normalerweise sinkt bei einer Leistungsreduktion auch der Wirkungsgrad. Dieser Effekt wird durch die Einbeziehung eines zusätzlichen Korrekturfaktors λ berücksichtigt, der durch die Vereinigung der Großkesselbesitzer (VGB 2004) abgeschätzt wurde.

Durch Umformen von Gleichung (1) erhält man:

$$KW = \frac{Q^F \cdot g \cdot c \cdot AS}{h \cdot 3.6 \cdot \frac{1 - \eta_{total}}{\eta_{elec}} \cdot \lambda \cdot (1 - \alpha) \cdot (1 - \beta) \cdot \varpi \cdot EZ} \quad (2)$$

Mit dieser Gleichung lassen sich die Auswirkungen von Beschränkungen hinsichtlich der verfügbaren Wassermenge und der zulässigen Aufwärmspanne auf die Produktion abschätzen. Die maximal verfügbare Kapazität ergibt sich dabei durch:

$$KW_{max} = \frac{Q_{max}^F \cdot g \cdot c \cdot AS_{max}}{h \cdot 3.6 \cdot \frac{1 - \eta_{total}}{\eta_{elec}} \cdot \lambda \cdot (1 - \alpha) \cdot (1 - \beta) \cdot \varpi \cdot EZ} \quad (3)$$

mit KW_{max} verfügbare Leistung [kW]

Q_{max}^F maximal zulässige Frischwasserentnahme

AS_{max} maximal zulässige Aufwärmspanne

Für Kraftwerke mit Durchlaufkühlung vereinfacht sich Gleichung (3) zu:

$$KW_{max} = \frac{Q_{max}^F \cdot g \cdot c \cdot AS_{max}}{h \cdot 3.6 \cdot \frac{1 - \eta_{total}}{\eta_{elec}} \cdot \lambda \cdot (1 - \alpha)} \quad (4)$$

Mit dem öko-hydrologischen Modell SWIM (*Soil and Water Integrated Model*) wurden für die stratifizierte Klimaszenarien Abflüsse simuliert (dabei lag jeweils die im Rahmen vom Projekt CORINE erfasste Landnutzung von 2006 zugrunde; eine knappe Beschreibung von SWIM findet sich in Anhang C). Für jeden Standort wird unter Nutzung der Lufttemperatur und, falls nötig, des Abflusses die

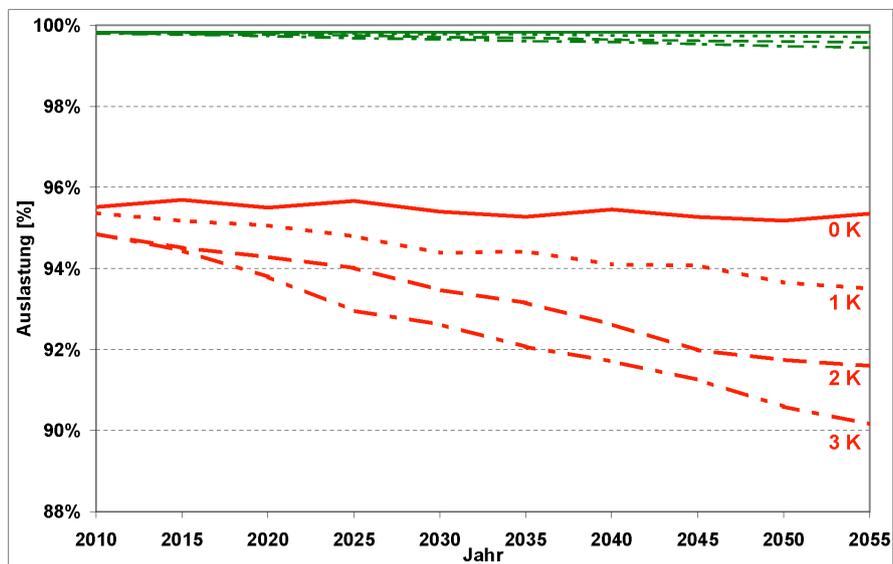
Wassertemperatur simuliert. Wenn die Wassertemperatur oberhalb des Grenzwerts für die Mischwassertemperatur liegt (für die meisten Gewässer beträgt dieser 28°C (Cyprinidengewässer), für die Isar als Salmonidengewässer gelten deutlich niedrigere Werte), muss das AKW vollständig heruntergefahren werden. Ausnahmeregelungen, wie sie z. B. 2003 und 2006 teilweise genehmigt wurden, werden nicht berücksichtigt. Bei niedrigeren Wassertemperaturen wird unter Berücksichtigung der maximal zulässigen Aufwärmspanne die maximale Mischwassertemperatur und aus dieser die maximale Temperatur des Rückleitwassers berechnet. Aus der nach der Wasserentnahme im Fluss verbleibenden Wassermenge, der Menge des Rückleitwassers, der Wassertemperatur oberhalb der Entnahme bzw. des Rückleitwassers wird die aktuelle Mischwassertemperatur berechnet. Dabei werden die genannten Grenzwerte für Aufwärmspanne und Mischwassertemperatur berücksichtigt. Bei Überschreitung von Grenzwerten erfolgt eine Reduktion der Wasserentnahme bis der entsprechende Grenzwert unterschritten wird. Mittels dieses Reduktionsfaktors und des Korrekturfaktors λ (vgl. Gleichung (2)) wird für den entsprechenden Tag die Produktionsreduktion berechnet. Der Ansatz wurde für ausgewählte Atomkraftwerke getestet und validiert (vgl. Anhang D).

Ergebnisse für die AKW

Abbildung 8 zeigt die Auslastung aller AKW für die stratifizierte Klimaszenarien (Abbildung 9 zeigt analog dazu die Jahresproduktion). Dabei sind sowohl Mittelwerte (gebildet aus den Ergebnissen der 100 STAR-Realisierungen) als auch „mittlere Minima“ dargestellt. Letztere stellen eine Extremwertbetrachtung dar: das „mittlere Minimum“ ist der Mittelwert der minimalen Tageswerte der Produktion aller AKW, die für jedes Jahr der jeweiligen 5-Jahres-Periode (z. B. die Jahre 2008 bis 2012 für den 2010er Wert) und jede der 100 Realisierungen ermittelt werden (für jede 5-Jahres-Periode liegen also 500 Jahresgänge der Produktion vor, für die jeweils das Jahres-Minimum bestimmt wird, und diese 500 Minima werden dann gemittelt). Wie in Abbildung 8 dargestellt, liegt die mittlere Jahresauslastung für alle Klimaszenarien über 99%, während sich die mittleren Minima der Auslastung für 2055 zwischen 90% und über 95% bewegen, wobei die Werte mit steigender Temperatur deutlich abnehmen. Abbildung 9 zeigt dies analog für die Jahresproduktion. Für einzelne Kraftwerke kann allerdings auch die mittlere Jahresauslastung mit steigender Temperatur stärker abnehmen, wie dies am Beispiel des AKW Unterweser in Anhang D dargestellt ist (dort sinkt die mittlere

Jahresauslastung im 3K-Szenario bis 2055 auf 95%). Zusätzlich wurde der absolut niedrigste Tageswert aus allen Jahrgängen im Szenariozeitraum und allen Realisierungen ermittelt.

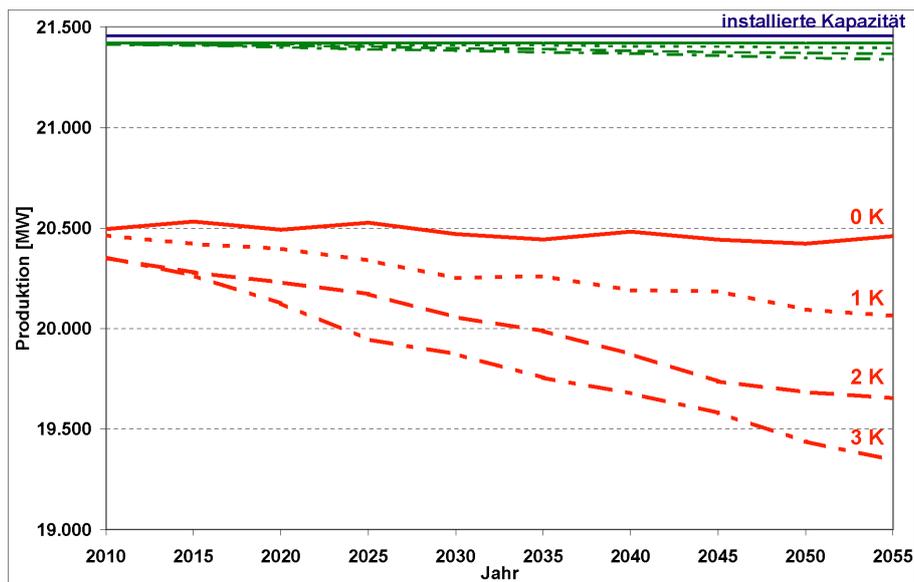
Abbildung 9: Auslastung der AKW für die stratifizierte Klimaszenarien, Mittelwerte (grün) und „mittlere Minima“ (rot) aus 100 STAR-Realisierungen.



Im 0 K-Szenario liegt dieser niedrigste Tageswert der Auslastung aller AKW bei 80%, im 1K-Szenario bei 77%, im 2K-Szenario bei 72% und im 3K-Szenario bei 64% (stets im Mittel über alle AKW, d.h. die Auslastung verteilt sich in der Regel unterschiedlich auf die einzelnen Kraftwerke). Diese extrem niedrigen Werte ergeben sich für Tage, an denen in einigen Flüssen bzw. Flussabschnitten, z. B. im Rhein,

eine Wassertemperatur von 28°C erreicht wird und die dort liegenden Kraftwerke (theoretisch) vollständig heruntergefahren werden müssen.

Abbildung 10: Jahresproduktion der AKW für die stratifizierten Klimaszenarien, Mittelwerte (grün) und „mittlere Minima“ (rot) aus 100 STAR-Realisierungen.



Gesamter thermischer Kraftwerkspark

Methode

Der bislang dargestellte „komplexe“ Modellansatz erlaubt eine erhöhte Wasserentnahme bei hohen Wassertemperaturen, um die Abwärme über eine größere Wassermenge abzuführen. Der Ansatz erfordert allerdings umfangreiche Daten, die nicht für alle thermischen Kraftwerke zur Verfügung standen. Um den gesamten thermischen Kraftwerkspark zu simulieren, musste der Ansatz also vereinfacht werden.

Der „vereinfachte“ Ansatz geht davon aus, dass die Produktion ab einem bestimmten Schwellwert der Wassertemperatur eingeschränkt werden muss, ohne die Möglichkeit der Erhöhung der Entnahmemenge. Entsprechend geht nur die Wassertemperatur in die Berechnung der Produktionseinschränkungen ein. Für Kraftwerke mit Durchlaufkühlung wurden – in Cyprinidengewässern – oberhalb von etwa 23,2°C Wassertemperatur Produktionseinschränkungen angenommen. Der Schwellwert von 23,2°C entspricht auch in etwa dem von van Vliet und Koautoren (2012) angenommenen. Kraftwerke mit Kühlturm (Ablauf- oder Kreislaufkühlung) sind im Allgemeinen weniger von Produktionseinschränkungen aufgrund hoher Wassertemperaturen oder Niedrigwasser (bzw. zu geringer Wasserverfügbarkeit) betroffen. Für Kraftwerke mit Kühlturm wurden daher oberhalb von 26°C Wassertemperatur Produktionseinschränkungen angenommen, auch wenn in Niedrigwasserperioden Produktionseinschränkungen bereits bei geringeren Wassertemperaturen auftreten können. Für Salmonidengewässer wie z.B. die Isar wurden die niedrigeren Schwellwerte von 20°C (Durchlaufkühlung) bzw. 24°C (Kühlturm) angesetzt. Abbildung 10 illustriert exemplarisch den Verlauf der Produktionsreduktion beim „vereinfachten“ Ansatz für Kraftwerke mit Durchlaufkühlung in Cyprinidengewässern. Die Produktionsreduktions-Funktionen

wurden aus dem komplexen Ansatz in Kombination mit vorhandenen Messdaten abgeleitet.

Abbildung 11: Produktionsreduktion bei Kraftwerken mit Durchlaufkühlung in Cyprinidengewässern in Abhängigkeit vom Tageswert der Wassertemperatur.

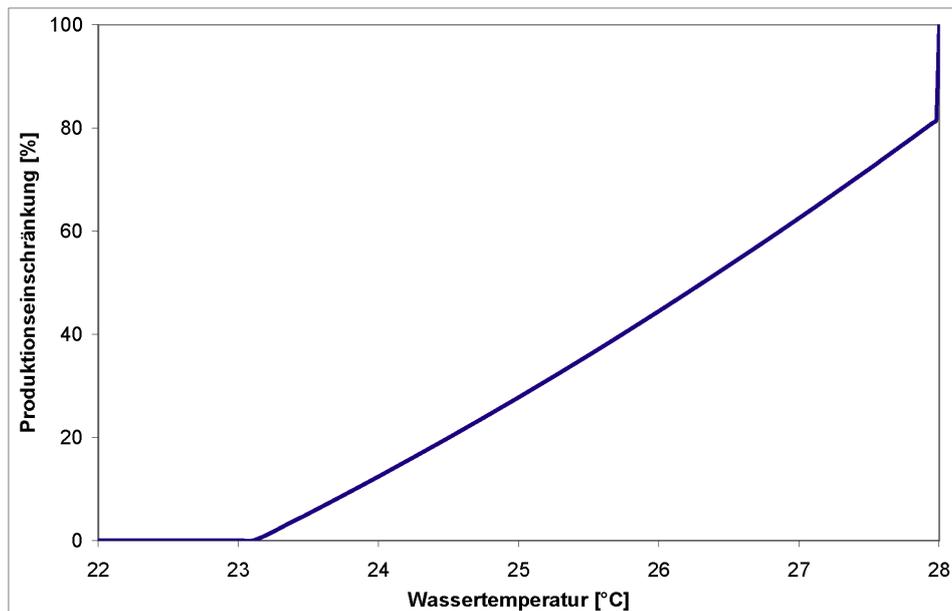


Abbildung 11 zeigt beispielhaft die Jahresauslastung für das AKW Grohnde für die Klimaszenarien unter Verwendung des komplexen Modellansatzes; Abbildung 12 zeigt dasselbe für den vereinfachten Modellansatz.

Abbildung 12: Jahresauslastung des AKW Grohnde, simuliert mit dem komplexen Modell (Mittelwerte und Wiederkehrintervall 100 a).

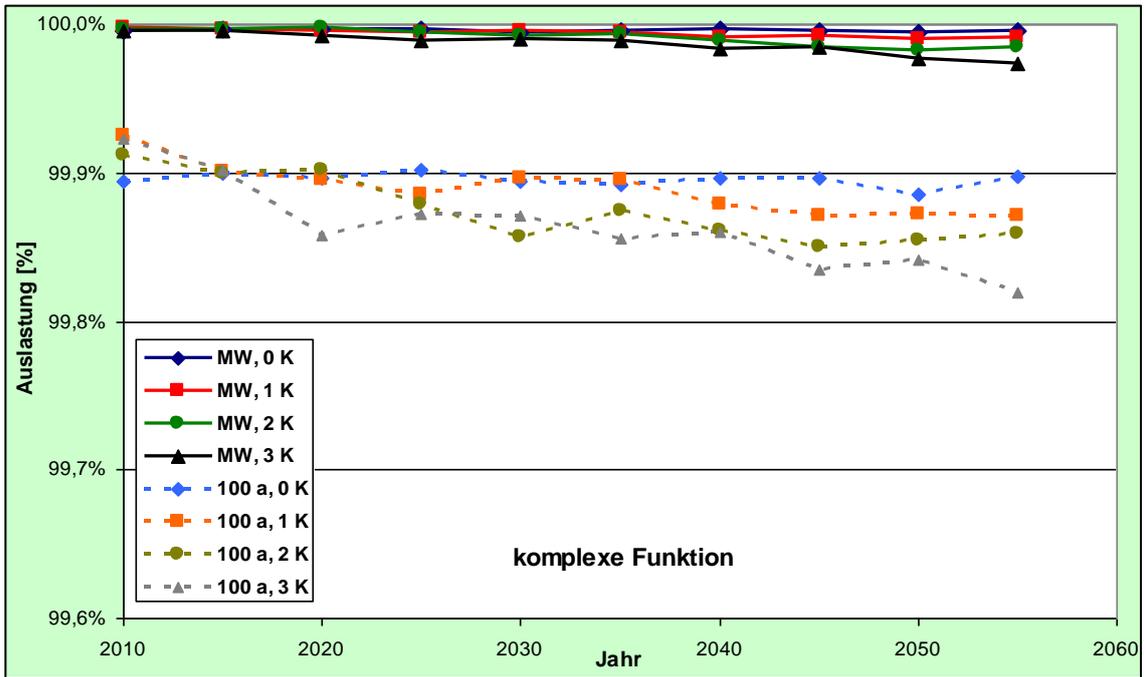
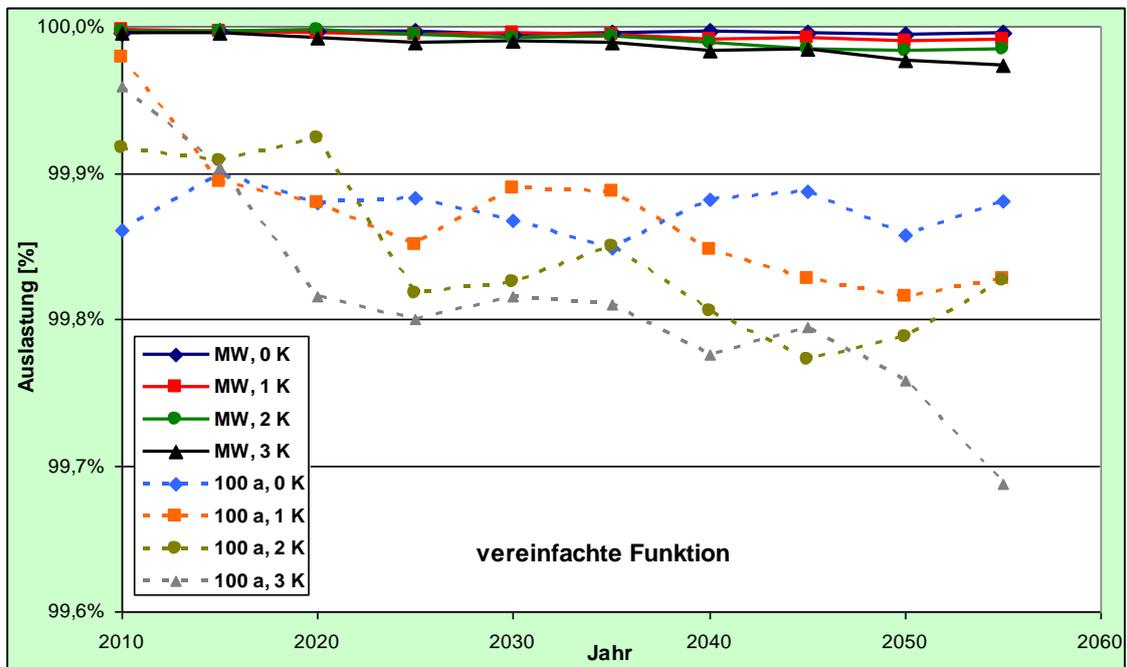


Abbildung 13: Jahresauslastung des AKW Grohnde, simuliert mit dem vereinfachten Modell (Mittelwerte und Wiederkehrintervall 100 a).



Für die Mittelwerte aus den 100 STAR-Realisierungen stimmen die Ergebnisse des komplexen und des vereinfachten Modells sehr gut überein. Bei der Extremwertbetrachtung (Wiederkehrintervall 100 a; dies entspricht dem 1. Perzentil aus den 500 Jahressgängen, die für jede betrachtete 5-Jahres-Periode zur Verfügung stehen) hingegen weichen die Ergebnisse deutlich voneinander ab. Es schien daher nicht gerechtfertigt, das vereinfachte Modell für Extremwertbetrachtungen zu verwenden. Die Bestätigung der Zuverlässigkeit der „vereinfacht gerechneten“ Mittelwert-Ergebnisse für die übrigen AKW ließen es

allerdings gerechtfertigt erscheinen, für die Mittelwerte den vereinfachten Modellansatz für alle thermischen Kraftwerke zu verwenden. Entsprechend wurden Wassertemperaturmodelle für alle Gewässer parametrisiert, an denen sich Kraftwerke befinden. Dabei werden die Wassertemperaturen allerdings nicht für jedes einzelne Kraftwerk, sondern für Flussabschnitte simuliert. Selbstverständlich ist dieses Vorgehen mit höheren Unsicherheiten behaftet als die Simulationen der AKW mit dem komplexen Ansatz und dem an den direkten Standort angepassten Wassertemperaturmodell.

Ergebnisse des vereinfachten Modellansatzes für die thermischen Kraftwerke

Mit dem vereinfachten Modellansatz wurde für alle nicht ausgeschlossenen thermischen Kraftwerke (einschließlich der AKW) eine Abschätzung der Klimawirkungen vorgenommen. Dafür wurde das Wassertemperaturmodell für 65 Pegel bzw. Flussabschnitte, für die gemessene Wassertemperaturen vorlagen, parametrisiert. Abbildung 13 zeigt die Lage der thermischen Kraftwerke inklusive der Unterteilung in Kraftwerke mit Durchlaufkühlung und Kraftwerke mit Kühlturm. Darüber hinaus ist erkennbar, welche Kraftwerke abseits der Fließgewässer mit

Wassertemperaturmessungen liegen und welche z. B. Meerwasser zur Kühlung nutzen.

Abbildungen 14 und 16 zeigen die Ergebnisse des 1K-Szenarios für Kraftwerke mit Durchlaufkühlung und Kraftwerke mit Kühlturm sowie die Modellergebnisse für 2010. Bestimmte Bereiche sind besonders stark betroffen, z. B. das Gebiet Rhein-Main-Neckar. Dort kann die mittlere jährliche Auslastung für Kraftwerke mit Durchlaufkühlung auf bis zu 97% und für Kraftwerke mit Kühlturm auf bis zu 99,8% sinken. Dies würde pro Jahr etwa 18 Tage Stillstand für Kraftwerke mit Durchlaufkühlung bzw. etwa 1 Tag Stillstand für Kraftwerke mit Kühlturm bedeuten.

Im Mittel aller Kraftwerke mit Durchlaufkühlung sinkt die mittlere jährliche Auslastung von 2010 bis 2055 im 1K-Szenario von 99,5% auf 99,1%, für Kraftwerke mit Kühlturm sinkt sie von 99,99% auf 99,97% (vgl. Tabelle 2). Bei einer Jahresproduktion von 147.097 GWh der Kraftwerke mit Durchlaufkühlung würde dies einer Fehlmenge von 730 GWh (2010) und 1.284 GWh (2055) entsprechen. Bei den Kraftwerken mit Kühlturm mit einer Jahresproduktion von 252.542 GWh würde dies einer Fehlmenge von 24 GWh (2010) und 72 GWh (2055) entsprechen.

In den Abbildungen 15 und 17 sind die Ergebnisse des 2K- und des 3K-Szenarios für Kraftwerke mit Durchlaufkühlung und Kraftwerke mit Kühlturm dargestellt. Auch hier zeigt sich die besonders starke Betroffenheit bestimmter Gebiete wie z.B. der Rhein-Main-Neckar-Region. Dort kann die mittlere jährliche Auslastung für Kraftwerke mit Durchlaufkühlung im 2K-Szenario auf bis zu 95% (3K-Szenario 93%) und für Kraftwerke mit Kühlturm auf bis zu 99,6% (3K-Szenario 99,4%) sinken. Die mittlere jährliche Auslastung, Jahresproduktion sowie Fehlmengen für das 2K- und das 3K-Szenario sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Bei den teilweise sehr geringen simulierten Produktionsreduktionen ist zu beachten, dass diese sich auf wenige Tage im Sommer beschränken, an denen die kumulierten Ausfälle durchaus erheblich sein können, wie die Abbildungen in Anhang D exemplarisch für die AKW zeigen.

Tabelle 2: Mittlere Jahresproduktion, mittlere Jahresauslastung und mittlere jährliche Fehlmengen der thermischen Kraftwerke für 2010 und – unter drei verschiedenen Klimaszenarien – für 2055 (unterteilt nach Kühlsystemen und in Summe).

thermische Kraftwerke mit Durchlaufkühlung

inst. Leistung [MW]	16.792	2010	Szen. +1K	Szen. +2K	Szen. +3K
Produktion [MW]		16.709	16.645	16.558	16.476
Auslastung		99,5%	99,1%	98,6%	98,1%
relative Änderung [%]			-0,4%	-0,9%	-1,4%
Fehlmenge [GWh/a]		-730,0	-1.284,3	-2.053,0	-2.763,1

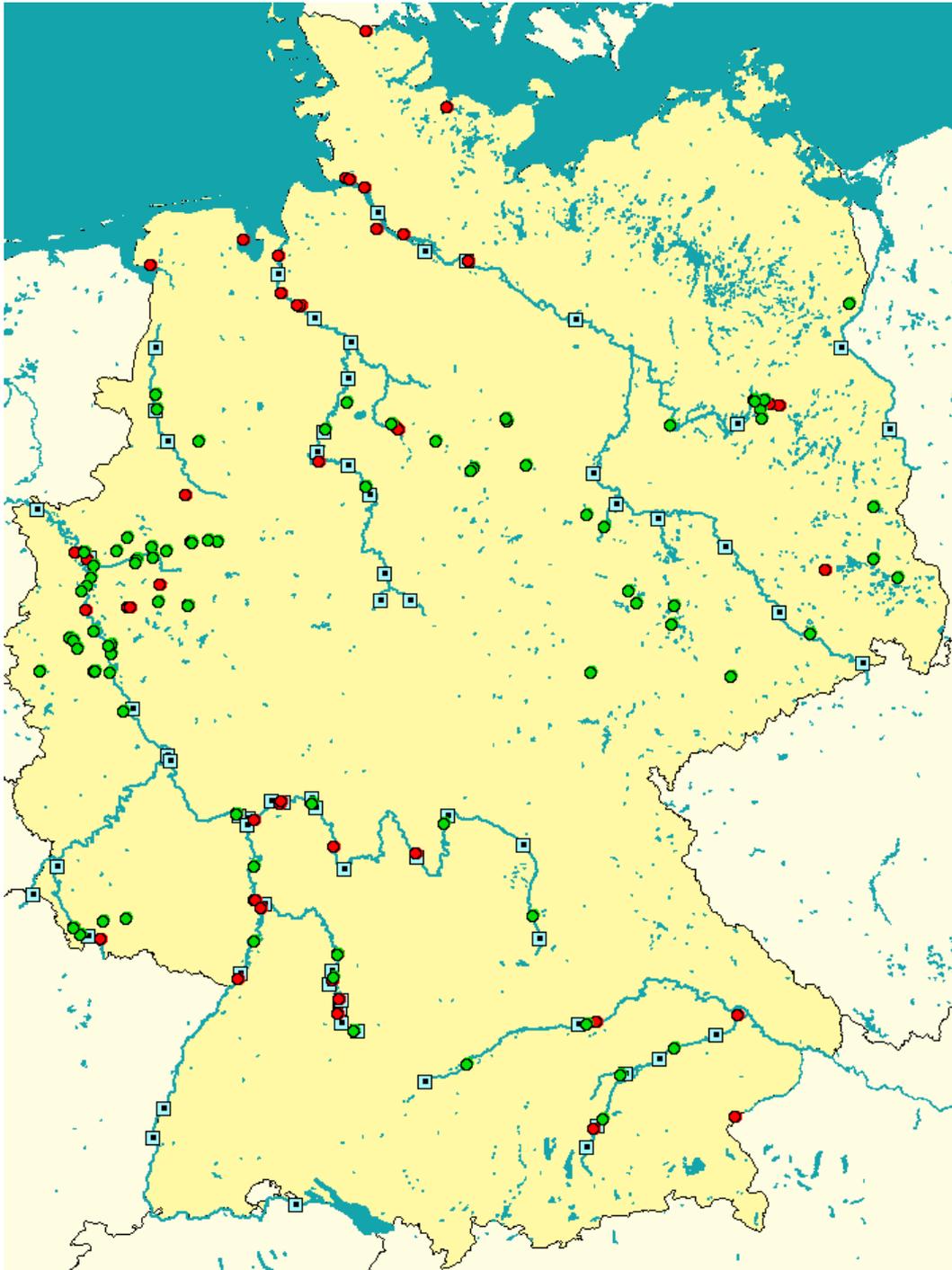
thermische Kraftwerke mit Kühlturm

inst. Leistung [MW]	28.829	2010	Szen. +1K	Szen. +2K	Szen. +3K
Produktion [MW]		28.826	28.821	28.814	28.807
Auslastung		99,99%	99,97%	99,95%	99,92%
relative Änderung [%]			-0,02%	-0,04%	-0,07%
Fehlmenge [GWh/a]		-23,8	-72,4	-130,3	-196,7

Summe thermische Kraftwerke

inst. Leistung [MW]	45.621	2010	Szen. +1K	Szen. +2K	Szen. +3K
Produktion [MW]		45.535	45.466	45.372	45.283
Auslastung		99,8%	99,7%	99,5%	99,3%
relative Änderung [%]			-0,15%	-0,36%	-0,55%
Fehlmenge [GWh/a]		-753,8	-1.356,7	-2.183,3	-2.959,8

Abbildung 14: Lage der Wassertemperaturpegel (hellblaue Quadrate) und Kraftwerke mit Durchlaufkühlung (rote Kreise) und mit Kühlturm (grüne Kreise).



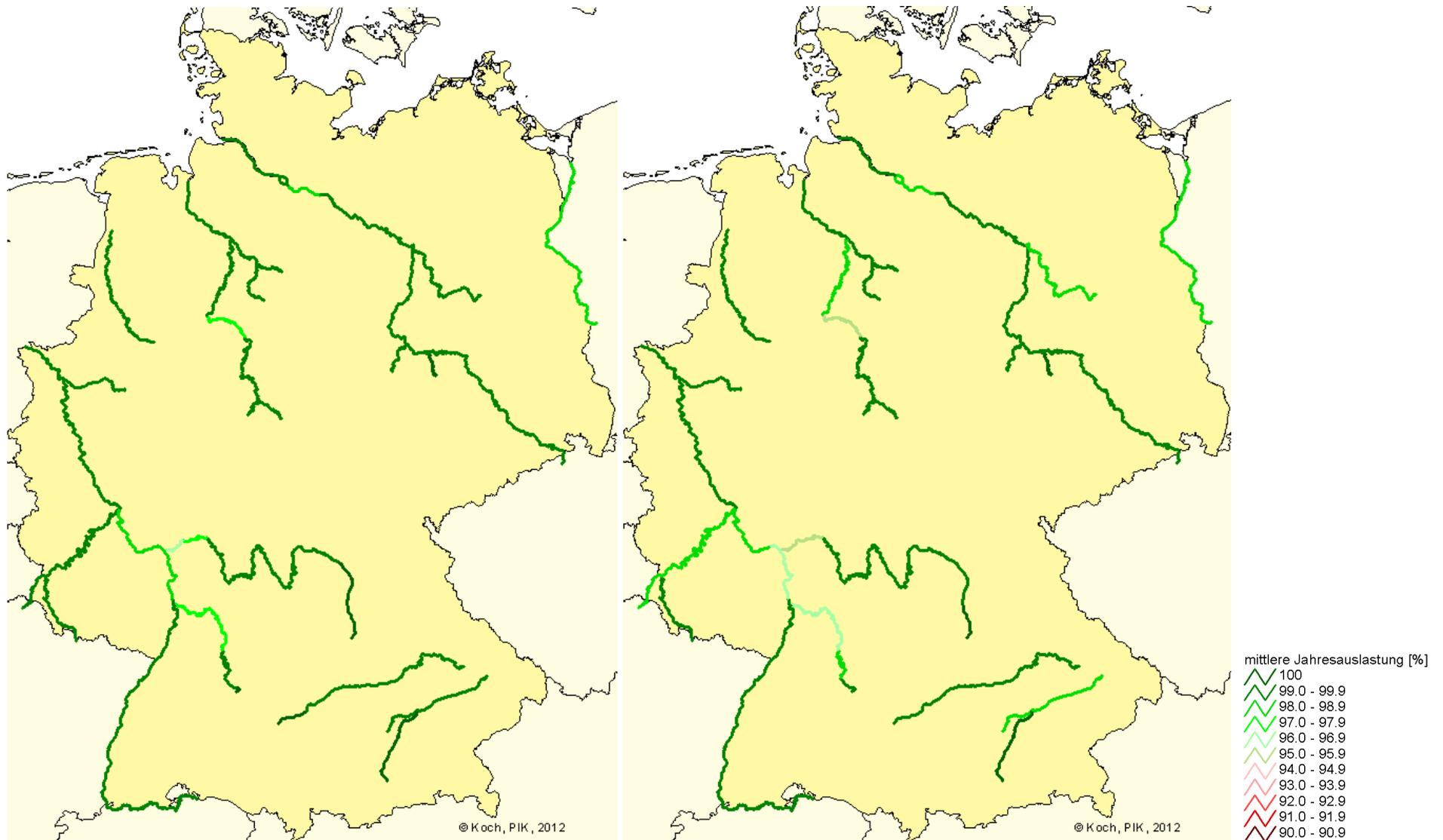


Abbildung 15: Mittlere Jahresauslastung thermischer Kraftwerke mit Durchlaufkühlung für 2010 (links) und unter dem 1K-Szenario für 2055 (rechts).

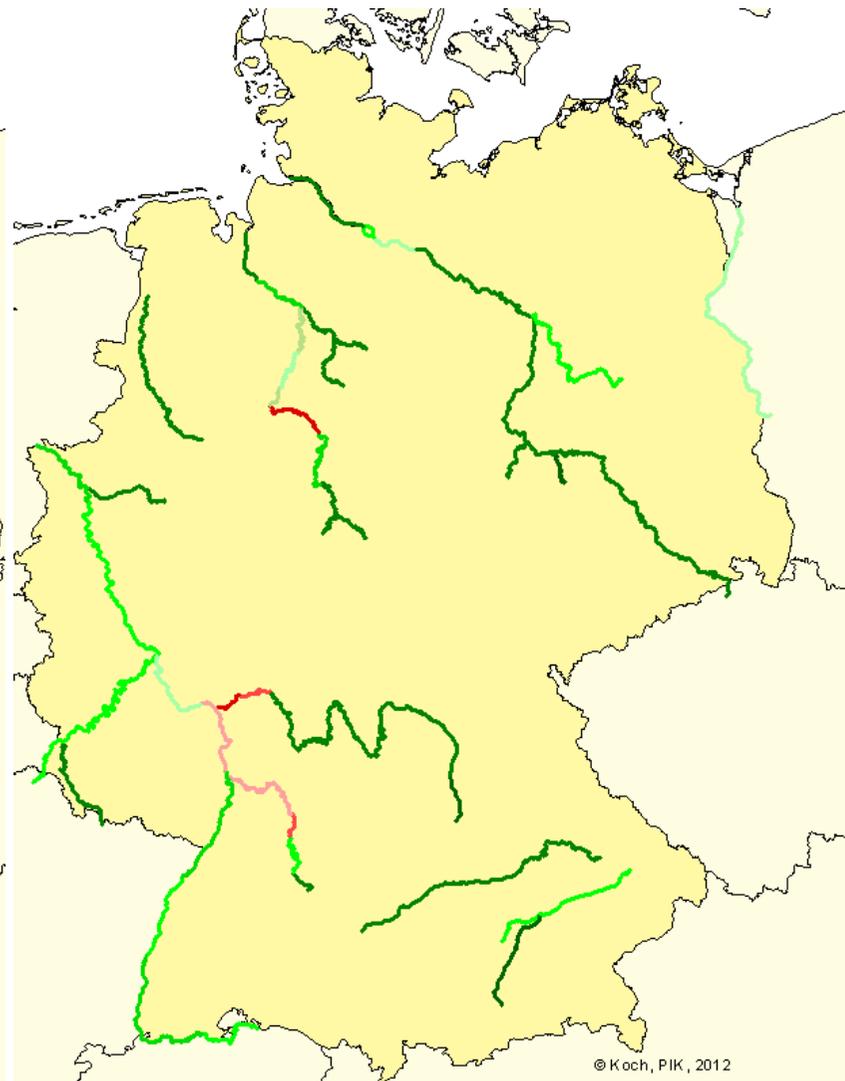
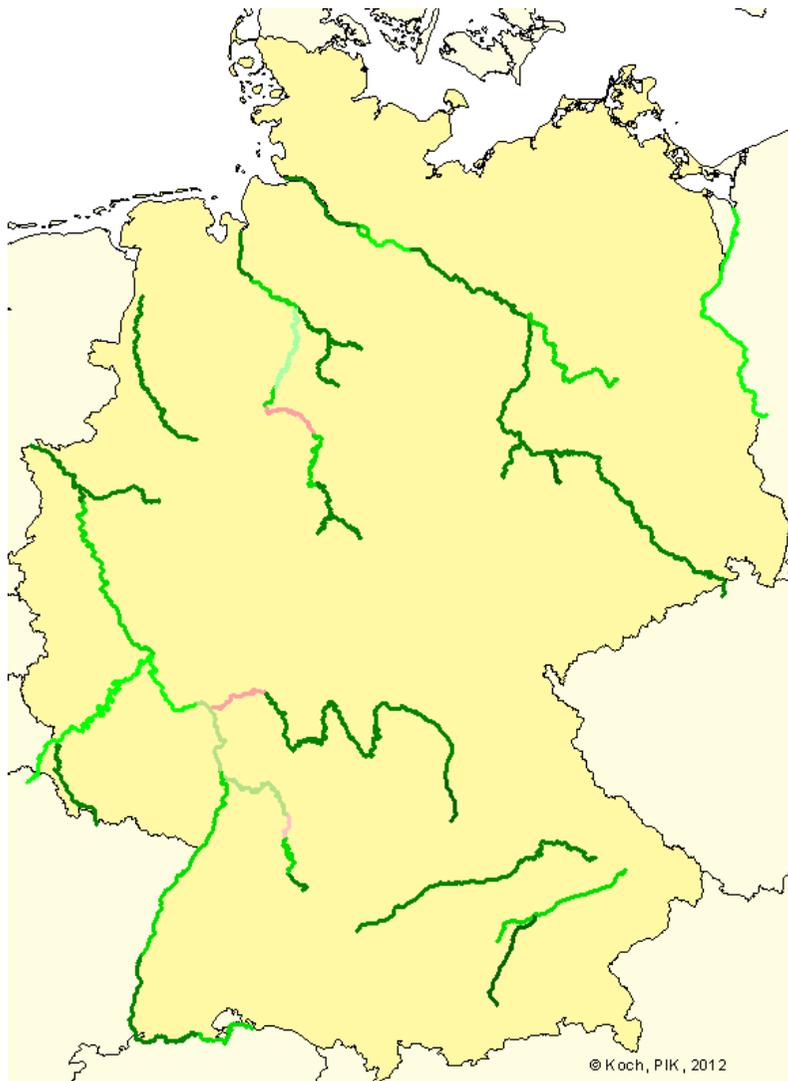


Abbildung 16: Mittlere Jahresauslastung thermischer Kraftwerke mit Durchlaufkühlung unter dem 2K-Szenario (links) und dem 3K-Szenario (rechts) für 2055.

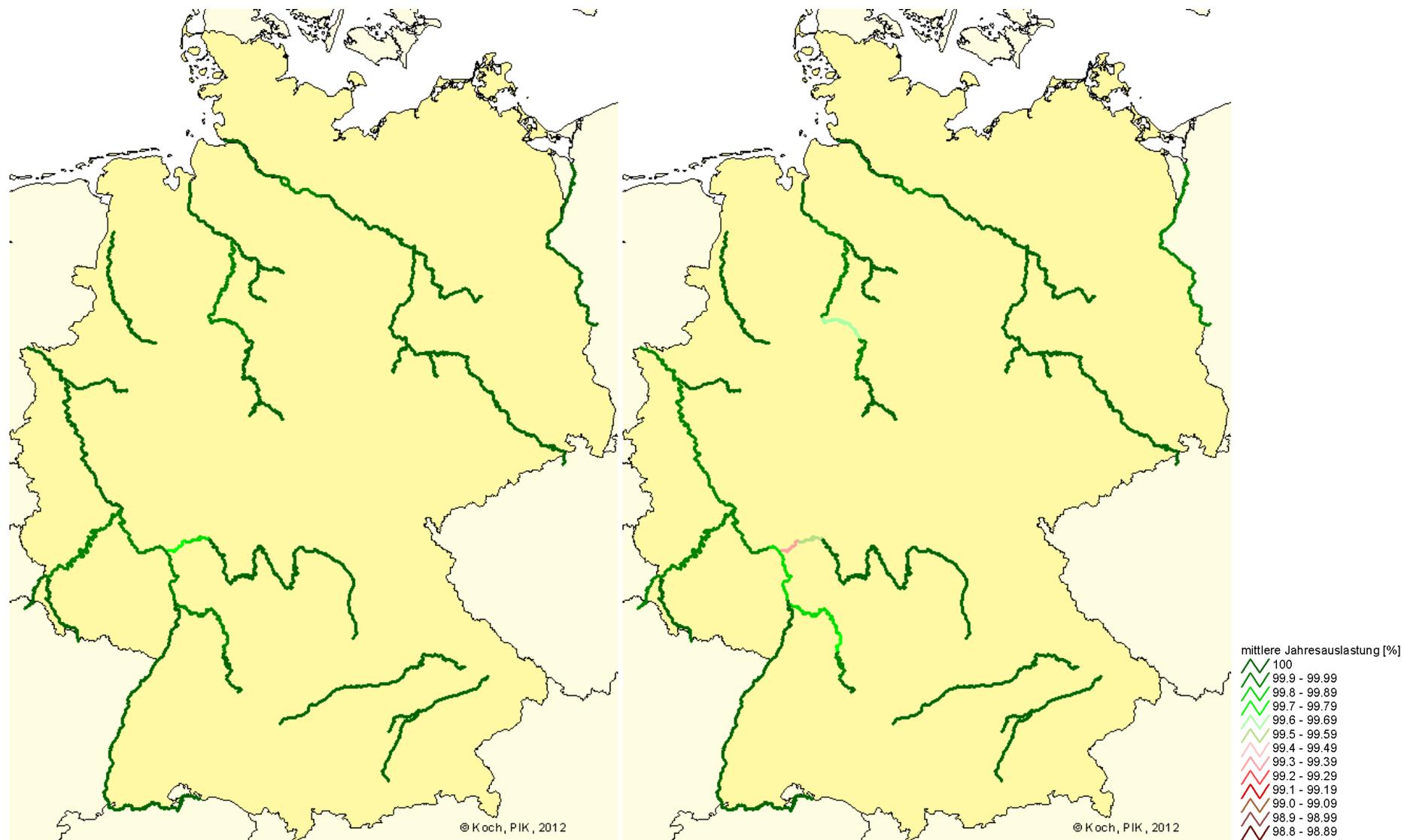


Abbildung 17: Mittlere Jahresauslastung thermischer Kraftwerke mit Kreislaufkühlung für 2010 (links) und unter dem 1K-Szenario für 2055 (rechts).

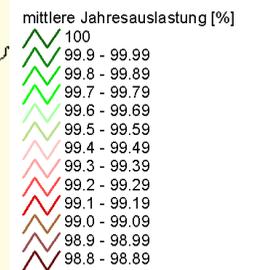
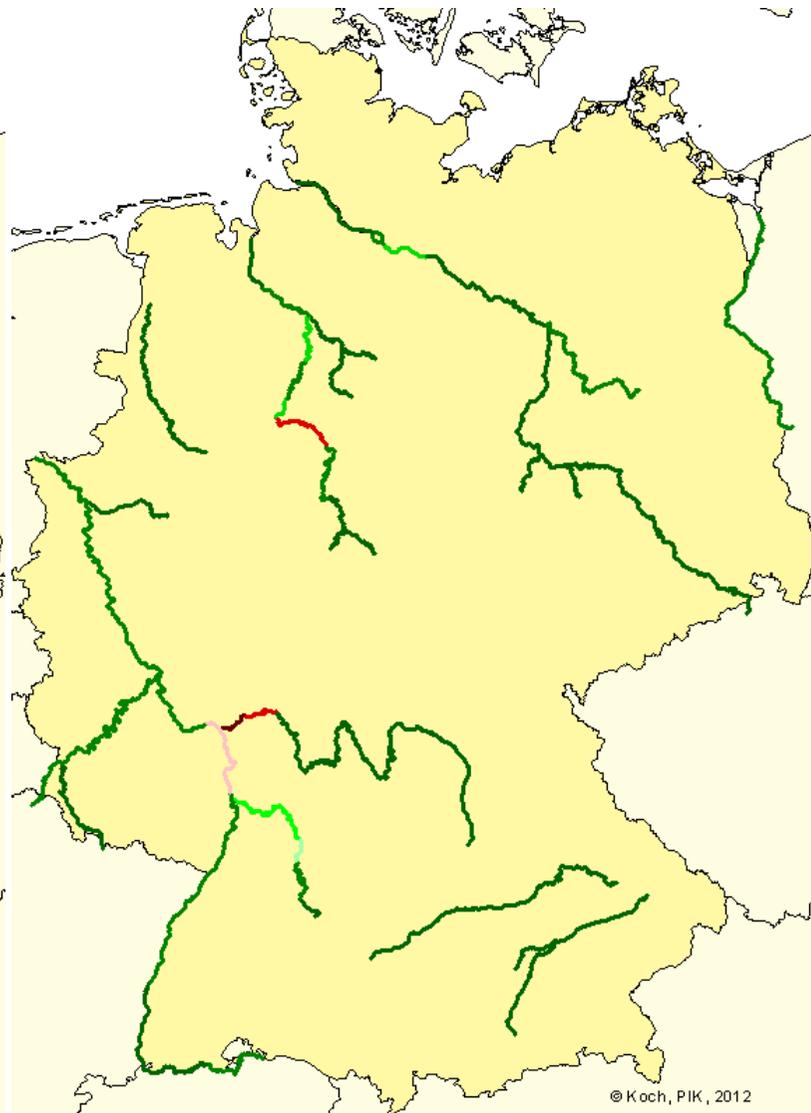
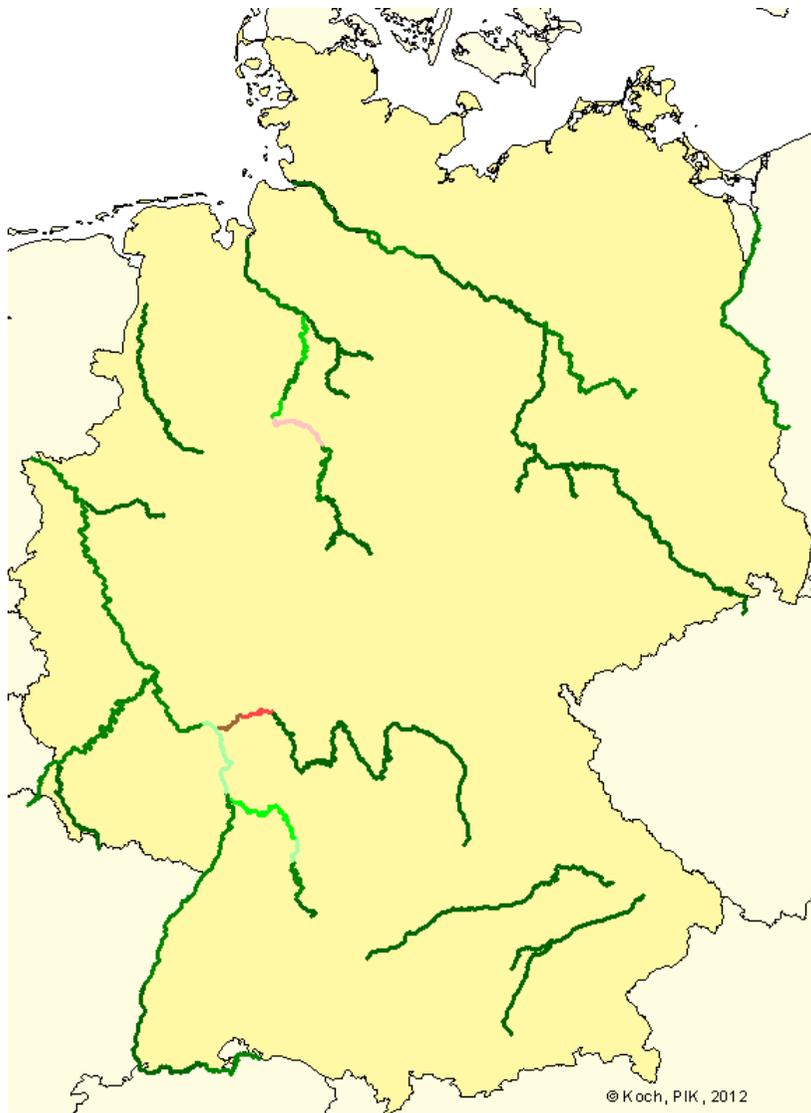


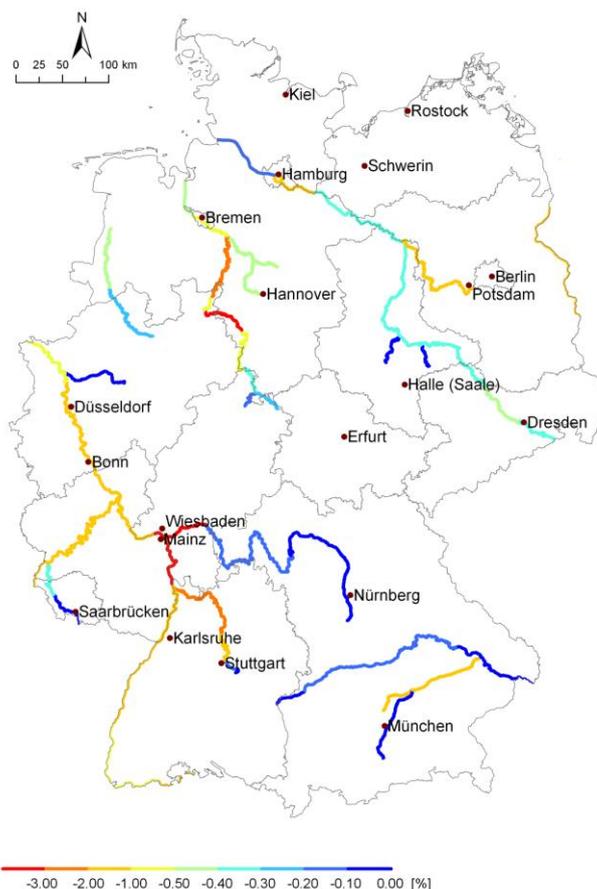
Abbildung 18: Mittlere Jahresauslastung thermischer Kraftwerke mit Kreislaufkühlung unter dem 2K-Szenario (links) und dem 3K-Szenario (rechts) für 2055.

Zusammenfassung und Diskussion

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Stromproduktion thermischer Kraftwerke aufgrund von Veränderungen der Temperatur und Menge des verfügbaren Kühlwassers sind – unseren Simulationen zufolge – im durchschnittlichen Jahresmittel und aggregiert über ganz Deutschland als relativ gering einzuschätzen. Kraftwerke mit Durchlaufkühlung sind allerdings deutlich stärker betroffen als Kraftwerke mit Kühlturm: Im 3K-Szenario etwa sinkt die mittlere Jahresproduktion für Kraftwerke mit Durchlaufkühlung bis 2055 (gegenüber 2010) um -1,4%, während sie für Kraftwerke mit Kreislaufkühlung um lediglich -0,07% sinkt.

Betrachtet man diese Ergebnisse in ihrer regionalen und saisonalen Verteilung, fallen die simulierten Auswirkungen des Klimawandels allerdings teilweise deutlich stärker aus. Zum einen zeigt sich, dass einige Regionen in Deutschland besonders stark betroffen sind. Abbildung 18 gibt einen Überblick über die Änderung der Auslastung der thermischen Kraftwerke mit Durchlaufkühlung von 2010 bis 2055 im 2K-Szenario.

Abbildung 19: Auslastung thermischer Kraftwerke mit Durchlaufkühlung, Änderung 2055 gegenüber 2010 (2K-Szenario); Jahresmittelwerte



Für die Rhein-Main-Neckar-Region etwa ergibt sich für Kraftwerke mit Durchlaufkühlung im 3K-Szenario bis 2055 ein Rückgang der mittleren Jahresproduktion um -4,9%, für Kraftwerke mit Kreislaufkühlung um -0,53%. Zum anderen zeigt sich, dass die simulierten Einbußen meist auf die Hochsommermonate beschränkt sind und sich zuweilen auf wenige Wochen oder Tage konzentrieren, an denen die Stromproduktion drastisch eingeschränkt ist (für die AKW illustrieren dies die Abbildungen in Anhang D). Hierzu wären weitere quantitative Analysen nötig.

Ein weiterer unter Klimawandel relevanter Aspekt ist das verstärkte Auftreten klimatisch „extremer“ Jahre. Für eine quantitative Abschätzung dieses Effekts gibt die nur für die AKW durchgeführte Extremwertbetrachtung der „mittleren Minima“ erste Hinweise. So

zeigt sich etwa, dass – aggregiert über alle AKW – das mittlere Jahres-Minimum der Produktion im Jahr 2055 beim 3K-Szenario um 5,5% niedriger ist als im 0 K-Szenario; der über alle Realisierungen und Jahre absolut niedrigste Tageswert der Produktion liegt beim 3K-Szenario sogar um 20% unter dem Wert für das 0 K-Szenario.

Zusätzlich zur Kühlwasserproblematik reduzieren höhere Außentemperaturen per se die thermische Effizienz der Kraftwerke. Wie u. a. die Studie von Linnerud und Koautoren (2011) zeigt, erfordert eine Abschätzung dieses Effekts Informationen über den Kraftwerkstyp und die „Ausgangstemperatur“. Die bislang in der Literatur vorhandenen groben Abschätzungen deuten darauf hin, dass dieser Effekt in einer ähnlichen Größenordnung wie der „Kühlwasser-Effekt“ liegen könnte und weiterer Untersuchung bedarf.

Wichtigster Aspekt für die Einschränkung der Elektrizitätsproduktion an thermischen Kraftwerken ist die Wassertemperatur, untergeordnet der Abfluss bzw. die Wasserverfügbarkeit. In einigen Einzugsgebieten (Rhein, Donau,...) werden Abflüsse als Eingangsparameter für die Berechnung der Wassertemperatur benötigt. Im Vergleich zum Einfluss der Lufttemperatur ist der des Abflusses auf die Wassertemperatur jedoch deutlich geringer. In den hier aufgeführten Analysen wurden (regionale) Klimadaten des Modells STAR verwendet. Andere regionale, insbesondere dynamische, Klimamodelle liefern, z. B. hinsichtlich des Niederschlages, teilweise deutlich andere Ergebnisse. Betreffs der Entwicklung der (Luft-)Temperatur sind die Ergebnisse der regionalen

Klimamodelle jedoch recht einheitlich. Insofern kann davon ausgegangen werden, dass auch bei Nutzung von Klimaeingangsdaten aus anderen regionalen Klimamodellen ähnliche Ergebnisse (insbesondere bezüglich des Trends) für die thermischen Kraftwerke erzielt werden würden.

Die thermischen Kraftwerke werden vermutlich auch in Zukunft einen wichtigen Beitrag zur Stromproduktion in Deutschland leisten. Allerdings wird sich der Kraftwerkspark in den nächsten Jahrzehnten hinsichtlich der verwendeten Energieträger und technischen Ausstattung wahrscheinlich grundlegend verändern. Die vorliegenden Simulationsergebnisse können Anregungen bieten, diesen Transformationsprozess in Voraussicht der möglichen Auswirkungen des Klimawandels zu steuern.

Stromproduktion durch Wasserkraftanlagen

Einführung

Die Stromproduktion durch Wasserkraftanlagen (WKA) hat noch immer einen bedeutenden Anteil an der Stromproduktion mittels Erneuerbarer Energien und die in Deutschland installierte Kapazität ist in den letzten Jahren leicht angestiegen. Ihr Beitrag an der Stromproduktion mittels Erneuerbarer Energien ist zwischen 1990 und 2010 allerdings von 91% auf 20% gesunken (BMU 2011), was auf den starken Ausbau der übrigen Erneuerbaren Energien (insbesondere Windkraft und Solar) zurückzuführen ist. Da Wasserkraftanlagen – im Vergleich zu anderen Erneuerbaren Energien – aber sowohl

Grund- als auch (gesteuerte) Spitzenlast abdecken, bleiben sie auch zukünftig ein wichtiger Baustein der Erneuerbaren Energien.

Einige Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserkraftnutzung liegen bereits vor. In Österreich wird bis 2040 je nach Klimaszenario mit einer Zunahme von 4 bis 10% der Produktion gerechnet, bis 2100 ergeben sich allerdings größtenteils Produktionsrückgänge, die bezogen auf die Referenzperiode bis zu 10% betragen können (KlimAdapt 2010). Für die Obere Donau, d. h. den deutschen Teil des Donaueinzugsgebiets, muss mit einer Reduktion der Wasserkrafterzeugung um 8 bis 16% bis 2060 gerechnet werden (Prasch und Mauser 2010). Für kleinere Einzugsgebiete in den Schweizer Alpen simulieren Schaeffli und Koautoren (2007) eine Abnahme der Produktion von 36% für den Zeitraum 2070 bis 2099 im Vergleich zur Kontrollperiode. Für Teile Norwegens berechnen Seljom und Koautoren (2011) bis 2050 eine Zunahme der Produktion um mehr als 20%, für andere Landesteile eine Reduktion um 10%. Lehner und Koautoren (2005) liefern eine grobe Abschätzung für ganz Europa: Während in Nordeuropa eine Zunahme von bis zu 25% zu erwarten sei, ergebe sich für Teile Südeuropas eine Reduktion um bis zu 25%. Für das Elbeeinzugsgebiet berechnen Grossmann und Koch (2011) eine Abnahme der Wasserkrafterzeugung um 13% bis 2050 im Vergleich zu 2010. Wie bei den thermischen Kraftwerken liegt aber bislang keine Abschätzung für ganz Deutschland vor.

Nach Angaben des BMU (2011) waren 2010 in Deutschland Wasserkraftanlagen mit einer Kapazität von 4.395 MW installiert. Bei einem angenommenen Betrieb von 353 Tagen im Jahr (ein Tag pro Monat für Wartungs- und andere Arbeiten) ergibt sich eine maximale Jahresproduktion von 37.234 GWh. 2010 wurden 20.956 GWh erzeugt (BMU 2011), d. h. die Auslastung lag bei 56%. Insgesamt ergab sich nach BMU (2011) für den Zeitraum 1990 bis 2010 eine maximale jährliche Auslastung von 83% (2000) und eine minimale jährliche Auslastung von 53% (2003), während der Mittelwert bei 62% lag.

Daten und Methoden

Die mit Wasserkraftanlagen erzeugte Energie hängt im Wesentlichen von Fallhöhe und Durchflussmenge ab, wobei die maximale Fallhöhe bzw. die maximale Turbinenkapazität obere Grenzen darstellen. Wasserkraftanlagen dienen der Produktion von Grund-, Mittel- oder Spitzenlast. Letztere werden im Folgenden nicht betrachtet, da sie nur wenige Stunden am Tag mit hoher Last gefahren werden. Ebenso werden Pumpspeicherkraftwerke nicht berücksichtigt, da diese das Wasser in einem nahezu geschlossenen Kreislauf nutzen und somit nicht unmittelbar vom Durchfluss abhängig sind. Wasserkraftanlagen, an denen Grund- oder Mittellast erzeugt wird, befinden sich meist an Talsperren oder Flussläufen. Turbinenkapazität und maximale Fallhöhe sind Spezifika jeder einzelnen Anlage. Daher ist eine große Menge an Daten notwendig, um für

große Gebiete mit vielen Wasserkraftanlagen die Änderung der Produktion in Abhängigkeit vom Durchfluss zu ermitteln.

Lehner und Koautoren (2005) verwenden für die Abschätzung der Klimawirkungen auf das Wasserkraftpotenzial für Wasserkraftanlagen an Speichern bzw. in oder an Flussläufen unterschiedliche Funktionen. Sie argumentieren, dass Wasserkraftanlagen an Speichern weniger anfällig sind, da Schwankungen im Niederschlags- bzw. Abflussregime ausgeglichen werden können.

Eine geografische Analyse der Lage der Wasserkraftanlagen in Deutschland zeigt, dass der Großteil der Wasserkraftanlagen an Speichern in den oberen Bereichen der Einzugsgebiete liegt. Wasserkraftanlagen an Flussläufen (Laufwasserkraftanlagen) liegen unterhalb selbiger. Somit wird die von Lehner und Koautoren (2005) angeführte Ausgleichswirkung der Speicher auch für letztere wirksam. Folglich unterscheiden wir im Folgenden nicht zwischen Wasserkraftanlagen an Speichern und an Flussläufen.

Die Auslastung von Wasserkraftanlagen ist von deren Ausbaugrad abhängig, der wie folgt definiert ist:

$$f_a = Q_a / MQ \quad [-] \quad (1)$$

mit Q_a maximale Kapazität der Anlage [m^3/s]

MQ mittlerer Jahresabfluss [m^3/s]

In GLOWA-Elbe wurden 118 Wasserkraftanlagen im deutsch-tschechischen Einzugsgebiet der Elbe betrachtet (91 Laufwasserkraftanlagen in einem Fluss oder an einer

Ausleitstrecke und 27 Speicherwasserkraftanlagen an Talsperren), für welche die notwendigen Daten für eine objektspezifische Betrachtung vorlagen. Aus den simulierten mittleren jährlichen Abflüssen (in m³/s) und der mittleren jährlichen Stromproduktion (in MWh/a) wurde eine statistische Beziehung abgeleitet. Dazu wurden Abflüsse und Stromproduktion normiert, um die Auswirkungen von Änderungen im Abflussgeschehen unabhängig von der Höhe der Abflüsse und der Größe der Wasserkraftanlagen zu erfassen. Für das Elbegebiet ergab sich folgende Funktion:

$$y = 0,8 * MQ + 0,2 \quad (2)$$

wobei y die normierte Stromproduktion und MQ der normierte Jahresabfluss ist. Änderungen im Abfluss MQ wirken sich also nicht „voll“ auf die Änderung der Produktion y aus. Dabei weisen unterschiedliche Anlagen entsprechend des Ausbaugrades eine deutlich unterschiedliche Reaktion auf Abflussänderungen aus. Entsprechend der GLOWA-Elbe-Ergebnisse können eine obere und eine untere Grenzfunktion (Min- bzw. Max-Funktion) festgelegt werden.

Ist der Ausbaugrad hoch, wirkt sich jede Änderung im Abfluss MQ unmittelbar auf die Änderung der Produktion y aus:

$$y = 1,0 * MQ \quad (3)$$

Ist der Ausbaugrad gering, schlagen Abflussänderungen relativ wenig durch:

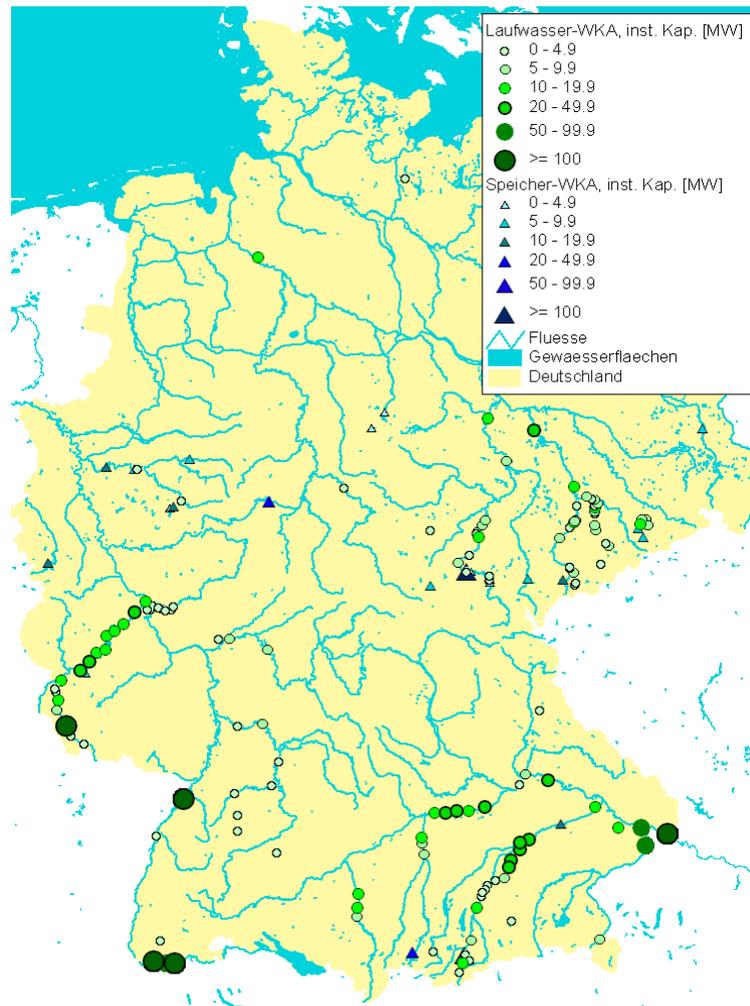
$$y = 0,5 * MQ + 0,5 \quad (4)$$

Der Ausbaugrad der mehreren Hundert Wasserkraftanlagen in Deutschland ist nicht bekannt. Daher werden für die Abschätzung beide obigen Funktionen im Sinne einer Min-/Max-Abschätzung verwendet. Neben den Min-/Max-Funktionen wird Funktion (2) als Funktion für eine mittlere Änderung genutzt.

Eine zentrale Übersicht zu Wasserkraftwerken in Deutschland stand nicht zur Verfügung. Einzelne Betreiber haben Daten zu ihren Anlagen u. a. im Internet öffentlich gemacht. Diese sind auf Wikipedia zusammengetragen. Im Literaturverzeichnis werden also nicht die einzelnen (Internet-)Quellen, sondern Wikipedia (2011) als Quelle genannt.

Für Deutschland waren die Lage und installierte Kapazität (in MW) von 134 Laufwasserkraftanlagen sowie 26 Speicherwasserkraftanlagen bekannt (vgl. Abbildung 19). Die Summe von deren installierter Kapazität beträgt 2.191 MW (entspricht 18,6 TWh/a), also etwa 50% der in Deutschland installierten Wasserkraft-Leistung.

Abbildung 20: Lage, Typ und installierte Kapazität der Wasserkraftanlagen in Deutschland.



Für Teileinzugsgebiete (siehe Abbildung 20) wurden mit dem öko-hydrologischen Modell SWIM Abflüsse für die stratifizierte Klimaszenarien erzeugt. Für jeden 5-Jahres-Zeitraum (z. B. für den 2010er-Wert die Jahre 2008 bis 2012) wurden alle 100 Realisierungen verwendet, um ein möglichst breites Spektrum möglicher Klimarealisierungen einzubeziehen. Somit konnten für jeden Betrachtungszeitraum 500 Jahresmittelwerte des Abflusses je Teileinzugsgebiet genutzt werden. Die MQ-Werte für 2010 dienten als Basis der Normierung, d. h. die MQ-Werte des jeweiligen Teileinzugsgebiets für alle folgenden 5-Jahres-Perioden wurden durch den Wert von 2010 geteilt. Mittels der Formeln 2-4

wurden dann minimale, mittlere und maximale Änderungen des Wasserkraftpotenzials berechnet (siehe Abbildung 20-22). Anschließend wurden diese Änderungen für das jeweilige Teileinzugsgebiet mit der dort installierten Kapazität verschnitten und für 2010 eine mittlere Auslastung der Wasserkraftanlagen von 55% zugrundegelegt.

Ergebnisse

Abbildungen 20 bis 22 zeigen die Ergebnisse für die stratifizierten Klimaszenarien (1 K, 2K, 3 K bis 2055) für die Teileinzugsgebiete unter Verwendung der drei unterschiedlichen Funktionen (Minima, Mittel, Maxima). Für alle drei Szenarien und alle drei verwendeten Funktionen ergibt sich für fast alle Teileinzugsgebiete ein sinkendes Wasserkraftpotenzial. Der Rückgang des Wasserkraftpotenzials ist jeweils für die Minimum-Funktion am schwächsten und für die Maximum-Funktion am stärksten. Alle drei Abbildungen zeigen ein sehr ähnliches räumliches Muster: die dominante Struktur ist, dass der Rückgang im Westen generell viel geringer ausfällt als im Osten; darüber hinaus ist der Rückgang im nördlichen Westen besonders schwach (dort liegen auch fast alle der wenigen Gebiete, z. B. entlang der Ems, in denen es im 1K- und im 2K-Szenario zu einem geringen Anstieg des Wasserkraftpotenzials bis 2055 gegenüber 2010 um bis zu 5% kommen kann), während er im nördlichen Osten besonders stark ist (mit einem Rückgang des Wasserkraftpotenzials im 3K-Szenario für die Maximum-Funktion bis 2055 gegenüber 2010 um bis zu 40%).

Zur räumlichen Aggregation der Ergebnisse wurde die für die Teileinzugsgebiete simulierte jährliche Auslastung mit den in Abbildung 19 dargestellten Wasserkraftanlagen verschnitten. Die so ermittelten Werte sind in Tabelle 3 unter „WKA (simuliert)“ aufgeführt. Unter „WKA (alle)“ sind die daraus auf ganz Deutschland hochgerechneten Werte dargestellt. Dabei wurde unterstellt, dass die Wasserkraftanlagen, deren Lage und installierte Kapazität unbekannt ist, der Verteilung der Wasserkraftanlagen mit bekannter Lage und Kapazität entsprechen. Die Synopsis der Ergebnisse in Tabelle 3 zeigt, dass die mittlere Jahresproduktion der Wasserkraftanlagen in Deutschland unter Klimawandel um 3% (1K-Szenario, Minimum-Funktion) bis 24% (3K-Szenario, Maximum-Funktion) zurückgeht. Ebenfalls in Tabelle 3 enthalten sind die Ergebnisse für zwei Ausbau-Szenarien für Wasserkraftanlagen. Da das Ausbaupotenzial für Wasserkraftanlagen in Deutschland von DLR/IFEU/WI¹ (2004) auf etwa 3 bis 5 TWh/a geschätzt wird, wurden die beiden Ausbau-Szenarien „AUSBAU + 3 TWh/a“ und „AUSBAU + 5 TWh/a“ gerechnet. Die Ergebnisse für die Maximum-Funktion zeigen, dass ein Ausbau der Wasserkraft den klimawandelbedingten Produktionsrückgang nur bis zum 1K-Szenario vollständig kompensieren könnte. Beim 3K-Szenario etwa könnte der Produktionsrückgang selbst im „AUSBAU + 5 TWh/a“-Szenario lediglich ungefähr halbiert werden.

¹Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Energie- und Umweltforschung und Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie.

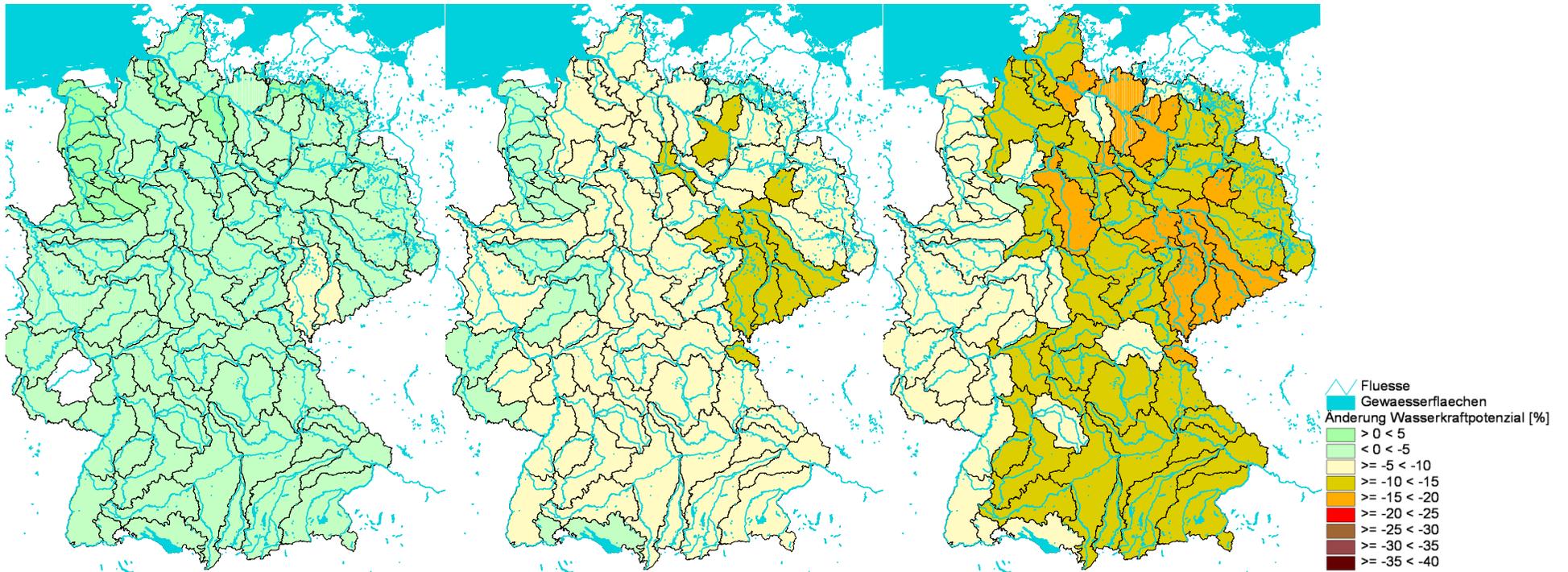


Abbildung 21: Prozentuale Änderung des Wasserkraftpotenzials unter den Szenarien 1K (links), 2K (Mitte) und 3K (rechts) bis 2055 gegenüber 2010 unter Verwendung der Minimum-Funktion ($y = 0,5 * MQ + 0,5$).

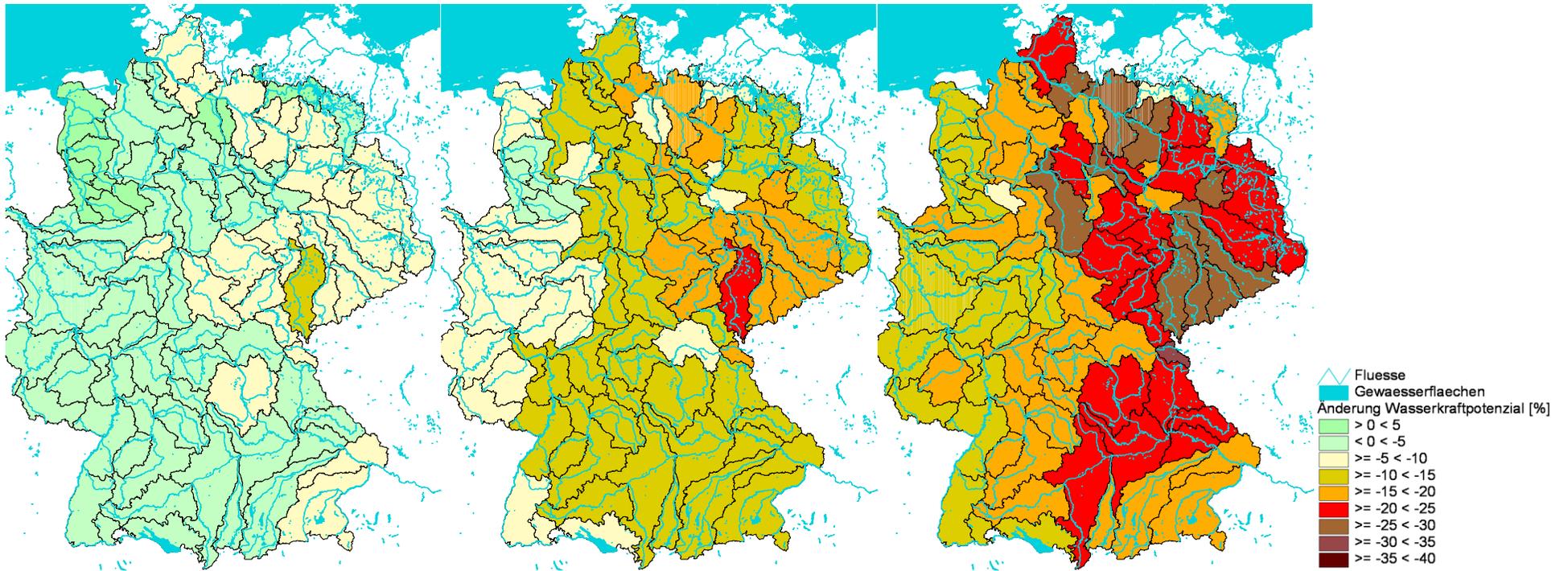


Abbildung 22: Prozentuale Änderung des Wasserkraftpotenzials unter den Szenarien 1K (links), 2K (Mitte) und 3K (rechts) bis 2055 gegenüber 2010 unter Verwendung der mittleren Funktion ($y = 0,8 * MQ + 0,2$).

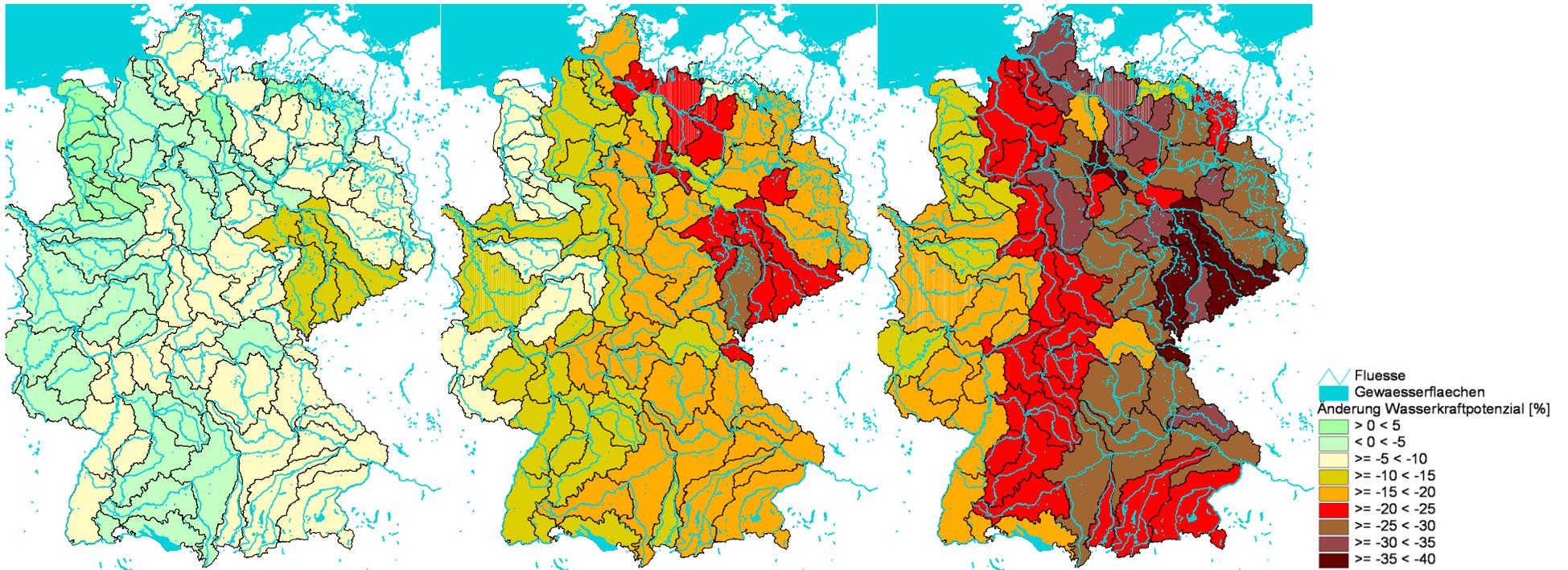


Abbildung 23: Prozentuale Änderung des Wasserkraftpotenzials unter den Szenarien 1K (links), 2K (Mitte) und 3K (rechts) bis 2055 gegenüber 2010 unter Verwendung der Maximum-Funktion ($y = 1,0 \cdot MQ$).

Tabelle 3: Mittlere Jahresauslastung und Jahresproduktion von Wasserkraftanlagen in Deutschland unter Klimawandel

Lauf+Speicher-WKA	Minimale Reduktion					Mittelwerte					Maximale Reduktion				
	inst. Kap.	2010	2055, 1K	2055, 2K	2055, 3K	inst. Kap.	2010	2055, 1K	2055, 2K	2055, 3K	inst. Kap.	2010	2055, 1K	2055, 2K	2055, 3K
WKA (simuliert)															
Sum WKA MW	2.191	1.205	1.168	1.114	1.065	2.191	1.205	1.144	1.057	979	2.191	1.205	1.127	1.019	921
Sum WKA TWh/a	18,6	10,2	9,9	9,4	9,0	18,6	10,2	9,7	9,0	8,3	18,6	10,2	9,5	8,6	7,8
Auslastung		55%	53%	51%	49%		55%	52%	48%	45%		55%	51%	47%	42%
ΔAuslastung			-3%	-8%	-12%			-5%	-12%	-19%			-6%	-15%	-24%
Fehl WKA TWh/a			-0,3	-0,8	-1,2			-0,5	-1,3	-1,9			-0,7	-1,6	-2,4
WKA (alle)															
Sum WKA MW	4.395	2.417	2.343	2.235	2.137	4.395	2.417	2.293	2.119	1.964	4.395	2.417	2.260	2.044	1.848
Sum WKA TWh/a	37,2	20,5	19,9	18,9	18,1	37,2	20,5	19,4	18,0	16,6	37,2	20,5	19,2	17,3	15,7
Fehl WKA TWh/a			-0,6	-1,5	-2,4			-1,0	-2,5	-3,8			-1,3	-3,2	-4,8
AUSBAU + 3 TWh/a															
Sum WKA MW	4.749	2.612	2.532	2.415	2.309	4.749	2.612	2.478	2.290	2.122	4.749	2.612	2.443	2.208	1.997
Sum WKA TWh/a	40,2	22,1	21,5	20,5	19,6	40,2	22,1	21,0	19,4	18,0	40,2	22,1	20,7	18,7	16,9
Fehl WKA TWh/a		1,7	1,0	0,0	-0,9		1,7	0,5	-1,1	-2,5		1,7	0,2	-1,8	-3,6
AUSBAU + 5 TWh/a															
Sum WKA MW	4.985	2.742	2.658	2.535	2.424	4.985	2.742	2.601	2.403	2.227	4.985	2.742	2.564	2.318	2.096
Sum WKA TWh/a	42,2	23,2	22,5	21,5	20,5	42,2	23,2	22,0	20,4	18,9	42,2	23,2	21,7	19,6	17,8

Fehl WKA TWh/a		2,8	2,0	1,0	0,1		2,8	1,6	-0,1	-1,6		2,8	1,2	-0,8	-2,7
----------------	--	-----	-----	-----	-----	--	-----	-----	------	------	--	-----	-----	------	------

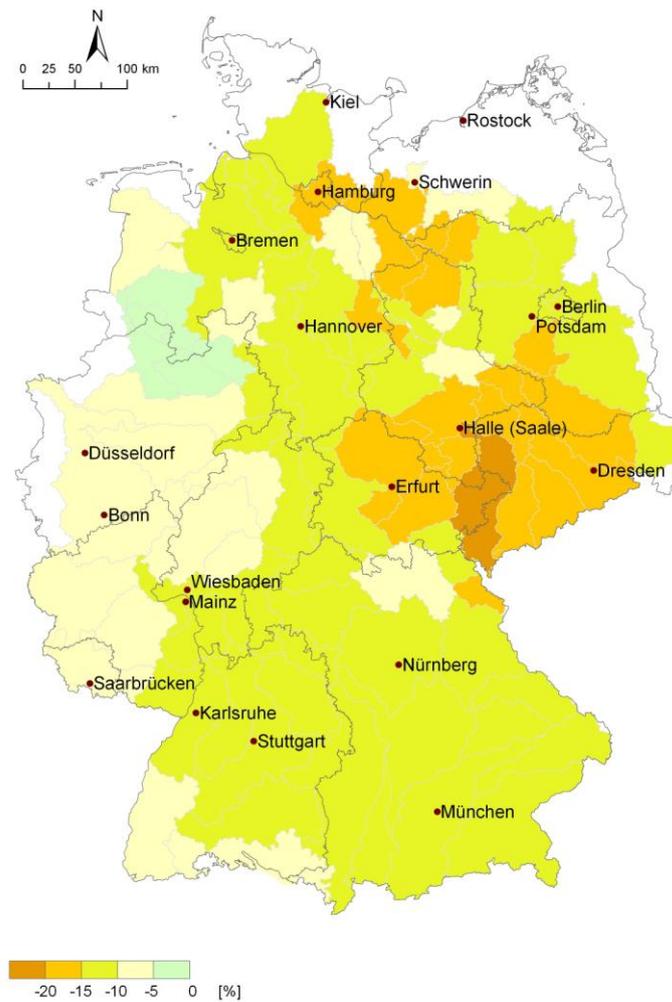
Annahmen:

- mittlere Auslastung (2010): 55% (die "Fehlmengen" in den Klimaszenarien sind auf diesen Wert bezogen)
- Jahresproduktion [TWh/a]: 1 Tag pro Monat Stillstand, also 353 Tage/Jahr in Produktion
- Pumpspeicherkraftwerke werden nicht berücksichtigt
- AUSBAU + 3-5 TWh/a = Potenzial des Ausbaus der Wasserkraft in Deutschland

Zusammenfassung und Diskussion

Die analysierten Klimaszenarien führen – im Jahresmittel und aggregiert über ganz Deutschland – durchweg zu einer Reduktion der Stromproduktion an Wasserkraftanlagen, die je nach Klimaszenario und zu Grunde gelegter Funktion zwischen 3% (1K-Szenario, Minimum-Funktion) und 24% (3K-Szenario, Maximum-Funktion) liegt. Ursache hierfür sind die unter Klimawandel sinkenden Abflüsse. Bei den Wasserkraftanlagen sind also im Mittel deutlich stärkere Auswirkungen des Klimawandels als bei den thermischen Kraftwerken zu erwarten. Abbildung 23 fasst die Änderung des Wasserkraftpotenzials zwischen 2055 und 2010 im 2K-Szenario noch einmal zusammen.

Abbildung 24: Wasserkraftpotenzial, Änderung 2055 gegenüber 2010 (2K-Szenario, mittlere Funktion); Jahresmittelwerte



Dieser Rückgang ist regional sehr ungleich verteilt. Im Osten fällt der Rückgang generell viel stärker aus als im Westen, wobei der Rückgang im nördlichen Osten besonders stark (mit einem Rückgang des Wasserkraftpotenzials im 3K-Szenario für die Maximum-Funktion um bis zu 40%) und im nördlichen Westen besonders schwach (dort liegen auch fast alle der wenigen Gebiete, z. B. entlang der Ems, in denen es im 1K- und im 2K-Szenario zu einem geringen Anstieg des Wasserkraftpotenzials um bis zu 5% kommen kann) ist. Eine Analyse der saisonalen Verteilung der Rückgänge steht noch aus. Hierzu wären detaillierte

Informationen über die Lage und Steuerung von Talsperren nötig, da der Jahresgang der Abflüsse mithilfe von Talsperren erheblich „geglättet“ werden kann. Ergebnisse aus dem Projekt GLOWA-Elbe zeigen allerdings, dass auch mit Talsperrensteuerung nicht verhindert werden kann, dass die Produktionsrückgänge vor allem auf die Sommermonate konzentriert sind.

Ein Vergleich der hier genutzten Abflüsse – unter Verwendung von Klimaeingangsdaten des Modells STAR – mit Abflüssen, die unter Nutzung anderer regionaler Klimamodelle erzeugt wurden, findet sich in Hattermann und Koautoren (2010). Die dort beschriebenen simulierten Abflüsse zeigen teilweise einen dem hier beschriebenen entgegengesetzten Trend, d.h. in einigen Gebieten Deutschlands bleiben die Abflüsse auch unter Klimawandelbedingungen stabil oder nehmen geringfügig zu. Entsprechend wäre die Elektrizitätserzeugung an Wasserkraftanlagen auch geringer vom Klimawandel betroffen.

Die simulierten Reduktionen im Wasserkraftsektor sind insofern relevant, als dieser als stabiler Baustein innerhalb der Erneuerbaren Energien gilt, der bereits eine ausgereifte Technologie besitzt und einen hohen Ausbaugrad erreicht hat. Für eine bessere Abschätzung wären detailliertere Daten zu den Wasserkraftanlagen notwendig. Dazu gehören neben der Lage am Gewässer Informationen zu Fallhöhe, installierter Kapazität hinsichtlich Durchfluss der Turbinen bzw. elektrischer Leistung, aber auch Informationen zur Steuerung der Anlage. Letztere

umfassen die Steuerung von Talsperren/Speichern sowie Mindestabflüsse bei Laufwasserkraftanlagen an Ausleitstrecken usw.

Stromproduktion durch Windkraftanlagen

Einführung

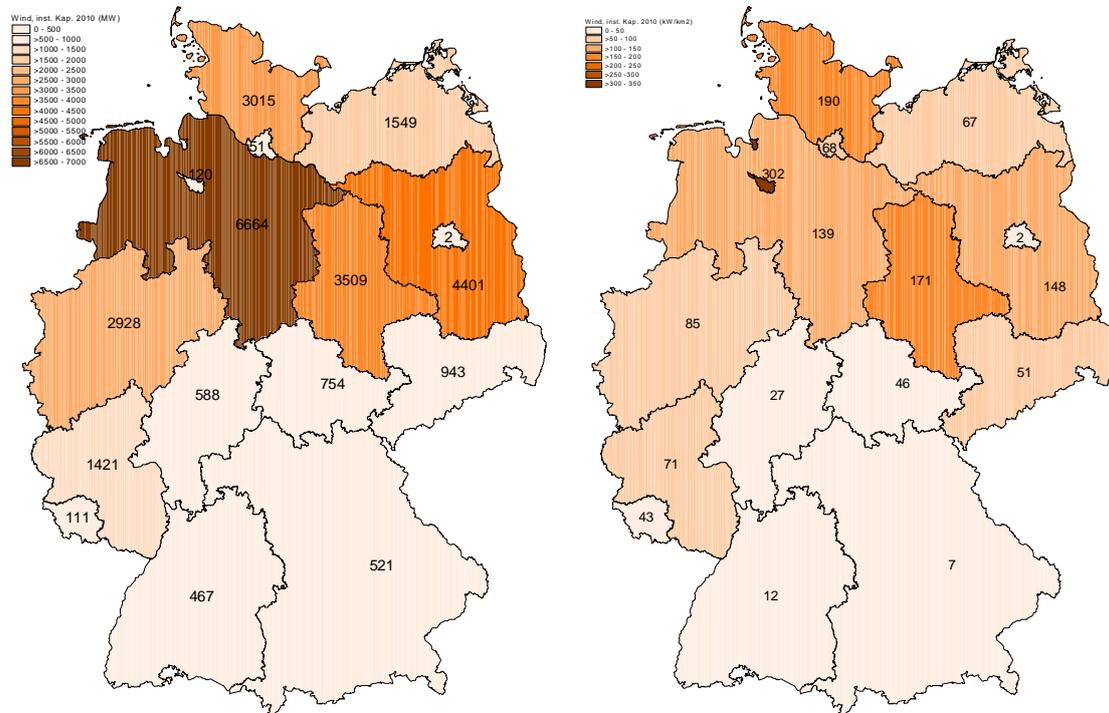
Die Stromproduktion durch Windkraftanlagen (auch Windenergieanlagen genannt) trägt erheblich zum insgesamt steigenden Anteil der Erneuerbaren Energien an der gesamten Stromproduktion bei. Die in Deutschland installierte Kapazität ist in den letzten 20 Jahren rasant gestiegen (1990: 55 MW; 2000: 6097 MW; 2010: 27.209 MW). Der Anteil der Windenergie an der Stromproduktion innerhalb der Erneuerbaren Energien ist von 1990 über 2000 bis 2010 von 0,4% über 20% auf 37% gestiegen (BMU 2011).

Bisherige Analysen der Auswirkungen des Klimawandels zeigen, dass meist nur geringe Auswirkungen auf das Windkraftpotenzial zu erwarten sind. Nach Pryor und Koautoren (2005a/b) ist für Nordeuropa mit positiven Effekten, insbesondere im Winter, zu rechnen, während Seljom und Koautoren (2011) zufolge für Norwegen lediglich mit geringfügigen Änderungen zu rechnen ist. Brayshaw und Koautoren (2011) simulieren Änderungen von bis zu 10% für Großbritannien. Hinsichtlich des Off-shore-Windpotenzials in Nordeuropa finden Barstad und

Koautoren (2012) eine geringfügige Abnahme, wobei sie auf die große Streuung der Ergebnisse in Abhängigkeit der verwendeten GCMs hinweisen.

Abbildung 24 zeigt die Windkraftnutzungseignung für Deutschland (Bezugszeitraum 1981-2000; DWD, 2005). Die vorliegende Studie erstellt Karten mit klimawandelbedingten Änderungen dieses Potenzials. Abbildung 25 stellt die aktuelle Verteilung (Stand 2010) der installierten Windkraftleistung je Bundesland dar. Im Zuge des Umbaus des deutschen Energiesystems ist mit einem weiteren dynamischen Ausbau der installierten Windkraftleistung zu rechnen.

Abbildung 26: Installierte Windkraftleistung je Bundesland (in MW, links) und je Flächeneinheit (in kW/km², rechts) (Quelle: Bundesverband WindEnergie, www.wind-energie.de).



Für Deutschland liegt bislang keine Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf das Windkraftpotenzial bzw. die Stromerzeugung an Windkraftanlagen vor. Dies wird im Folgenden erstmals versucht.

Daten und Methoden

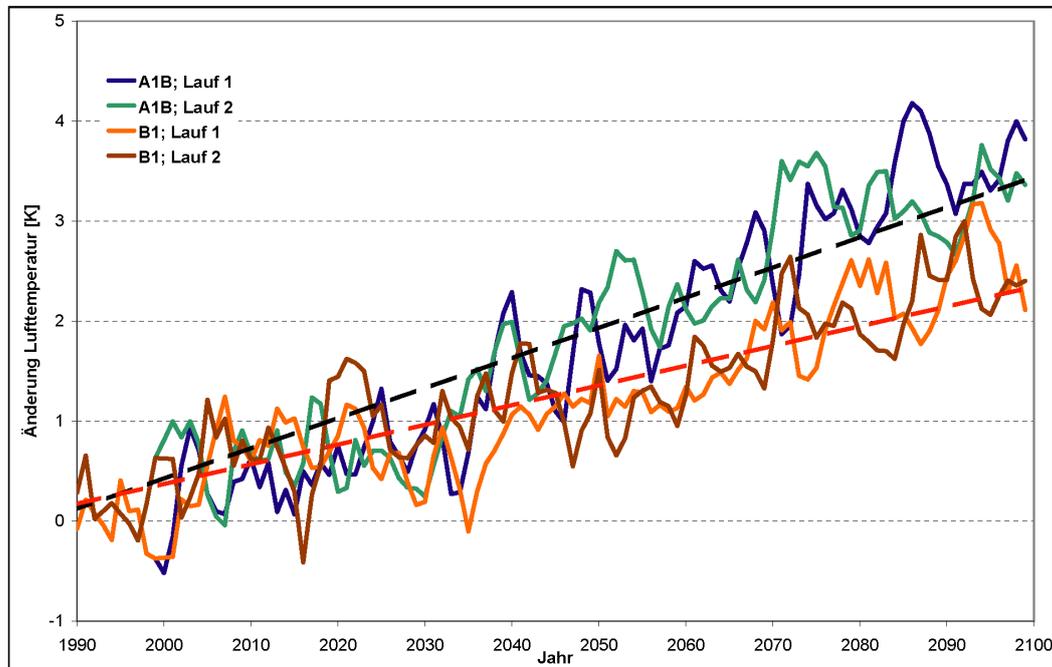
Für eine Bewertung des Windkraftpotenzials reichen Tagesmittelwerte der Windgeschwindigkeit (in m/s), wie sie vom statistischen regionalen Klimamodell STAR geliefert werden, nicht aus. Eine solche Bewertung erfordert Werte mit

zeitlich feinerer Auflösung. Daher werden hier Daten des dynamischen regionalen Klimamodells CCLM (Konsortialläufe) verwendet, bei dem die Windgeschwindigkeiten für verschiedene Atmosphärenschichten als 3-stündliche Terminwerte vorliegen. Dabei wird die für die Obergrenze der ersten Modellschicht simulierte Windgeschwindigkeit genutzt, die einer Höhe von 60 bis 150 m über Grund entspricht. Das CCLM wurde mit einer horizontalen Auflösung von etwa 18 km betrieben.

Zur Abschätzung der Auslastung der Anlagen wird die Leistungskurve einer modernen Windkraftanlage (Nabenhöhe ca. 120-130 m, Rotorradius ca. 50 m) verwendet (vgl. z. B. StMWIVT 2010). Die von uns gewählte Leistungskurve hat die Form einer Stufenfunktion mit folgenden Charakteristika: bei Windgeschwindigkeiten kleiner als 4 m/s steht die Anlage still; zwischen 4 m/s und 15 m/s steigt die Auslastung nahezu linear auf 100% an; zwischen 15 m/s und 30 m/s verbleibt die Anlage bei Vollauslastung; oberhalb von 30 m/s muss die Anlage abgeschaltet werden (vgl. StMWIVT 2010, S. 27; DENA o. D.).

Um eine mit den Simulationen für die thermischen und Wasserkraftwerke vergleichbare Temperatur-Stratifizierung zu erreichen, wurde aus den CCLM-Daten ermittelt, zu welchem Zeitpunkt eine Temperaturerhöhung von 1 K, 2 K bzw. 3 K erreicht wird. Die Werte zu diesen Zeitpunkten wurden dann als 1K-, 2K- bzw. 3K-Szenario interpretiert.

Abbildung 27: Änderung der Lufttemperatur (gleitender 3-Jahresmittelwert) für Deutschland in den CCLM-Läufen für die Emissionsszenarien A1B und B1 (gestrichelte Linien: lineare Trendgerade).



Das dynamische regionale Klimamodell CCLM wurde vom globalen Zirkulationsmodell ECHAM5 angetrieben. Für die beiden Emissionsszenarien A1B und B1 lagen jeweils zwei CCLM-Läufe (Realisierungen) vor, die sich nur in ihrem atmosphärischen Zustand zum Initialisierungszeitpunkt unterscheiden und ansonsten unter gleichen Randbedingungen – und zwar ausschließlich der projizierten Entwicklung der Treibhausgase – betrieben wurden. Obwohl sich die beiden Simulationen für ein Emissionsszenario hinsichtlich des Temperaturverlaufs erwartungsgemäß unterscheiden, weisen sie den gleichen Trend auf (vgl. Abbildung 26). Da die Temperatur nur in den A1B-Läufen (und nicht in den B1-

Läufen) bis 2100 um mehr als 3 K zunimmt, werden nur die A1B-Läufe für die Abschätzung der Änderung des Windkraftpotenzials verwendet.

Nach Angaben des BMU (2011) waren im Jahr 2010 Windkraftanlagen mit einer Kapazität von 27.209 MW installiert. Bei einem angenommenen Betrieb von 363 Tagen im Jahr (zwei Tage pro Jahr für Wartungs- und andere Arbeiten) ergibt sich eine maximal mögliche Jahresproduktion von 237.045 GWh. Im Jahr 2010 wurden 37.793 GWh erzeugt, d. h. die Auslastung lag bei 15,9%. Insgesamt ergab sich nach BMU (2011) für den 20-Jahres-Zeitraum 1990 bis 2010 eine minimale jährliche Auslastung von 10,8% (1991), eine maximale jährliche Auslastung von 21,1% (1993). Der Mittelwert lag bei 16,4%.

Zur Validierung des Verfahrens wurde für die 20-Jahres-Referenzperiode 1981 bis 2000 die jeweilige Jahresauslastung simuliert (da in den CCLM-Läufen die Emissionsszenarien bereits im Jahr 2000 beginnen, wurde dieser um 10 Jahre nach vorne verschobene Zeitraum gewählt). Dazu wurde für diesen Zeitraum für die einzelnen Bundesländer die mittlere Auslastung berechnet und diese anschließend mit den installierten Kapazitäten (siehe Abbildung 25, links) verschnitten. Dadurch werden sowohl die räumliche Verteilung der Windkraftanlagen als auch der Windgeschwindigkeiten (bzw. die Auslastung der Windkraftanlagen) berücksichtigt. Für Lauf 1 ergibt sich eine mittlere Auslastung von 16,5%, für Lauf 2 von 16,3%. Dieser und weitere Validierungsschritte lassen

es gerechtfertigt erscheinen, dass der dargestellte Ansatz plausible Ergebnisse liefert.

Ergebnisse

Die simulierte jährliche Auslastung (des Kraftwerksparks von 2010) unter Annahme einer Temperaturzunahme von 1 K liegt in Lauf 1 bei 16,9% (Lauf 2: 17,1%). Bei einer Temperaturzunahme von 2 K liegt sie in Lauf 1 bei 17,4% (Lauf 2: 16,9%) und bei einer Temperaturzunahme von 3 K liegt sie in Lauf 1 bei 17,5% (Lauf 2: 17,2%). Für die Jahresproduktion bedeutet das eine Erhöhung, die zwischen 798 GWh/a (1 K, Lauf 1) und 2206 GWh/a (3 K, Lauf 1) liegt.

Tabelle 4: Mittlere Jahresauslastung und Jahresproduktion von Windkraftanlagen in Deutschland unter Klimawandel.

		1981-2000	+ 1K	+ 2K	+ 3K
Lauf 1	Auslastung [%]	16,5%	16,9%	17,4%	17,5%
	Δ Auslastung [%]		0,3%	0,9%	0,9%
	Produktion [GWh/a]	38.973	39.770	41.071	41.179
	Δ Produktion [GWh/a]		798	2.098	2.206
Lauf 2	Auslastung [%]	16,3%	17,1%	16,9%	17,2%
	Δ Auslastung [%]		0,7%	0,6%	0,9%
	Produktion [GWh/a]	38.499	40.187	39.908	40.569
	Δ Produktion [GWh/a]		1.688	1.408	2.070
Lauf 1+2	Auslastung [%]	16,4%	17,0%	17,2%	17,3%
	Δ Auslastung [%]		0,5%	0,7%	0,9%
	Produktion [GWh/a]	38.736	39.979	40.489	40.874
	Δ Produktion		1.243	1.753	2.138

	[GWh/a]				
Lauf 1+2	relative Änderung [%]		+3,2%	+4,5%	+5,5%

Abbildung 27 zeigt die mittlere monatliche Auslastung der Windkraftanlagen für die beiden A1B-Läufe aggregiert für ganz Deutschland.

Für Januar weisen beide Läufe eine Erhöhung der Auslastung aus. In einigen Sommermonaten, insbesondere im August, geht die Auslastung zurück. Für Frühjahr und Herbst, d. h. in Monaten mit vorherrschend Tiefdrucklagen und Westwindregimen, sind die Ergebnisse uneinheitlich.

Abbildung 28 zeigt die mittlere monatliche Produktion der Windkraftanlagen für die beiden A1B-Läufe aggregiert für ganz Deutschland.

Abbildung 28: Mittlere monatliche Auslastung der Windkraftanlagen für die beiden CCLM-Läufe für das Emissionsszenario A1B (die 1K/2K/3K-Werte sind die Werte zum jeweiligen Erreichungszeitpunkt der Temperatur).

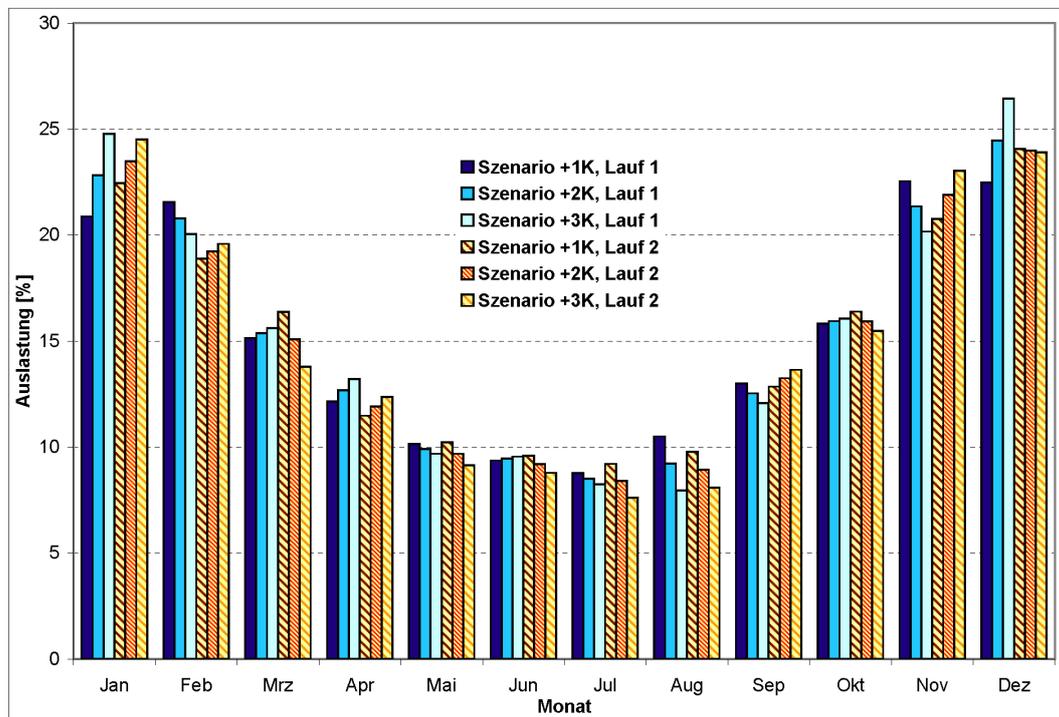
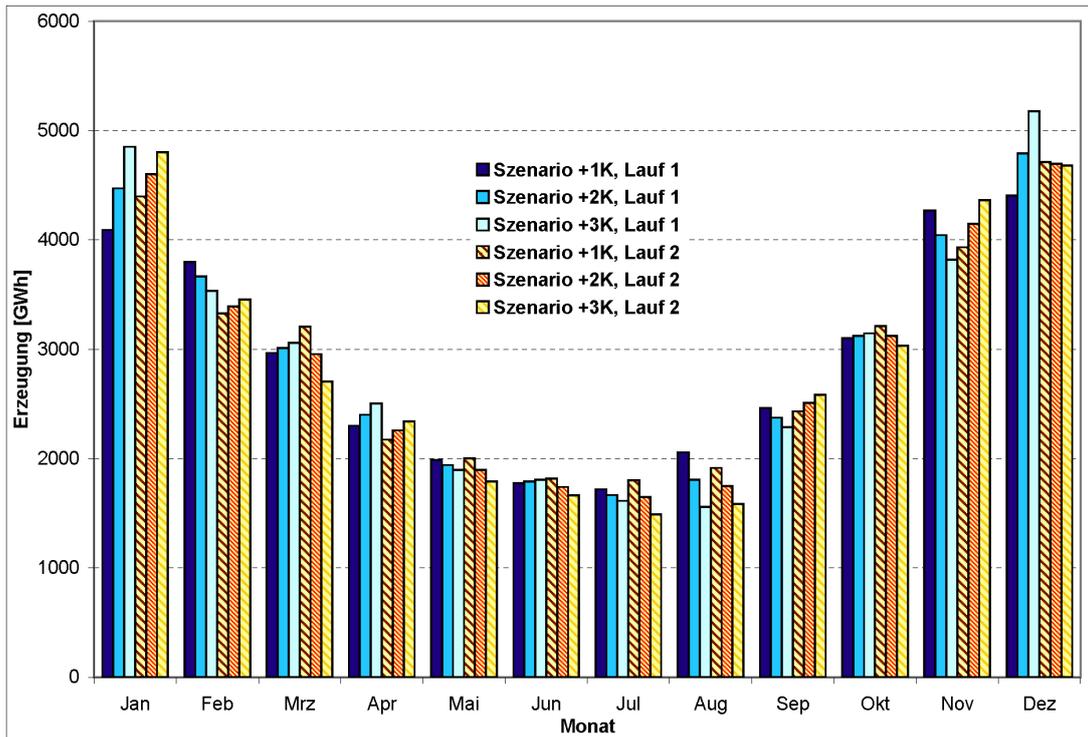


Abbildung 29: Mittlere monatliche Produktion der Windkraftanlagen für die beiden CCLM-Läufe für das Emissionsszenario A1B (die 1K/2K/3K-Werte sind die Werte zum jeweiligen Erreichungszeitpunkt der Temperatur).



Abbildungen 29 bis 31 zeigen die Differenzen zwischen der Auslastung der Periodenmittel 2011-2040, 2041-2070 und 2071-2100 und der mittleren Auslastung der Kontrollläufe 1970-2000. Um die starken räumlichen und zeitlichen Schwankungen der Windgeschwindigkeit und also der Auslastung abzuschwächen, wurde jeweils über 30-Jahres-Zeiträume und beide CCLM-Läufe gemittelt. Die Werte der Periode 2011-2040 können im Sinne einer Temperaturzunahme von 1 K, die der Periode 2041-2070 von 2 K und die der Periode 2071-2100 von 3 K interpretiert werden. Während sich für die Periode 2011-2040 relativ geringe Änderungen zeigen, sind die Änderungen für 2041-2070 und 2071-2100 etwas stärker. Hinsichtlich der räumlichen Verteilung ist

unter dem „3K-Szenario“ (entspricht dem Zeitraum 2071-2100) v. a. im mittel- und noch deutlicher im norddeutschen Raum mit einer Erhöhung des Windkraftpotenzials zu rechnen. Im süddeutschen Raum sind die Änderungen dagegen kleiner mit gebietsweise entgegengesetztem Vorzeichen.

Abbildung 30: Differenz zwischen der Auslastung des Periodenmittels 2011-2040 und der Mittelwerte der Kontrollläufe 1970-2000 für das Emissionsszenario A1B gemittelt über beide Läufe (interpretierbar als Veränderung unter dem 1K-Szenario).

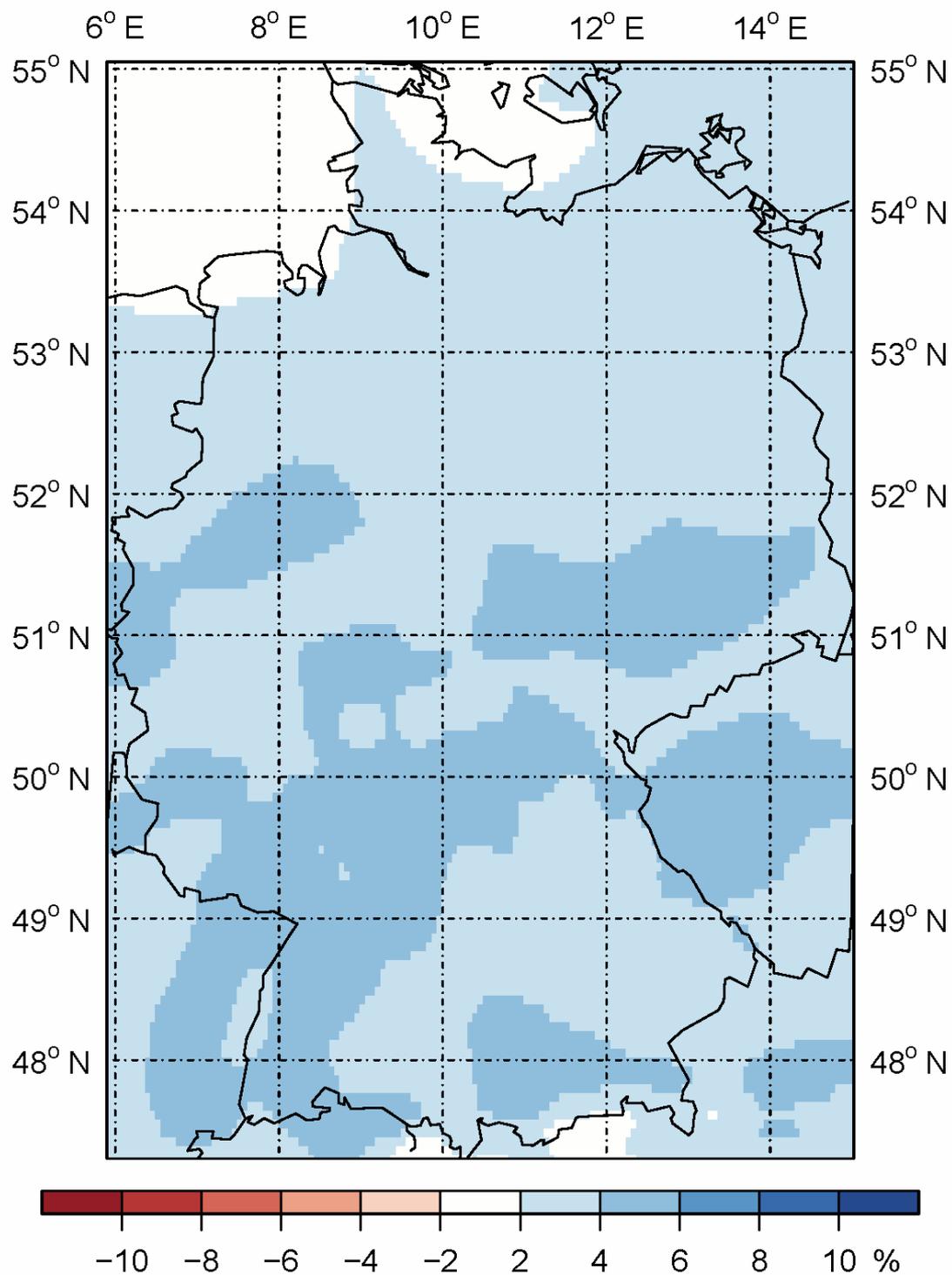


Abbildung 31: Differenz zwischen der Auslastung des Periodenmittels 2041-2070 und der Mittelwerte der Kontrollläufe 1970-2000 für das Emissionsszenario A1B gemittelt über beide Läufe (interpretierbar als Veränderung unter dem 2K-Szenario).

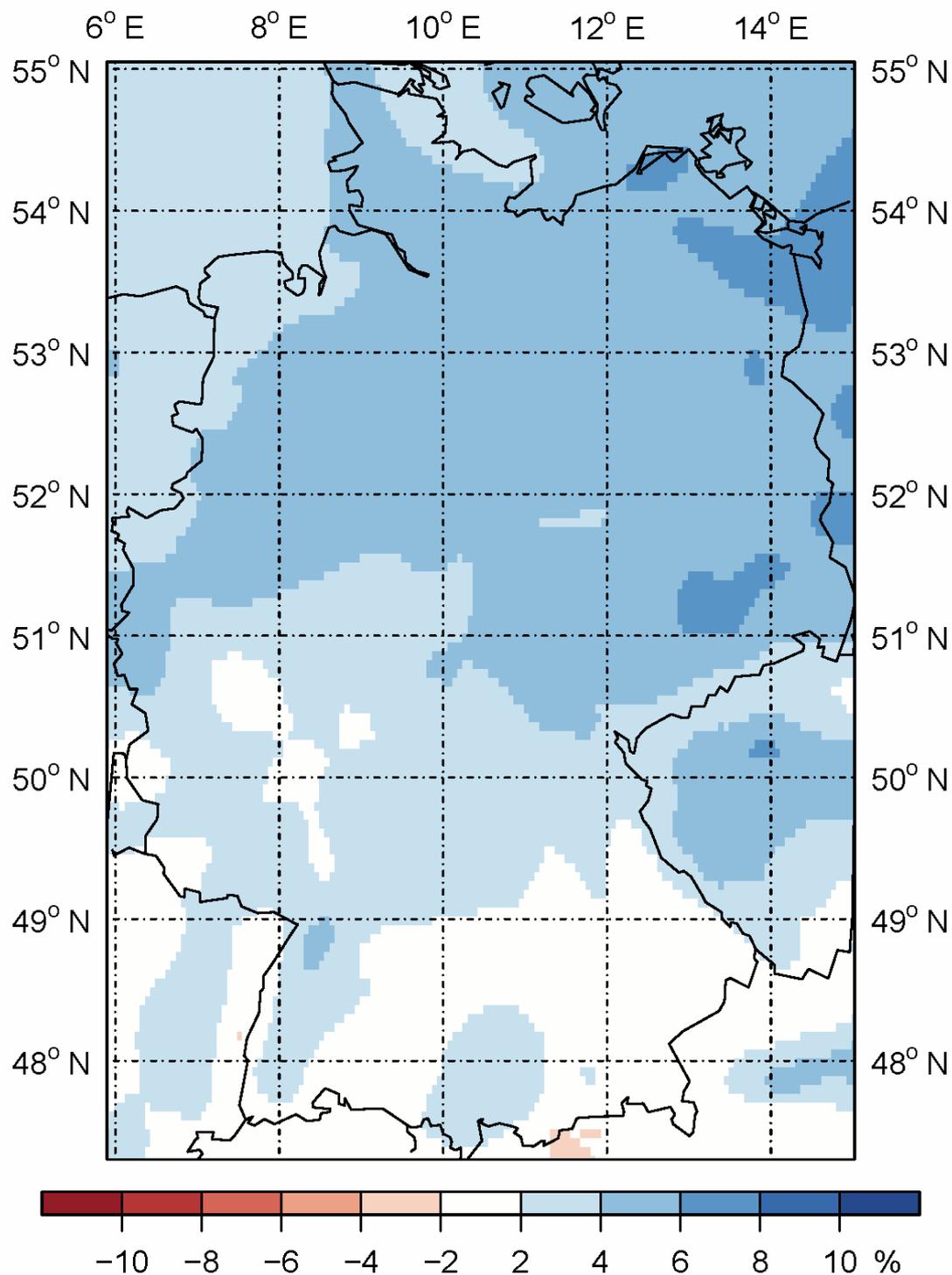
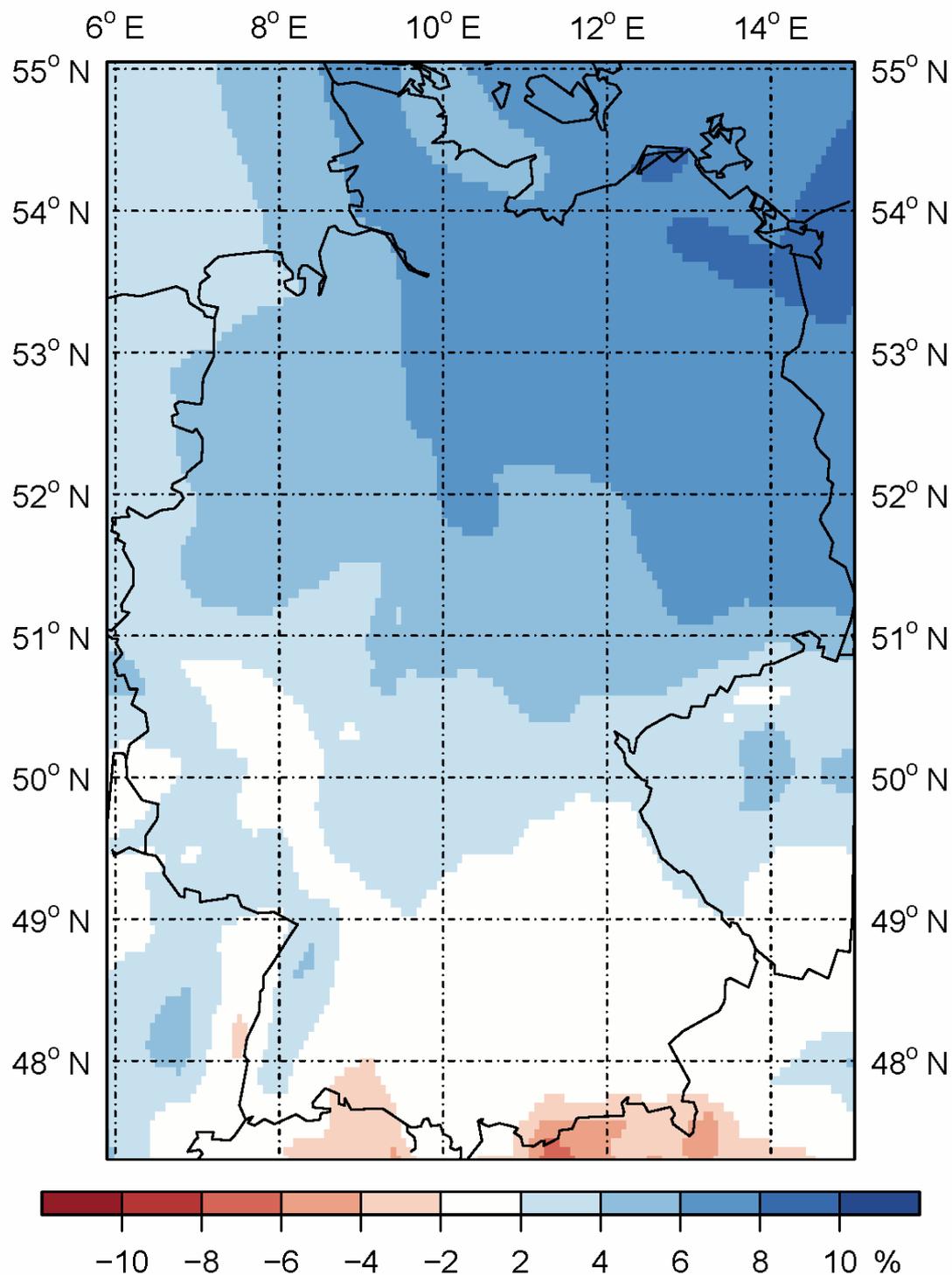


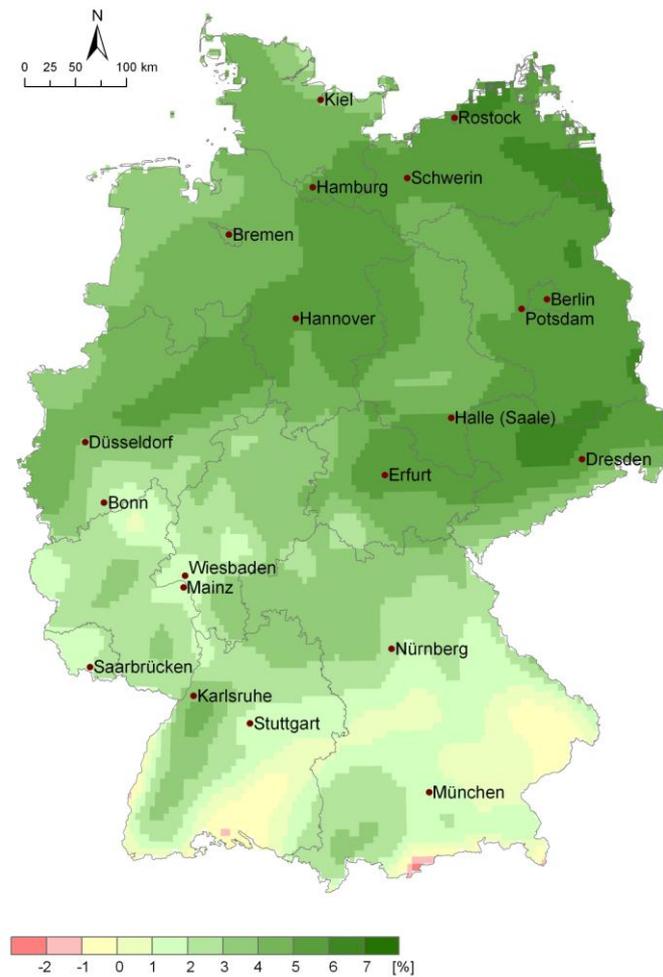
Abbildung 32: Differenz zwischen der Auslastung des Periodenmittels 2071-2100 und der Mittelwerte der Kontrollläufe 1970-2000 für das Emissionsszenario A1B gemittelt über beide Läufe (interpretierbar als Veränderung unter dem 3K-Szenario).



Zusammenfassung und Diskussion

Die Stromproduktion an Windkraftanlagen erhöht sich im Jahresmittel und aggregiert über ganz Deutschland – über beide Läufe gemittelt – um 3,2% (1K-Szenario) bis 5,5% (3K-Szenario) aufgrund der simulierten Zunahme der mittleren Windgeschwindigkeiten in Nabenhöhe typischer moderner Windräder. Abbildung 32 bildet noch einmal das veränderte Potenzial von Windkraftanlagen zwischen 2010 und 2055 für das 2K-Szenario ab. Räumlich scheinen Mittel- und Norddeutschland zu profitieren, während in Süddeutschland eher geringe Effekte zu erwarten sind. Hinsichtlich der saisonalen Verteilung zeigen sich allenfalls in einzelnen Monaten eindeutige Trendmuster, etwa eine Zunahme des Windkraftpotenzials im Januar und eine Abnahme im August.

Abbildung 33: Potenzial von Windkraftanlagen, Änderung 2055 gegenüber 2010 (2 K-Szenario); Jahresmittelwerte



Aufgrund des sehr datenaufwändigen Verfahrens konnten in der vorliegenden Studie nur zwei Läufe des dynamischen regionalen Klimamodells CCLM ausgewertet werden. Die Ergebnisse sind entsprechend noch wenig robust. Um sie robuster zu machen, müssten weitere Läufe dynamischer regionaler Klimamodelle analysiert werden. Zudem sind die Windgeschwindigkeiten in dynamischen regionalen Klimamodellen generell noch mit großen Unsicherheiten behaftet. Dies betrifft insbesondere die Starkwinde, deren mögliche Zunahme unter Klimawandel zu einem häufigeren Abschalten der Windkraftanlagen führen würde.

Der Windkraftsektor ist insofern von großer Relevanz, als dessen weiterer Ausbau eine der tragenden Säulen der Energiewende ist bzw. werden soll. Zudem ist es angesichts des saisonalen Verlaufs des Stromverbrauchs günstig, dass die Auslastung von Windkraftanlagen im Winter generell höher ist als im Sommer. Da die Windkraft eine relativ junge Technologie ist, sind ihr weiterer Ausbau und technologische Innovationen (z. B. hinsichtlich der Windgeschwindigkeits-Auslastungs-Funktion) für die zukünftig produzierte Jahresstrommenge wahrscheinlich weitaus entscheidender als die klimatischen Effekte aufgrund des Klimawandels.

Simulation der Änderung des Solarstrompotenzials

Der Klimawandel kann die Erzeugung von Solarstrom durch verschiedene Effekte beeinflussen, z. B. durch Veränderungen der Luftfeuchte, der Bewölkung und der Wolkencharakteristik (Schaeffer u. a. 2012). Daraus resultieren letztlich Änderungen der Strahlungsintensität. Die Lufttemperatur wiederum hat einen erheblichen Einfluss auf die Effizienz von Solarmodulen. In Abhängigkeit von den Charakteristika der Solarmodule bzw. ihrer Kühlung verringert sich mit steigender Luft- und somit Solarzellentemperatur die Effizienz erheblich (vgl. Tabelle 5).

Jede Solarzelle weist je nach Bauart und verwendetem Material spezifische Charakteristika hinsichtlich der Umwandlung von Strahlung in Strom auf. Aufgrund

dieser stark heterogenen Gegebenheiten haben wir von einer Abschätzung der Klimawirkungen auf die Erzeugung von Solarstrom abgesehen. Es ist derzeit offen, ob eine möglicherweise zunehmende Strahlungsintensität die aus der steigenden Temperatur resultierenden Effizienzverluste kompensieren kann.

Tabelle 5: Beispiel für die Verringerung der Stromausbeute in Abhängigkeit von der Solarzellen-Temperatur (Solarstromerzeugung 2012).

Solarzellen-Temperatur [°C]	Verringerung der Stromausbeute [%]
30°C	5%
40°C	10%
50°C	15%
60°C	20%

6. Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf Holzenergiepotenzial und Wasserhaushalt

Entwicklung und Struktur der Holzwirtschaft in Deutschland

Deutschland verfügt mit 3,4 Mrd. m³ über die größten Holzvorräte in Europa, Wälder nehmen ein Drittel der Landesfläche ein. Während in den letzten vier Jahrzehnten die Waldfläche um etwa 1 Million Hektar zunahm, wird der Zuwachs der nächsten Jahre mit ca. 10.700 Hektar pro Jahr deutlich langsamer ausfallen (BMELV 2006 und 2010).

Der Holzeinschlag hat sich gegenüber dem langjährigen Mittel der 1990er Jahre in etwa verdoppelt (BMELV 2009) und lag im Durchschnitt der Jahre 2005 bis 2010 bei ca. 61 Mio. m³ (BMELV 2011). Damit liegt die Nutzung weiterhin unter dem Zuwachs, eine Entwicklung, die sich nach Schätzungen des BMELV noch ca. 15 bis 20 Jahre fortsetzen wird. Bei gleichbleibender Nutzungsstruktur wird das jährlich nutzbare Potenzial auf rund 80 Mio. m³ geschätzt (BMELV 2011).

Im vergangenen Jahrzehnt hat sich allerdings mit der zunehmenden Bedeutung von Holz für das Energiesystem die Nachfragestruktur deutlich verändert. Während in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts die energetische Holznutzung zunehmend bedeutungslos wurde und die stoffliche Nutzung dominierte, beobachtet man seit etwa 2000 eine Trendumkehr. Noch 2005 gingen rund zwei

Drittel des Holzeinschlags in Form von Schnittholz, Platten und konstruktiven Bauelementen in den Bausektor, die restliche Menge verteilte sich auf Papierherstellung und Brennholz (vgl. BMELV 2006). Im Jahr 2010 hingegen betrug die energetische Holznutzung bereits 50 Mio. m³, also fast die Hälfte der gesamten inländischen Holzverwendung von 110 Mio. m³ (Seintsch 2011).

Im Verhältnis zum gesamten Energie-Stoffwechsel in Deutschland nimmt die energetische Holznutzung jedoch einen sehr geringen Anteil ein. Gegenwärtig tragen alle erneuerbaren Energieträger zusammen ca. 10% zum Primärenergieverbrauch von ca. 13.000 PJ bei, wobei Holz mit einem Anteil von ca. 35% der wichtigste erneuerbare Energieträger ist, noch vor Windkraft (16%), Wasserkraft (8%) und Biotreibstoffen (14%) (AGEB Pressedienst 2012, BMELV 2011).

Die wichtigsten Faktoren, die zur beobachteten Renaissance von Holz als Energieträger geführt haben, sind hohe Gas- und Ölpreise sowie staatliche Förderungen und Initiativen wie z.B. die im Koalitionsvertrag von 2002 beschlossene und 2004 initiierte „Charter für Holz“ (BMLV 2004). In Zukunft werden die vom Bundestag im Juni 2011 im Gesetespaket zur Energiewende beschlossenen Ziele zum Anteil erneuerbarer Energieträger am Energiesystem (60% an der Bruttoendenergie und 80% an der Stromerzeugung bis 2050) die weitere Entwicklung der energetischen Holznutzung entscheidend mitbestimmen.

Durch die stärkere energetische Nutzung von Holz werden Forstwirtschaft und Energiewirtschaft wieder enger miteinander gekoppelt. Ein möglicher massiver Anbau von Energiewäldern (sogenannten Kurzumtriebsplantagen (KUP), die auf landwirtschaftlichen Böden angebaut werden) würde in Zukunft zusätzliche Koppelungen dieser beiden Sektoren mit dem Sektor Landwirtschaft etablieren. Gleichzeitig ist die Holzwirtschaft, wie jeder Biomasseproduzent, ein besonders klimasensitiver Sektor, der über geänderte Nettoprimärproduktion und Wasserinanspruchnahme unter Klimawandel sowohl Potenzialänderungen erfahren als auch mögliche neue Nutzungskonkurrenzen zu anderen wichtigen Land- und Wassernutzern erzeugen könnte.

Zusammengenommen legen die bereits beobachtbaren und die geplanten Entwicklungen nahe, dass die energetische Holznutzung in den kommenden Jahrzehnten ein zunehmend zentrales Element im Biomasse-Energie-Wasser-Nexus darstellen wird, dessen systemische (sektorübergreifende) Reaktionen auf den Klimawandel bisher noch nicht untersucht wurden.

Die folgenden Untersuchungen gehen von fünf Fragen aus:

- Wie wird sich die Biomasseproduktivität und daraus abgeleitet das Energiepotenzial des Waldes (bei gegenwärtigem Waldbestand) unter Klimawandel (temperaturstratifiziert bei OK, 1K, 2K und 3K gegenüber 2003) verändern?

- Welche Konsequenzen hat die veränderte Biomasseproduktivität im Wald für den Wasserhaushalt?
- Wie hoch ist die Sensitivität der Klimawirkungen in Hinblick auf den zentralen Unsicherheitsfaktor CO₂-Düngung?
- Welchen Einfluss auf das Gesamtsystem (Holzenergiepotenzial und Wasserhaushalt) unter Klimawandel hätte ein zusätzlicher Anbau von Energiewäldern auf landwirtschaftlichen Flächen (Kurzumtriebsplantagen)?
- Welchen Beitrag könnte die energetische Nutzung von Holz unter Klimawandel für das gesamte Energiesystem leisten?

Die Simulationen wurden für ganz Deutschland in regionaler Auflösung mit Hilfe des vom regionalen Klimamodell STAR angetriebenen Waldwachstumsmodells 4C (Lasch et al 2010) durchgeführt. Sie werden im Folgenden zunächst für den bestehenden Wald und danach für vier verschiedene Ausbau-Szenarien von zusätzlichen Energiewäldern auf landwirtschaftlichen Flächen dargestellt.

Szenario 1 - Wald: Nettoprimärproduktion, Energiepotenziale und Versickerungsraten unter Klimawandel

Dieses Szenario geht davon aus, dass der Waldbestand in Deutschland so bleibt wie er gegenwärtig ist und dass das Verhältnis zwischen stofflicher und

energetischer Nutzung von Holz dem Stand von 2010 entspricht. Die im Folgenden beschriebene Computersimulation setzt dieses Waldsystem einem temperaturstratifizierten Klimawandel aus.

Stand des Wissens, Daten und Methoden

Gegenwärtig beträgt das Holzaufkommen in Deutschland ungefähr 70 Millionen m³ (ohne Rinde) Holz aus dem Wald (Mantau 2009). Das entspricht ebenfalls den Werten, die eine Inventurstudie auf Basis einer Unterstichprobe der Bundeswaldinventur (BWI) ergab. Diese hat für den Zeitraum 2002-2008 ermittelt, dass durchschnittlich 106.7 Millionen m³ (mit Rinde) Holz ausgeschieden ist, wobei die verwertbare Nutzungsmenge 70,5 Millionen m³ (ohne Rinde) betrug (Polley u. a. 2009). Die Holzaufkommensmodellierung errechnete auf Basis der BWI2 und verschiedener Nutzungs- und Waldentwicklungsszenarien ein durchschnittliches jährliches Holzaufkommen von 78 Millionen m³ (ohne Rinde) bis 2042. Für die letzte Prognoseperiode 2038-2042 sind 81 Millionen m³ (ohne Rinde) ausgewiesen (Schmitz u. a. 2005). Eine zweite Schätzung des zukünftigen Rohholzpotenzials auf Basis der Inventurstudie 2008 stellen Dunger und Rock (2009) vor. Sie prognostizieren für das Ende des Simulationszeitraumes (2039-2043) ein geringeres Rohholzpotenzial von etwa 96 Millionen m³ (mit Rinde), was mit 20% Rindenabzug 76.8 Millionen m³ (ohne

Rinde) entspricht. Aretz und Hischl (2007) schätzen das Holzenergiepotenzial des Waldes auf maximal 450 PJ pro Jahr. Allerdings berücksichtigt keine dieser Holzpotenzialabschätzungen welchen Einfluss der Klimawandel hätte.

In einer für den gesamten Waldbestand Deutschlands repräsentativen Simulation wurde die Nettoprimärproduktion (NPP), als Ausgangsgröße zur Abschätzung des Energiepotenzials, und die Versickerung (Perkolation), als Ausgangsgröße zur Abschätzung des Einflusses auf den Wasserhaushalt, und Klimawandel berechnet.

Für die repräsentative Darstellung des gesamten Waldbestandes Deutschlands wurde eine Datenbank genutzt, die für das BMBF-Verbundprojekt „Wälder und Forstwirtschaft Deutschlands im globalen Wandel: Strategie für eine integrierte Wirkungsanalyse und -bewertung“ erarbeitet wurde (Wolff 2002). Die Daten basieren auf der stichprobenhaften Erhebung der Bundeswaldinventur und der ökologischen Waldzustandskontrolle entlang eines regelmäßigen Rasters über der Waldfläche (Wolff 2002). Aus dieser Datenbank wurden 4.583 Waldbestände von jeweils 1 ha Größe als repräsentativ ausgewählt und für das Modell 4C initialisiert. Die Bestände repräsentieren die Hauptbaumarten in Deutschland (Fichte, Kiefer, Buche, Eiche) mit ihren ungefähren Flächenanteilen gemäß Bundeswaldinventur (BMELV 2005) und Mischungen mit den Baumarten Birke, Douglasie und Robinie. Baumarten der ausgewählten Flächen, die nicht im Modell parametrisiert sind, wurden durch ähnliche, parametrisierte Baumarten ersetzt.

Mit diesen Beständen wurde der Zeitraum 1977-2006 (Basiszeitraum) und 2031-2060 (stratifizierte Klimaszenarien) simuliert. Alle Bestände wurden einem einheitlichen Bewirtschaftungsszenario unterworfen, das die Stammzahl alle 5 Jahre um 15% reduziert. Die Bodendaten wurden der Bodenübersichtskarte (BÜK) 1000 (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2004) entnommen.

Die Klimadaten wurden über ein GIS von der nächstgelegenen Klimastation zugeordnet. Um in den Klimaszenarien die Niederschlagsvariabilität bei einer vorgegebenen Temperaturerhöhung mit zu berücksichtigen, wurde für jedes STAR-Klimaszenario (0 K, 1 K, 2 K, 3 K) mit je einer trockenen, mittleren und feuchten Realisierung gerechnet. Bei der Darstellung der Ergebnisse wurde dann stets über die drei Realisierungen gemittelt. Damit unterscheidet sich die in diesem Projektteil verwendete Anzahl von STAR Realisierungen von der im Projektteil Stromerzeugung (siehe Kapitel 5), in dem mit jeweils hundert Realisierungen gearbeitet wurde. Die Entscheidung für nur drei STAR Szenarien in diesem Projektteil war letztlich eine Ressourcenfrage.

Neben Temperatur und Niederschlag ist die Berücksichtigung der globalen atmosphärischen CO₂-Konzentration wichtig, da hiervon eine erhöhte Nettoprimärproduktion der Pflanzen erwartet wird. Der tatsächliche Einfluss einer Erhöhung der CO₂-Konzentration auf die Nettoprimärproduktion ist allerdings nach

wie vor unzureichend verstanden und dementsprechend in der Literatur umstritten. Norby und Koautoren (2005) etwa wiesen in empirischen FACE-Experimenten (Free-Air CO₂ Enrichment) eine Erhöhung der NPP von $23 \pm 2\%$ bei einem CO₂-Gehalt von 550 ppm nach (gegenüber der NPP bei etwa 380 ppm). Diesen Wert schätzen sie als robust für temperierte junge Waldbestände ein. Ergebnisse gekoppelter Klima-Vegetationsmodelle ergaben für die gleiche CO₂-Konzentration einen mittleren Anstieg der NPP um 22% (Cramer u. a. 2001). Allerdings bewirken in natürlichen Wäldern oder in KUP Bestandesfaktoren wie z.B. Konkurrenz und Nährstoffverfügbarkeit eine Verringerung oder sogar ein Ausbleiben des CO₂-Düngeeffekts (Körner 2006, Norby u. a. 2009).

Um diese generelle Unsicherheit des CO₂-Effekts zu berücksichtigen, wurden alle Modellläufe ohne und mit CO₂-Effekt gerechnet. Modelltechnisch wurde dies dadurch implementiert, dass zusätzlich zu den Läufen, in denen ein den jeweiligen Klimaszenarien entsprechender Anstieg der CO₂-Konzentration angenommen wurde, parallel Läufe mit einer (artifizial) konstanten CO₂-Konzentration von 350 ppm durchgeführt wurden. Diese in den „ohne CO₂ Düngeeffekt“ Szenarien angenommene CO₂-Konzentration entspricht dem Mittelwert für den Zeitraum 1977-2006. Für das OK-Szenario wurde eine konstante CO₂-Konzentration von 380 ppm angenommen. Für die weiteren Temperaturszenarien „mit CO₂ Düngeeffekt“ sind die entsprechenden Werte: 503 ppm (1 K), 568 ppm (2 K)

bzw. 625 ppm (3 K). Damit kann in 4C das Wachstum ohne und mit CO₂-Düngeeffekt simuliert werden. Die Ergebnisse ohne bzw. mit CO₂-Effekt können als untere bzw. obere Abschätzung in Bezug auf die Unsicherheit des CO₂-Effekts aufgefasst werden.

Der Anteil von Energieholz an der gesamten geernteten Trockenmasse wurde zu 43% festgelegt, was dem aktuellen Anteil an der gesamten Holzverwendung in Deutschland entspricht (Mantau 2009). Als Umrechnungsfaktor von Biomasseerträgen in Energie wurde ein durchschnittlicher Heizwert von 18841 kJ kg⁻¹ zugrunde gelegt (Grote und Feldhusen, 2007).

Ergebnisse

Der mittlere Biomasseertrag (und damit auch das Energiepotenzial) aus Wald in Deutschland steigt mit zunehmender Temperatur sowohl bei konstanter CO₂-Konzentration als auch – noch deutlicher – bei steigenden CO₂-Konzentrationen für die Periode 2031-2060 gegenüber dem Basiszeitraum an (Tabelle 6 und Abbildung 33).

Der mittlere Hektarertrag in Deutschland von 5,85 t TM/ha/a (Basiszeitraum) steigt ohne Berücksichtigung des CO₂-Effekts (d.h. mit konstanter CO₂-Konzentration) um zwischen 7,4% (1K-Szenario) und 17,5% (3K-Szenario) bis 2060 an. Bei Berücksichtigung des CO₂-Effekts steigt er noch deutlich stärker an:

um zwischen 18,5% (1K-Szenario) und 36,9% (3K-Szenario) bis 2060.

Entsprechend variiert das mittlere Energiepotenzial für ganz Deutschland –unter der angenommenen Nutzung des Holzeinschlags für Energiedienstleistungen je nach Klimaszenario und je nach Berücksichtigung des CO₂-Effekts zwischen 515 und 530 PJ pro Jahr (OK) bzw. zwischen 581 und 675 PJ pro Jahr (3K). Für den Basiszeitraum wurde ein mittleres Energiepotenzial von 491 PJ pro Jahr simuliert.

Tabelle 6: Mittlere Biomasseerträge und deren relative Änderung (gegenüber dem Basiszeitraum) auf den Waldflächen nach Bundesländern, simuliert für den Basiszeitraum (1977-2006) und die stratifizierte Klimaszenarien (2031-2060), jeweils ohne und mit CO₂-Effekt (jeweils Mittelwert der drei Realisierungen trocken, mittel und feucht).

Gebiet	Wald- fläche [Mio.ha]	Basis		ohne CO ₂ -Effekt				mit CO ₂ -Effekt			
		NPP [t C ha ⁻¹ a ⁻¹]	Stamm- zuwachs [t TM ha ⁻¹ a ⁻¹]	OK [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]	OK [%]	1K [%]	2K [%]	3K [%]
BB	1.01	8.76	5.84	5.3	4.9	11.3	10.0	8.0	16.1	27. 4	31.5
BW	1.31	9.05	6.04	4.2	7.1	14.7	17.7	7.2	17.9	29. 8	35. 6
BY	2.41	8.63	5.75	5.0	7.8	15.7	20. 7	8.0	18.4	30. 7	39. 2
HE	0.82	8.11	5.40	4.5	7.6	12.8	15.1	7.8	19.3	29. 2	35. 2
MV	0.50	8.45	5.64	6.1	7.5	15.0	20. 5	8.7	17.7	29. 7	39. 5
NI	1.09	8.24	5.50	5.4	8.7	17.3	21.9	8.5	19.0	31.5	40. 4
NW	0.84	8.64	5.76	4.3	9.4	16.9	22. 2	7.2	20. 5	31.2	40. 0
RP	0.78	9.32	6.21	4.0	8.5	15.6	19.6	7.1	19.6	30. 5	37. 6

SH	0.16	9.14	6.10	4.7	6.7	15.7	19.9	7.6	16.5	29. 2	37. 4
SL	0.09	9.69	6.46	3.7	5.1	10.6	9.5	7.2	19.1	28. 5	31.0
SN	0.49	9.02	6.01	5.8	7.7	14.7	17.7	8.6	18.5	30. 4	38. 3
ST	0.47	8.62	5.74	5.4	7.3	14.1	14.8	8.5	18.0	28. 5	35. 0
TH	0.50	8.47	5.65	5.6	8.2	14.3	17.3	8.9	19.4	30. 9	38. 5
Gesamt	10.48	8.78	5.85	4.9	7.4	14.5	17.5	8.0	18.5	29. 8	36. 9

Die Ertragszuwächse unter Klimawandel sind regional ungleich verteilt. Unter dem 3K-Szenario etwa werden die höchsten relativen Ertragssteigerungen für die Bundesländer Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen simuliert (ohne CO₂-Effekt bis etwa 22% bis 2031-2060; mit CO₂-Effekt bis etwa 40% bis 2031-2060), während die geringsten in Brandenburg und Saarland auftreten (ohne CO₂-Effekt bis etwa 10% bis 2031-2060; mit CO₂-Effekt bis etwa 31% bis 2031-2060). In Brandenburg und im Saarland nimmt der Biomasseertrag – bei konstanter CO₂-Konzentration – beim Übergang vom 2K- zum 3K-Szenario sogar wieder ab.

Beispielhaft zeigt eine Karte (Abbildung 33) die Änderung der Nettoprimärproduktion unter dem 3K-Szenario ohne CO₂-Düngeeffekt als Szenario mit der möglichsten NPP-Entwicklung. Abbildung 34 stellt parallel dazu die Veränderung unter dem 3K-Szenario mit Düngeeffekt durch CO₂ dar. Ohne Düngeeffekt lässt sich die räumliche Verteilung der Regionen mit eher positiven

Auswirkungen der Klimaszenarien und Regionen mit eher negativen Auswirkungen grob wie folgt skizzieren: Zum einen profitieren die Waldbestände, die sich in den niederschlagsreicheren Mittelgebirgen befinden. Ab einer Höhenlage über 600 m gibt es anhand unserer Simulationen keinen Waldbestand mehr, der NPP-Verluste hinnehmen muss. Zum anderen ergeben sich im nordwestlichen Teil Deutschlands (Niedersachsen, Schleswig-Holstein) größtenteils NPP- Gewinne aufgrund der Klimaänderung. Besonders einige Waldbestände in Brandenburg und Sachsen-Anhalt sowie im flachen warmen südwestlichen Teil Deutschlands zeigen NPP-Rückgänge im 3K-Szenario.

Abbildung 34: Veränderung der NPP unter dem 3K-Szenario ohne CO₂-Düngeeffekt als Weiser für die Produktivität für die 4583 Waldbestände der BW1 und ÖWK.

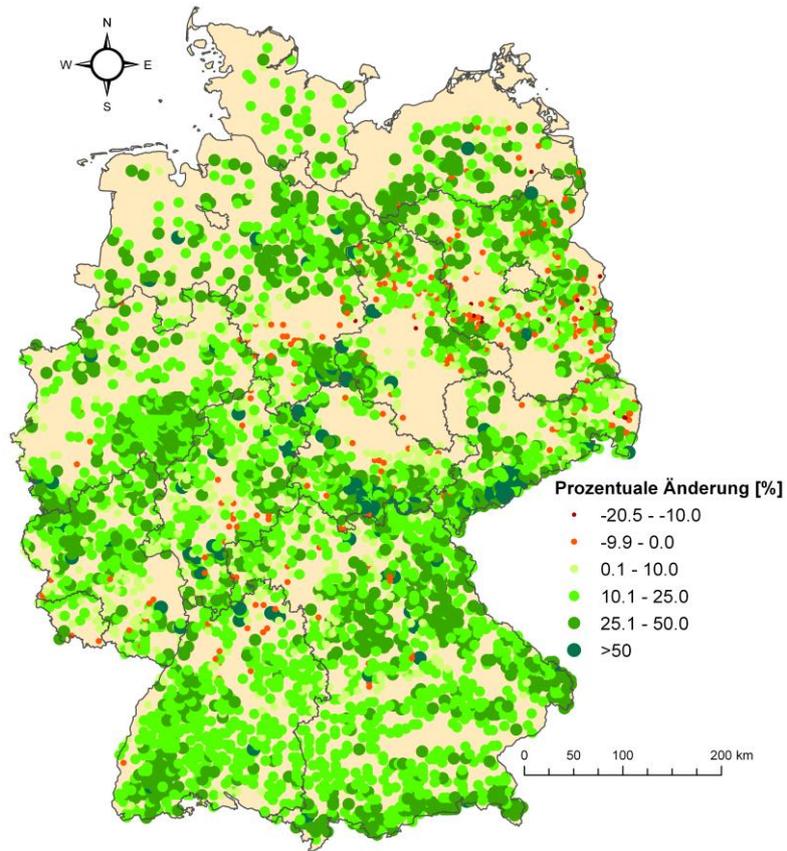
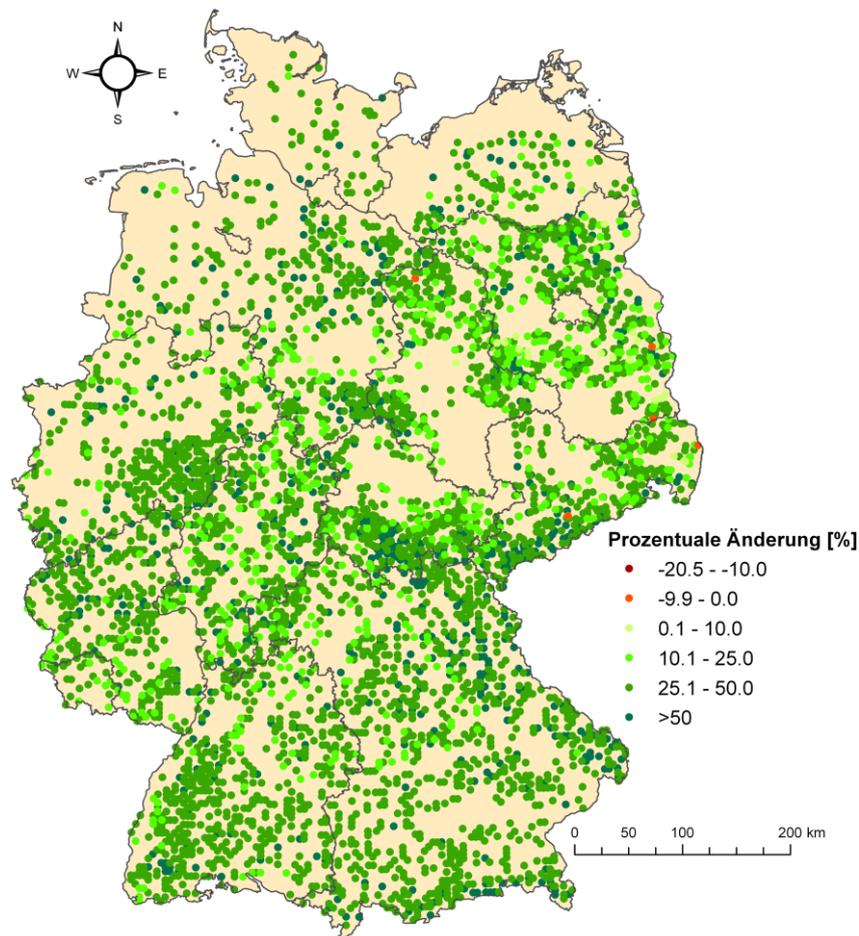


Abbildung 35: Veränderung der NPP unter dem 3K-Szenario mit CO₂-Düngeeffekt als Weiser für die Produktivität für die 4583 Waldbestände der BW1 und ÖWK.



Die mittlere Versickerungsrate unter Wald in Deutschland sinkt mit zunehmender Temperatur sowohl bei konstanter CO₂-Konzentration als auch – etwas weniger stark – bei steigenden CO₂-Konzentrationen für die Periode 2031-2060 gegenüber dem Basiszeitraum ab (Tabelle 7 und Abbildung 35).

Die mittlere Versickerungsrate in Deutschland von 391,8 mm/a (Basiszeitraum) sinkt ohne Berücksichtigung des CO₂-Effekts um zwischen 9,2% (1K-Szenario) und 29,5% (3K-Szenario) bis 2055. Bei Berücksichtigung des CO₂-Effekts sinkt sie etwas schwächer: um zwischen 5% (1K-Szenario) und 23,4% (3K-Szenario) bis 2055. Die Versickerungsverluste sind ohne CO₂-Effekt höher als mit CO₂-

Effekt; dies liegt daran, dass die Transpirationsverluste bei steigender CO₂-Konzentration sinken.

Tabelle 7: Mittlere Versickerungsraten und deren relative Änderung (gegenüber dem Basiszeitraum) auf den Waldflächen nach Bundesländern, simuliert für den Basiszeitraum (1977-2006) und die stratifizierten Klimaszenarien (2031-2060), jeweils ohne und mit CO₂-Effekt (jeweils Mittelwert der drei Realisierungen trocken, mittel und feucht).

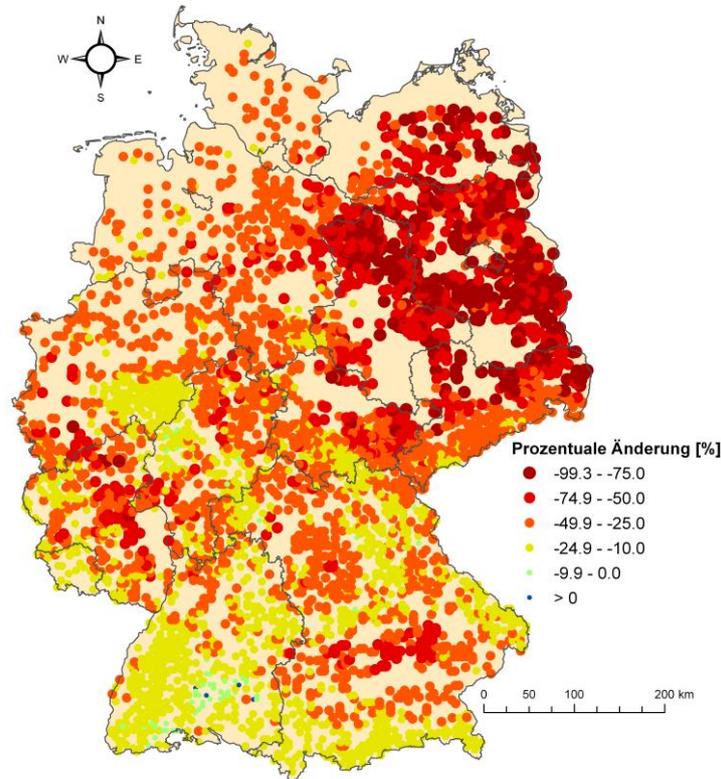
Gebiet	Wald- fläche [Mio. ha]	Basis [mm/a]	ohne CO ₂ -Effekt				mit CO ₂ -Effekt			
			0 K [%]	1 K [%]	2 K [%]	3 K [%]	0 K [%]	1 K [%]	2 K [%]	3 K [%]
BB	1,01	144,0	-9,0	-29,3	-45,2	-67,1	-5,8	-17,7	-32,4	-54,7
BW	1,31	628,3	-5,8	-6,9	-12,4	-18,2	-5,2	-4,3	-9,0	-14,2
BY	2,41	576,0	-3,3	-6,0	-14,8	-24,0	-2,6	-3,1	-10,9	-19,4
HE	0,82	411,9	-5,3	-9,1	-11,9	-25,1	-4,4	-5,7	-7,5	-20,3
MV	0,50	195,0	-3,8	-13,7	-38,7	-55,0	-1,1	-3,1	-25,2	-41,0
NI	1,09	379,7	1,5	-5,4	-17,0	-33,4	2,6	-0,7	-10,7	-25,9
NW	0,84	576,4	0,1	-7,2	-9,6	-24,3	0,8	-4,2	-5,6	-19,6
RP	0,78	387,6	-6,7	-10,3	-13,3	-27,3	-5,6	-6,0	-7,5	-20,6
SH	0,16	366,7	0,8	-3,7	-17,2	-32,1	2,1	1,7	-10,3	-23,7
SL	0,09	462,6	-7,9	-6,9	-8,3	-20,4	-7,2	-4,1	-4,7	-16,2
SN	0,49	379,0	-3,0	-16,8	-26,9	-39,4	-1,8	-12,4	-21,3	-33,2
ST	0,47	202,3	-4,8	-19,9	-30,2	-49,2	-2,6	-11,7	-20,3	-39,3
TH	0,50	383,8	-3,9	-9,1	-16,7	-28,8	-2,9	-5,2	-11,6	-23,1
Gesamt	10,48	391,8	-3,7	-9,2	-16,8	-29,5	-2,6	-5,0	-11,3	-23,4

Abbildung 35 zeigt, dass in fast allen Waldbeständen die Versickerungen zurückgehen (nur 4 Waldbestände in BW sind knapp positiv). Die stärksten Rückgänge sind im nordostdeutschen Tiefland (Mecklenburg-Vorpommern,

Brandenburg, Sachsen-Anhalt) zu verzeichnen sowie im Mainzer Becken (RP) und Teilen Bayerns.

Die regionale Differenzierung der mittleren jährlichen Versickerungsraten spiegelt v. a. die regionale Variabilität der Klimaszenarien wider. Neben Böden und Landnutzung ist die Niederschlagsmenge der wichtigste Faktor in Bezug auf die Versickerung. Die Bundesländer mit den geringsten Versickerungsraten im Basiszeitraum sind auch die Gebiete mit den geringsten jährlichen Niederschlagsmengen. In diesen Bundesländern ist der relative Rückgang im 3K-Szenario (um bis zu 67% in Brandenburg ohne CO₂-Effekt) im Vergleich zu den anderen Bundesländern am höchsten und aus der Perspektive des Landschaftswasserhaushalts sehr relevant.

Abbildung 36: Veränderung der Versickerung unter 4583 Waldbeständen der BW1 und ÖWK. Beziehung der Versickerungsänderung zur Geländehöhe (rechte obere Abbildung). Berechnet für das 3K-Szenario und ohne CO₂-Düngeeffekt.



Die hohen absoluten (aber eher niedrigen relativen) Rückgänge in den Wäldern von Bundesländern mit hohen Versickerungssummen (wie z.B. Bayern, Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen) beeinträchtigen den Landschaftswasserhaushalt weniger stark. In den nordwestlichen Bundesländern (Niedersachsen, Schleswig-Holstein) ist die Versickerung unter 0 K und 1 K gegenüber dem Basiszeitraum – bei beiden CO₂-Varianten – kaum verringert oder sogar leicht erhöht. Erst ab 2 K zeigt sich hier ein deutlicher relativer Rückgang der Versickerungsrate.

Szenario 2 - Energieholzplantagen: Nettoprimärproduktion, Energiepotenziale und Versickerungsraten unter Klimawandel

Energieholzplantagen (Kurzumtriebsplantagen)

In diesem Kapitel soll nicht der Ist-Zustand der forstwirtschaftlichen Flächen in Deutschland den stratifizierten Klimaszenarien unterworfen werden, sondern mögliche zukünftige Nutzungsformen von Holz als Energieträger. Eine viel diskutierte Möglichkeit ist die moderate bis massive Ausweitung von sogenannten Kurzumtriebsplantagen (KUP) bzw. Energieholzplantagen, die nicht auf forstwirtschaftlichen, sondern auf landwirtschaftlichen Flächen angebaut werden.

KUP werden in einem mehrere Jahre dauernden Umtrieb bewirtschaftet. Verschiedene Baumarten eignen sich dafür (u. a. Pappel, Weide, Aspe, Robinie). Sie haben gegenüber landwirtschaftlichen Pflanzen, die nur einjährig angebaut werden, mehrere Vorteile. Das erzeugte Holz ist sehr energieeffizient und die Anbauflächen sind geringer mit Pestiziden und Düngern belastet als mit Energiemais bepflanzte Ackerflächen. Zudem sind Energieholzplantagen deutlich artenreicher als Ackerflächen (Rock 2007) und können durch die mehrjährige Nutzung im Boden mehr Kohlenstoff speichern als durch eine konventionelle landwirtschaftliche Nutzung (Qinkenstein 2009, Tönshoff u. a. 2010). Aufgrund der Nutzungskonkurrenz mit den landwirtschaftlichen Pflanzen werden KUP bisher

in Deutschland kaum genutzt: derzeit stehen nur etwa 5000 ha unter KUP (Magazin für Erneuerbare Energien, Januar 2012). Sie werden aber wegen der genannten Vorzüge dennoch als interessante Option für den Ausbau erneuerbarer Energieträger angesehen.

Stand des Wissens, Daten und Methoden

In unseren Simulationen betrachten wir vier verschiedene Ausbau-Szenarien: 1, 2, 3 und 4 Millionen Hektar der Ackerflächen unter Aspen-KUP. Diese Größen wurden gewählt, da sie ungefähr die Spannbreite des in der Literatur genannten Flächenpotenzials für KUP abdecken, das zwischen 0,58 Mio. ha und dem geschätzten Wert für Energiepflanzenanbau von etwa 3,7 Mio. ha für 2020 liegt (AEE 2010, IFNE 2009, Thrän u. a. 2005). In unseren Szenarien wurden die jeweils schlechtesten Standorte (Flächen mit den niedrigsten Erträgen) unter KUP gestellt, da unbestritten erscheint, dass die besten Ackerflächen für die Nahrungsmittelproduktion zur Verfügung stehen müssen.

Bisherige Untersuchungen zu den Ertragsleistungen von KUP erfolgten v. a. mit Regressionsmodellen (Röhle u. a. 2009) oder empirischen Kohlenstoffhaushaltsmodellen (Quinkenstein u. a. 2009). Diese und ähnliche Studien simulieren einzelne Standorte und rechnen die Ergebnisse allenfalls für größere Gebiete hoch. Bei Wechsung und Koautoren (2008) findet sich eine

modellbasierte Simulationsstudie zu den Erträgen von Aspen-KUP in Ostdeutschland unter dem 2K-Szenario. Eine modellbasierte Studie zu Erträgen und Versickerungsraten von KUP in ganz Deutschland für stratifizierte Klimaszenarien liegt bislang nicht vor und wurde im Rahmen des vorliegenden Projekts erstmals durchgeführt.

Für den Basiszeitraum (1987-2006) und die stratifizierten Klimaszenarien (0 bis 3 K bis 2055, Simulationsperiode jeweils 2041-2060)² sowie vier KUP-Ausbau-Szenarien (1 Mio. ha bis 4 Mio. ha) wurden die potenziellen Biomasseerträge und Versickerungsraten von Aspen-Kurzumtriebsplantagen mit Hilfe des prozessbasierten Waldwachstumsmodells 4C (Lasch u. a. 2005) für ganz Deutschland simuliert. Die Simulation erfolgte für 7010 Flächen unterschiedlicher Größe, die aus den Ackerflächen in Deutschland ausgewählt wurden. Die Auswahl der Flächen erfolgte über eine Verschneidung der digitalen Bodenkarte BÜK 1000 mit der Landnutzungskarte CORINE Landcover 2000. Organische Böden und bewässerte landwirtschaftliche Flächen wurden ausgeschlossen, da sie nicht bzw. nicht primär für KUP geeignet sind. Damit werden etwa 76% der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland repräsentiert. Eine detailliertere

² KUPs dürfen aufgrund gesetzlicher Regelungen max. 20 Jahre auf Ackerflächen betrieben werden, wobei alle 5 Jahre eine Ernte erfolgt. Daher wurde für KUPs nur eine 20 Jahres Periode simuliert. Für Waldflächen wird analog zu den Mittelungen anderer Größen (z.B. in der Meteorologie, Normalperiode) ein dreißigjähriges Mittel bevorzugt, um auch Schwankungen zwischen den Jahren auszugleichen.

Beschreibung des Simulationsansatzes und des Modells 4C findet sich in Kollas und Koautoren (2009). Eine Kurzbeschreibung von 4C findet sich in Anhang E.

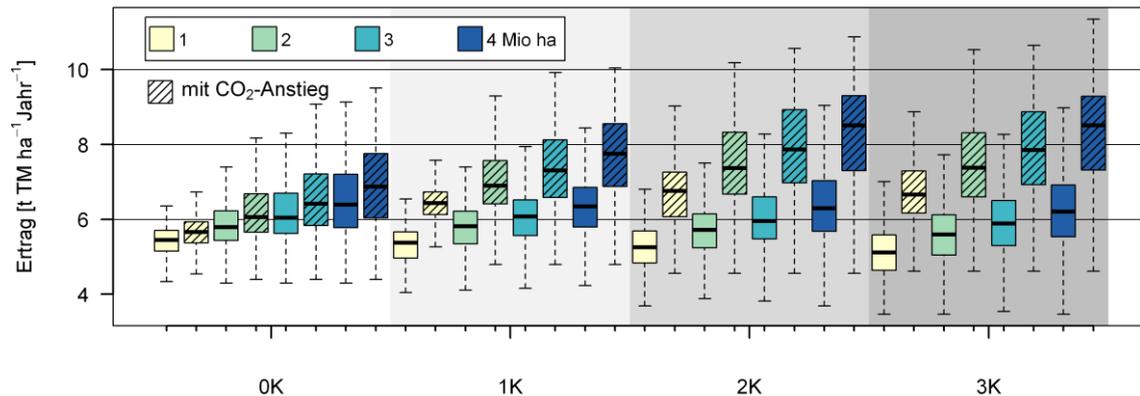
Die Zuordnung der Klimastationen, die Berücksichtigung der Niederschlagsvariabilität durch die Auswahl von drei Realisierungen pro STAR-Klimaszenario sowie die Modellierung ohne und mit Berücksichtigung des CO₂-Effekts erfolgte wie bei den Wald-Simulationen.

Zur Abschätzung des gesamten jährlichen Energiepotenzials wurden die mittleren Flächenerträge (t TM ha⁻¹ Jahr⁻¹) berechnet und – wie beim Wald – ein Heizwert von 18841 kJ kg⁻¹ zugrunde gelegt. Die Änderung der Versickerungsrate wurde (ebenfalls flächengewichtet) für die jeweiligen Landflächen ermittelt.

Ergebnisse

Abbildung 36 zeigt die jährlichen Hektarerträge für die vier Klimaszenarien (0-3 K) und die vier KUP-Szenarien (1-4 Mio. ha) jeweils ohne und mit CO₂-Effekt.

Abbildung 37: Jährliche Hektarerträge für die vier Klimaszenarien (0-3 K) und die vier KUP-Szenarien (1-4 Mio. ha) für den Zeitraum 2041-2060 jeweils ohne und mit CO₂-Effekt. Die Spannbreiten resultieren aus den unterschiedlichen Ergebnissen für die einzelnen Flächen: der schwarze Balken ist der Median, die farbige Box reicht vom 25-ten zum 75-ten Perzentil und die oberen und unteren Whisker beschreiben den 1.5-fachen Interquartilabstand

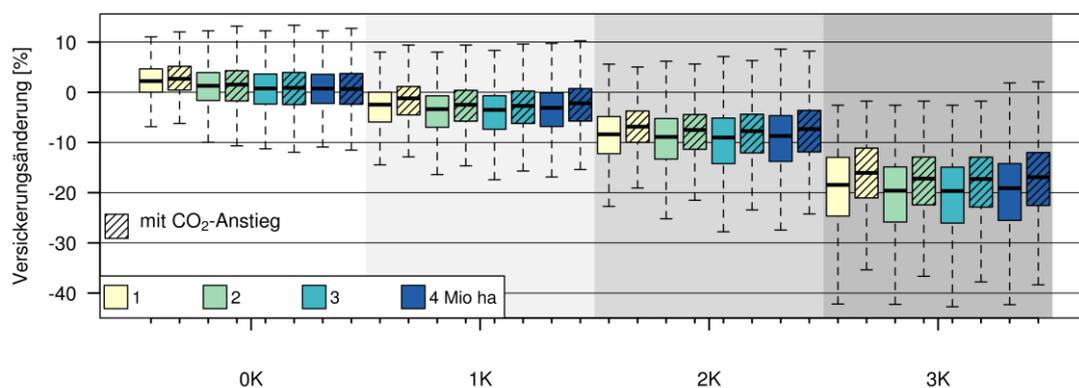


Hinsichtlich der Erträge lassen sich qualitativ folgende Zusammenhänge erkennen:

- die Hektarerträge sind bei Berücksichtigung des CO₂-Effekts höher als ohne CO₂-Effekt und die Differenzen werden mit zunehmender Temperatur größer;
- die Hektarerträge steigen mit zunehmender KUP-Fläche, da sukzessive bessere Standorte hinzukommen;
- ohne Berücksichtigung des CO₂-Effekts sinken die jährlichen Hektarerträge mit zunehmender Temperatur leicht (zumindest die Mediane);
- bei Berücksichtigung des CO₂-Effekts hingegen steigen die Hektarerträge mit zunehmender Temperatur von 0 K bis 2 K für alle KUP-Szenarien an; beim Anstieg von 2 K auf 3 K findet allerdings kein signifikanter Ertragszuwachs mehr statt;
- die Streuung der Ergebnisse (Interquartilabstand) nimmt mit zunehmender KUP-Fläche und tendenziell auch mit zunehmender Temperatur zu.

Abbildung 37 zeigt die relativen Änderungen der mittleren jährlichen Versickerungsraten (gegenüber dem Basiszeitraum) für die vier Klimaszenarien (0-3 K) und die vier KUP-Szenarien (1-4 Mio. ha) jeweils ohne und mit CO₂-Effekt.

Abbildung 38: Relative Änderungen der mittleren jährlichen Versickerungsraten für den Zeitraum 2041-2060 (gegenüber dem Basiszeitraum) für die vier Klimaszenarien (0-3 K) und die vier KUP-Szenarien (1-4 Mio. ha) jeweils ohne und mit CO₂-Effekt. Weitere Erläuterung zur Grafik siehe Abb. 32.



Hinsichtlich der Änderung der Versickerungsraten lassen sich qualitativ folgende Zusammenhänge erkennen:

- die Versickerungsänderungen sind nur beim 0 K-Szenario tendenziell positiv (zumindest die Mediane); beim 1K- bis 3K-Szenario sind die Mediane negativ und nehmen mit steigender Temperatur ab;
- die Versickerungsraten sind bei Berücksichtigung des CO₂-Effekts meist geringfügig höher als ohne CO₂-Effekt (zumindest die Mediane);
- zunehmende KUP-Fläche wirkt sich praktisch nicht auf die Änderung der Versickerungsrate aus;
- die Streuung der Ergebnisse (Interquartilabstand) nimmt mit zunehmender Temperatur tendenziell leicht zu.

Tabelle 8 zeigt die für ganz Deutschland simulierten mittleren jährlichen Biomasseerträge, Energiepotenziale und Versickerungsraten für den Basiszeitraum sowie das Energiepotenzial und die relativen Änderungen von Erträgen und Versickerungsraten unter den vier Klimaszenarien für alle vier KUP-Szenarien. Es werden jeweils die Resultate ohne und mit Berücksichtigung des CO₂-Effekts angegeben.

Tabelle 8: Biomasseerträge, Energiepotenziale und Versickerungsraten für den Basiszeitraum (1987-2006) und relative Änderungen von Erträgen und Versickerungsraten (gegenüber dem Basiszeitraum) sowie Energiepotenziale unter den vier KUP-Szenarien und den vier Klimaszenarien (0 K bis 3 K) für den Zeitraum 2041-2060 ohne und mit Berücksichtigung des CO₂-Effekts (die Werte für die Klimaszenarien sind jeweils die Mittelwerte aus den drei Realisierungen trocken, mittel, feucht).

Klima-Szenario	KUP-Szenario	Ertrag [t TM/ha/a]		Energiepotenzial [GJ/ha/a]		Versickerungsrate [mm/a]	
		ohne CO ₂ -Effekt	mit CO ₂ -Effekt	ohne CO ₂ -Effekt	mit CO ₂ -Effekt	ohne CO ₂ -Effekt	mit CO ₂ -Effekt
Basis	1 Mio. ha	5,16	5,16	97,27	97,27	390,51	390,51
	2 Mio. ha	5,48	5,48	103,18	103,18	373,30	373,30
	3 Mio. ha	5,74	5,74	108,23	108,23	364,56	364,56
	4 Mio. ha	6,05	6,05	114,00	114,00	366,44	366,44
		relative Änderung des Ertrags [%]				relative Änderung der Versickerungsrate [%]	
0 K	1 Mio. ha	6,7	11,6	103,75	108,54	2,8	3,1
	2 Mio. ha	7,6	13,7	111,01	117,34	1,7	1,8
	3 Mio. ha	8,6	15,2	117,58	124,68	1,1	1,1
	4 Mio. ha	8,7	15,3	123,92	131,40	0,8	0,9
1 K	1 Mio. ha	4,7	25,5	101,79	122,04	-3,8	-2,1
	2 Mio. ha	5,9	27,4	109,27	131,50	-4,6	-3,1
	3 Mio. ha	6,1	28,3	114,79	138,81	-4,8	-3,5
	4 Mio. ha	5,4	27,8	120,20	145,65	-4,5	-3,2
2 K	1 Mio. ha	3,4	31,5	100,56	127,93	-8,7	-6,8
	2 Mio. ha	4,4	34,6	107,72	138,90	-9,7	-8,0
	3 Mio. ha	5,4	36,7	114,08	147,92	-10,4	-8,8
	4 Mio. ha	5,6	36,7	120,42	155,80	-10,5	-8,6
3 K	1 Mio. ha	0,6	31,7	97,87	128,13	-20,1	-17,3
	2 Mio. ha	1,8	35,0	105,06	139,26	-21,5	-18,8
	3 Mio. ha	2,7	36,5	111,10	147,75	-22,1	-19,4

	4 Mio. ha	2,5	36,5	116,91	155,60	-21,9	-19,1
--	-----------	-----	------	--------	--------	-------	-------

Folgende quantitativen Ergebnisse und Zusammenhänge in Tabelle 8 sind hervorzuheben:

- Im Basiszeitraum (1987-2006) liegen die mittleren Hektarerträge je nach KUP-Szenario (1-4 Mio. ha) zwischen 5,16 und 6,05 t TM/ha/a. Die entsprechenden Energiepotenziale liegen zwischen 97 und 114 GJ/ha/a. Die Hektarerträge bzw. Energiepotenziale steigen dabei mit der KUP-Fläche an, da sukzessive bessere Standorte einbezogen werden (dies gilt auch für alle Klimaszenarien). Die mittleren Versickerungsraten im Basiszeitraum liegen zwischen 366 und 391 mm/a und sinken mit steigender KUP-Fläche.
- Die Hektarerträge (und damit auch die Energiepotenziale) liegen in allen Klimaszenarien im Zeitraum 2041-2060 (0-3 K) durchweg höher als im Basiszeitraum. Ohne Berücksichtigung des CO₂-Effekts steigen die Hektarerträge im 0 K-Szenario je nach KUP-Szenario um 6-9%; mit steigender Temperatur nehmen die Ertragszuwächse allerdings ab und liegen im 3K-Szenario nur noch bei 1-3%. Mit Berücksichtigung des CO₂-Effekts steigen die Ertragszuwächse hingegen von 0 K (12-15%) bis 2 K (32-37%) deutlich an; beim Übergang vom 2K- zum 3K-Szenario

stagnieren die Ertragszuwächse allerdings. Die Ertragszuwächse hängen also entscheidend vom Eintreten des CO₂-Effekts ab.

- Die relativen Änderungen der Versickerungsraten sind nur im OK-Szenario leicht positiv gegenüber dem Basiszeitraum (Zunahme je nach KUP-Szenario um 1-3%). Für das 1K- bis 3K-Szenario geht die Versickerungsrate gegenüber dem Basiszeitraum zurück, wobei der Rückgang mit steigender Temperatur deutlich zunimmt. Der Versickerungsrückgang ist dabei auf steigende Temperaturen und Niederschlagsrückgang im Sommer zurückzuführen, zudem steigen mit den Erträgen die Interzeptionsverluste, verursacht durch größere Blattmassen der Bäume, was die Versickerungsrate zusätzlich senkt. Ohne CO₂-Effekt fällt der Rückgang (von 4-5% bei 1 K auf 20-22% bei 3 K) etwas stärker aus als mit CO₂-Effekt (von 2-4% bei 1 K auf 17-19% bei 3 K), was sich – wie beim Wald – durch geringere Transpirationsverluste im Fall steigender CO₂-Konzentrationen erklären lässt. Die Änderung der Versickerungsraten wird nur gering durch die Änderung der CO₂-Konzentration beeinflusst.

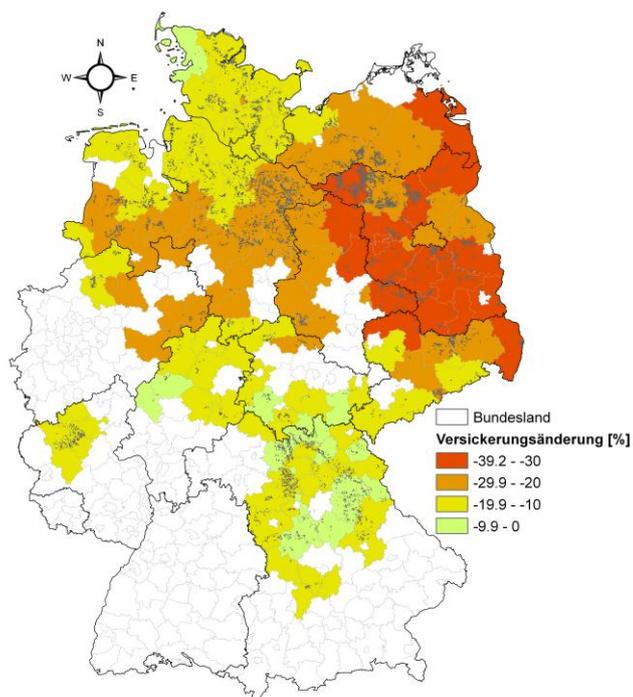
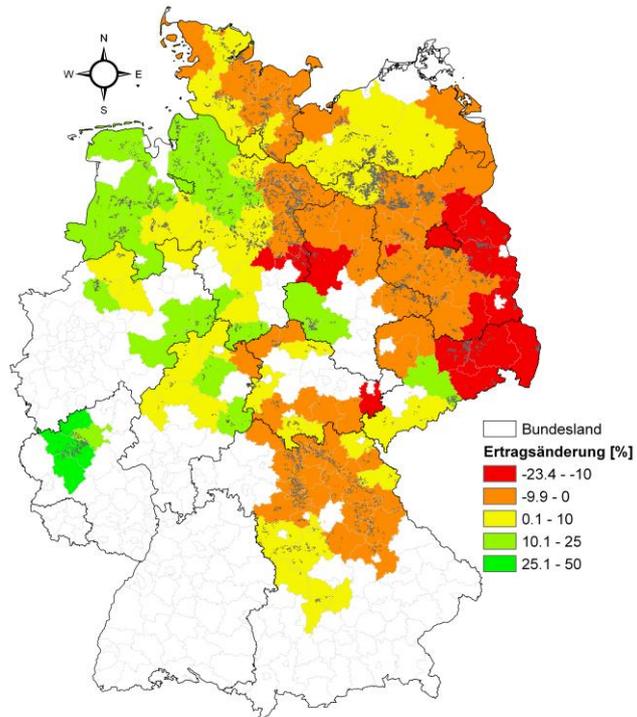
Die Flächen der Nutzung für Aspen-KUP liegen bei einer Gesamtnutzung von circa einer Million Hektar Ackerfläche vorwiegend im Nordosten und Nordwesten Deutschlands. Abbildung 38 zeigt, dass sie unter dem 3K Szenario vor allem im

Nordosten eher Ertragsrückgänge aufweisen, im Nordwesten dagegen Ertragssteigerungen.

Die untere Karte zeigt auch, dass der Rückgang der Versickerung unter dem 3K Szenario räumlich sehr stark, ähnlich zu den Ertragsänderungen, variiert. Die stärksten Versickerungsrückgänge werden für den Nordosten (Brandenburg, Sachsen, Sachsen-Anhalt) berechnet, während Regionen im Nordwesten und Norden Bayerns weniger betroffen sind.

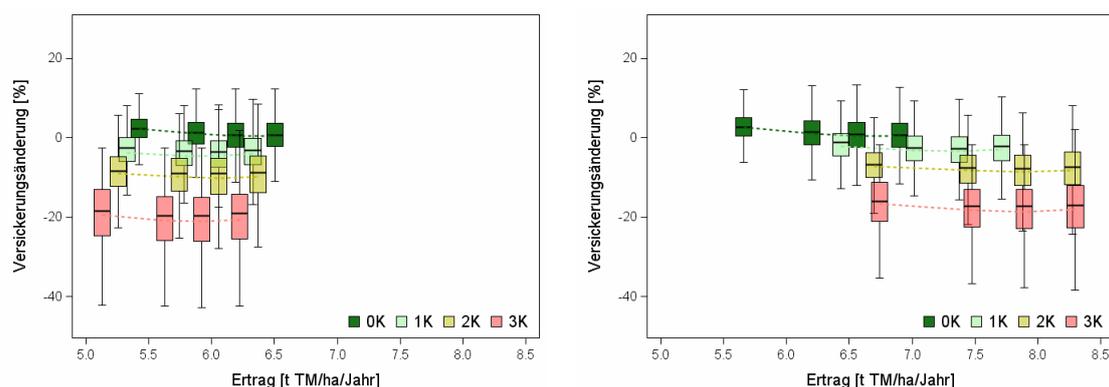
Im Folgenden wird der Zusammenhang zwischen Ertrags- und Versickerungsänderungen analysiert. Abbildung 39 zeigt die relativen Änderungen der mittleren jährlichen Versickerungsraten (gegenüber dem Basiszeitraum) in Abhängigkeit von den jährlichen Hektarerträgen für die vier Klimaszenarien (O-3 K) und die vier KUP-Szenarien (1-4 Mio. ha) ohne (links) und mit (rechts) CO₂-Effekt.

Abbildung 39: Lage der KUP-Flächen bei Nutzung von 1 Million Hektar Ackerfläche (graue Flächen). Veränderung der Erträge [%] (oben) und Versickerung [%] (unten) gemittelt für Landkreise mit KUP-Flächen bei einem Temperaturanstieg von 3 K und ohne CO₂-Düngeeffekt.



Für ein gegebenes KUP-Szenario ohne Berücksichtigung des CO₂-Effekts sinken die Erträge mit steigender Temperatur (Abbildung 39, links). Dies liegt v. a. daran, dass die Aspen-KUP auf den ärmsten Standorten aller betrachteten Ackerflächen simuliert wurden, die wesentlich nährstoffärmer und schlechter wasserversorgt sind als die Waldstandorte. Auf denjenigen Standorten, auf denen bereits unter OK der Ertrag wasserlimitiert ist, wird daher eine höhere Temperatur die Produktivität nicht mehr steigern, sondern wird im Gegenteil durch die damit verbundene zurückgehende Wasserverfügbarkeit ein Sinken der Erträge bewirken. Bei nährstofflimitierten Standorten wiederum ist zu erwarten, dass eine Temperaturerhöhung keinen Einfluss auf die Produktivität hat.

Abbildung 40: Relative Änderungen der mittleren jährlichen Versickerungsraten (gegenüber dem Basiszeitraum) in Abhängigkeit von den jährlichen Hektarerträgen für die vier Klimaszenarien (0-3 K) und die vier KUP-Szenarien (1-4 Mio. ha) ohne (links) und mit (rechts) CO₂-Effekt. Weitere Erläuterung zur Grafik siehe Abb. 32.



Wird der CO₂-Effekt berücksichtigt, wird deutlich, dass die Erträge mit zunehmender Temperatur vom OK- bis 2K-Szenario zunächst stark ansteigen (bei

abnehmender Versickerungsrate), beim Übergang vom 2K- zum 3K-Szenario stagnieren aber die Erträge nahezu, während die Versickerungsrate absinkt. Der Vergleich der Ergebnisse mit und ohne CO₂-Effekt deutet darauf hin, dass die Wasserlimitierung an den KUP Standorten durch den CO₂-Effekt leicht abgemildert wird. Dies ist durch die geringere Verdunstung unter höherem CO₂-Partialdruck und dadurch bedingt eine höhere Wassernutzungseffizienz zu erklären.

7. Zur Machbarkeit erweiterter Sektoren und Regionen übergreifender Vulnerabilitätsabschätzungen für Deutschland: Synthese und Ausblick

Der vorliegende Bericht ist das Ergebnis der Pilotphase eines längerfristig angelegten Forschungsvorhabens. Die Pilotphase hatte sich im Wesentlichen drei Aufgaben gestellt. Erstens die kritische Sichtung der einschlägigen wissenschaftlichen Konzepte zu Vulnerabilität, Risiko, Resilienz etc., zweitens die Erarbeitung eines eigenen Ansatzes zur integrierten und erweiterten Vulnerabilitätsabschätzung und drittens die exemplarische empirische Umsetzung desselben an einem Beispiel.

Der Literaturreview, dokumentiert in Kapitel 2, zeigt, dass es eine Vielzahl einschlägiger Konzepte sowohl innerhalb als auch außerhalb der Klimafolgenforschung gibt. Da verschiedene Disziplinen vergleichbare Sachverhalte in unterschiedlichen Systemen untersuchten, hat sich keine einheitliche Begrifflichkeit entwickelt und nur sehr wenige Ansätze versuchen so etwas wie eine disziplinübergreifende Konzeptualisierung von Risiko oder Vulnerabilität. Aber auch innerhalb der Klimafolgenforschung gibt es nach wie vor zahlreiche Publikationen, die sich mit grundsätzlichen konzeptuellen und terminologischen Fragen beschäftigen. Ein weiterer Aspekt, in dem sich die vorgestellten Ansätze unterscheiden, besteht in den unterschiedlich ausgeprägten

Möglichkeiten der empirischen Operationalisierung. So enthält die versicherungsmathematische bzw. ökonomische Risikodefinition (Risiko ist maximales Schadensausmaß mal Eintrittswahrscheinlichkeit) eine sehr konkrete Anweisung zur empirischen Umsetzung. Allerdings bleibt die tatsächliche Operationalisierung auf diejenigen Fälle beschränkt, bei denen die Parameter maximales Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit hinreichend genau bestimmt werden können. Für viele der als besonders wichtig angesehenen möglichen Schadensfälle, darunter auch Folgen des Klimawandels, ist gerade das nicht gegeben. Es ist daher nicht weiter verwunderlich, dass sich z.B. die Klimafolgenforschung auf Vulnerabilität und nicht auf Risiko als Zentralbegriff einigte. Wie in Kapitel 2 dargestellt, gibt es allerdings auch innerhalb der Klimafolgenforschung weder einheitliche Definitionen und noch einheitliche Operationalisierungsanleitungen.

Unser eigener Ansatz, dargestellt in Kapitel 3, greift das Konzept der systemischen Risiken auf. Obwohl auch dieser Ansatz keine konkrete Operationalisierung vorschlägt, ist er doch der einzige, der auf die Gesamtgesellschaft abstellt und den Anspruch formuliert, nicht lokal oder sektoral begrenzte, sondern gesamtgesellschaftliche Gefährdungslagen unterschiedlichster Art zu adressieren. Dieses allgemeine Konzept eignet sich darüber hinaus auch sehr gut, um die von Füssel (2007) vorgeschlagenen konkreten Bedingungen für eine quantitative und

vergleichbare Bewertung von Vulnerabilität (bzw. in unserer Terminologie von systemischen Risiken) zu spezifizieren (siehe Seite 28). Darauf aufbauend kann, unter Bezugnahme auf einschlägige Gesellschaftstheorien, eine nähere Spezifizierung von essenziellen gesellschaftlichen Teilsystemen, und schließlich eine Auswahl aus diesen, wie in Kapitel 3 beschreiben, erfolgen.

Für diese Pilotstudie wurde der Komplex Wasser, Energie, Biomasse (Biomasse-Energie-Wasser-Nexus) ausgewählt. Die Grundidee besteht darin die Kaskade Veränderung der mittleren Temperatur in Deutschland, das sich daraus ergebende veränderte räumlich/zeitliche Muster von Temperatur und Wasserhaushalt auf die Produktionsbedingungen des wassersensitiven Energiesystems (also thermische Kraftwerke und Biomasse für energetische Nutzung) abzubilden. Zusätzlich wurden mögliche Klimafolgen für die Stromproduktion aus Windkraftanlagen simuliert. Bei diesen gehen wir zwar nicht von einer spezifischen Wassersensitivität aus, sondern von einer Sensitivität gegenüber Windextremen. Wir haben sie hier dennoch berücksichtigt, da der Ausbau der Windkraft ein wichtiges Element der Energiewende ist und daher auch die Sensitivität dieses Kraftwerkstyps für eine Gesamteinschätzung der Stromproduktion im Hinblick auf Klimawandel relevant ist. Auf Grund von Beschränkungen der verfügbaren Modelle wurde im Biomassebereich bisher nur die Holzproduktion (auf forst- und auf landwirtschaftlichen Flächen) betrachtet. Die Ergebnisse dieser sehr

hochauflösenden Simulationen wurden schließlich wieder aggregiert um zu quantitativen Aussagen über klimaabhängige Beeinträchtigungen des Gesamtsystems zu kommen. Diese aggregierten Ergebnisse werden nun zunächst getrennt für Stromproduktion und für Holzenergieproduktion dargestellt und danach vergleichend diskutiert.

Im Kapitel über den Stromsektor stellen wir zunächst die Frage, welchen Anteil am gesamten Sektor wir mit unseren Simulationen berücksichtigen. Tabelle 9 zeigt die in Deutschland installierte Leistung (Brutto) und Bruttostromerzeugung im öffentlichen Stromnetz im Jahr 2010 sowie die per Simulation berücksichtigten Leistungen und produzierten Strommengen für 2010. Bezogen auf das Jahr 2010 wurden also 71% der gesamten Stromproduktion Deutschlands simuliert (71% = $447832/628100$).

Tabelle 9: Installierte Leistung (Brutto) und Bruttostromerzeugung im öffentlichen Stromnetz im Jahr 2010 (Quelle: BMWi 2012, Energiedaten Tabelle 22: Stromerzeugungskapazitäten, Bruttostromerzeugung und Bruttostromverbrauch) und per Simulation berücksichtigte Leistungen und produzierte Strommengen für 2010.

	install. Leistung 2010 (Brutto) [GWh]	Brutto- strom- erzeugung 2010 [GWh]	install. Leistung 2010 simuliert [GWh]	install. Leistung 2010 hochger. [GWh]	Produktion 2010 simuliert [GWh]	Produktion 2010 hochger. [GWh]
therm. KW	911000	498500	399639	802109	398885	-
Wasserkraft	91100	27400	18566	37234	10211	20479

Windkraft	238300	37800	237045	237045	38736	38736
PV	151500	11700	-	-	-	-
Biomasse	42900	27600	-	-	-	-
Sonstige	54300	25100	-	-	-	-
Summe	1489100	628100	655250	1076388	447832	-

Tabelle 10 enthält die für die drei Stromsektoren simulierten Änderungen der Jahresproduktion unter den drei Klimaszenarien. Dabei werden jeweils die mittleren Jahreswerte – bei den Wasserkraftanlagen für die mittlere Produktionsfunktion – aufgeführt bzw. zugrunde gelegt. Abbildung 40 bildet die Änderungen noch einmal in Diagrammform ab.

Tabelle 10: Simulierte Änderung der Jahresproduktion der betrachteten Teile der drei Stromsektoren für das 1K-, 2K- und 3K-Szenario (bis 2055) und Gesamtsumme für alle Szenarien.

Stromsektor	sim. Prod. 2010 [GWh/a]	Änderung +1K	Änderung +2K	Änderung +3K
thermische Kraftwerke	398.885	-0,15%	-0,36%	-0,55%
Wasserkraftanlagen	10.211	-5,1%	-12,3%	-18,8%
Windkraftanlagen	38.736	+3,2%	+4,5%	+5,5%
Summe simuliert	447.832	+0,02%	-0,14%	-0,31%

Abbildung 41: Graphische Darstellung der simulierten Änderung der Jahresproduktion der betrachteten Teile der drei Stromsektoren für das 1K-, 2K- und 3K-Szenario (bis 2055) und Gesamtsumme für alle Szenarien.

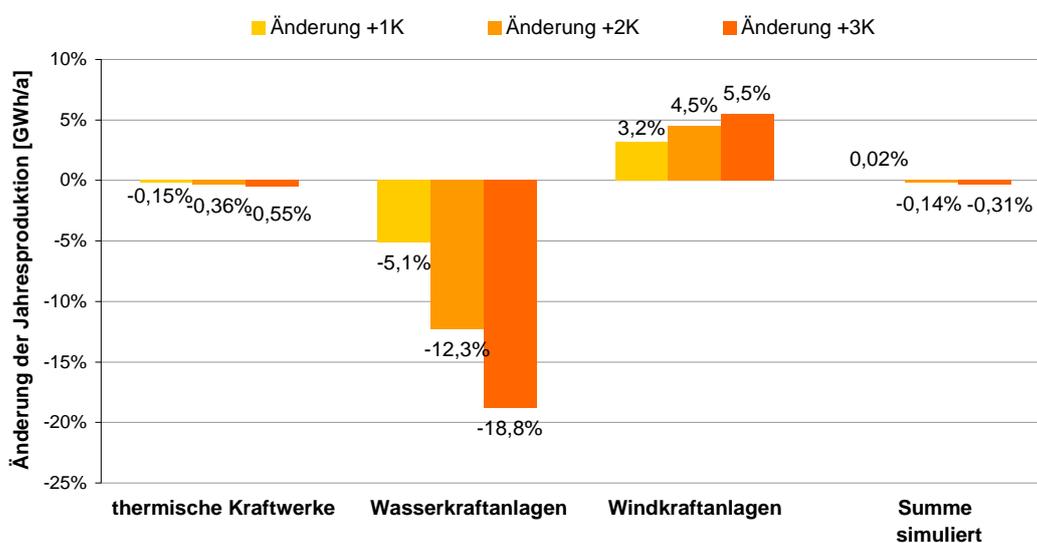


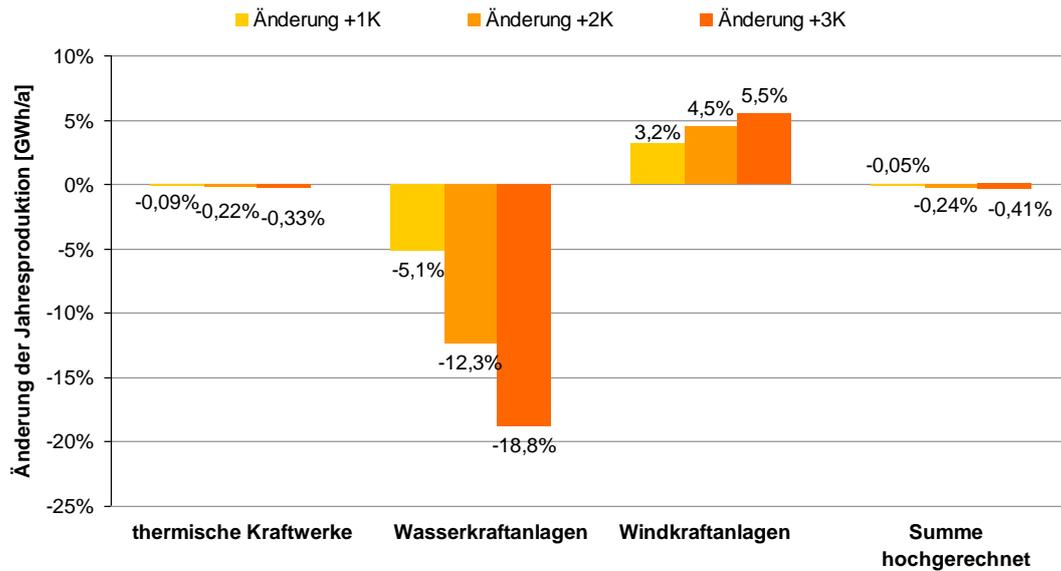
Tabelle 11 stellt die hochgerechneten Änderungen der Jahresproduktion zusammen, in Abbildung 41 werden die Ergebnisse graphisch dargestellt. Dabei liegen folgende Annahmen zugrunde: bei den thermischen Kraftwerken wurden etwa 50% der installierten Kapazität simuliert, für weitere 10% wird angenommen,

dass sie sich wie die simulierten verhalten, für die übrigen 40% wird angenommen, dass sie nicht klimasensitiv sind; bei den Wasserkraftwerken wurden etwa 50% der installierten Kapazität simuliert, von den übrigen 50% wird angenommen, dass sie sich genauso verhalten wie die simulierten. Bei den Windkraftwerken wurde die gesamte installierte Kapazität simuliert.

Tabelle 11: Hochgerechnete Änderungen der Jahresproduktion in den drei Stromsektoren für das 1K-, 2K- und 3K-Szenario (bis 2055) und Gesamtsumme für alle Szenarien.

Stromsektor	betrachtete inst. Leistung [GWh/a]	hochg. Produktion 2010 [GWh/a]	Änderung +1K	Änderung +2K	Änderung +3K
th. Kraftwerke	802.109	801203	-0,09%	-0,22%	-0,33%
Wasserkraftanlagen	37.234	20.479	-5,1%	-12,3%	-18,8%
Windkraftanlagen	237.045	38.736	+3,2%	+4,5%	+5,5%
Summe hochgerechnet	1.076.388	860.418	-0,05%	-0,24%	-0,41%

Abbildung 42: Graphische Darstellung der hochgerechneten Änderungen der Jahresproduktion in den drei Stromsektoren für das 1K-, 2K- und 3K-Szenario (bis 2055) und Gesamtsumme für alle Szenarien.



Der in der vorliegenden Studie berücksichtigte Anteil (simuliert, hochgerechnet oder als nicht bzw. kaum klimasensitiv eingeschätzt) an der gesamten Stromproduktion in Deutschland beträgt 88%. Dabei ist zu beachten, dass z. B. Windkraftanlagen in der Vergangenheit nicht immer voll produziert haben, um eine Netzüberlastung zu verhindern – dies wird im Modell nicht berücksichtigt. Zudem werden bei den thermischen Kraftwerken geplante oder (nicht Wassertemperatur abhängige) unplanmäßige Produktionseinschränkungen vom Modell nicht berücksichtigt.

Bei thermischen Kraftwerken mit Flusswasserkühlung muss unter Klimawandel v. a. aufgrund erhöhter Wassertemperaturen, teilweise auch aufgrund fehlender Wasserverfügbarkeit, mit häufigeren Einschränkungen und somit – im Jahresmittel – mit einer, allerdings geringfügigen, Reduktion der Stromproduktion gerechnet werden. Für Wasserkraftanlagen ergibt sich aufgrund sinkender Abflüsse fast

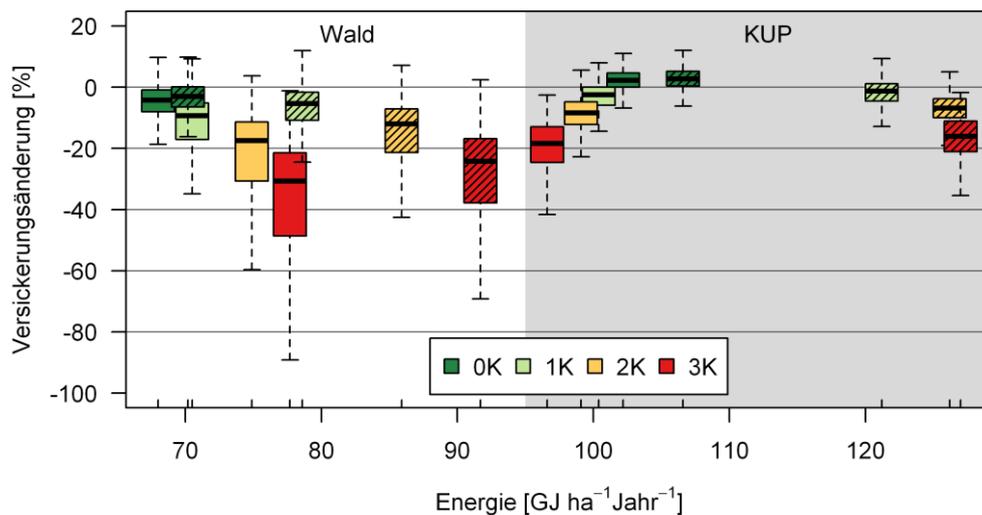
durchweg eine erheblich deutlichere Reduktion der jährlichen Stromproduktion. Bei Windkraftanlagen hingegen kann im Jahresmittel und aggregiert über ganz Deutschland mit einer leichten Zunahme der Auslastung gerechnet werden. Alle Kraftwerkstypen zeigen im Jahresmittel eine annähernd lineare Abhängigkeit von der mittleren Temperaturerhöhung.

Die simulierten Auswirkungen des Klimawandels auf die drei Stromsektoren sind regional ungleich verteilt. Eine systematische Synthese der regionalen Effekte in allen drei Stromsektoren steht allerdings noch aus. Unsere Simulationen deuten auch darauf hin, dass die Klimawandeleffekte auf die drei Stromsektoren saisonal gegenläufig sind: Die Zunahme der Auslastung der Windkraftanlagen zeichnet sich v. a. im Winterhalbjahr ab, während die Einschränkungen bei thermischen Kraftwerken und Wasserkraftanlagen v. a. im (Hoch-)Sommer auftreten. Auch hier wäre ein naheliegender nächster Schritt, die saisonalen Effekte systematischer zu analysieren und ihre vermutete Gegenläufigkeit zu quantifizieren.

Die Zusammenhänge zwischen Klimawandel und Holzproduktion sind komplexer. Zum einen wird die Produktivität von Biomasse nicht nur durch Temperatur und Wasserverfügbarkeit bestimmt, sondern eine veränderte Produktivität hat auch, über veränderte Versickerungsraten, Rückwirkungen auf den Wasserhaushalt. Dazu kommt, dass sich die quantitative Ausprägung eines entscheidenden Faktors, nämlich des CO₂-Effekts, nicht hinreichend prognostizieren lässt. Darüber

hinaus betrachten wir nicht nur die traditionelle Holzproduktion im Forst, sondern auch die Möglichkeit der Holzproduktion auf landwirtschaftlichen Flächen in sogenannten Kurzumtriebsplantagen. Daraus ergibt sich ein wesentlich komplexeres Gesamtbild als für die Stromproduktion. Abbildung 42 zeigt dieses Gesamtbild, mit den Versickerungsänderungen (gegenüber dem Basiszeitraum) in Abhängigkeit vom jährlichen Energiepotenzial für die vier Klimaszenarien (0-3 K) jeweils ohne und mit CO₂-Effekt für Wald und Aspen-KUP.

Abbildung 43: Relative Änderungen der mittleren jährlichen Versickerungsraten (gegenüber dem Basiszeitraum) in Abhängigkeit vom jährlichen Energiepotenzial pro Hektar.



Dargestellt sind die vier Klimaszenarien (0-3 K) jeweils ohne (unschraffiert) und mit (schraffiert) CO₂-Effekt, links für die gesamte Waldfläche Deutschlands für den Zeitraum 2031-2060, rechts für 1 Mio. ha Aspen-KUP für den Zeitraum 2041-2060.

Im Gegensatz zur Stromproduktion aus thermischen und Wasserkraftwerken, steigt das Holzenergiepotenzial im Wald mit zunehmender Temperatur, wobei die Steigerungen unter Annahme eines CO₂-Effekts wesentlich stärker ausgeprägt sind und im 3K Szenario bis ca. 40% betragen können. Anders bei den Kurzumtriebsplantagen, hier würden die Erträge ohne CO₂-Effekt bei steigender Temperatur sinken, und nur unter Annahme eines CO₂-Effekts steigen. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Erträge auf Kurzumtriebplantagen wesentlich höher sind, und daher der niedrigste Szenarienwert (3K ohne CO₂-Effekt) immer noch über dem höchsten Wert für den Wald liegt. Die durchweg höheren Energiepotenziale von KUP gegenüber Wald resultieren daraus, dass beim Wald davon ausgegangen wird, dass nur 43% des Ertrags energetisch genutzt werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Veränderung der relativen Versickerungsrate in Abhängigkeit von den Produktivitätsänderungen. In Abbildung 42 erkennt man, dass die Spannbreite der relativen Versickerungsverluste für die Waldflächen deutlich größer ist als für die KUP-Flächen und generell mit steigender Temperatur zunimmt. Für ein gegebenes Klimaszenario und eine gegebene Berücksichtigung des CO₂-Effekts geht unter Wald die Versickerung vergleichsweise stärker zurück. Der Vorteil der KUP-Flächen als Grundwasserspender resultiert v.a. daraus, dass hier – ähnlich wie bei landwirtschaftlich genutzten Flächen – in den Wintermonaten

aufgrund fehlender Belaubung die Niederschläge fast vollständig dem Grundwasser zugeführt werden.

Der Primärenergiebedarf betrug 2011 in Deutschland ca. 13.000 PJ, davon wurden ca. 1300 PJ durch erneuerbare Energieträger, und davon wiederum 35% (455 PJ) durch Holz abgedeckt (AGEB Pressedienst 2012, BMELF 2011). Auf Basis eines konstant angenommen Primärenergieverbrauchs von 13.000 PJ/Jahr würde sich also unter Klimawandel und den vorgenommen Annahmen (43% der geernteten Trockenmasse wird einer energetischen Nutzung zugeführt) der Beitrag von Energieholz aus dem bestehenden Waldbestand zum gesamten Primärenergieverbrauch unter Klimawandel nur geringfügig erhöhen: von derzeit 4% zu 5% (1K) bzw. 6% (3K) ohne CO₂ Düngeeffekt, bzw. mit CO₂ Düngeeffekt zu 6% (1K) und 7% (3K). Wird zusätzlich noch Holz in Kurzumtriebsplantagen produziert so würde sich der Anteil von Holz in der extremen KUP Ausbaustufe und unter 3K plus CO₂-Effekt bis etwa 12% des derzeitigen Primärenergieverbrauchs steigern lassen.

Aller Voraussicht nach wird der Primärenergieverbrauch Deutschlands 2050 jedoch niedriger sein als heute. In den von uns untersuchten elf Energieszenarien (siehe Anhang F) liegt die Spannweite für 2050 zwischen 5.000 und 12.000 PJ Primärenergieverbrauch pro Jahr. Holzenergie könnte daher in den extrem Szenarien (3K, maximaler KUP Ausbau und CO₂-Effekt) auf einen Anteil zwischen

32% (von 5.000 PJ) bzw. 13% (von 12.000 PJ) des Primärenergieverbrauches ansteigen. Dies würde allerdings mit einem deutlichen Rückgang der Versickerungsraten erkauft werden.

Es ist beim gegenwärtigen Stand des Wissens nicht möglich vom Rückgang der Versickerungsraten quantitative Rückschlüsse auf die Entwicklung des Grundwassers zu ziehen, oder Grenzwerte festzulegen, jenseits derer massive negative Auswirkungen auf das ökologische Wasserregime oder sozioökonomische Wassernutzungen, unter anderem auch auf die Stromproduktion, zu erwarten wären.

Unklar ist auch, wie sehr in Zukunft andere, hier nicht berücksichtigte Klimafolgen, wie zum Beispiel Extremwetterereignisse, oder Schädlinge das realisierbare Energiepotenzial verringern könnten. Darüber hinaus sollten in zukünftigen Analysen auch die Effekte des Waldumbaus auf Energieertrag und Grundwasserneubildung betrachtet werden, denn die durch den Waldumbau bedingte Zunahme von Laubbaumarten im Untersuchungsgebiet kann zu sinkenden Holzerträgen, aber auch zu geringeren Verlusten in der Grundwasserneubildung führen (Lasch u. a. 2012).

In allen unseren Simulationen, abgesehen von den KUP Simulationen, trifft der zukünftige Klimawandel auf ein gegenwärtiges System: den gegenwärtigen Kraftwerkspark und den gegenwärtigen Waldbestand. Um Anpassungsfragen zu

diskutieren, müssen die Entwicklungsmöglichkeiten und die wahrscheinliche Entwicklungsrichtung dieser Systeme im Zuge der angestrebten Energiewende betrachtet werden. Unsere Ergebnisse können – insbesondere auch in ihrer regionalen und saisonalen Verteilung – Hinweise darauf geben, wie der Umbau des Energiesystems so gestaltet werden kann, dass die wahrscheinlichen Folgen des Klimawandels auf dieses zukünftige Energiesystem möglichst gering ausfallen. Dies betrifft u. a. die technische Ausstattung (z. B. Kühlsysteme), die Standortwahl, die Berücksichtigung von Saisonalitäten der Stromproduktion bei der Planung des zukünftigen Energiemixes, die Berücksichtigung von Konzentrationen besonders klimasensitiver Elemente des Energiesystems in einzelnen Regionen, die Zielkonflikte zwischen Biomasseproduktivität und negativen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt.

Es kann davon ausgegangen werden, dass sich der thermische Kraftwerkspark und der Windkraftanlagenpark in ihrer Zusammensetzung (technische Ausstattung, verwendete Energieträger bei thermischen Kraftwerken) und ihre jeweiligen Anteile an der gesamten Stromproduktion in den nächsten Jahrzehnten grundlegend verändern. Da diese Veränderungen und die technischen Potenziale insbesondere im Bereich Windenergie als relativ junge Technologie derzeit kaum einschätzbar sind, haben wir von einer Quantifizierung der Anpassungskapazität in diesen Bereichen abgesehen.

Bei der Wasserkraft als reifer und relativ weit ausgebauter Technologie haben wir hingegen versucht, Anpassungsfragen auch quantitativ zu diskutieren. Aus unserer Sicht gibt es drei mögliche „Anpassungsoptionen“, um dem in Zukunft vermutlich sinkenden Wasserkraftpotenzial entgegenzuwirken: 1. Weiterentwicklung der Technologie (Turbinen usw.); 2. Ausbau; 3. Steuerung und Wasser-Management. Für die ersten beiden Optionen konnten wir quantitative Abschätzungen angeben. Nach Fichtner (2003) besteht bei Wasserkraftanlagen, je nach Baujahr und Anlagengröße, ein technisches Verbesserungspotenzial von 3 bis 16%, das v. a. durch den Austausch veralteter Turbinen realisierbar wäre. Der technischen Weiterentwicklung moderner Flussturbinen bescheinigen Branchenexperten allerdings nur ein geringes Potenzial (TrendResearch 2011). Das Ausbaupotenzial der Wasserkraft erlaubt es unseren Simulationen zufolge, den Produktionsrückgang durch Klimawandel bis zum 1K-Szenario zu kompensieren; im 3K-Szenario hingegen könnte der Produktionsrückgang lediglich etwa halbiert werden. Die dritte Anpassungsoption konnten wir nicht betrachten; hierzu wäre allerdings weitere Forschung zu empfehlen, zumal Anlagenbetreiber diese Option als realistisch und effektiv hervorheben.

Dies sind vorläufige Überlegungen, die erst im Folgeprojekt ausführlicher bearbeitet werden. Grundsätzlich geht es in diesem Projekt nicht darum Einzelmaßnahmen zu empfehlen, sondern systemische Gefährdungslagen zu

untersuchen, und damit Entscheidungsgrundlagen dafür zu liefern, in welchem systemischen Zusammenhang letztlich auch Anpassungsmaßnahmen gesehen werden müssen. Idealerweise würde man dafür alle untersuchten Dynamiken in einer gekoppelten Modellwelt darstellen. Ein derartiges multi-faktorielles Experiment ist allerdings mit einem enormen Aufwand verbunden und kann im Rahmen des vorliegenden Projektes nicht geleistet werden. Es wird also im Folgeprojekt vor allem darum gehen zu untersuchen, welche weniger ressourcenaufwändige Alternativen entwickelt werden könnten, um systemische Zusammenhänge darzustellen.

8. Literatur

- Abgrall, J.-F., 2010. "The Mechanisms of Productivity: The Search for the Underlying Determinants". Government of Canada, Working Paper Series 045. <http://dspace.cigilibrary.org/jspui/handle/123456789/27646> (zugegriffen am 15.06.12).
- Adger, W.N., 1999. "Social vulnerability to climate change and extremes in coastal Vietnam." *World Development* 27:249-269.
- . 2000. "Social and Ecological Resilience: Are They Related?" *Progress in Human Geography* 24 (3) (September 1): 347–364. doi:10.1191/030913200701540465.
- . 2006. "Vulnerability." *Global Environmental Change* 16 (3) (August): 268–281. doi:10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006.
- AEE, 2010: *Erneuerbare Energien 2020 Potenzialatlas Deutschland*. Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (AEE), Berlin.
- AGEB, 2009. *Energy Balance for the Federal Republic of Germany 2008*, AG Energiebilanzen AG, Berlin.
- . 2010. *Evaluation Tables on the Energy Balance for the Federal Republic of Germany 1990 to 2009*, Juli 2010, www.ag-energiebilanzen.de
- . 2012. "Pressedienst 01/2012". Berlin.
- Anger, C. & Plünnecke, A., 2006. "Bildungsarmut Und Humankapitalschwäche in Deutschland". Institut der deutschen Wirtschaft Köln.
- Angerer, G., Erdmann, L. & Marscheider-Weidemann, F., 2009. *Rohstoffe Für Zukunftstechnologien*. Karlsruhe: Fraunhofer Verlag.
- Aragao, L.E.O.C., Malhi, Y., Metcalfe, D.B., Silva-Espejo, J.E., Jimenez, E., Navarrete, D., Almeida, S., Costa, A.C.L., Salinas, N., Phillips, O.L., Anderson, L.O., Alvarez, E., Baker, T.R., Goncalvez, P.H., Human-Ovalle, J., Mamani-Solorzano, M., Meir, P., Monteagudo, A., Patino, S., Penuela, M.C., Prieto, A., Quesada, C.A., Rozas-Davila, A., Rudas, A., Silva, Jr., J.A. & Vasquez, R., 2009: „Above- and below-ground net primary productivity across ten Amazonian forests on contrasting soils.“ *Biogeosciences* 6(12): 2759-2778.
- Aretz, A. & Hirschl, B., 2007: *Biomassepotenziale in Deutschland - Übersicht maßgeblicher Studienergebnisse und Gegenüberstellung der Methoden*. Dendrom-Diskussionspapier, Eberswalde.

- Aven, T. & Renn, O., 2010. *Risk Management and Governance Concepts, Guidelines and Applications. Technology, Risk, and Society*. Berlin Heidelberg: Springer Verlage.
- Azzimonti, M., De Francisco, E. & Quadrini, V., 2012. "Financial globalization, inequality, and the raising of public debt." Federal Reserve Bank of Philadelphia, Working Paper 12-6.
- Badeck, F. W., Beese, F., Berthold, D., Einert, P., Jochheim, H., Kallweit, R., Konopatzky, A., Lasch, P., Meesenburg, H., Meiwes, K.-J., Puhmann, M., Raspe, S., Schulte-Bisping, H., Schulz, C. & Suckow, F., 2007: *Parametrisierung, Kalibrierung und Validierung von Modellen des Kohlenstoffumsatzes in Waldökosystemen und deren Böden*. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), Institut für Bodenkunde und Waldernährung der Universität Göttingen (IBW), Landesforstanstalt Eberswalde (LFE), Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt (NW-FVA), Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK). F. F. C2-Projekte.
- Baecker, D., 2004. *Wozu Soziologie?* Berlin: Kadmos.
- . 2005. *Schlüsselwerke der Systemtheorie*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- 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." *Renewable Energy* 44: 398-405.
- Beck, U., 1986. *Risikogesellschaft: Auf Dem Weg in eine Andere Moderne*. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Beck, U., Giddens, A. & Lash, S., 1996. *Reflexive Modernisierung: Eine Kontroverse*. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Berger-Schmitt, R. 2000. "Social Cohesion as an Aspects of the Quality of Societies: Concept and Measurement." EU-Reporting Working Paper 14.
- Berndt, M., El Masry, I., Ruf, W. & Strutynski, P., 2005. "60 Thesen für eine Europäische Friedenspolitik." Universität Kassel, Kassel.
- Berlin-Institut, 2004. "Deutschland 2020: Die demographische Zukunft der Nation." Berlin-Institut für Bevölkerung und Entwicklung, Berlin.
- Bertalanffy, L., 1969. *General System Theory*. New York: George Braziller Publishing.
- BMELV, 2004. "Verstärkte Holznutzung zugunsten von Klima, Lebensqualität, Innovation und Arbeitsplätzen (Charta für Holz)." Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV), Berlin.

- . 2005. "Die zweite Bundeswaldinventur. Der Inventurbericht." Berlin.
- . 2006. "Land- und Forstwirtschaft in Deutschland. Daten und Fakten." Berlin.
- . 2009. "Waldbericht der Bundesregierung 2009." Berlin.
- . 2010. *Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten*. Münster: Landwirtschaftsverlag Münster.
- . 2011. "Agrarpolitischer Bericht der Bundesregierung 2011." Berlin.
- BMU, 2011. "Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2010 - unter Verwendung aktueller Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat)." Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin (Stand: Dezember 2011).
- BMWi/ BMU, 2010: "Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung." Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin. <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/energiekonzept-2010,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf> (Zugriff am 12.07.12)
- BMWi, 2010. „Energie in Deutschland. Trends und Hintergründe zur Energieversorgung.“ Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Berlin, August 2010, <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/statistik-und-prognosen.html> (Zugriff am 12.07.12)
- . 2011. *Energiedaten. Nationale und internationale Entwicklung*, Berlin, Stand 15.8.2011, <http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/statistik-und-prognosen.html> (Zugriff am 12.07.12)
- . 2012. *Energiedaten. Nationale und internationale Entwicklung*, Berlin, Stand 19.04.2012, <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/Binaer/energie-daten-gesamt,property=blob,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.xls> (Zugriff am 12.07.12)
- Botkin, D. B. & Nisbet, R. A., 1992: "Forest Response To Climatic-Change - Effects Of Parameter-Estimation And Choice Of Weather Patterns On The Reliability Of Projections." *Climatic Change* 20(2): 87-111.
- Böhnke, P., 2006. *Am Rande Der Gesellschaft: Risiken Sozialer Ausgrenzung*. Opladen: Budrich.
- Bonoli, G., 2007. "Time Matters: Postindustrialization, New Social Risks, and Welfare State Adaptation in Advanced Industrial Democracies." *Comparative Political Studies* 40: 495.

- Bouder, F, Slavin, D. & Lofstedt, R.E., 2007. *The Tolerability of Risk: A New Framework for Risk Management*. London: Earthscan.
- Bourcarde, K. & Schütte, J., 2010. "Deutschland 2010: Was Ist Geblieben Von Der Mittelstandsgesellschaft?" In: B. Benz, J. Boeckh & H. Mogge-Grotjahn, *Soziale Politik – Soziale Lage – Soziale Arbeit*. 245–262. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- Boyd, E., & Osbahr, H., 2010. "Responses to Climate Change: Exploring Organisational Learning Across Internationally Networked Organisations for Development." *Environmental Education Research* 16 (5-6): 629–643.
- Brayshaw, D.J., Troccoli, A., Fordham, R. & Methven, J., 2011. "The impact of large scale atmospheric circulation patterns on wind power generation and its potential predictability: A case study over the UK." *Renewable Energy* 36 (8): 2087-2096.
- Breen, R., 1997. "Inequality, Economic Growth and Social Mobility." *The British Journal of Sociology* 48(3):429-49.
- Brenke, K. & Grabka, M., 2011. "Schwache Lohnentwicklung Im letzten Jahrzehnt." DIW Wochenberichte 45.
- Brooks, N., Adger, W.N. & Kelly, P.M., 2005. "The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation." *Global Environmental Change Part A* 15:151-163.
- Brus, D.J., Hengeveld, G.M., Walvoort, D.J.J., Goedhart, P.W., Heidema, A.H., Nabuurs, G.J., Gunia, K., 2012. "Statistical mapping of tree species over Europe." *Eur. J. Forest Res.* 131: 145-157.
- Bundesakademie für Sicherheitspolitik, 2008. "Seminar für Sicherheitspolitik 2008. Energiesicherheit 2050." Berlin.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), 2004: „Nutzungsdifferenzierte Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:100.000.000 (Wald-BÜK 1000).“ Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Hannover.
- Burck, J., von Blücher, F. u. Fabian, T., 2010. *Welche Energie-Zukunft ist möglich? Ein Vergleich von vier Niedrig-Energie-Szenarien für Deutschland*, Germanwatch-Studie, August 2010, www.germanwatch.org/klima/nes.pdf (Zugriff am 12.07.12)
- Caruso, R. & Schneider, F., 2011. "The Socio-Economic Determinants of Terrorism and Political Violence in Western Europe (1994-2007)." *European Journal of Political Economy* 2011. http://works.bepress.com/raul_caruso/41 (Zugriff am 12.07.12)

- Castel, Robert. 2009. "Die Wiederkehr Sozialer Unsicherheit." In: R. Castel & K. Dörre, *Prekarität, Abstieg, Ausgrenzung: Die Soziale Frage Am Beginn Des 21. Jahrhunderts*. 21–35. Frankfurt a. M.: Campus Verlag.
- Cohn, A., Fehr, E. & Goette, L., 2008. "Fairness and Effort - Evidence from a Field Experiment." IEW Working Paper, University of Zurich, 2009.
- Costa, L. & Kropp, J.P., 2012. "Linking Components of Vulnerability Int Theoretic Frameworks and Case Studies." *Sustainable Science* 2012: 1-9.
- Cramer, W., Bondeau A., Woodward, F. I., Prentice, I. C., Betts, R. A., Brovkin, V., Cox, P. M., Fisher V., Foley, J. A., Friend, A. D., Kucharik, C., Lomas, M. R., Ramankutty, N., Sitch, S., Smith, B. & White, A., Young-Molling, C., 2001: "Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO₂ and climate change: results from six dynamic global vegetation models." *Global Change Biology* 7 (4): 357-373.
- Cutter, S. L. & Finch, C., 2008. "Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards." *PNAS* 105:2301-2306.
- Delhey, J., 2012. "Gleichheit Fühlt Sich Besser an Statusunbehagen Und Wohlbefinden in Europäischen Gesellschaften." Informationsdienst Soziale Indikatoren 47.
- DENA ,2012. "Nennleistung einer Windenergieanlage (WEA)". Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena). <http://www.thema-energie.de/energie-erzeugen/erneuerbare-energien/windenergie/auslegung-montage/nennleistung-einer-windenergieanlage-wea.html> (Zugriff am 19.07.12).
- Deutsche Bank Research, 2003. "Deutsches Wachstumspotenzial: Vor Demographischer Herausforderung." Aktuelle Themen 277, 14 Juli 2003.
- Deutsches Atomforum, 2004. *Kernenergie in Deutschland - Jahresbericht 2003*, Deutsches Atomforum e.V., Berlin.
- Deutschmann, C., 2010. "Sozialstrukturelle Bedingungen Wirtschaftlicher Dynamik." In: N. Burzan & P.A. Berger, *Dynamiken (in) Der Gesellschaftlichen Mitte*. 43–54. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- DLR/IFEU/WI, 2004. "Ökologisch optimierter Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland." Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Energie- und Umweltforschung & Wuppertal Institut für Klima, Umwelt und Energie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).

- Downing, T.E., Butterfield, R., Cohen, S., Hug, S., Moss, R. Rahman, A., Sokona, Y. & Stephen, L., 2001. "Climate Change Vulnerability: Linking Impacts and adaptation." Report to the Governing Council of the United Nations Programme, Nairobi.
- Dunger, K. & Rock, J., 2009: "Projektionen zum potenziellen Rohholzaufkommen." *AFZ-Der Wald* 20: 1079-1081.
- Durkheim, E., 1973. *De la division du travail social*. Paris: Presses universitaires de France.
- Esteban, J. & Ray, D., 2008. "Polarization, Fractionalization and Conflict." *Journal of Peace Research* 45 (2): 163–182.
- . 2011. "Linking Conflict to Inequality and Polarization." *The American Economic Review* 101 (4): 1345–1374.
- Europäische Kommission. 2008a. "The Raw Materials Initiative - Meeting Our Critical Needs for Growth and Jobs in Europe." Arbeitspapier der Europäischen Kommission. Europäische Kommission, Brüssel.
- . 2008b. "Regionen 2020: Bewertung Der Künftigen Herausforderungen Für Die EU- Regionen". Arbeitspapier der Europäischen Kommission.
- . 2010. "Demography Report 2010". Arbeitspapier der Europäischen Kommission.
- . 2011. "The Social Dimension of the Europe 2020 Strategy - A Report of the Social Protection Committee." Arbeitspapier der Europäischen Kommission.
- Eurostat, 2001. "Economy-wide Material Flow Accounts and Derived Indicators. A methodological guide." Statistical Office of the European Communities, Luxemburg.
- Feeley, T.J., Skone, T.J., Stiegel, G.J., McNemar, A., Nemeth, M., Schimmoller, B., Murphy, J.T. & Manfredi, L., 2008. "Water: A critical resource in the thermoelectric power industry." *Energy* 33: 1-11.
- FICHTNER, 2003. "Gutachten zur Berücksichtigung großer Laufwasserkraftwerke im EEG." Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU).
- Fischer-Kowalski, M. & Weisz, H., 1999. "Society as Hybrid Between Material and Symbolic Realms. Toward a Theoretical Framework of Society-Nature Interaction." *Advances in Human Ecology* 8:215-251.
- Fleischhauer, M., Greiving, S., Lindner, C. & Lückenköter, J., 2012. "Darstellung Der Ergebnisse Von Arbeitspaket 2 'Gesamtbild Vulnerabilität' (sowie Bezug Auf AP3)". Diskussionspapier 2. Netzwerktreffen, Bonn.

- Foerster, H. v. & Schmidt, S.J., 1993. *Wissen und Gewissen. Versuch einer Brücke*. Frankfurt a. M.: Suhrkamp.
- Folke, C., 2006. "Resilience: The Emergence of a Perspective for Social-ecological Systems Analyses." *Global Environmental Change* 16 (3): 253-267.
- Folke, C., Carpenter, S.R., Elmqvist, T. & Gunderson, L., 2002. "Resilience and Sustainable Development: Building Adaptive Capacity in a World of Transformations." Rainbow Series 3. International Council for Scientific Unions (ICSU), Paris. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1523-1739.2004.00077.x/pdf> (Zugriff am 9.06.12)
- Förster, H., Lilliestam, J., 2010. "Modeling thermoelectric power generation in view of climate change." *Regional Environmental Change* 10(4): 327-338.
- Fürstenau, C., Badeck, F., Lasch, P., Lexer, M., Lindner, M., Mohr, P. & Suckow, F., 2007: "Multiple-use forest management in consideration of climate change and the interests of stakeholder groups." *European Journal of Forest Research* 126(2): 225-239.
- Füssel, H.-M. 2007. "Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research." *Global Environmental Change* 17:155-167.
- . 2010. "How inequitable is the global distribution of responsibility, capability, and vulnerability to climate change: A comprehensive indicator-based assessment." *Global Environmental Change* 20 (4): 597-611.
- Füssel, H.M. & Klein, R., 2006. "Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking." *Climatic Change* 75:301-329.
- Gallino, L., 1993. *Dizionario di Sociologia*. Turin: TEA.
- Gallopín, G. C., 2006. "Linkages Between Vulnerability, Resilience, and Adaptive Capacity." *Global Environmental Change* 16 (3): 293-303.
- Galtung, J., 1968. "A structural theory of integration." *Journal of Peace Research* 5:375.
- . 1982. "Sicherheit und Verletzlichkeit. Plädoyer für einen neue Unabhängigkeit." in M. Gronemeyer and R. Gronemeyer (Hrsg.), *Frieden vor Ort - Ausbrechen - Verantwortlich werden*, vol. Magazin Brennpunkte, XII. Frankfurt a. M.: Fischer Taschenbuch Verlag. 26-41
- . 1995. "On the social cost of modernization." UNRISD Discussion Paper, Nairobi.

- Gerber, M.M., Hinterlehner H. & Jackson, J., 2010. „Insecurities about crime in Germany, Austria and Switzerland: A review of research findings.“ *European Journal of Criminology*, 1-17.
- Girardin, C.A.J., Malhi, Y., Aragao, L.E.O.C., Mamani, M., Huasco, W.H., Durand, L., Feeley, K.J., Rapp, J., Silva-Espejo, J.E., Silman, M., Salinas, N. & Whittaker, R.J., 2010: “Net primary productivity allocation and cycling of carbon along a tropical forest elevational transect in the Peruvian Andes.“ *Global Change Biology* 16(12): 3176-3192
- Glugla, G., 1969: „Berechnungsverfahren zur Ermittlung des aktuellen Wassergehaltes und Gravitationswasserabflusses im Boden.“ *Albrecht-Thaer-Archiv* 13: 371-376.
- Grossmann, M. & Koch, H., 2011. “Wasserkraftanlagen”. In: F. Wechsung, H. Koch, P. Gräfe (Hrsg.), *Elbe-Atlas des globalen Wandels*. Berlin: Weißensee-Verlag. 70-71.
- Grote, K.-H. & Feldhusen, J. (Hrsg.), 2007. *DUBBEL, Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Grote, R. & Erhard, M., 1999. “Simulation of tree and stand development under different environmental conditions with a physiologically based model.” *Forest Ecology & Management* 120(1-3): 59-76.
- Grote, R. & Suckow, F., 1998. “Integrating dynamic morphological properties into forest growth modelling. I. Effects on water balance and gas exchange.” *Forest Ecology and Management* 112: 101-119.
- Hasenauer, H., Nemani, R.R., Schadauer, K. & Running, S.W., 1999. “Climate variations and tree growth between 1961 and 1995 in Austria.” Karjalainen, T., Spiecker, H. & Laroussinie, O. (Hrsg.), *Proceedings of a Workshop on Causes and Consequences of Accelerating Tree Growth in Europe*. INRA (French National Institute for Agronomic Research), 75-86
- Hattermann, F.F., Huang, S. & Koch, H., 2010. “Simulation der Wirkung von Klimaänderungen und Klimamodellunsicherheit auf den Wasserhaushalt für deutsche Flusseinzugsgebiete.” In: K. Kaiser, J. Libra, B. Merz, O. Bens & R.F. Hüttl (Hrsg.), *Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordostdeutschland: Trends, Ursachen, Lösungen*. Scientific Technical Report 10/10. Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam. 49-59.
- Haxeltine, A. & Prentice, I. C., 1996. “A general model for the light-use efficiency of primary production.” *Functional Ecology* 10(5): 551-561.
- Hinkel, J., 2011. “‘Indicators of Vulnerability and Adaptive Capacity’: Towards a Clarification of the Science-policy Interface.” *Global Environmental Change* 21: 198-208.

- Hochschul-Informations-System (HIS), 2011. "Soziale Und wirtschaftliche Bedingungen des Studiums. Deutschland Im Europäischen Vergleich - Eurostudent IV 2008-2011." Hochschul-Informations-System GmbH, Berlin.
- Hjerpe, M. & Glaas, E., 2012. "Evolving local climate adaptation strategies: incorporating influences of socio-economic stress." *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 17 (5):471-486.
- Holling, C. S., 1973. "Resilience and the Stability of Ecological Systems." *Annual Review of Ecology and Systematics* 4: 1-23.
- . 1996. "Engineering Resilience Versus Ecological Resilience." In: P. Schulze (Hrsg.), *Engineering Within Ecological Constraints*. Washington D.C.: National Academy Press.
- Horster, D., 1997. *Niklas Luhmann*. München: Beck.
- Hradil, S., 2006. *Die Sozialstruktur Deutschlands im Internationalen Vergleich*. Wiesbaden: VS Verlag.
- Huber, M., 2009. "What Is 'Systemic Risk'? Remarks on the Risks of Risk Communication." *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 18 (1): 9-12.
- IFNE, 2009. "Strom aus erneuerbaren Energien bis zum Jahr 2020. Kosten-Nutzen Betrachtung ausgewählter Aspekte." Ingenieurbüro für Erneuerbare Energien (IFNE), Teltow.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (Martin Parry, Osvaldo Canziani, Jean Palutikof, Paul van der Linden, and Claire Hanson u. a.), 2007. *Climate Change 2007 - Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of the Working group II to the fourth Assessment Report of the IPCC*. Cambridge, New York, Melbourne: Cambridge University Press.
- Ionescu, C., Klein, R., Hinkel, J., Kumar, K.K & Klein, R., 2009. "Towards a Formal Framework of Vulnerability to Climate Change." *Environmental Modeling and Assessment* 14 (1): 1-16.
- International Strategy for Disaster Reduction (ISDR), 2004. "Living with Risk. A Global Review of Disaster Reduction Initiatives. Volume 1." United Nations, New York.
- ISMERI, 2009a. *Regional challenges in the perspective of 2020. Background paper on: Demographic challenge*. A report to the Directorate-General for Regional Policy Unit Conception, forward studies, impact assessment. ISMERI Europa.
- . 2009b. *Regional challenges in the perspective of 2020. Background paper on: New Social Risks*.

- . 2009b. *Regional challenges in the perspective of 2020. Synthesis.*
- IIFW, 2009. *World Economic Outlook: October 2009: Sustaining the Recovery.* International Monetary Fund (IMF). Washington, D.C.
- Jackson, R., Howe, N. & Nakashima, K., 2010. "The global aging preparedness index." CSIS - Centre for Strategic & International Studies, Washington DC.
- Jaeger, C., Renn, O., Rosa, E. & Webler, T., 2001. *Risk, Uncertainty and Rational Action.* London: Earthscan.
- Japp, K. P., 1996. *Soziologische Risikotheorie: Funktionale Differenzierung, Politisierung Und Reflexion.* Weinheim: Juventa-Verlag.
- Jesuit, D., 2003. "The Regional Dynamics of European Electoral Politics Participation in National and European Contests in the 1990s." *European Union Politics* 4 (2): 139–164.
- Kalina, T. & Weinkopf, C., 2012. "Niedriglohnbeschäftigung 2010: Fast jede/r vierte arbeitet für Niedriglohn." IAQ-Report Nr. 2012-01. Institut Arbeit und Qualifikation, Gelsenkirchen.
- Kasperson, J. X., Kasperson, R. E., Turner II, B. L., Schiller, A. & Hsieh, W.H., 2005. "Vulnerability to Global Environmental Change." *Social Contours of Risk* 2:245–285.
- Kartschall, T., Döring, P. & Suckow, F., 1990: "Simulation of Nitrogen, Water and Temperature Dynamics in Soil." *Syst. Anal. Model. Simul.:* 7(6), 33-40.
- Kaufmann, F.-X. 2005. *Schrumpfende Gesellschaft: Vom Bevölkerungsrückgang und Seinen Folgen.* Frankfurt a.M.: Suhrkamp Verlag.
- Keles, D., Möst, D. & Fichtner, W., 2011. „The development of the German energy market until 2030 – A critical survey of selected scenarios." *Energy Policy* 39: 812-25.
- Kelly, P.M. & Adger, W.N., 2000. "Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation." *Climate Change* 47:325-352.
- Klasen, S. & Nestmann, T., 2006. "Population, Population Density and Technological Change." *Journal of Population Economics* 19 (3): 611–626.
- Klieme, E., Artelt, C., Hartig, J., Jude, N., Köller, O., Prenzel, M., Schneider, W. & Stanat, P., 2010. "PISA 2009: Bilanz nach einem Jahrzehnt." Münster: Waxmann.
- KlimAdapt, 2010. "Ableitung von prioritären Maßnahmen zur Adaption des Energiesystems an den Klimawandel." Endbericht, Studie im Auftrag der Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG), Wien.

- Klitgaard, R. & Fedderke, J., 1995. "Social Integration and Disintegration: An Exploratory Analysis of Cross-Country Data." *World Development*, 23(3):357-369.
- Koch, H. & Grünewald, U., 2010. "Regression models for daily stream temperature simulation: case studies for the river Elbe, Germany." *Hydrological Processes* 24: 3826-3836.
- Koch, H., Vögele, S., Kaltofen, M. & Grünewald, U., 2012. "Trends in water demand and water availability for power plants - scenario analyses for the German capital Berlin." *Climatic Change* 110: 879-899.
- Koch, H. & Vögele, S. 2009. "Dynamic modelling of water demand, water availability and adaptation strategies for power plants to global change." *Ecological Economics* 68 (7): 2031-2039.
- Koch, H., Wechsung, F. & Grünewald, U., 2010. "Analyse jüngerer Niedrigwasserabflüsse im tschechischen Elbeinzugsgebiet." *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 54 (3): 169-178.
- Koitzsch, R., 1977: „Schätzung der Bodenfeuchte aus meteorologischen Daten, Boden- und Pflanzenparametern mit einem Mehrschichtmodell.“ *Z. f. Meteor.* 27(5): 302-306.
- Kollas, C., Lasch, P., Rock, J. & Suckow, F., 2009: "Bioenergy potential in Germany - assessing spatial patterns of biomass production with aspen short-rotation coppice." *Int. Agrophys.* 23(4): 343-352.
- Körner, C., 2006. "Plant CO₂ responses: an issue of definition, time and resource supply." *New Phytologist* 172: 393-411.
- Krysanova, V., Muller-Wohlfeil, D.-I. & Becker, A., 1998. "Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds." *Ecological Modelling* 106(2-3): 261-289.
- Kumhof, M., Lebarz, C., Ranciere, R., Throckmorton, N., 2012. "Income Inequality and Current Account Imbalances." IWF Working Paper (WP/12/08), IWF, Washington D.C.
- Kumhof, M. & Ranciere, R., 2010. "Inequality, Leverage and Crises." IWF Working Paper WP/10/268. IWF, Washington, DC.
http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1751380. (Zugriff am 12.06.12)
- Lahl, K., 2009. "Sicherheitspolitik im Wandel. Zeit für strategische Entscheidungen." *Polizei* 6.
- Lasch, P., Badeck, F.-W., Lindner, M. & Suckow, F., 2002: "Sensitivity of simulated forest growth to changes in climate and atmospheric CO₂." *Forstwiss. Centralblatt* 121, Supplement 1: 155-171.

- Lasch, P., Badeck, F. W., Suckow, F., Lindner, M. & Mohr, P., 2005: "Model-based analysis of management alternatives at stand and regional level in Brandenburg (Germany)." *Forest Ecology and Management* 207(1-2): 59-74.
- Lasch, P., Kollas, C., Rock, J., Suckow, F., 2010: "Potentials and impacts of short-rotation coppice plantation with aspen in Eastern Germany under conditions of climate change." *Regional Environmental Change* 10(2): 83-94.
- Lasch, P., Lindner, M., Erhard, M., Suckow, F. & Wenzel, A., 2002: "Regional impact assessment on forest structure and functions under climate change - the Brandenburg case study." *Forest Ecology and Management* 162(1): 73-86.
- Länder Hamburg, Niedersachsen & Schleswig-Holstein, 2008. "Wärmelastplan für die Tideelbe." Dezember 2008.
- Leichenko, R. & O'Brien, K., 2008. *Environmental Change and Globalization: Double Exposures*. Oxford: Oxford Univ Pr.
- Leichenko, R., O'Brien, K. & Solecki, W.D., 2010. "Climate Change and the Global Financial Crisis: A Case of Double Exposure." *Annals of the Association of American Geographers* 100 (4): 963-972.
- Lörz, M. & Krawietz, M., 2011. "Internationale Mobilität und Soziale Selektivität: Ausmaß, Mechanismen und Entwicklung herkunftsspezifischer Unterschiede zwischen 1990 und 2005." *Kölner Zeitschrift Für Soziologie Und Sozialpsychologie* 63 (2): 185-205.
- Lamersdorf, N., Petzold, R., Schwärzel, K., Feger, K.-H., Köstner, B., Moderow, U., Bernhofer, C. & Knust, C., 2010: "Bodenökologische Aspekte von Kurzumtriebsplantagen. In: A. Bemann & C. Knust. (Hrsg.), *AGROWOOD: Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven*. Berlin: Weißensee-Verlag. 170-188.
- Latour, B., 1998. *Wir sind nie modern gewesen. Versuch einer symmetrischen Anthropologie*. Frankfurt a.M.: Fischer Taschenbuch Verlag.
- Lasch, P., Badeck, F. W., Suckow, F., Lindner, M. & Mohr, P., 2005: "Model-based analysis of management alternatives at stand and regional level in Brandenburg (Germany)." *For. Ecol. Manage.* 207(1-2): 59-74.
- Lasch, P., Kollas, C., Rock, J. & Suckow, F., 2010: "Potentials and impacts of short-rotation coppice plantation with aspen in Eastern Germany under conditions of climate change." *Reg. Envir. Chang.* 10(2): 83-94.

- Lasch, P., Suckow, F., Gutsch, M. & Reyer, C., 2012: "Waldumbau in Brandenburg: Grundwasserneubildung unter Klimawandel." In: U. Grünewald, O. Bens, H. Fischer, HR. Hüttl, K. Kaiser & A. Knierim (Hrsg.), *Wasserbezogenen Anpassungsmaßnahmen an den Landschafts- und Klimawandel*. Schweizerbarth: 272-279.
- Lehner B., Czisch G. & Vassolo S., 2005. "The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis." *Energy Policy*. 33: 839-855.
- Linnerud, K., Mideksa, T. & Eskeland, G., 2011. "The Impact of Climate Change on Nuclear Power Supply." *Energy Journal* 32(1): 149-168.
- Luhmann, N., 1984. *Soziale Systeme. Grundriß einer allgemeinen Theorie*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp.
- .1986. *Ökologische Kommunikation: Kann die moderne Gesellschaft sich auf ökologische Gefährdungen einstellen?* Opladen: Westdeutscher Verlag.
- . 1991. *Soziologie Des Risikos*. Berlin: Gruyter.
- . 1993. "Risiko Und Gefahr." In N. Luhmann (Hrsg.): *Soziologische Aufklärung 5. Konstruktivistische Perspektiven*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften. 131–169.
- . 1997. "Die Moral Des Risikos Und Das Risiko Der Moral." In: G. Bechmann. *Risiko Und Gesellschaft. Grundlagen Und Ergebnisse Interdisziplinärer Risikoforschung*. Opladen: Westdeutscher Verlag. 327-338.
- 1997. *Die Gesellschaft der Gesellschaft*. Frankfurt a.M.: Suhrkamp.
- Lutz, W., O'Neill, B.C. & Scherbov, S., 2003. "Europe's Population at a Turgning Point." *Science* 299:1991-1992.
- Lutz, W., Cuaresma, J.C. & Sanderson, W., 2008. "The Demography of Educational Attainment and Economic Growth." *Science* 319:1047-1048.
- Mädig, H., 2009. "Alterung – ihre lokalen Folgen als Probleme für Kommunalpolitik und –verwaltung." In: H. Bucher & E.-J. Flöthmann (Hrsg.), *Demographische Alterung auf kommunaler Ebene: Umsetzung und Konsequenzen*. Schriftenreihe der deutschen Gesellschaft für Demographie. 15–32. BoD – Books on Demand.
- Mäkelä, A., 1986: "Implications of the pipe model theory on dry matter partitioning and height growth trees." *Journal of Theoretical Biology* 123: 103-120.

- Mäkelä, A., Sievänen, R., Lindner, M. & Lasch, P., 2000: "Application of volume growth and survival graphs in the evaluation of four process-based forest growth models." *Tree Physiology* 20(5/6): 347-355.
- Mantau, U., 2009: "Holzrohstoffbilanz Deutschland: Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung bis 2012." Waldstrategie 2020 Tagungsband zum Symposium des BMELV, 10.-11. Dez. 2008, Berlin. In: B. Seintsch & M. Dieter (Hrsg.), Braunschweig, vTI. Landbauforschung, vTI *Agriculture and Forest Research Sonderheft* 327: 27-36.
- McCarthy, J.J., Canziani, O.F., Leary, N.A., Dokken, D.J. & White, K.S., 2001. *Climate Change 2001. Impacts, Adaptation, and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- McLaren, L. M., 2011. "The cultural divide in Europe. Migration, Multiculturalism, and Political Trust." *World Politics* 64: 199-241.
- Meiwes, K.-J., Badeck, F. W., Beese, F., Berthold, D., Einert, P., Jochheim, H., Kallweit, R., Konopatzky, A., Lasch, P., Meesenburg, H., Puhmann, M., Raspe, S., Schulte-Bisping, H., Schulz, C. & Suckow, F., 2007: „Kohlenstoffumsatz in Waldökosystemen und deren Böden. Parametrisierung, Kalibrierung und Validierung von Modellen.“ *AFZ / Der Wald*(20/2007): 1076-1078.
- Merton, R. K., 1949. *Social Theory and Social Structure; Toward the Codification of Theory and Research*. Glencoe: Free Press.
- Mistral, J. 2011. "Wages and Productivity - the Missing Link." Discussion Paper of ThinkTank 20: Beyond Macroeconomic Policy Coordination Discussions in the G-20.
http://www.brookings.edu/~media/research/files/reports/2011/11/think%20tank%2020/11_think_tank_20. (Zugriff am 19.07.12).
- Moorhead, D. L., Sinsabuagh, R. L., Linkins, A. E. & Reynolds, J. F., 1996: "Decomposition processes: modelling approaches and applications." *The Science of the Total Environment* 183: 137-149.
- Nelson, D. R., Adger, W.N. & Brown, K., 2007. "Adaptation to Environmental Change: Contributions of a Resilience Framework." *Annual Review of Environment and Resources* 32 (1): 395-419.
- Nassehi, A., 1997. "Inklusion, Exklusion - Integration, Desintegration. Die Theorie funktionaler Differenzierung und die Desintegrationsthese." In: W. Heitmeyer (Hrsg.), *Bundesrepublik*

Deutschland: Auf dem Weg von der Konsens- zur Konfliktgesellschaft, Band 2: Was hält die Gesellschaft zusammen? Frankfurt a. M.: Suhrkamp. 113-148

- . 2004. "Die Theorie funktionaler Differenzierung im Horizont ihrer Kritik." *Zeitschrift für Soziologie* 33:98-118.
- . 2008. "Die funktional differenzierte Gesellschaft: Das bürgerliche Privileg der Fremdheit." unpublished.
- Norby, R.J., DeLucia, E.H., Gielen, B., Calfapietra, C., Giardina, C.P., King, J.S., Ledford, J., McCarthy, H.R., Moore, D.J.P., Ceulemans, R., De Angelis, P., Finzi, A.C., Karnosky, D.F., Kubiske, M.E., Lukac, M., Pregitzer, K.S., Scarascia-Mugnozza, G.E., Schlesinger, W.H. & Oren, O., 2005. "Forest response to elevated CO₂ is conserved across a broad range of productivity." *PNAS* 102: 18052–18056.
- Norby, R.J., Warren, J.M., Iversen, C.M., Garten, C.T. Jr, Medlyn, B.E. & McMurtrie, R.E., 2009. "CO₂ enhancement of forest productivity constrained by limited nitrogen availability." *Nature Precedings*.
<http://precedings.nature.com/documents/3747/version/1> (Zugriff am 09.06.12).
- O'Brien, K., Eriksen, S., Schjolden, A. & Nygaard, L., 2004. "What's in a Word? Conflicting Interpretations of Vulnerability in Climate Change Research." CICERO Working Paper 2004:04. Center for International Climate and Environmental Research, Oslo, Norway.
www.cicero.uio.no/media/2682.pdf (Zugriff am 09.06.12).
- O'Brien, K., Leichenko, R., Kelkar, U., Venema, H., Aandahl, G., Tompkins, H. Javed, A., Bhadwal, S., Barg, S., Nygaard, L. & West, J., 2004. "Mapping Vulnerability to Multiple Stressors: Climate Change and Globalization in India." *Global Environmental Change* 14 (4): 303–313.
- O'Brien, K., Sygna, L. & Haugen, J., 2004. "Vulnerable or Resilient? A Multi-Scale Assessment of Climate Impacts and Vulnerability in Norway." *Climatic Change* 64:193-225.
- OECD, 2008a. Recommendation of the Council on Resource Productivity. Organization for Economic Cooperation (OECD), Paris.
- . Emerging Risks in the 21st Century. An Agenda for Action.
- . 2008b. Growing Unequal? Income Distribution and Poverty in OECD Countries.
- . 2011a. Divided We Stand: Why Inequality Keeps Rising.
- . 2011b. Bildung Auf Einen Blick 2011.

- Olmos, S., 2001. "Vulnerability and Adaptation to Climate Change: Concepts, issues, Assessment models." Climate Change Knowledge Network. <http://www.cckn.net>.
- Orlowsky, B., Gerstengarbe, F.-W. & Werner, P.C., 2008. "A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM." *Theor. Appl. Climatol.* 92 (3-4): 209 - 223.
- Oswalt, P. (Hrsg.), 2004. *Schrumpfende Städte / Shrinking Cities: Städtischer Wandel im Zeichen von Postfordismus und Globalisierung*. Publikation Zur Ausstellung KW - Institute for Contemporary Art Berlin, 4.9. - 7.11.2004. Ostfildern: Hatje Cantz Verlag.
- Petermann, T., Bradke, H., Lüllmann, A., Poetzsch, M. & Riehm, U., 2010. "Gefährdung Und Verletzbarkeit Moderner Gesellschaften – Am Beispiel Eines Großräumigen Ausfalls Der Stromversorgung." Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, Endbericht.
- Petzold, R., Feger, K. H. & Schwärzel, K., 2009: "Wasserhaushalt von Kurzumtriebsplantagen." In: T. Reeg, A. Bemann, W. Konold, D. Murach and H. Spiecker (Hrsg.), *Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. 181-192.
- Polley, H., Hennig, P. & Schwitzgebel, F., 2009: "Holzvorrat, Holzzuwachs, Holznutzung in Deutschland." *AFZ-Der Wald* 20: 1076-1078.
- Prasch M. & Mauser W., 2010. "Globaler Wandel des Wasserkreislaufs am Beispiel der Oberen Donau." *KLIWA-Berichte, Heft 15*, Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft: 293-302.
- Prognos/EWI/GWS, 2010. *Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung*, Projekt Nr. 12/10 des BMWi, Berlin.
<http://bmwi.de/BMWi/Navigation/Service/publikationen,did=356294.html> (Zugriff am 09.06.12).
- Pryor, S.C., Barthelmie, R.J. & Kjellström, E., 2005a. "Potential climate change impact on wind energy resources in northern Europe: analyses using a regional climate model." *Climate Dynamics* 25: 815–835.
- Pryor, S.C., Schoof, J.T., Barthelmie, R.J., 2005b. "Climate change impacts on wind speeds and wind energy density in northern Europe: empirical downscaling of multiple AOGCMs." *Climate Research* 29: 183–198.

- Putnam, R. D., 2001. *Gesellschaft Und Gemeinsinn: Sozialkapital Im Internationalen Vergleich*. Gütersloh: Bertelsmann Stiftung.
- Quinkenstein, A., Jochheim, H., Schneider, B. U. & Hüttl, F., 2009. "Modellierung des Kohlenstoffhaushalts von Pappel-Kurzumtriebsplantagen in Brandenburg." In: T. Reeg, A. Bemann, W. Konold, D. Murach & H. Spiecker (Hrsg.), *Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. 193-204.
- Rajan, R. G. 2010. *Fault Lines: How Hidden Fractures Still Threaten the World Economy*. Princeton: Princeton University Press.
- Ranci, C., 2002. "Fenomenologia della vulnerabilità sociale." *Rassegna italiana di sociologia* 4:521-552.
- Renn, O., Dreyer, M., Klinke, A., & Schweizer, P.-J., 2007. "Systemische Risiken: Charakterisierung, Management Und Integration in Eine Aktive Nachhaltigkeitpolitik." *Jahrbuch Ökologische Ökonomik* 5, (Soziale Nachhaltigkeit): 157-188
- Renn, O. & Keil, F., 2008. "Systemische Risiken: Versuch Einer Charakterisierung." *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 17 (4): 349-354.
- Renn, O., Klinke, A. & van Asselt. M., 2011. "Coping with Complexity, Uncertainty and Ambiguity in Risk Governance: a Synthesis." *Ambio* 40 (2): 231-246.
- Ritzen, J., Easterly, W. & Bayer, M., 2000. "On 'Good' Politicians and 'Bad' Policies - Social Cohesion, Institutions, and Growth, Volume 1." Policy, Research Working Paper WPS 2448. Weltbank, Washington D.C.
- Rock, J., 2007: "Ökologische Aufwertung von Energieholzplantagen - Möglichkeiten und Kosten." *Archiv f. Forstwesen u. Landschaftsökologie* 41(2): 60-66.
- Röhle, H., Hartmann, K.-U., Steinke, C. & Murach, D., 2009: "Leistungsvermögen und Leistungserfassung von Kurzumtriebsplantagen." *Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen*. In: T. Reeg, A. Bemann, W. Konold, D. Murach and H. Spiecker (Hrsg.), *Anbau und Nutzung von Bäumen auf landwirtschaftlichen Flächen*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. 41-56.
- Schaber, J., Badeck, F.-W. & Lasch, P. 1999: "Ein Modell der Sukzessionsdynamik europäischer Wälder - Forest Ecosystems in a changing Environment (4C)." Deutscher Verband forstlicher Versuchsanstalten - Sektion forstliche Biometrie und Informatik. 11. Jahrestagung und Internationale biometrische Gesellschaft. Deutsche Region.

- Arbeitsgruppe Ökologie, Herbstkolloquium. D. R. Pelz, O. Rau and J. Saborowski.
Freiburg. 212-217.
- Schaber, J. & Badeck, F. W., 2003: "Physiology-based phenology models for forest tree species in Germany." *International Journal of Biometeorology* 47(4): 193-201.
- Schaeffer, R., Szklo, A.S., Pereira de Lucena, A.F., Borba, B.S.M.C., Nogueira, L.P.P., Fleming, F.P., Troccoli, A., Harrison, M. & Boulahya, M.S., 2012. "Energy sector vulnerability to climate change: A review." *Energy* 38: 1-12.
- 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(3): 1191-1205.
- Scheuer, S., Haase, D. & Meyer, V., 2011. "Exploring Multicriteria Flood Vulnerability by Integrating Economic, Social and Ecological Dimensions of Flood Risk and Coping Capacity: From a Starting Point View Towards an End Point View of Vulnerability." *Natural Hazards* 58 (2): 731-751.
- Schmitz, F.; Polley, H., Hennig, P., Dunger, K. & Englert, H., 2005: "Das potenzielle Rohholzaufkommen 2003 – 2042: Das Wichtigste in Kürze." Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Bonn.
- Seintsch, B., 2001. "Holzbilanzen 2009 und 2010 für die Bundesrepublik Deutschland." VTI, Hamburg.
- Sen, Amartya. 1995. *Inequality Reexamined*. Harvard, Harvard University Press.
- Seljom, P., Rosenberg, E., Fidje, A., Haugen, J.E., Meir, M., Rekstad, J. & Jarlset, T., 2011. "Modelling the effects of climate change on the energy system – A case study of Norway." *Energy Policy* 39: 7310-7321.
- Sennet, R., 1998, *The Corrosion of Character, The Personal Consequences Of Work In the New Capitalism*, New York, Norton.
- Siebert, H., 2010. *Economic Policy for Aging Societies*. Berlin Heidelberg: Springer Verlag.
- Simon, Julian L. 1998. *The Ultimate Resource 2*. Princeton: Princeton Univ Pr.
- Smit, B. & Wandel, J., 2006. "Adaptation, Adaptive Capacity and Vulnerability." *Global Environmental Change* 16 (3): 282-292.

- Solarstromerzeugung, 2012. "Temperatur Photovoltaik Modul." <http://www.solarstromerzeugung.de/temperatur-photovoltaik-modul.html> (Zugriff: 06.01.2012)
- Solt, F., 2008. "Economic inequality and democratic political engagement." *American Journal of Political Science* 52 (1): 48–60.
- . 2010. "Does Economic Inequality Depress Electoral Participation? Testing the Schattschneider Hypothesis." *Political Behavior* 32 (2): 285–301.
- Statistisches Bundesamt, 2012. "Handelskennzahlen: Exportquote." <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Aussenhandel/Handelskennzahlen/Exportquote.html> (Zugriff am 09.06.12).
- Steiner, N. D., & Martin, C.D., 2012. "Economic Integration, Party Polarisation and Electoral Turnout." *West European Politics* 35 (2): 238–265.
- StMWIVT, 2010. "Bayerischer Windatlas - Nutzung der Windenergie." Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie (StMWIVT), München.
- Strauch, U. 2011. "Wassertemperaturbedingte Leistungseinschränkungen konventioneller thermischer Kraftwerke in Deutschland und die Entwicklung rezenter und zukünftiger Flusswassertemperaturen im Kontext des Klimawandels." Würzburger Geographische Arbeiten Heft 106. Würzburg.
- Suckow, F., Badeck, F.-W., Lasch, P. & Schaber, J., 2001: „Nutzung von Level-II-Beobachtungen für Test und Anwendungen des Sukzessionsmodells FORESEE.“ *Beitr. Forstwirtsch. u. Landsch.ökol.* 35(2): 84-87.
- Tainter, J. A. 1988. *The collapse of complex societies*. Cambridge: Cambridge University Press.
- . 2000. "Problem Solving: Complexity, History, Sustainability." *Population & Environment* 22(1): 3-41.
- . 2006. "Social complexity and sustainability." *Ecological Complexity* 3(2): 91-103.
- Taylor-Gooby, P., 2004. "New Risks and Social change." In: P. Taylor-gooby, (Hrsg.): *New risks, new welfare: the transformation of the European welfare state*. Oxford: Oxford University Press. 1-28.
- Thrän, D., Edel, M., Pfeifer, J., Ponitka, J., Rode & M., Knispel, S., 2011: "Identifizierung strategischer Hemmnisse und Entwicklung von Lösungsansätzen zur Reduzierung der

- Nutzungskonkurrenzen beim weiteren Ausbau der Biomassenutzung." DBFZ Report Nr. 4 DBFZ, Leipzig.
- Tönshoff, C., Wachendorf, C., Stülpnagel, R. & Jörgensen, R. G., 2010: "Welche Bedeutung haben die C und N Vorräte des Bodens und der pflanzlichen Biomasse von Kurzumtriebsplantagen für die Dynamik der organischen Bodensubstanz nach dem Umbruch. Anbau nachwachsender Rohstoffe: Wirkungen auf Bodeneigenschaften, Funktionen und Emissionen in Bezug auf Klima- und Gewässerschutz." Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft, Müncheberg.
- TrendResearch, 2011. "Wasserkraft in Deutschland und Europa bis 2030 – Ausbauziele und Potenziale der Wasserkraft, Marktentwicklung bis 2030 in Deutschland und ausgewählten europäischen Ländern." www.trendresearch.de (Zugriff am 09.06.12).
- Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matson, P.A., McCarthy, J.J., Corell, R. W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J.X., Luers, A., Martello, M.L., Polsky, C., Pulsipher, A. & Schiller, A., 2003. "A framework for vulnerability analysis in sustainability science." *PNAS* 100:8074-8079.
- Uslaner, E. M. & Brown, M., 2005. "Inequality, Trust, and Civic Engagement." *American Politics Research* 33 (6): 868–894.
- van Vliet, M. T. H., Yearsley, J. R., Ludwig, F., Vögele, S., Lettenmaier, D. P. & Kabat, P., 2012. "Vulnerability of US and European electricity supply to climate change." *Nature Climate Change*. Advance Online Publication.
- Varela, F. G., Maturana, H. R. & Uribe, R., 1974. "Autopoiesis: the organization of living systems, its characterization and a model." *Biosystems* 5:187-196.
- Vergolini, L., 2011. "Social cohesion in Europe: How do the different dimensions of inequality affect social cohesion?" *International Journal of Comparative Sociology* 52 (3): 197–214.
- VGB, 2004. "Jahresnutzungsgrad von fossil befeuerten Kraftwerken." Anlage 1. Vereinigung der Großkesselbesitzer e.V. (VGB), Essen.
- Villagrán de León, J. C. 2006. "Vulnerability: A Conceptual and Methodological Review." SOURCE. No. 2/2006, Bonn.
- Walker, B. H., Holling, C. S., Carpenter, S. R. & Kinzig, A., 2004. "Resilience, Adaptability and Transformability in Social-ecological Systems." *Ecology and Society* 9 (2): 5 [online].
- Waring, R., Landsberg, J. & Williams, M., 1998. "Net primary production of forests: a constant fraction of gross primary production?" *Tree Physiology* 18(2): 129-134.

- Watts, M. J. & Bohle, H.G., 1993. "The space of vulnerability: the causal structure of hunger and famine." *Progress in Human Geography* 17 (1): 43–67.
- Wechsung, F., Gerstengarbe, F.-W., Lasch, P. & Lüttger, A. (Hg.), 2008: "Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel." PIK Report Nr. 112, Potsdam.
- Wikipedia 2011: "Liste von Wasserkraftwerken in Deutschland."
http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_von_Wasserkraftwerken_in_Deutschland (Zugriff am 09.06.12).
- Wilkinson, R.& Pickett, K., 2010. *The spirit level: why equality is better for everyone*. London: Penguin.
- Willke, H., 1995. *Systemtheorie III: Steuerungstheorie*. Stuttgart, Jena: Gustav Fischer.
- Winiwarter, V. & Knoll, M., 2007. *Umweltgeschichte. Eine Einführung*. Köln: Böhlau.
- Wolff, B., 2002: "Processing forest inventory data to establish a nationwide database for the estimation of the impacts of climate change on German forest and forestry." *Forstw. Cbl.* 121, Supplement 1: 18-27.
- Xiao, C., Yuste, J., Janssens, I., Roskams, P., Nachtergale, L., Carrara, A., Sanchez, B. & Ceulemans, R., 2003. Above- and belowground biomass and net primary production in a 73-year-old Scots pine forest. *Tree Physiology* 23(8): 505-516
- Zebisch, M., Grothmann, T., Schröter, D., Hasse, C., Fritsch, U. & Cramer, W., 2005. "Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme." Report 201 41 253, Umweltbundesamt, Dessau.
- Zebisch, M., 2012. "Methoden Vulnerabilität: Praxisbeispiel UBA-Studie + CLISP" presented at the Vernetzungsworkshop Vulnerabilität, December 3, Berlin.
- Zinn, J. O., 2008. "Introduction: the contribution of sociology to the discourse on risk and uncertainty." In J.O. Zinn (Hrsg.), *Social theories of risk and uncertainty: an introduction*. Malden: Blackwell.

9. Anhang

A. Szenarien mit STAR (Statistisches Regionalisierungsmodell)

Methodik

Langjährige Meßreihen (Tagesmittelwerte) werden mit einem statistischen Verfahren so aufbereitet, dass sie in Form von Szenarienzeitreihen aus globalen Klimamodellen entnommene regionale klimatische Änderungen (Temperaturtrend) wiedergeben. Als Grundannahme wird die großräumige (im GCM simulierte) Änderung meteorologischer Größen (speziell der langjährigen Mittelwerte der Temperatur) regional als richtig angesehen. Der entsprechende Trend wird auf eine per Zufallszahlengenerator (unter Berücksichtigung der interannuellen Variabilität und des Ranges) erzeugte Rekombination der Jahresmittelwerte aufgeprägt.

Für die gemessenen Tageswerte (Tagesmitteltemperatur) eines jeden Jahres werden die Abweichungen vom Jahresmittelwert ermittelt und unter Beachtung der Rangfolge zufällig ausgewählter Jahre der simulierten Zeitreihe der Jahresmittel zugeordnet. Die Tageswerte dieser simulierten Zeitreihe ergeben sich also als Summe von Jahresmittel, Änderungswert (Jahrestrend) und Tageswerteabweichung. Die simulierte Zeitreihe wird korrigiert, um den Erhalt

statistischer Charakteristika zu gewährleisten. Zwischenergebnis ist eine simulierte Zeitreihe von Tageswerten der Temperatur.

Die Zeitreihe der Meßdaten wird anhand von temperaturbezogenen Parameterkombinationen (Tagesmittel, Tagesamplitude, astronomisch mögliche Sonnenscheindauer, Temperaturverhalten der Vortage) einer Clusteranalyse unterzogen und die Tageswerte in Cluster ähnlicher Tage aufgeteilt.

Für die simulierte Zeitreihe werden ebenfalls die Parameterkombinationen für jeden Tag berechnet und jede dieser Kombinationen über ein Distanzmaß einem der Beobachtungscluster und in diesem wiederum einem konkreten Tag zugeordnet. Damit können die kompletten meteorologischen Informationen dieses Tages in die Simulation übernommen werden. Das Auftreten von im Beobachtungszeitraum nicht aufgetretenen Extremwerten wird durch eine adaptive Varianzkorrektur ermöglicht. Die bislang beschriebenen Arbeitsschritte werden für Bezugsstationen, die die mittleren klimatischen Verhältnisse der Region bestmöglich widerspiegeln, durchgeführt. Nachdem die Tageszuordnung von simulierter Zeitreihe und der Zeitreihe der Meßwerte bekannt ist, wird eine Übertragung auf alle Stationen vorgenommen und somit die räumliche Konsistenz gewahrt.

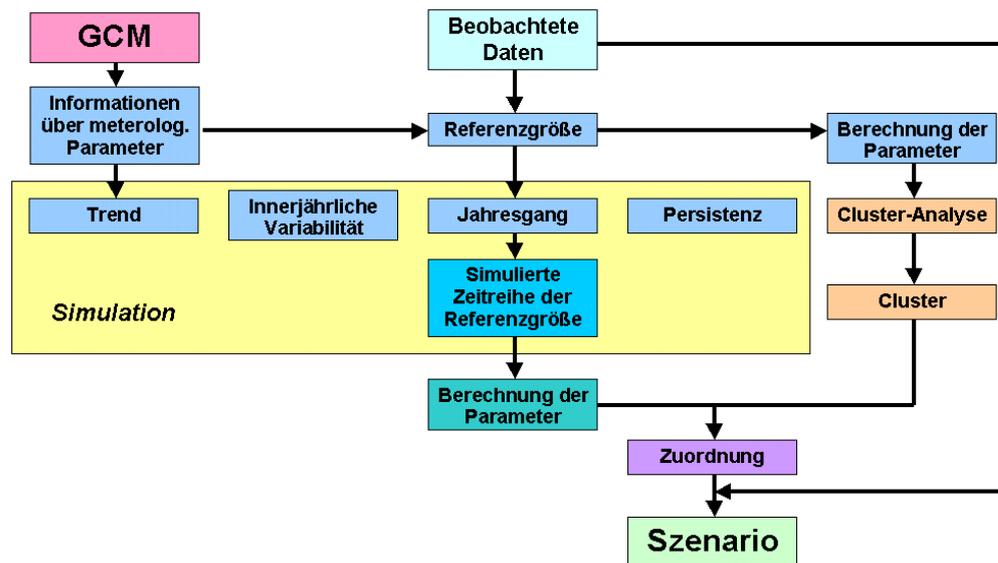
Durch erneute Rekombinationen der Jahresmittelwerte der Temperatur und Durchführung der nachfolgenden Arbeitsschritte können beliebig viele

Szenarienrealisationen erstellt werden. Dadurch ist es möglich, ein statistisch bewertbares Stichprobenkollektiv zu erstellen, um so die Spannbreite möglicher Klimaänderungen absichern zu können.

Leistungsparameter

- Je nach vorhandenen Beobachtungsdaten beliebige räumliche (Punkt) und zeitliche (Stunde) Auflösung.
- Beliebig viele Szenarienrealisationen.
- Möglichkeit der freien Vorgabe von Klimaänderungen (nicht aus Klimamodellen abgeleitet) z.B. zur Simulation von Extremsituationen.
- Geringe Rechenzeit.
- Erfolgreicher Einsatz in verschiedenen nationalen und internationalen Projekten.

Abbildung A. 1: Entwicklung von Szenarien im Statistischen Regionalisierungsmodell STAR



Erstellung der STARII-Szenarien in 0.5°-Stufen für Deutschland

Zuerst wurde für Deutschland ein Szenarium mit 100 Realisierungen gerechnet, dem der Lauf für das Emissionsszenarium A1B des ECHAM5/OM zugrunde lag. Aus den Ergebnissen dieses globalen Modelllaufs wurden die Temperaturtrends räumlich differenziert für den Zeitraum 2007 – 2060 abgeleitet und auf die 8 Referenzstationen übertragen. Gemittelt über Deutschland lag die Temperaturänderung etwas über 2K.

Bei den Szenarien mit den 0.5°-Stufen beziehen sich die vorgegebenen Trends jeweils auf das Deutschlandmittel. Sie umfassen die Stufen: 0.0°, 0.5°, 1.0°, 1.5°, 2.0°, 2.5° und 3.0°. Auch hier wurden die Temperaturänderungen räumlich differenziert auf die Referenzstationen übertragen. Zugrunde liegt dabei das

Verhältnis des Gebietsmitteltrends zu dem Trend an der jeweiligen Station, wie es bei dem oben beschriebenen A1B-Lauf auftrat. D. h., dass das räumliche Muster aus den Temperaturänderungen eben dieses Laufes im Wesentlichen erhalten bleibt, allerdings eben mit diesen verschiedenen Änderungsstärken.

Eine Ausnahme bildet die Stufe 0.0°. In diesem Fall geht die Temperatur unverändert auf dem Niveau am Ende des Beobachtungszeitraums (klimatisch gesehen und nicht nur die „zufällige“ Temperatur von 2006 verwendet) in das Modell ein. Es findet also keine räumlich differenzierte Temperaturänderung statt. Die räumlichen Temperaturunterschiede bleiben natürlich dabei aber erhalten.

Es wurden jeweils 1000 Realisierungen für die Referenzstationen berechnet, 100 an Hand der Trends der klimatischen Wasserbilanz (siehe „Charakterisierung der Realisierungen für eine STARII-Szenariensimulation“) ausgewählt und dafür für alle Stationen die Realisierungen erstellt sowie drei davon besonders bezeichnet (unten, Median, oben).

B. Szenarien mit CCLM



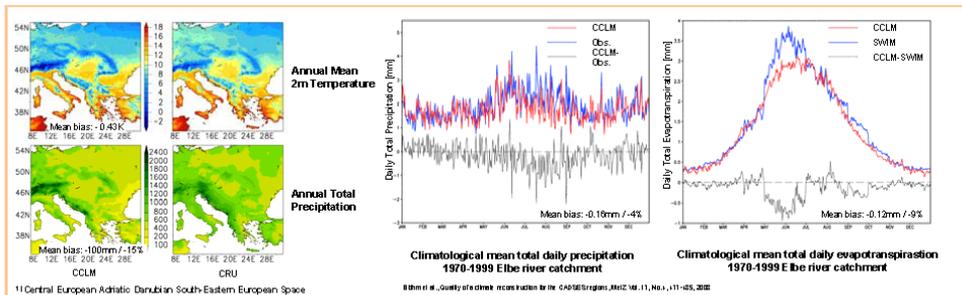
CCLM – A MODEL FOR HIGH-RESOLUTION SIMULATIONS OF CLIMATE AND EXTREMES

CCLM is applied for climate and extremes reconstruction and scenario generation. At PIK, coupling to a hydrology and an urban area model is ongoing. Within the COSMO and CLM communities, the model is among others coupled with a sea ice module, a lake module, a fog module, an aerosol module and with a regional ocean model.

THE HYDROLOGICAL CYCLE IN THE CADSES¹⁾ REGIONS

- High quality Elbe river catchment climate reconstructions -

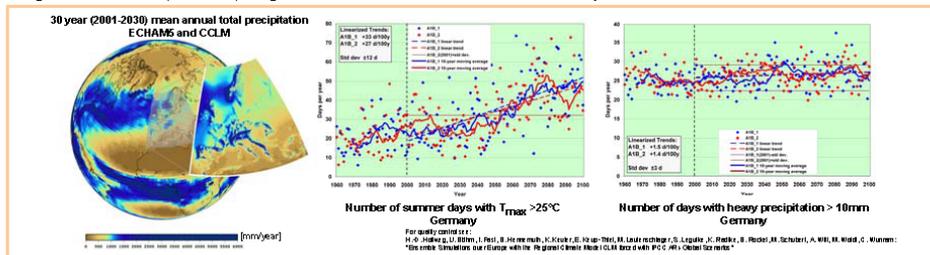
High-quality CCLM reconstruction of near-surface climate parameters in the Elbe river catchment - a solid basis for assessing climate-hydrology-vegetation feedbacks by coupling of CCLM and SWIM.



THE CONSORTIUM RUNS

- Transient climate scenarios allowing to assess uncertainty -

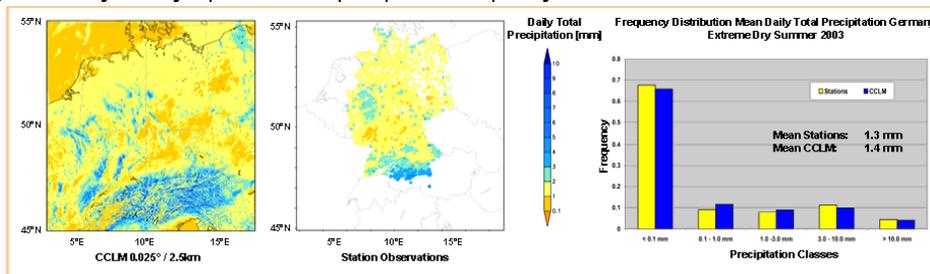
With two realizations for each emission scenario, a range of uncertainty can roughly be estimated for the first time for high-resolution (~18km) regional climate simulations for Europe with CCLM.



VERY HIGH-RESOLUTION RECONSTRUCTION OF THE DROUGHT 2003

- A double-nesting approach for ensembles of extreme scenarios -

Double-nesting (coarse resolution ~7km, high resolution ~2.5km) performs well (mean relative precipitation bias ~12 %) and nearly exactly reproduces the precipitation frequency distribution.



RESEARCH DOMAIN II - CLIMATE IMPACTS AND VULNERABILITIES
REGIONAL IMPACTS AND STRATEGIES
U. BÖHM, F.-W. GERSTENGARBE, M. BÜCHNER, D. HAUFE, M. KÜCKEN
H. ÖSTELRE, S. SCHUBERT, J. VOLKHOZ



C. Das öko-hydrologische Modell SWIM

Daten zur Kalibrierung und Validierung der Modelle

Für die Kalibrierung und Validierung der Abflusssimulationen (Modell SWIM) wurden Daten des Global Data Runoff Centers (GDRC) in Koblenz verwendet.

Für die Kalibrierung und Validierung der Simulation der Wassertemperaturen wurden Daten folgender Behörden bzw. öffentlicher Institutionen verwendet:

- Arbeitsgemeinschaft Elbe (Elbe, Saale, Mulde), jetzt Flussgebietsgemeinschaft Elbe;
- Bayerisches Landesamt für Umwelt (Donau, Isar, Main);
- Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz (Rhein, Mosel);
- Flussgebietsgemeinschaft Rhein (Rhein, Mosel, Saar, Emscher);
- Flussgebietsgemeinschaft Weser (Weser, Aller);
- Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie (Main, Fulda, Werra);
- Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg (Havel, Oder);
- Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Rhein, Neckar);
- Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (Ems, Weser, Aller).

Wir danken für die Bereitstellung der Daten.

Methodik

Das Modellsystem SWIM (*Soil and Water Integrated Model*) ist ein zeitlich kontinuierlich arbeitendes, räumlich gegliedertes Einzugsgebietsmodell für die regionale Skala. Es enthält Module zur Berechnung der Hydrologie, des Pflanzenwachstums (Landwirtschaft und Forst), des Nährstoffkreislaufes (Stickstoff und Phosphor) und der Erosion. Die Flächendisaggregation erfolgt in drei Ebenen: die in ihren geographischen Eigenschaften homogene Hydrotopebene, die aus den Hydrotopen zusammengesetzte Teileinzugsgebietsebene und die alles integrierenden Einzugsgebiete. Die unterste Ebene, die Hydrotopebene, entsteht aus der Verschneidung verschiedener räumlicher Informationen: digitales Geländemodell, Teileinzugsgebiete, Bodenkarte, Landnutzung, Grundwasserflurabstand usw. Sie spiegelt die landschaftliche Heterogenität flächenscharf wieder. Die auf der Hydrotopebene errechneten vertikalen und lateralen Wasser- und Stoffflüsse werden auf der Teileinzugsgebietsebene aggregiert und durch das Flusssystem zum Gebietsauslass des Einzugsgebietes geroutet. Das hydrologische Modul in SWIM umfasst vier Teilsysteme: die Bodenoberfläche, die Wurzelzone (wobei entsprechend den Bodeninformationen bis zu 12 Bodenschichten unterschieden werden), den oberen und den unteren Grundwasserleiter sowie das Wasser im Vorfluter.

Wichtig für die Modellierung der hydrologischen Verhältnisse unter Klimawandel ist eine dynamische Modellierung der Vegetationsentwicklung, da sich unter höheren Temperaturen die Phänologie der Pflanzen ändert und die Pflanzen früher im Jahr anfangen zu wachsen und später im Jahr ihre Blätter verlieren, was über die Pflanzentranspiration starke Rückkopplungen auf den regionalen Wasserhaushalt hat. Das Pflanzenwachstum wird auf der Basis eines vereinfachten EPIC-Ansatzes berechnet. Dabei wird eine spezielle, für die Region parametrisierte Datenbasis benutzt, mit deren Hilfe verschiedene Kulturarten (Weizen, Gerste, Mais, Kartoffeln, Raps usw.) sowie auch natürliche Vegetationsbestände (Wald, Grasland) dynamisch – auf Tagesbasis – modelliert werden können. Eine detaillierte Beschreibung der in SWIM abgebildeten Prozesse findet sich in Krysanova und Koautoren (1998).

SWIM: SOIL AND WATER INTEGRATED MODEL

SWIM

SWIM is an ecohydrological integrated river basin model simulating runoff generation, nutrient and carbon cycling, plant growth and crop yield, river discharge and erosion as interrelated processes at a daily time step using regionally available data and considering feedbacks. It was developed to investigate climate and land use change impacts at the regional scale. The model set-up and postprocessing are supported by a GIS interface.

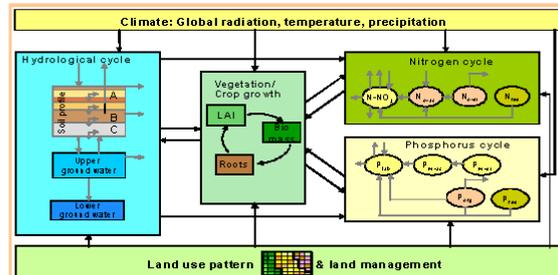


Figure 1: The overview of processes included in SWIM

EXAMPLES OF APPLICATIONS:

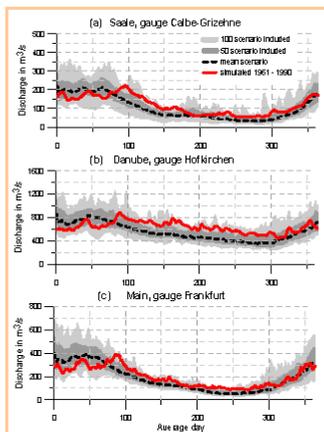


Figure 2: Climate impact study for Germany: seasonal dynamics of river discharge in the scenario period (2051-2060) and the reference period (1961-1990) for three selected rivers.

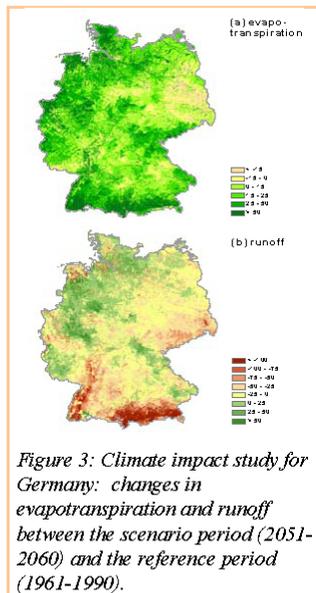


Figure 3: Climate impact study for Germany: changes in evapotranspiration and runoff between the scenario period (2051-2060) and the reference period (1961-1990).

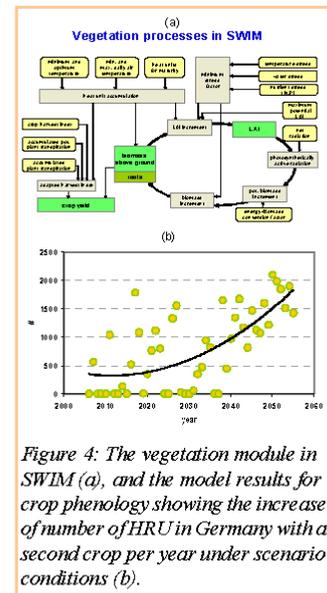


Figure 4: The vegetation module in SWIM (a), and the model results for crop phenology showing the increase of number of HRU in Germany with a second crop per year under scenario conditions (b).

DIRECTIONS OF MODEL DEVELOPMENT:

- SWIM is being coupled to the dynamical regional model CCLM to better reproduce hydrological cycle in RCM including feedbacks of the landscape pattern to climate processes (resp.: J. Volkholz & F. Hattermann);
- the SWIM-CN version, which includes full carbon cycle, is being updated. (resp.: J. Post & C. Rachimov)
- riparian zone processes at the river basin scale (additional water and nutrient uptake) are included in a new version of SWIM (resp.: T. Vetter & F. Hattermann);

List of selected papers:

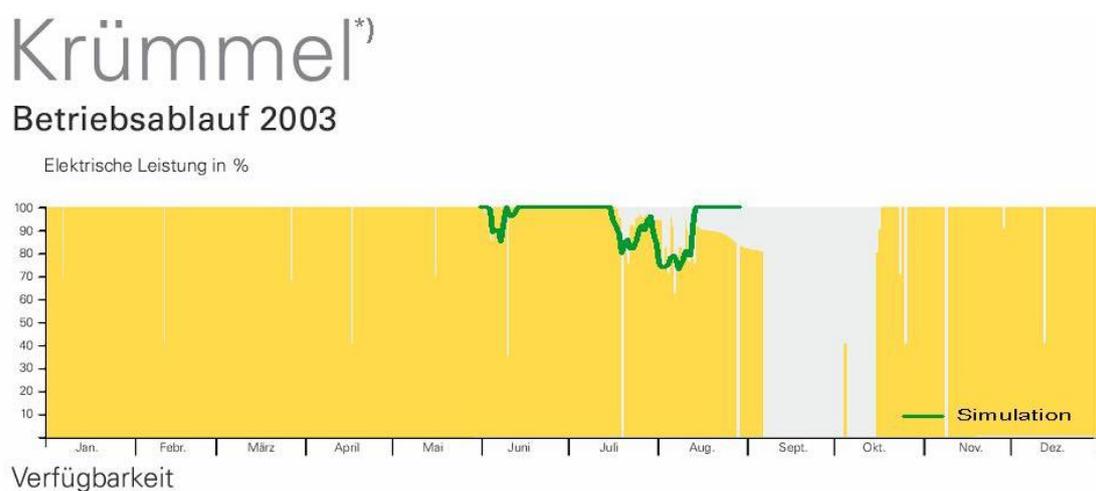
Hattermann, F.F., J. Post, V. Krysanova, T. Conradt and F. Wechsung 2008. Assessment of Water Availability in a Central-European River Basin (Elbe) Under Climate Change. *Advances in Climate Change Research* 4, 42-50.
 Hesse, C., V. Krysanova, J. Pätzolt, F. Hattermann., 2008. Eco-hydrological modelling in a highly regulated catchment to find measures for improving water quality. *Ecological Modelling*, 218, 135-148.
 Huang, Sh., C. Hesse, V. Krysanova and F. Hattermann, 2008. From meso- to macroscale dynamic water quality modelling for the assessment of land use change scenarios. Submitted to *Ecological Modelling*
 Yu, P., V. Krysanova, Y. Wang, W. Xiong, F. Mo, Zh. Shi, H. Liu, T. Vetter & Sh. Huang, 2009. Quantitative estimate of water yield reduction caused by forestation in a water-limited area in northwest China, *Geophysical Research Letters*, 36, L02406, doi:10.1029/2008GL038744.

- snow module is being adjusted taking into account elevation zones and interpolating temperature at the hydrotope level (resp.: Sh. Huang);
- in-stream processes (biota and nutrient cycling) are being integrated in order to enable better representation of the landscape - river interactions (resp.: C. Hesse);
- the "Elbe-Expert-Toolbox"-version of SWIM is interactively coupled with the water management model WBalMo of DHI-WASY by the OpenMI framework (resp.: T. Conradt & C. Rachimow).

D. Test des komplexen Modells für ausgewählte AKW

Anhand ausgewählter Atomkraftwerke wurde der komplexe Ansatz getestet. Die Abbildungen D.1 bis D.3 zeigen exemplarisch die für 2003 veröffentlichten und simulierten Produktionseinschränkungen. Die Simulationen stimmen gut mit den veröffentlichten Daten überein. Zu beachten ist dabei z. B., dass das AKW Krümmel Mitte August 2003 für die Jahresrevision heruntergefahren wurde. Insbesondere bei den AKW Unterweser und Philippsburg 1 zeigt sich, dass neben den (sommerlichen) wassertemperaturbedingten Einschränkungen weitere Faktoren die Auslastung beeinflussen, die der Modellansatz nicht erfassen kann, die für die Simulation der Auswirkungen des Klimawandels aber auch keine Rolle spielen.

Abbildung D. 1: Veröffentlichter und simulierter Jahresgang der elektrischen Leistung des AKW Krümmel in 2003.

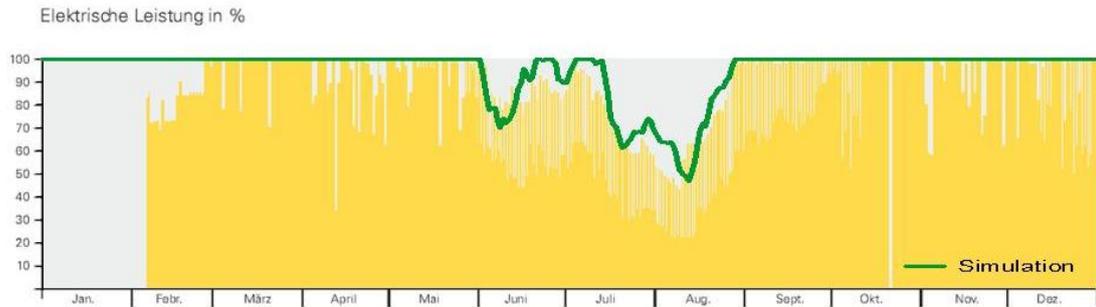


*) Daten: Deutsches Atomforum – Kernenergie in Deutschland, Jahresbericht 2003

Abbildung D. 2: Veröffentlichter und simulierter Jahresgang der elektrischen Leistung des AKW Unterweser in 2003.

Unterweser^{*)}

Betriebsablauf 2003

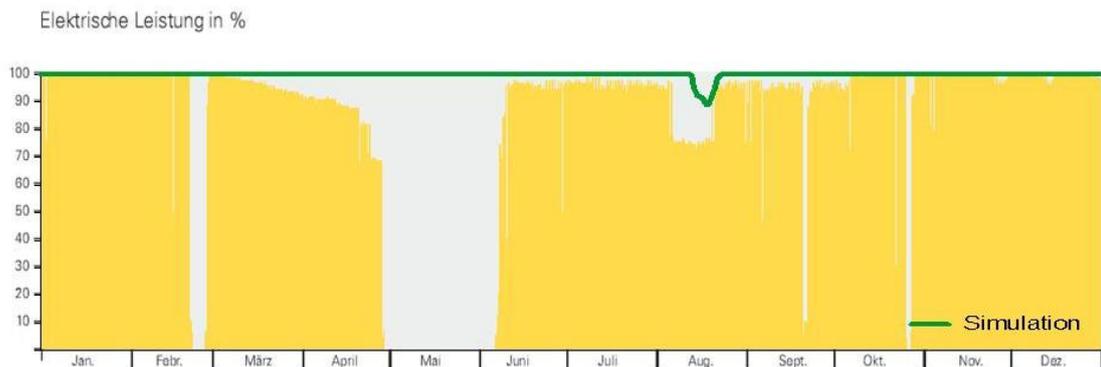


*) Daten: Deutsches Atomforum – Kernenergie in Deutschland, Jahresbericht 2003

Abbildung D. 3: Veröffentlichter und simulierter Jahresgang der elektrischen Leistung des AKW Philippsburg 1 in 2003.

Philippsburg 1^{*)}

Betriebsablauf 2003

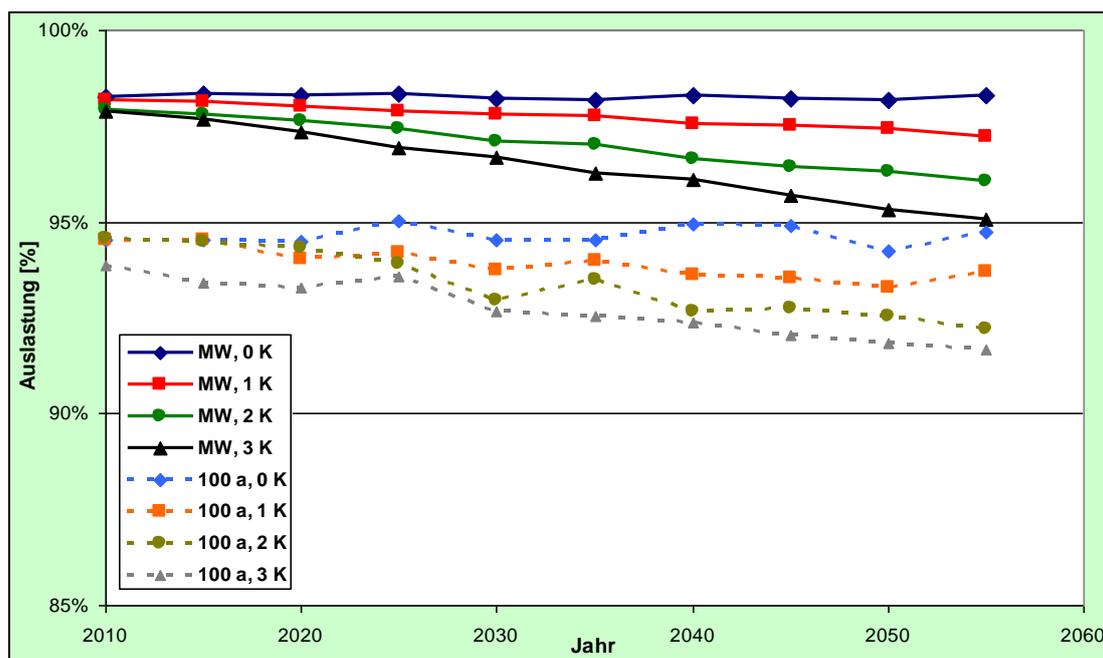


*) Daten: Deutsches Atomforum – Kernenergie in Deutschland, Jahresbericht 2003

Ausgewählte Ergebnisse für die AKW

Abbildung D.4 zeigt die Jahresauslastung für das AKW Unterweser, das bereits in der Vergangenheit häufig von Produktionseinschränkungen aufgrund hoher Wassertemperaturen betroffen war (Vgl. Abbildung D.2), für die stratifizierten Klimaszenarien. Dabei sind sowohl die Mittelwerte als auch eine Extremwertbetrachtung (Wiederkehrintervall 100 a = 1. Perzentil) dargestellt.

Abbildung D. 4: Jahresauslastung des AKW Unterweser für die stratifizierten Klimaszenarien (Mittelwerte und Wiederkehrintervall 100 a)



Insgesamt zeigt sich, dass die in der Vergangenheit betroffenen AKW auch die in den Klimaszenarien am stärksten von Einschränkungen betroffenen sind. Das AKW ISAR 1 allerdings, dessen Kühlsystem nach den Hitzesommern 2003 bzw.

2006 verändert wurde (Einbau von Zellenkühltürmen), wäre den Simulationen zufolge zukünftig nicht mehr von Einschränkungen betroffen.

E. Das Waldwachstumsmodell 4C

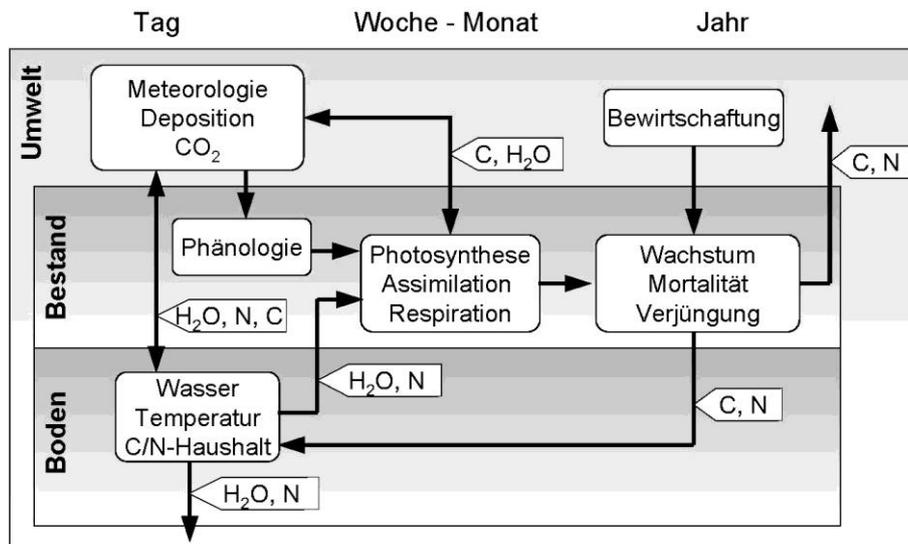
Das prozessbasierte Waldwachstumsmodell 4C beschreibt die Dynamik und das Wachstum von Waldbeständen (Lasch und Koautoren 2005, <http://www.pik-potsdam.de/~lasch/4c.htm>). Ausgehend von einem definierten Anfangszustand (in dieser Untersuchung: Pflanzung) oder auf Basis simulierter Naturverjüngung wachsen die Bäume unter Konkurrenz um Licht, Wasser und Nährstoffe, wobei Baumindividuen einer Art, gleichen Alters und identischer Baumdimensionen in Kohorten zusammengefasst sind. Produktion und Wachstum werden für jede Kohorte berechnet. Es ist möglich, den Effekt sich ändernder atmosphärischer CO₂-Konzentrationen auf das Wachstum der Bäume abzubilden. Die Position der Individuen der Kohorten im Bestand ist nicht bekannt; es wird angenommen, dass die Bäume gleichmäßig auf der Bestandesfläche verteilt sind. Der Kronenraum des Bestandes ist in 0,5 m hohe Schichten eingeteilt, um detaillierte Informationen der Stoffflüsse in den Kompartimenten des Baums zu erhalten. Der Boden wird den Bodenhorizonten folgend in beliebig viele Schichten beliebiger Dicke gegliedert, in welchen u. a. Temperatur und Bodenfeuchte simuliert werden. Das Modell ist derzeit für 11 Baumarten, einschließlich Aspe, parametrisiert und nutzbar. Es benötigt als Eingabegrößen für die Simulation an einem Standort die Informationen über den Bestand, den Boden und tägliche meteorologische Parameter (Temperatur, Niederschlag, Strahlung, relative Luftfeuchte, Luftdruck,

Windgeschwindigkeit). Das Modell erlaubt die Simulation von Waldbewirtschaftungsmaßnahmen und der bei Kurzumtriebsplantagen üblichen Eingriffe. Darüber hinaus ist es möglich, die bei Ernten übliche totale Entnahme der Bäume durch ein „Auf den Stock setzen“ (bodennahes Zurückschneiden) der Aspe zu ersetzen und damit auch die Stockaustriebe zu simulieren.

Wasser- und Nährstoffbilanzierung

Abbildung E.1 beschreibt das prinzipielle Zusammenwirken der Teilmodelle zur Vegetations- und Bodendynamik in 4C.

Abbildung E.1: Modellschema 4C



Das Wasser- und Nährstoffangebot wird in Abhängigkeit von Boden, Bestand und Wetter bilanziert (Grote & Erhard 1999). Nach Bilanzierung von Bestandesniederschlag und Wasserentzug wird der Bodenwasserhaushalt mit einem Versickerungsmodell berechnet (Glugla 1969; Koitzsch 1977), auf dessen Grundlage dann die aktuelle Bodentemperatur bestimmt wird. Bodenfeuchte und Bodentemperatur steuern die Umsatzgeschwindigkeit der Streu und der organischen Bodensubstanz und damit die Nährstoffverfügbarkeit (Kartschall u. a. 1990; Moorhead u. a. 1996; Grote und Suckow 1998). Durch die jährliche Bilanzierung des Streufalls und die Zufuhr zum Bodenkompartment wird der Nährstoffkreislauf im System Pflanze – Boden geschlossen. Zusätzlichen Eintrag erhält das System durch Deposition, Verluste treten durch Auswaschung auf.

Assimilation und Allokation

Die photosynthetische Nettoassimilationsleistung wird nach einem Ansatz von (Haxeltine und Prentice 1996) als Funktion von absorbiertes photosynthetisch aktiver Strahlung, Lufttemperatur sowie Bodenwasser- und Nährstoffverfügbarkeit berechnet. Die Produktion der einzelnen Kohorten ist artenspezifisch und abhängig vom Anteil der Kohorte an der vom Bestand absorbierten Strahlung. Aus der jährlichen Bruttoassimilationsleistung wird nach Abzug der Respiration das Wachstum der Kompartimente Feinwurzeln, Stamm, Blattwerk, sowie Äste und Grobwurzeln berechnet. Die Allokationskoeffizienten für die einzelnen Kompartimente werden dabei so bestimmt, dass sie einem vorgeschriebenen Verhältnis des Querschnitts der leitenden Gewebe im Holz zu den zu versorgenden Blattmassen und einer ausgewogenen Leistung des Aufnahmevermögens der Feinwurzeln und der Produktionskapazität der Blätter entsprechen (*functional balance and pipe model theory*, siehe z.B. Mäkelä 1986). Zusätzlich gehen in die Bestimmung der Allokationskoeffizienten eine Höhenwachstumsfunktion ein, die vom relativen Lichtgenuss und dem Blattmassenzuwachs abhängig ist, sowie die zu ersetzenden Streuproduktionsflüsse. Die Kronenansatzhöhe wächst, wenn die Nettoproduktion der untersten Kronenschicht negativ wird. Damit sind die Baumdimensionen Höhe, Brusthöhendurchmesser und Kronenansatzhöhe im Modell berechenbar.

Phänologie

Das Modell enthält ein Modul zur Simulation des Blattaustriebstags der Buche, das mit dem phänologischen Datensatz des Deutschen Wetterdienstes parametrisiert wurde (Schaber und Badeck 2003). Der Blattwurf wird anhand eines festen durchschnittlichen Datums bestimmt. Für die Laubbaumarten wurden die erforderlichen Parameter an Daten des DWD angepasst. Für die immergrünen Baumarten werden gegenwärtig im Modell noch keine phänologischen Stadien unterschieden.

Mortalität

Die Mortalität der Individuen innerhalb der Kohorten wird aus der Kohlenstoffbilanz bestimmt (stressbedingte Mortalität) oder nach einer vorgegebenen altersbedingten Mortalitätsrate. Beide Ansätze können auch kombiniert werden. Stressbedingte Mortalität tritt auf, wenn die Kohlenstoffbilanz über einen bestimmten Zeitraum negativ wird und daher z.B. die Blattmasse der Individuen einer Kohorte eines Jahres geringer ist als die des Vorjahres. Sie führt damit zur Verringerung der Individuenzahl bzw. zum vollständigen Absterben der Kohorte. Die intrinsische artenspezifische Mortalität wird über ein maximales Alter der Baumart definiert (Botkin & Nisbet 1992).

Regeneration und Management

Auf Bestandesebene können Verjüngungs- und Bewirtschaftungsmaßnahmen simuliert werden (Lasch u. a. 2005). Die Verjüngung beschreibt das Aufwachsen von gepflanzten Setzlingen oder von Sämlingen, die jährlich in Abhängigkeit von Umweltbedingungen im Bestand aufkeimen können, in die Baumschicht.

Das Modell erlaubt die Simulation einer Vielzahl von Bewirtschaftungsvarianten, die durch die Kombination verschiedener implementierter Methoden möglich sind. Ein Bewirtschaftungsplan steuert die verschiedenen Eingriffe. In Abhängigkeit von der Bestandeshöhe werden Jungwuchspflege, Läuterung und Jungbestandespflege simuliert. Für die anschließenden Bestandeseingriffe kann Hoch- oder Niederdurchforstung gewählt werden. Die Durchforstung wird durch Durchforstungsstärke und Durchforstungsintervall beschrieben. Zur Ernte des Bestandes, gesteuert über die Umtriebszeit, ermöglicht das Modell den Kahlschlag mit anschließender Neuanpflanzung oder natürlicher Verjüngung oder einen Schirmschlag, ebenfalls kombiniert mit einer Unterpflanzung. Für die Pflanzung kann eine Artenspezifikation und Pflanzdichte vorgegeben werden. Die Generierung von Mischbeständen ist möglich. Der Bewirtschaftungsplan erlaubt damit auch langfristige Simulationen über mehrere Umtriebszeiten.

Zur Simulation von Kurzumtriebsplantagen (KUP) mit schnellwachsenden Baumarten wurden die dafür notwendigen Prozesse (Stammaustrieb) und Bewirtschaftungsmaßnahmen implementiert.

Zeitregime

Die Berechnung der Flüsse und die Änderung der Zustandsvariablen erfolgt prozessabhängig mit unterschiedlichen zeitlichen Schrittweiten. Die Wasser- und Wärme Flüsse und die Phänologie werden im Tagestakt berechnet, Bodenkohlenstoff- und Stickstoffdynamik sowie die photosynthetische Produktion mit Schrittweiten zwischen wahlweise einem Tag bis zu einer Woche, während Allokation, Wachstum, Mortalität und Regeneration im Jahrestakt berechnet werden.

Parameter, Initialisierung und Triebkräfte

Die Artenzusammensetzung und die Bestandesstruktur können auf der Basis von Inventurdaten initialisiert werden. Die Kohorten werden dann entsprechend der gemessenen Verteilungen von Brusthöhendurchmesser sowie, falls vorhanden, Baumhöhe und Kronenansatzhöhe definiert. Weiterhin werden zur Initialisierung Daten zu Bodenstruktur, Kohlenstoff- und Stickstoffgehalten benötigt. Die Modellparameter für den Boden werden, soweit sie nicht explizit bestimmt wurden, über die Textur zugeordnet; alle anderen Parameter, im Prinzip immer artenabhängig, werden aus der Literatur bestimmt.

Als treibende klimatische Größen werden Tagesmittel bzw. -summen der Temperatur, des Niederschlags, der Luftfeuchte und der Strahlung benötigt, die wahlweise aus Messreihen eingelesen oder aus Monatswerten mit Hilfe eines Wettergenerators hergeleitet werden können. Außerdem wird eine Zeitreihen der atmosphärischen CO₂-Konzentration und der Stickstoff-Deposition vorgegeben

Validierung und Anwendung

Das Modell liegt in einer ersten, hier umrissenen Ausbaustufe vor und wird an langen Zeitreihen von Dauerbeobachtungsflächen hinsichtlich der Bestandesdynamik getestet (Schaber u. a. 1999; Mäkelä u. a. 2000). Es ist gegenwärtig für die Baumarten Buche (*Fagus sylvatica* L.), Fichte (*Picea abies* L.), Kiefer (*Pinus sylvestris* L.), Eiche (*Quercus robur* L.), Birke (*Betula pendula* Roth), Aspe (*Populus tremula* (L.), *P. tremuloides* (Michx.)), Aleppo-Kiefer (*Pinus halepensis* Mill.), Ponderosa-Kiefer (*Pinus ponderosa* Dougl.), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) parametrisiert. Einzelne Komponenten des Waldwachstumsmodells 4C wurden für mehrere Baumarten an verschiedenen Standorten (v.a. an Level II Standorten in Brandenburg, Sachsen und Thüringen) validiert.

Im Rahmen des BMBF- Projektes „Wälder und Forstwirtschaft im Globalen Wandel: Strategien für eine integrierte Wirkungsanalyse und -bewertung“ (LK9528-9533, vgl. auch Wolff 2002) und des EU-Projektes Projektes

„SilviStrat: Silvicultural Response Strategies to Climatic Change in Management of European Forests” (EVK2-2000-00723) wurde das Modell für Analysen eingesetzt (Lasch u. a. 2002; Lasch u. a. 2002; Lasch u. a. 2005; Fürstenau u. a. 2007). Weitere Anwendungen erfolgten im Rahmen eines Forest Focus-Projekts (Badeck u. a. 2007; Meiwes u. a. 2007). Im Rahmen einer Studie zur Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen wurde mittels 4C das Ertragspotenzial von Aspen- KUP analysiert (Wechsung u. a. 2008), siehe auch Kollas u. a. (2009); Lasch u. a. (2010).

F. Energieszenarien

Aufgrund der Verknappung und Verteuerung der fossilen Energieträger, der angestrebten Senkung der Importquote bei Primärenergieträgern und des großteils energiebedingten anthropogenen Klimawandels unterliegt das Energiesystem – flankiert durch die Maßnahmen der Bundesregierung zur Beschleunigung der Energiewende – derzeit einem starken Wandel. Das Energiesystem im Jahre 2050 wird daher vermutlich ein völlig anderes sein als heute. Mithilfe von Energieszenarien werden mögliche Transformationspfade des Energiesystems simuliert. Den Szenarien liegen Projektionen der demographischen und wirtschaftlichen Entwicklung Deutschlands zugrunde. Diese umfassen u.a. die Entwicklung der Haushaltsgrößen, der Wohnfläche, des Personen-, Güter- und Luftverkehrs, der Energiepreise, des Bruttoinlandsprodukts, des Wachstums bzw. der Bruttowertschöpfung in Landwirtschaft, Industrie und Dienstleistungssektor sowie – teilweise – das (absolute) Potenzial an Biomasse.

Um ein Gefühl von der Spannbreite der möglichen Entwicklungen des Energiesystems zu vermitteln, wird im Folgenden der Zeitverlauf einiger zentraler Variablen aus einigen der wichtigsten Energieszenarien für Deutschland dargestellt. Die insgesamt 11 Szenarien sind (siehe Burck u. a. 2010; Keles u. a. 2011; Prognos/EWI/GWS 2010): Lead Scenario der BMU-Leitstudie 2007 (BMU

2007), Referenzszenario 2005 der BMU-Leitstudie 2007 (REF 2005), Leitszenario 2009 (BMU 2009), Szenario 1 (Referenz) und 3 (Umweltbewusstes Handeln) der Studie „Energiezukunft 2050“ im Auftrag von EnBW, E.ON, RWE und Vattenfall (FfE 2009), zwei Szenarien aus der Studie Modell Deutschland Klimaschutz bis 2050 (WWF 2009), Klimaschutz: Plan B 2050 (Greenpeace 2009), drei der Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung (BMWi 2010).

Abbildung F.1 zeigt den Zeitverlauf des Primärenergieverbrauchs (1990-2010 Messdaten; 2010-2050 Szenariodaten). Die moderate Abnahme des PEV in den letzten 20 Jahren geht in fast allen Szenarien in eine noch stärkere zukünftige Abnahme über. So beträgt der PEV in den vom BMU und vom BMWi in Auftrag gegebenen Szenarien im Jahr 2050 nur noch 49% bis 58% des Werts von 2010. Am stärksten ist der Rückgang des PEV in den ambitionierteren Szenarien des WWF (auf etwa 40% bis 2050) und von Greenpeace (auf 33% bis 2050).

Abbildung F.1: Primärenergieverbrauch in Deutschland 1990-2050 (1990-2010: Messdaten; 2010-2050: Energieszenarien) in 11 Energieszenarien (eigene Darstellung).

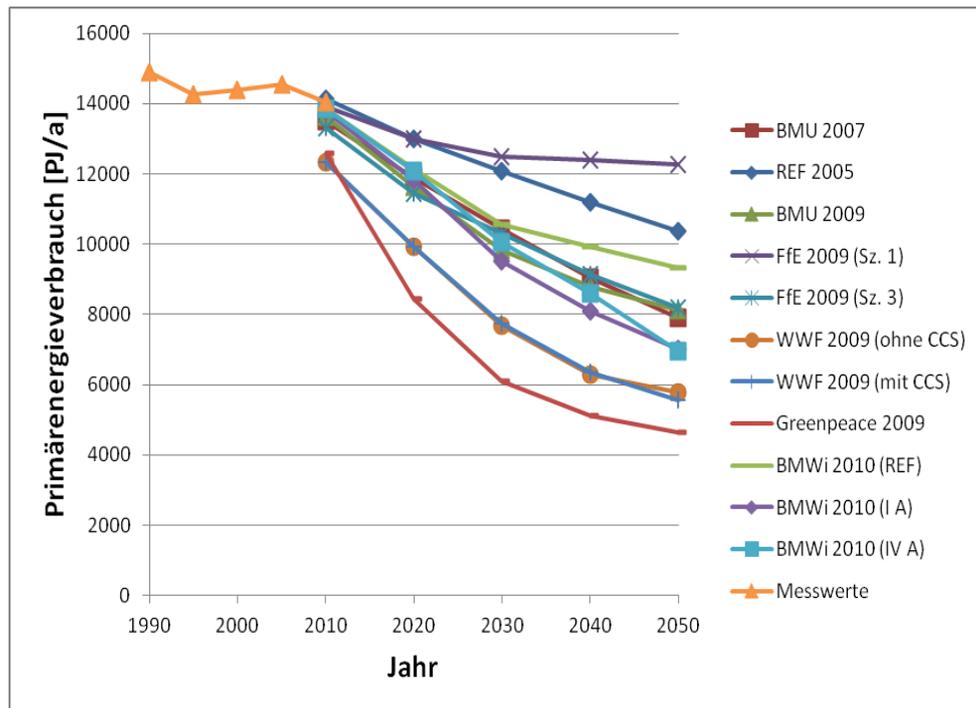


Abbildung F.2 zeigt den Zeitverlauf des Anteils der Erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch (1990-2010 Messdaten; 2010-2050 Szenariodaten). In allen Szenarien setzt sich der Anstieg des Anteils der Erneuerbaren Energien am PEV weiter fort. In den vom BMU und vom BMWi in Auftrag gegebenen Szenarien steigt der Anteil der Erneuerbaren Energien am PEV bis 2050 auf etwa 50%. In den ambitionierteren Szenarien des WWF steigt er bis 2050 auf knapp 60% (mit CCS³) bzw. über 70% (ohne CCS) und im Greenpeace-Szenario sogar auf knapp 90%.

³ Carbon Dioxide Capture and Storage.

Abbildung F.2: Anteil der Erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch in Deutschland 1990-2050 (1990-2010: Messdaten; 2010-2050: Energieszenarien) in 11 Energieszenarien (eigene Darstellung).

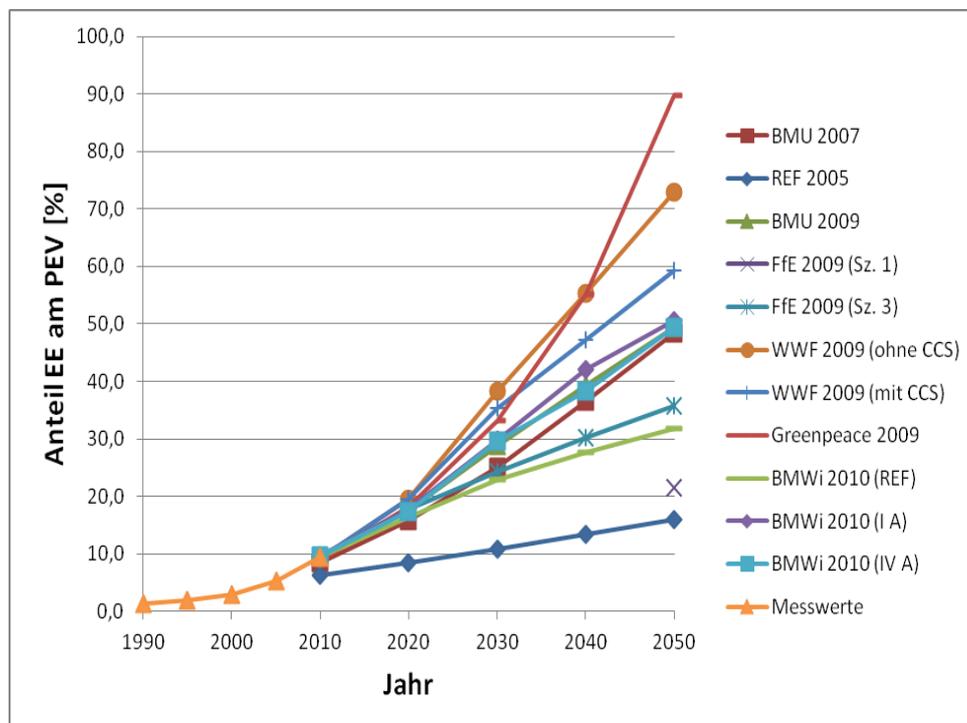


Abbildung F.3 zeigt den Zeitverlauf der Importquote des Primärenergieverbrauchs (1990-2010 Messdaten; 2010-2050 Szenariodaten). In allen Szenarien zeichnet sich ein weiteres Absinken der Importquote ab. In den vom BMU und vom BMWi in Auftrag gegebenen Szenarien liegt die Importquote im Jahr 2050 bei etwa 50% bis 55%. In den ambitionierteren Szenarien geht die Importquote v.a. aufgrund des hohen Anteils Erneuerbarer Energien sogar noch weiter zurück: in den WWF-Szenarien auf 35-40% und im Greenpeace-Szenario auf etwa 10%.

Abbildung F.3: Importquote des Primärenergieverbrauch in Deutschland 1990-2050 (1990-2010: Messdaten; 2010-2050: Energieszenarien) in 8 Energieszenarien (eigene Darstellung).

