

U. Grünewald, O. Bens, H. Fischer, R.F. Hüttl,  
K. Kaiser, A. Knierim (Hrsg.)

# Wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen an den Landschafts- und Klimawandel



Schweizerbart

U. Grünewald, O. Bens, H. Fischer, R.F. Hüttl, K. Kaiser,  
A. Knierim (Hrsg.)

# **Wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen an den Landschafts- und Klimawandel**

Mit 103 Abbildungen und 29 Tabellen



Schweizerbart Science Publishers ·  
Stuttgart · 2012

Grünewald et al. (Hrsg.)

Wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen an den Landschafts- und Klimawandel

Titelbild: Das entstehende Lausitzer Seenland aus der Luft, 2008 (Foto mit freundlicher Genehmigung der Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH)

Umschlagrückseite von links nach rechts

Niedrigwasser in Dresden im Sommer 2003 im Bereich der Augustusbrücke nach dem Extremhochwasser 2002 (Foto: Simon, 2003)

„In-Lake“-Behandlung des Lausitzer Tageausees „Geierswalde“ zur Minderung der bergbaubedingten Versauerung (Foto: Gassert, BTU Cottbus, 2004)

Flutung des Ilse-Sees, 2007 (Foto mit freundlicher Genehmigung der Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH)

**ISBN ebook (pdf) 978-3-510-65473-4**

**ISBN 978-3-510-65274-7**

Information on this title: [www.schweizerbart.de/9783510652747](http://www.schweizerbart.de/9783510652747)

© 2012 E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, Germany

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar.

Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Verlag: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Johannesstr. 3A,

70176 Stuttgart, Germany

[mail@schweizerbart.de](mailto:mail@schweizerbart.de)

[www.schweizerbart.de](http://www.schweizerbart.de)

© Gedruckt auf alterungsbeständigem Papier nach ISO 9706-1994

Satz: Satzpunkt Ursula Ewert GmbH, Bayreuth

Printed in Germany by Gulde-Druck GmbH & Co. KG, Tübingen

# Wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen an den Landschafts- und Klimawandel – eine Einführung

## Vorwort

Durch den Wandel von Landschaften infolge einer veränderten Landnutzung, der Errichtung von Siedlungen, Verkehrsinfrastrukturen und Industrieanlagen sowie infolge der Gewinnung von Rohstoffen werden hydrologische Prozesse ebenso beeinflusst wie durch die Veränderung meteorologischer bzw. klimatischer Größen. Der Landschafts- und Klimawandel wirkt sich somit auf die regionalen und überregionalen Wasser- und Stoffflüsse aus; z. B. auf das Abflussregime, die Wasserverfügbarkeit und den Wärmehaushalt der Gewässer.

Wesentliche Bereiche der Wasserwirtschaft (z. B. Wasserversorgung, Hochwasser- und Niedrigwasservorsorge, Erhaltung der ökologischen Funktion der Gewässer), aber auch verschiedene Nutzungen an den Gewässern (z. B. Wasserkraft, Wasserstraßen, Kühlwasser, Brauchwasser, Bewässerung, Trinkwasser) sind davon betroffen.

Zu dem Thema „wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen“ fand vom 22. bis 24. Juni 2011 ein Fachsymposium in Großräschen mitten in der im Umbruch befindlichen Bergbaufolgelandschaft der Niederlausitz statt. Gemeinsame Veranstalter waren:

- acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften – Projektgruppe „Georessource Wasser – Herausforderung Globaler Wandel“
- Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften (BBAW) – Projektgruppe „Globaler Wandel – Regionale Entwicklung“
- Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Brandenburg Berlin (INKA BB) innerhalb des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsnetzwerks „Klimawandel in den Regionen zukunftsfähig gestalten“ (KLIMZUG).

Ziel des Fachsymposiums war es, die spezifischen Herausforderungen, Chancen und Risiken wasserbezogener Anpassungsmaßnahmen sowohl aus unterschiedlichen Wissenschaftsbereichen (z. B. Natur-, Ingenieur-, Technik- und Sozialwissenschaften), als auch aus unterschiedlichen deutschen Regionen (z. B.

Bayern, Nordostdeutschland, Lausitz) und Flusseinzugsgebieten (z. B. Elbe, Rhein) auszuloten. Daraus sollten Schlussfolgerungen für mögliche und erforderliche Anpassungsoptionen sowohl im Bereich von Wissenschaft und Wirtschaft als auch im Bereich von Politik und Verwaltung abgeleitet werden. An der Veranstaltung nahmen etwa 100 Vertreter aus verschiedenen Institutionen und Regionen vor allem aus Deutschland teil. In mehr als zwanzig Vorträgen und etwa dreißig Posterbeiträgen wurde die Thematik aus der Sicht unterschiedlicher Fachbereiche beleuchtet. Dabei kristallisierte sich neben vielfältigen problem- und regionenbezogenen Herausforderungen auch eine Vielzahl aktueller und zukünftiger wasserbezogener Anpassungsmöglichkeiten heraus.

Wir hoffen, dass mit dem Symposium und der Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse in dem vorliegenden Band der Versuch einer aktuellen Standortbestimmung zu den wasserbezogenen Anpassungsmöglichkeiten an den existierenden Landschafts- und Klimawandel in Deutschland gelungen ist und Perspektiven für die Auflösung der komplexen und in einigen Bereichen scheinbar konträren Sachverhalte aufgezeigt werden.

Unser besonderer Dank gilt den Autoren für ihr Engagement und die wertvollen Beiträge im Rahmen des Symposiums und dieses Bandes. Außerdem danken wir den Kolleginnen und Kollegen, die bei der Ausrichtung des Symposiums und der Buchproduktion mitgewirkt haben.

Wir hoffen und wünschen, dass dieser Band zur weiterhin notwendigen Netzwerkbildung und zur Verständigung über Fach-, Ressort- und räumliche Grenzen hinweg beiträgt.

Mögen die Beiträge eine gute Aufnahme bei dem weiten Personenkreis finden, der an der anspruchsvollen, vielfältigen und reizvollen Aufgabe der wasserbezogenen Anpassung an den Landschafts- und Klimawandel mitwirkt.

Uwe Grünewald, Oliver Bens, Holger Fischer, Reinhard F. Hüttl, Knut Kaiser, Andrea Knierim

# Water-related adaptation measures to landscape and climate change

## Foreword

Landscape change related to anthropogenic factors including reformed land usage, housing construction, the development of transport infrastructure and industrial facilities, and the extraction of raw materials, has an equally significant impact on hydrological processes as do changes in meteorological and climatic parameters. Landscape change and climate change affect not only regional and interregional water and material flows, but also influence aspects such as the discharge regime, water availability and the thermal load of water bodies.

Key areas of water management (e.g. water supply, flood and low water protection, ecological function of water bodies) as well as the different application of water bodies (e.g. hydropower, waterways, cooling water, utility water, irrigation, drinking water) are affected.

From 22 to 24 June 2011, a symposium on the topic of “water-related adaptation measures” was held in Großräschen, at the heart of the post-mining landscape of Lower Lusatia, which is undergoing major transition. The symposium was jointly organised by:

- German Academy of Science and Engineering (acatech) – project group “Geo-resource Water – The Challenge of Global Change”
- Berlin-Brandenburg Academy of Sciences and Humanities (BBAW) – project group “Global Change – Regional Development”
- Innovation Network for Climate Change Adaptation Brandenburg Berlin (INKA BB) within the research network “Managing Climate Change in the Regions for the Future” (KLIMZUG), funded by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF).

The aim of the symposium was to identify the specific challenges, opportunities and risks associated with water-related adaptation measures from different disciplines (e.g. natural sciences,

engineering, technological sciences and social sciences) and from different regions of Germany (e.g. Bavaria, Northeast Germany, Lusatia) and river basins (e.g. Elbe, Rhine). The intention was to then draw conclusions from the findings for potential and essential adaptation options not only in the domain of science and business, but also in the realm of politics and administration. The symposium was attended by approx. 100 representatives from many different institutions and regions, primarily in Germany. The topic was explored from very different specialist fields in more than twenty lectures and thirty poster contributions. This led to the emergence of a multitude of current and future water-related adaptation options in addition to a wide range of problem- and region-related challenges.

We trust that the symposium and the summary of the key results in the present proceedings have led to a successful attempt at assessing the current situation concerning water-related adaptation options with respect to the existent landscape and climate change in Germany. We also hope that prospects for resolving complex issues that appear to be contrary in some areas have been highlighted. We would particularly like to thank the authors for their dedication and for the valuable contributions they made to the symposium and these proceedings. We are also grateful to those colleagues who were involved in preparing this publication.

We hope and wish that these proceedings will contribute to the continually important aspects of networking and understanding beyond subject and department boundaries.

May the contributions enjoy a warm reception by those involved in the demanding, diverse and exciting task of water-related adaptation to landscape and climate change.

Uwe Grünewald, Oliver Bens, Holger Fischer,  
Reinhard F. Hüttl, Knut Kaiser, Andrea Knierim

# Inhalt

<i>Uwe Grünewald, Oliver Bens, Holger Fischer, Reinhard F. Hüttl, Knut Kaiser, Andrea Knierim</i> Vorwort .....	III
--	-----

## **Kapitel 1 Einführung**

<i>Uwe Grünewald</i> Wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen an den Landschafts- und Klimawandel in Deutschland – eine Einführung. ....	2
---	---

## **Kapitel 2 Landschaftswandel, globaler Wandel und regionale Anpassung: Perspektiven**

<i>Hans von Storch</i> Globaler Wandel, Klimawandel und regionale Anpassung. ....	14
--	----

<i>Gunnar Lischeid</i> Globaler Wandel und Adaptation: Effekte, Wirkungen und Nebenwirkungen auf den Landschaftswasser- und Stoffhaushalt .....	28
--	----

<i>Klement Tockner, Jörn Gessner, Martin Pusch, Christian Wolter</i> Domestizierte Ökosysteme und neuartige Lebensgemeinschaften: Herausforderungen für das Gewässermanagement. ....	33
---	----

## **Kapitel 3 Landschaftswandel und wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen am Beispiel der Region Lausitz**

<i>Uwe Grünewald</i> Landschaftswandel in der Lausitz: Bergbau(folgen) und Wasser – gestern, heute und morgen .....	44
--	----

<i>Rolf Kuhn</i> Landschaftswandel in der Lausitz: IBA Fürst-Pückler Land 2000–2010. ....	54
--	----

<i>Andrea Schapp, Jörg Walther, Petra Fleischhammel, Kai Mazur, Detlef Biemelt</i> Ein Ansatz zur Berücksichtigung der Auswirkungen von Klimawandel auf die Bewirtschaftung von Bergbaufolgeseen .....	62
---	----

<i>Kathleen Lünich</i> KliWES – Abschätzung der für Sachsen prognostizierten Klimaänderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten sächsischer Gewässer, Wasserhaushalt – Methodik und erste Ergebnisse .....	73
---	----

<i>Anne Gädeke, Ina Pohle, Herwig Hölzel, Hagen Koch, Uwe Grünewald</i> Analyse zum Einfluss des Landschafts- und Klimawandels auf den Wasserhaushalt in einem Teileinzugsgebiet der Spree .....	81
---	----

**Kapitel 4 Wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen in Regionen und Flusseinzugsgebieten**

*Anne Schulte-Wülwer-Leidig, Hans Moser, Enno Nilson*  
 Stand der Arbeiten zum Klimawandel in der Internationalen Kommission zum Schutz des Rheins (IKSR) ..... 96

*Frank Wechsung*  
 Veränderungen der Stadt-Land-Fluss Beziehung im Klimawandel – Ergebnisse einer Szenarienstudie für das deutsch-tschechische Flussgebiet der Elbe ..... 109

*Christian Korndörfer*  
 Anpassung der Landeshauptstadt Dresden an eine Zukunft mit verändertem Klima und knappen Ressourcen. .... 127

*Ottfried Dietrich, Ute Appel, Marcus Fahle, Gunnar Lischeid, Jörg Steidl*  
 Grundlagen für eine flexible und ressourcenschonende Wasserbewirtschaftung in Niederungsgebieten zur verbesserten Anpassung an den Klimawandel. .... 138

*Knut Kaiser, Jörn Friedrich, Silke Oldorff, Sonja Germer, Rüdiger Mauersberger, Marco Natkhin, Michael Hupfer, Anke Pingel, Jörg Schönfelder, Volker Spicher, Peter Stüve, Franziska Vedder, Oliver Bens, Olaf Mietz, Reinhard F. Hüttl*  
 Aktuelle hydrologische Veränderungen von Seen in Nordostdeutschland: Wasserspiegeltrends, ökologische Konsequenzen, Handlungsmöglichkeiten ..... 148

*Thomas Henschel*  
 Chancen und Risiken wasserbezogener Anpassungsmaßnahmen in Bayern ..... 171

**Kapitel 5 Ansätze und Instrumente zur gesellschaftlichen Steuerung wasserbezogener Anpassungsmaßnahmen**

*Ortwin Renn*  
 Öffentlichkeitsbeteiligung – Aktueller Forschungsstand und Folgerungen für die praktische Umsetzung ..... 184

*Ann Kathrin Buchs*  
 Die Rolle der Ökonomie bei der nachhaltigen Bewirtschaftung von Gewässern – Herausforderungen und Grenzen ..... 194

*Timothy Moss*  
 Regionale Wasserinfrastrukturen und globaler Wandel: Überlagerte Herausforderungen und entkoppelte Diskurse in der Region Berlin-Brandenburg ..... 202

*Andrea Knierim, Sonja Siart*  
 Ansätze und Instrumente zur gesellschaftlichen Steuerung von wasserbezogenen Anpassungsmaßnahmen ..... 210

*Heide Stephani-Pessel, Bettina Geiger, Uta Steinhardt*  
 Von kommunalen Anpassungsmaßnahmen zu einer regionalen Strategie eines adaptiven Wassermanagements. .... 220

*Heidi Kreibich, Florian Elmer, Andreas Gericke, Bruno Merz*  
 Veränderungen des Hochwasserrisikos und Konsequenzen für das Risikomanagement . . . . 228

*Monika von Haaren*

Der Kulturlandschaftsverband – neue Wege zur Anpassung der Kulturlandschaft an den Klimawandel .....	238
---	-----

## **Kapitel 6 Technische, wirtschaftliche und infrastrukturelle Gestaltung des Wandels**

*Rolf Gimbel, Stefan Panglisch*

Zukunftsperspektiven der Wasseraufbereitung unter den Bedingungen des globalen Wandels .....	250
---	-----

*Mike Ramelow, Steven Böttcher, Ralf Dannowski, Christoph Merz, Jörg Steidl,  
Björn Thomas*

Bausteine eines transdisziplinären Konzeptes zur Stabilisierung der Abflussverhältnisse am Fredersdorfer Mühlenfließ .....	258
---	-----

*Julius Jacob, Thorsten Rocksch, Uwe Schmidt*

Innovatives Bewässerungsmanagement für gärtnerische Kulturen – angepasste Tropfbewässerung beim Spargelanbau in der Region Berlin/Brandenburg .....	266
--	-----

*Petra Lasch, Felicitas Suckow, Martin Gutsch, Christopher Reyer*

Waldumbau in Brandenburg: Grundwasserneubildung unter Klimawandel .....	272
---	-----

*Jürgen Müller*

Auswirkungen von waldstrukturellen Veränderungen auf die hydroökologischen Bedingungen in den Beständen im Zuge des Waldumbaus .....	280
---	-----

*Jochen Stemplewski, Michael Becker, Ulrike Raasch*

Ein Wasserwirtschaftsverband im Bundesland Nordrhein-Westfalen passt sich dem Landnutzungs- und Klimawandel an .....	292
---	-----





# Kapitel 1

## Einführung



Das Lausitzer Seenland aus der Luft, ein Landschaft entsteht.  
(Foto mit freundlicher Genehmigung der Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-  
Verwaltungsgesellschaft mbH, 2009)



# Wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen an den Landschafts- und Klimawandel in Deutschland – eine Einführung

Uwe Grünewald

Brandenburgische Technische Universität Cottbus (BTU)

Uwe.Gruenewald@tu-cottbus.de

**Zusammenfassung:** Regional differenzierte wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen z. B. an den klimatischen, demographischen und wirtschaftlichen Wandel erfordern nicht nur einen Wandel in der Wasserbewirtschaftung, sondern auch einen Wandel in anderen Bereichen wie in der Landwirtschaft, der Raumplanung und der Energiewirtschaft. Letztlich gilt es, weg von der sektoralen Betrachtung hin zu integrativen Ansätzen zu gelangen. Integriertes Wasserressourcen-Management, die Europäische Wasserrahmenrichtlinie sowie die Hochwasserrisiko-Management-Richtlinie liefern dafür auch für das föderale Deutschland eine gute (gesetzliche) Basis, die es zu nutzen gilt. Als notwendig erweist es sich, Prioritäten zu setzen sowie kosteneffiziente Maßnahmen gemäß den differenzierten regionalen Bedingungen abzuleiten. Weiterhin sollte das Risikomanagement in seinen Stufen Risikoanalyse, Risikobewertung und Risikoumgang sowie die gesellschaftliche Kommunikation der Risiken verstärkt in die Prozesse der wasserbezogenen Anpassung an den Globalen Wandel in Deutschland einbezogen werden.

**Schlüsselwörter:** Anpassungsoptionen, Wasserdargebot, Wasserrahmenrichtlinie, Risikomanagement, Bürgerbeteiligung.

**Abstract:** Adapting water resources management to climatic, demographic, and economic change impacts requires change in water management practices, land use and technology development. The EU Water Framework Directive and the EU Flood Risk Management Directive call for an integrated and strategic planning approach. This provides the unique chance to include adaptation measures in integrated water resources management in the Federal German States, too. Successful adaptation strategies have to include priorities setting, risk management, participation, and economic instruments.

**Keywords:** adaptation options, water supply, water framework directive, risk management, public participation.

## 1 „Time to adapt“ – es ist Zeit, sich anzupassen

Eine Anpassung der sich ändernden, räumlich und zeitlich differenzierten Wasserdarstellungsbedingungen an die jeweiligen Wasserbedarfsbedingungen stellte bisher in vielen Ländern der Welt, aber auch in Europa und in einigen Regionen Deutschlands eine große Herausforderung dar.

Die Herausforderungen verschärfen sich deutlich, wenn großräumige und/oder tiefgreifende (globale, regionale oder lokale) Änderungen der Bedingungen, etwa durch einen abrupten Wandel der Land- und Wassernutzung oder/und des Klimas, zu berücksichtigen sind.

Ausführlich hat sich unter deutscher EU-Ratspräsidentschaft die Konferenz „Time to Adapt – Climate Change and the European Water Dimension; Vulnerability – Impacts –

Adaption“ vom 12. bis 14. Februar 2007 in Berlin (BMU 2007) mit den verschiedenen Anpassungsoptionen vor allem in den Bereichen Wasserwirtschaft, Landwirtschaft, Energie, Transport und Tourismus auseinandergesetzt. Stark vereinfacht lässt sich danach „mitigation“ mit dem „Politikbereich Energie“ und „adaptation“ mit dem „Politikbereich Wasser (und Boden)“ verknüpft darstellen (siehe auch von Storch 2009a).

Hervorzuheben ist darüber hinaus, dass „Anpassung an den Klimawandel“ vor allem als regionale und lokale Herausforderung besteht. Demzufolge sind diesbezüglich in Deutschland besonders auch die Bundesländer, die Regionen sowie die Kommunen gefordert.

Der projizierte Klimawandel beeinflusst das mittlere („potenzielle“ und „stabile“) Wasserdargebot mit großer Wahrscheinlichkeit ebenso wie die veränderte Ausprägung hydrologischer Extreme („Hoch- und Niedrigwasser“) sowie die Wasserbeschaffenheit in Raum und Zeit. Deshalb werden wasserbezogene Anpassungsstrategien insbesondere in Gebieten, die bereits heute durch Wasserverfügbarkeitskonflikte (nach Menge, Zeit, Beschaffenheit usw.) betroffen sind besonders wichtig.

Im *Allgemeinen* sind diese Strategien so flexibel anzulegen, dass gegebenenfalls weitere notwendige Anpassungsmaßnahmen auf diesen aufbauen können („flexible and no regret strategies“). Sie müssen aber auch die anderen Probleme des globalen Wandels (z. B. Welt-, EU-, Agrar-, Finanz- und Wirtschaftspolitik, internationale und nationale Energiepolitik, demographischer Wandel) berücksichtigen. Letztlich stellt der Klimawandel nur einen Teil des globalen Wandels dar. Insbesondere wegen der gegenwärtig nur mit großer Unsicherheit abschätzbaren Folgen dieses Wandels sollten die Anpassungsmaßnahmen darüber hinaus so gestaltet werden, dass „win-win-Situationen“ z. B. für unterschiedliche Sektoren, Bereiche oder Akteure erreicht werden können (z. B. BMU 2009).

Im *Speziellen* bedarf es zur Bewältigung der Unsicherheiten vielfältiger Anstrengungen sowohl im Bereich der Forschung und deren Praxisumsetzung als auch im technologischen, institutionellen, sozialen und politischen Bereich. Der Wissenschaft kommt

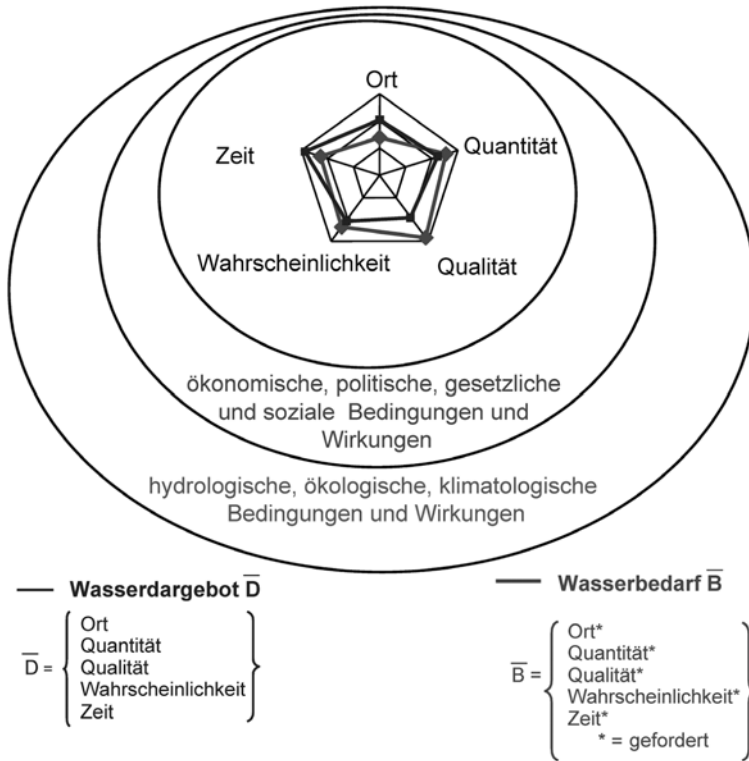
insofern eine besondere Rolle zu, dass sie durch die Bereitstellung von Wissen um die komplexen natürlichen und gesellschaftlichen Zusammenhänge, durch die Aufhellung der Randbedingungen sowie der „möglichen Risiken und Nebenwirkungen“ Aufklärungs- und Beratungsfunktionen zu übernehmen hat (siehe auch EEA (2007) und Beitrag von Storch in diesem Buch).

Zur Herausarbeitung, Bewertung und Bewältigung dieser regional außerordentlich differenzierten Herausforderungen wurden und werden im Bereich der Wasserbewirtschaftung vielfältige wissenschaftlich fundierte Verfahren und Methoden entwickelt (z. B. Loucks & van Beek 2005).

## 2 Wasserbewirtschaftung im Wandel

Die „Wasserwirtschaft“ strebt von jeher einen Ausgleich zwischen dem räumlich und zeitlich sowie bezüglich Menge und Beschaffenheit außerordentlich differenzierten natürlichen Wasserdargebot und den vielfältigen gesellschaftlichen Ansprüchen und Einflussnahmen an. Aufgabe der „Wasserbewirtschaftung“ ist es, Methoden und Verfahren bereitzustellen, welche ausweisen, wie Veränderungen in wasserwirtschaftlichen Systemen vorzunehmen sind, um mit den in diesen Systemen vorhandenen natürlichen Wasserressourcen den gesellschaftlich gerechtfertigten Wasserbedarf der Nutzer einschließlich der wasserabhängigen Ökosysteme zu befriedigen und den erforderlichen Schutz vor Schädigungen durch Wasser unter minimaler Inanspruchnahme gesellschaftlicher Mittel zu gewährleisten (siehe z. B. Grünewald 2001).

Abbildung 1 vermittelt einen Eindruck von der Vielfalt der bei der Wasserbewirtschaftung in einem Einzugsgebiet zu bewältigenden Herausforderungen. Letztlich geht es darum, solche Operationen (OP) auf Wasserdargebot (D) und -bedarf (B) auszuführen, dass eine möglichst optimale Übereinstimmung dieser beiden in ihren Elementen Wasserquantität und -qualität in Raum (Ort) und Zeit mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zu realisieren ist. Dies hat unter sich ständig wechselnden natürlichen (hydrologischen, ökologischen, klimatologischen, ...) und sozial-ökonomischen (ökono-



**Abbildung 1.** Modellhafte Darstellung der Hauptprobleme der integrierten Wasserressourcen-Bewirtschaftung in einem Einzugsgebiet unter sich verändernden Rahmen- und Randbedingungen (aus: Grünewald 2001).

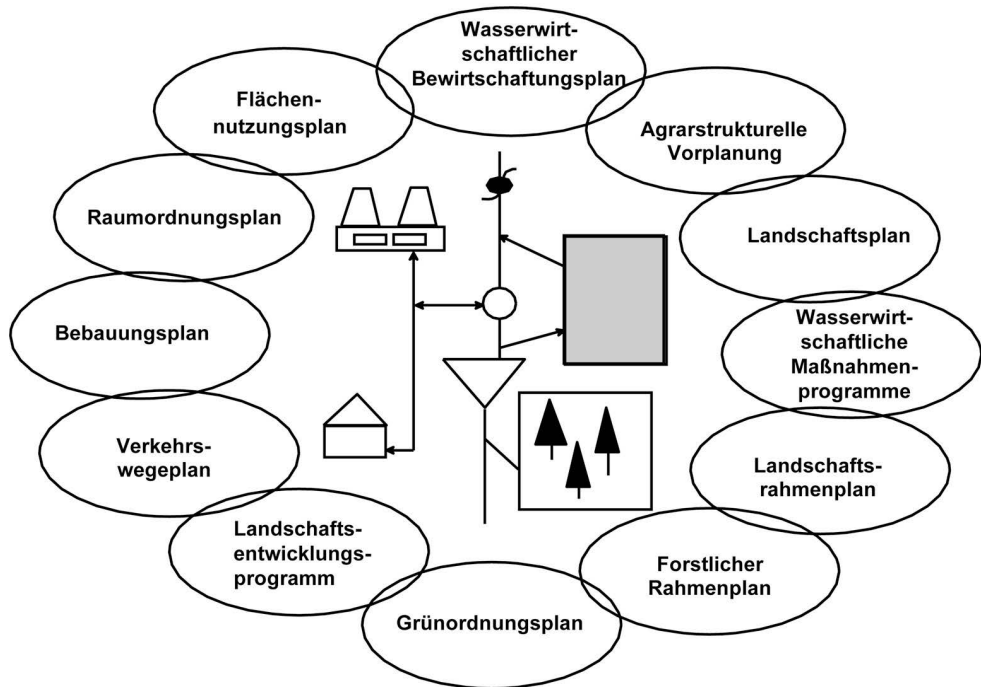
mischen, politischen, sozialen, ...) Bedingungen und Wirkungsgefügen zu erfolgen. Was zunächst (theoretisch) als klassische Aufgabenstellung der mathematischen Optimierung (z. B. „Summe der Kosten zum Minimum“) verstanden werden kann, erweist sich (praktisch) als kaum direkt lösbares (Optimierungs-) Problem, so dass die modernen Verfahren der Wasserbewirtschaftung in Flusseinzugsgebieten vor allem auf Szenarioanalysen und Variantenrechnungen basieren.

Voraussetzung für einen nachhaltigen Umgang mit den Wasserressourcen, die sich aus den Naturpotenzialen und dem ober- und unterirdischen Wasserangebot einer Landschaft ergeben, ist demzufolge ein ausgewogenes Verhältnis von Wasserangebot und Wasserbedarf in den Flusseinzugsgebieten (Grünewald 2003). Ausgewogenheit bedeutet dabei keineswegs eine vollständige Befriedigung des Bedarfs. In

vielen Regionen der Welt übersteigt der Bedarf schon heute das vorhandene Dargebot, so dass Vorrangregelungen, Prioritätensetzungen und Mehrfachnutzung nötig sind. Allerdings darf sich die Ausgewogenheit nicht nur auf das potenzielle Wasserangebot beziehen.

Das potenzielle Wasserangebot innerhalb eines Raumausschnittes wird definiert als Differenz des langjährigen Mittelwertes von Niederschlag und Verdunstung, während das stabile Wasserangebot sich als Differenz zwischen dem potenziellen Wasserangebot und den schnell abfließenden (kaum nutzbaren) Hochwassermengen darstellt. Eine Umverteilung des Wassers wird technisch vor allem durch Speicherbau und Speicherbewirtschaftung über die Erschließung und Nutzung des regulierten Wasserangebotes möglich.

Die sich oft über Jahrzehnte erstreckenden Vorbereitungen und Vorarbeiten bei Wasser-



**Abbildung 2.** Wasserwirtschaftliches System im Umfeld unterschiedlicher raumwirksamer Planungen.

bewirtschaftungsprojekten, wie der Bau von Talsperren- oder Wasserüberleitungssystemen, erfordern oftmals langwierige und schwierige technisch-technologische aber auch soziale, gesellschaftliche und politische Vorbereitungen und Abstimmungen.

International hat sich insbesondere im Umsetzungsprozess der „Agenda 21“ und der dort formulierten Nachhaltigkeitsansätze vor allem unter der Ägide der „Global Water Partnership“ (GWP) im Jahre 2002 das Konzept des „Integrated Water Resource Management – IWRM“ herausgebildet (z. B. Grambow 2008). Das „Technical Advisory Committee“ (TAC 2000) der internationalen Initiative „Global Water Partnership“ beschreibt „IWRM“ als einen „Prozess, der solch eine Entwicklung der Wasser- und Landressourcen sowie der damit verknüpften Naturressourcen ermöglicht, dass sowohl der ökonomische Nutzen als auch die soziale Wohlfahrt für die Gesellschaft ein Maximum erreichen, ohne die (nachhaltige) Lebensfähigkeit der betroffenen Ökosysteme zu beeinträchtigen“ (TAC 2000: 22).

Grambow (2008) schlussfolgert daraus treffend: „Eine funktionierende Raum- und Bodenordnung sind unabdingbare Teile eines integrierten Ansatzes. Die Landnutzungsplanung ist damit Teil des IWRM“ (ebenda: 190) und „Wasserwirtschaft denkt in der Fläche und im Rahmen von Flusseinzugsgebieten“ (ebenda: 184).

Letztlich gilt es gemäß Abbildung 1, Wasserdargebot und -bedarf durch „dargebots-“ und/oder „bedarfsorientierte“ Einflussnahmen in ihren Elementen Quantität, Qualität, Ort, Zeit und Wahrscheinlichkeit unter „minimalen Kosten“ oder „maximaler Nachhaltigkeit“ in „vertretbare Übereinstimmung“ zu bringen.

Dazu leitet sich die Forderung ab, dass die Instrumente der ineinandergreifenden wasserwirtschaftlichen Einflussnahme nicht isoliert angewendet werden sollen. Letztlich waren und sind sie (regional und differenziert) wesentliche Elemente der Planungs- und Strukturpolitik der jeweiligen Bundesländer. Demzufolge besteht die Herausforderung, sie sowohl als Bestandteil der Landesplanung und

Raumordnung als auch im Zusammenhang mit den vielfältigen anderen Fachplanungen und deren ständiger Weiterentwicklung zu sehen (Abbildung 2). Diese Betrachtungsweise trägt insbesondere den modernen IWRM-Erfordernissen – z. B. weg von der rein sektoralen hin zu einer integrativen Betrachtung, Sicherung der Ökosystem-Funktionen, Beteiligung der Öffentlichkeit an Entscheidungsprozessen – Rechnung.

Das Konzept des IWRM tangierend wurde Ende 2000 die EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL) erlassen (EU 2000). Ziele der Richtlinie sind die Erhaltung und die Verbesserung der aquatischen Umwelt in der Gemeinschaft („Erwägungsgrund 19“).

Speziell soll für die natürlichen Oberflächengewässer bis zum Jahr 2015 ein „guter (chemischer und ökologischer) Zustand“, für das Grundwasser ein „guter chemischer und mengenmäßiger Zustand“ erreicht werden. Für die „künstlichen oder erheblich beeinträchtigten Gewässer“ gelten mit dem „guten ökologischen Potenzial“ abgesenkte Umweltziele (Art. 4 EU-WRRL). Der gute Zustand der Gewässer bezieht sich somit auf die Wasserqualität, die Gewässermorphologie wie auch auf die Wassermengenbewirtschaftung. Er wird im Anhang V der EU-WRRL über biologische, hydromorphologische, chemische und physikalisch-chemische Qualitätskomponenten operationalisiert. Damit wird auch die Gewässerstruktur direkt zum Qualitätsmerkmal. Die Gewässerstruktur selber beschreibt das äußere Erscheinungsbild eines Fließgewässers mit den Teilbereichen Wasser, Gewässersohle, Ufer und Aue. Die Gewässerstrukturgüte bewertet die ökologische Qualität der Gewässerstrukturen und zeigt an, inwieweit ein Gewässer u. U. durch menschlichen Einfluss von seinem natürlichen Zustand abweicht.

Mit den erheblichen Schadwirkungen von Hochwassern in den letzten Jahren unter anderem auch wieder in Deutschland und in Mitteleuropa hat sich die öffentliche und behördliche Aufmerksamkeit für Hochwasservorsorgemaßnahmen deutlich erhöht. Sie schlägt sich in der Richtlinie 2007/60/EG über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken („EU-Hochwasserrisikomanagementrichtlinie“

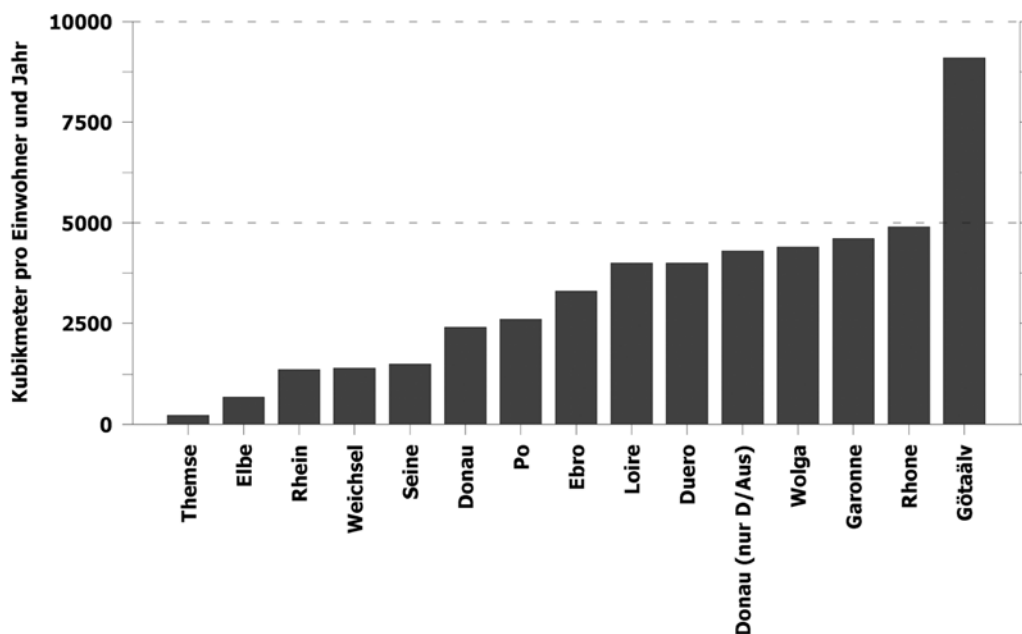
(EU-HWRM-RL)) nieder. Die Richtlinie ist Teil des europäischen Aktionsprogramms zum Hochwasserrisikomanagement: „Ziel dieser Richtlinie ist es, einen Rahmen für die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken zur Verringerung der hochwasserbedingten nachteiligen Folgen auf die menschliche Gesundheit, die Umwelt, das Kulturerbe und die wirtschaftliche Tätigkeit der Gemeinschaft zu schaffen“ (Artikel 1).

Auch die EU-HWRM-RL (EU 2007) fordert die Verknüpfung unterschiedlicher Politikbereiche und nennt wesentliche Ansatzpunkte für die Zusammenführung von Wasser- und Raumnutzung: „Bei der Erarbeitung politischer Maßnahmen für die Wasser- und Flächennutzung sollten die Mitgliedsstaaten und die Gemeinschaft die potenziellen Auswirkungen berücksichtigen, die solche Maßnahmen für das Hochwasserrisiko und das Hochwasserrisikomanagement haben können“ („Erwägungsgrund 9“).

Die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) fordert im Umweltausblick (OECD 2008) u. a.: „Die Wasserpolitik muss um das Risikomanagement erweitert werden, um den in der Tendenz zunehmenden Hochwasser-/ Dürreschäden Rechnung zu tragen. Für den Hochwasserschutz könnte eine vorausschauende Flächennutzungs politik für komplette Einzugsgebiete sowie die Durchsetzung gezielter Flächennutzungspläne hilfreich sein, durch die mehr ‚Platz für Flüsse‘ geschaffen wird. Es bleibt aber noch viel zu tun. Maßnahmen wie die Einrichtung von ‚grünen Korridoren‘ entlang von Flüssen und Bächen, die Wiederherstellung von Retentionsflächen bzw. eine bessere Überwachung der Abforstung und Erhaltung von Feuchtgebieten sind oftmals nicht vorgeschrieben, und die Vergabe von Baugenehmigungen liegt weiterhin im Ermessen der jeweiligen Kommunen“ (ebenda: 228f).

### 3 Wasserbezogene Anpassungsoptionen in Regionen und Flusseinzugsgebieten Deutschlands

Offensichtlich gibt es in Europa und Deutschland sehr gute gesetzliche Voraussetzungen, den sich abzeichnenden Herausforderungen



**Abbildung 3.** Mittlere jährliche Wasserverfügbarkeit je Einwohner auf der Basis des potentiellen Wasserdargebotes in ausgewählten europäischen Flusseinzugsgebieten.

bezüglich Landnutzungs- und Klimaänderungen bzw. des globalen Wandels durch Anpassungsmaßnahmen erfolgreich zu begegnen (siehe auch BMU 2009). Ohne Zweifel existieren auch national eine Vielzahl und Vielfalt von wissenschaftlich-technischen Projekten, die dazu beigetragen haben, für spezielle Regionen wie Süddeutschland (KLIWA: <http://www.kliwa.de/>) und Flusseinzugsgebiete wie den Rhein (IKSR: <http://www.iksr.org/>, siehe Beitrag Schulte-Wülwer-Leidig et al. in diesem Buch), die Donau (GLOWA-Donau: <http://www.glowa.org/de/danube/danube.php>) und die Elbe (GLOWA-Elbe: <http://www.glowa-elbe.de/>, siehe Beitrag Wechsung in diesem Buch) mit unterschiedlichem Konfliktpotenzial, z. B. schon bezüglich der Wasserverfügbarkeit (siehe Abbildung 3) differenzierte Ansätze und Anpassungsoptionen für eine nachhaltige Wasserbewirtschaftung zu entwickeln. Generell kann Deutschland mit einer mittleren Abflussbildung („potenzielles (Eigen-)Wasserdargebot“) von über 300 mm als „wasserreiches Land“ bezeichnet werden, in dem gute Möglichkeiten zur Anpassung an den Klimawandel

bestehen dürften. Bemerkenswert sind die großen regionalen Unterschiede.

Auf Bundesländerebene stellen Brandenburg mit 88 mm/a und Sachsen-Anhalt mit 93 mm/a mittlerer Abflusshöhe die beiden wasserärmsten Bundesländer dar. Baden-Württemberg (mit 472 mm/a) und Bayern (mit 382 mm/a) liegen diesbezüglich weit im Vordergrund (HAD 2003).

Ausgehend von „adaption is not a secondary issue“ (von Storch 2009a) war es das Ziel des Fachsymposiums in Großräschen, sich am Ufer eines sich gerade bildenden Bergbaufolgesees (mit einem Volumen von ca. 153 Mio. m<sup>3</sup>, einer Wasserfläche von ca. 7,7 km<sup>2</sup> und einer maximalen Wassertiefe von 55 m im Endzustand) in der in einem tiefgreifenden Wandel befindlichen Bergbaufolgelandschaft der Lausitz über die spezifischen Herausforderungen, Chancen und Risiken wasserbezogener Anpassungsmaßnahmen aus der Sicht verschiedener natur-, ingenieur- und technik- sowie sozialwissenschaftlicher u. a. Bereiche insbesondere aus der in von Storch (2009b) zitierten Sichtweise des „ehrlchen Maklers“ nach Pielke (2007) offen auszutauschen.



Getragen wurde diese Veranstaltung durch drei Institutionen:

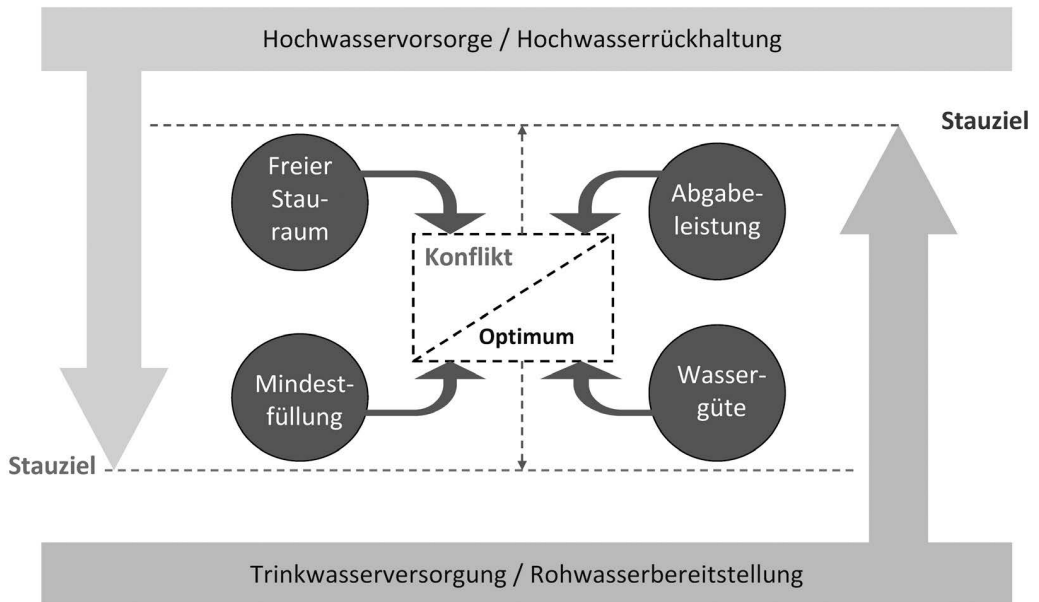
Ziel der Projektgruppe „*Geoessource Wasser – Herausforderung Globaler Wandel*“ (Laufzeit 2009–2011) der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech) ist es, Beiträge für die nachhaltige Bewirtschaftung von Wasserressourcen unter den Bedingungen des Globalen Wandels zu erstellen (Hüttl & Bens 2012). Ihre Arbeit steht in engem Zusammenhang zu jener der Interdisziplinären Arbeitsgruppe (IAG) „*Globaler Wandel – Regionale Entwicklung*“ (Laufzeit 2008–2011) der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften (BBAW). Ihr regionaler Schwerpunkt ist die Region Berlin-Brandenburg, wobei die Ressource Wasser im Mittelpunkt ihrer Betrachtung steht (Hüttl et al. 2011).

Das „*Innovationsnetzwerk Klimaanpassung Brandenburg Berlin*“ (INKA BB) (Laufzeit 2009–2014) ist wie die Forschungsnetzwerke „REGKLAM“ („Regionales Klimaanpassungsprogramm Modellregion Dresden“ – siehe Beitrag Korndörfer in diesem Buch) und „dynaklim“ (Dynamische Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels in der Emscher-Lippe-Region (Ruhrgebiet) – siehe Beitrag von Stemplewski, Becker & Raasch in diesem Buch) eines von sieben Innovationsnetzwerken zur Klimaanpassung, welches das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Maßnahme „Klimawandel in Regionen zukunftsfähig gestalten“ (KLIMZUG) fördert. Die Initiatoren sehen im Aufbau regionaler Netze zwischen Wissenschaft, Unternehmen, Verwaltung und Zivilgesellschaft den Schlüssel zu einer erfolgreichen Anpassung an das sich verändernde Klima. In INKA BB, das vom Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) koordiniert wird, geht es unter anderem um die Entwicklung innovativer Ansätze zur Anpassung an den Klimawandel in den Sektoren „Landnutzung“ (12 Teilprojekte) und „Wassermanagement“ (7 Teilprojekte). In letzterem sind u. a. die Brandenburgische Technische Universität (BTU) Cottbus als wissenschaftliche Einrichtung, die DHI-WASY GmbH Berlin als Unternehmen, die Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH (LMBV) als

Verwaltung sowie regionale Wasser- und Bodenverbände und wasserbezogene lokale Bürgerinitiativen als Vertreter der Zivilgesellschaft einbezogen.

Ohne Zweifel existieren im Bereich der Wasserbewirtschaftung in Deutschland vielfältige Beispiele für gelungene wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen (siehe z. B. Koch & Grünewald 2011). Beispielsweise kommt in vielen deutschen Bundesländern wasserwirtschaftlichen Stauanlagen und deren multifunktionaler Nutzung eine wesentliche Rolle zu. Ihre Bewirtschaftung unterlag seit jeher entsprechend den sich ändernden natürlichen und anthropogenen Bedingungen einem stetigen Anpassungsprozess (z. B. Socher et al. 2008). Insbesondere betrifft das den Interessenkonflikt zwischen der (Trink-)Wasserbereitstellung und der Hochwasservorsorge in ihren Gewässereinzugsgebieten. Während beispielsweise für die Sicherheit der Trinkwasserbereitstellung aus Talsperren hohe Füllungsstände gute quantitative und qualitative Voraussetzungen ergeben, liefern große Hochwasserschutzräume entsprechend große Wahrscheinlichkeiten für die Reduzierung der im Talsperreneinzugsgebiet entstehenden Hochwasserwellen (siehe Abbildung 4). Dies erforderte (z. B. Grünewald 1977) und erfordert (z. B. Paul et al. 2011) stetige Weiterentwicklungen wissenschaftlich fundierter Verfahren der Wasserbewirtschaftung.

Große wasserwirtschaftliche und gesellschaftliche Herausforderungen sind mit der Umgestaltung der durch jahrzehntelangen weit- und tiefgreifenden Abbau von Braunkohle in Tagebauen beispielsweise in der Lausitz für die Bundesländer Brandenburg und Berlin sowie den Freistaat Sachsen im Osten Deutschlands verknüpft (vgl. Beitrag Grünewald in diesem Buch). Die abrupte und großräumige Stilllegung der meisten Lausitzer Tagebaue nach der deutschen Wiedervereinigung verschärfte die Notwendigkeit wasserbezogener Anpassungsmaßnahmen erheblich. Unklar ist insbesondere, wie sich der globale Wandel, insbesondere der Klimawandel auf die noch über Jahrzehnte erforderliche wasserwirtschaftliche Nachsorge in den jetzt schon wasserarmen Regionen Nordostsachsens und Südbrandenburgs auswirken wird. Gegebenenfalls kann hier die



**Abbildung 4.** Interessenkonflikt zwischen Trinkwasserversorgung und Hochwasservorsorge in wasserwirtschaftlichen Planungsräumen (nach Socher et al. 2008).

verstärkte Nutzung überregionaler wasserwirtschaftlicher Überleitungsobjekte eine Ausgleichsfunktion schaffen (Koch et al. 2009), wie sie für das Einzugsgebiet der Elbe nicht unüblich sind. So erfolgt z. B. eine Überleitung von ca. 126 Mio. m<sup>3</sup>/Jahr aus dem Elbe-Havel-Kanal in die Havel und von ca. 70 Mill. m<sup>3</sup> Rohwasser pro Jahr aus der Bode bzw. der Rappbode zur Trinkwasserbereitstellung für den Mitteldeutschen Raum u. a. für die Städte Bernburg/Saale, Halle/Saale und Leipzig (IKSE 2009). Auch die Großstädte Dresden und Chemnitz erhalten Trinkwasser überwiegend aus Fernwasserversorgungssystemen (IKSE 2005). Mit dem Kanalsystem der Bundeswasserstraßen zwischen Rhein, Weser, Elbe und Oder bieten sich darüber hinaus hervorragende Voraussetzungen einer zukünftigen ämterübergreifenden überregionalen Wasserbewirtschaftung nach einheitlichen Grundsätzen und Regelungen (Meyer & Ebner von Eschenbach 2011).

Der wasserreiche Freistaat Bayern hat offensichtlich im Wassersektor eine regelrechte Strategie bezüglich der Anpassung an den Klimawandel entwickelt (siehe Beitrag von Henschel in diesem Buch). Tabelle 1 erläutert diese.

Auf der Basis des regionalen süddeutschen Forschungsverbundes KLIWA (<http://www.kliwa.de>) wurden und werden Maßnahmen („mitigation“ und „adaptation“) für die verschiedenen Bereiche der Wasserwirtschaft abgeleitet und mit wachsendem Erkenntnisfortschritt präzisiert (Grambow 2009). Der Freistaat Bayern knüpft damit an erfolgreiche wasserbezogene Anpassungsoptionen der Vergangenheit an. Obwohl „im Mittel wasserreich“, ist er doch bezüglich Wasserdargebot durch starke regionale Unterschiede geprägt. Der Alpenraum und das gesamte Einzugsgebiet der Oberen Donau (vergleiche Abbildung 3) verfügen über reichlich Wasser. Die nordbayerischen Flusseinzugsgebiete von Rednitz, Regnitz und Main leiden vor allem in Trockenperioden unter Wassermangel. Infolge hoher Bevölkerungs- und Industriedichte in den fränkischen Talräumen wird das dortige natürliche Wasserdargebot viel stärker beansprucht als in den Gewässereinzugsgebieten Südbayerns. Endes des Jahres 2000 wurde ein überregionales wasserwirtschaftliches Überleitungs- und Ausgleichsprojekt mit ca. 150 Mio. m<sup>3</sup>/Jahr endgültig fertiggestellt, das nicht nur zu einer An-

**Tabelle 1.** Matrix der Einflussgrößen aus der Emissionsreduzierung (Mitigation) und der Anpassung (Adaptation) im Wassersektor in Bayern (übernommen aus Grambow 2009, S. 241).

Grundlagen und Monitoring (Projekt KLIWA)		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Ermitteln der Auswirkungen des Klimawandels</li> <li>Ableiten von grundsätzlichen Konsequenzen</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>Identifizieren von Forschungsschwerpunkten</li> <li>Monitoring der Wasserhaushaltsgrößen</li> </ul>
Vorsorge (Reduktion)	Anpassung	
<b>Beiträge des Wasserbereichs</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Energie aus Geothermie</li> <li>Energieeffizienz in der Abwasserentsorgung</li> <li>Energie aus Abwasser</li> <li>Optimierte Wasserkraftnutzung</li> <li>CO<sub>2</sub>-Senken Auwald und Moore</li> </ul>	<b>Hochwasser</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Klimaänderungsfaktor</li> <li>Reduzieren von Restrisiken</li> <li>Sichern früherer Überschwemmungsgebiete als Notpolder</li> <li>Ausbau des Hochwasserrückhalts (Speicher, Retention)</li> <li>Optimieren der Hochwasservorhersage</li> <li>Hochwassergefahrenkarten</li> <li>Integrale Wildbachschutzkonzepte</li> </ul>	<b>Niedrigwasser und Dürre</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Stärken der Wasserversorgung (Verbundsysteme, Gewinnungsalternativen, Sicherung von GW-Reserven)</li> <li>Wärmelast- und Niedrigwassermanagementpläne</li> <li>Niedrigwasseraufhöhung</li> <li>Anforderungen an die Abwasserreinigung</li> <li>Gewässerschonende Landwirtschaft</li> <li>Schifffahrt</li> </ul>
<b>Risiken für das Wasser</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Erdwärmenutzung (Leckagen)</li> <li>Bewässerung in der Landwirtschaft</li> <li>Energiepflanzen, Dünge- und Pflanzenschutzmittel</li> <li>Dezentrale Biogasanlagen</li> <li>Durchgängigkeit</li> </ul>	<b>Übergreifende Maßnahmen</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>Sichern von Rückhalteräumen für Retention und Wasserausgleich</li> <li>Wasserrückhalt im ländlichen Raum (GW-Neubildung, HW-Schutz)</li> <li>Regenwasserbewirtschaftung (Entsiegelung, Versickerung)</li> <li>Anpassen der Infrastrukturen (z. B. Kanäle)</li> <li>Entwicklung neuer Technologie einschließlich Management für den Binnen- und Außenmarkt</li> <li>Öffentlichkeitsarbeit und Bewusstseinsbildung</li> </ul>	

hebung der Niedrigwasserführung in Rednitz, Regnitz und Main in Trockenperioden und zu einer Verbesserung der Wasserqualität führte, sondern auch zu einer Verbesserung des Natur- und Landschaftsschutzes, zu neuen Möglichkeiten für wassergebundene Freizeit und Erholung sowie zur Verringerung von Hochwasserschäden im mittleren Altmühltal beitrug (siehe Wasserwirtschaftsamt Ansbach (2010) sowie Beitrag Henschel in diesem Buch).

Bemerkenswerte Fortschritte im Bereich der deutschen Wasserwissenschaften wurden ohne Zweifel in den letzten Jahren bezüglich des Überganges vom klassischen Hochwasserschutz zum modernen Hochwasserrisikomanagement erreicht (siehe z. B. Merz et al. 2011). Hier liegen die Defizite zweifellos in der Überführung der Ergebnisse in die Praxis des

wasserwirtschaftlich-föderal (über-)regulierten Deutschlands (Grünewald 2011).

Generell lässt sich einschätzen, dass der Klimawandel als Motivation gesehen werden sollte, gut begründete Strategien des Risikomanagements stärker in der Wasserwirtschaft zu verwenden sowie Risikomanagementstrategien weiterzuentwickeln (z. B. für den Betrieb von Talsperren und Wasserversorgungssystemen sowie von Wasserüberleitungssystemen). Der Klimawandel ist als zusätzliche Quelle von Veränderung und Unsicherheit zu sehen. Ein Risikomanagement mit den Schritten Risikoanalyse („Was kann passieren?“), Risikobewertung („Was darf nicht passieren?“) und Risikoumgang („Wie kann mit dem Restrisiko umgegangen werden?“) hat bisher nur zögerlich in die Wasserwirtschaft Einzug genom-

men. Es ist aber vor dem Hintergrund dieser zusätzlichen Risikoquelle nötiger denn je, dies sehr breit angelegt zu tun.

Als (im Durchschnitt) wasserreiches Land sollte es für Deutschland vor allem auf Grund seines hohen wissenschaftlich-technischen und technisch-technologischen Niveaus, seiner Wirtschaftskraft und seiner guten (umwelt-)gesetzlichen Voraussetzungen möglich sein, entsprechende wasserbezogene Anpassungsstrategien im Sinne einer Daseinsvorsorge zu entwickeln. Insbesondere gilt dies für die Trinkwasserversorgung aber auch für den Erhalt oder die Wiederherstellung von Feuchtgebieten mit ihren vielfältigen wassermengenmäßigen Rückhalt- und Ausgleichwirkungen aber auch mit ihren wassergütemäßigen „Nierenfunktionen“ (Grüne Liga 2011). Voraussetzung dafür ist aber die fachliche Einsicht zur Notwendigkeit der Überwindung der nach wie vor in der Praxis dominierenden sektoralen Betrachtungsweise und der mangelnden öffentlichen Aufmerksamkeit. Insofern kommen einer stärkeren Bürgerbeteiligung (siehe Beitrag von Renn in diesem Buch) und einer Offenheit bezüglich entsprechender wasserinfrastruktureller regionaler und raumplanerischer Strategien (siehe Beiträge von Korndörfer und von Moss in diesem Buch) eine besondere Bedeutung zu. Nur so kann es gelingen, auch über Bundesländergrenzen und Grenzen der Bundesbehörden hinweg die politische Einsicht und den politischen Willen dafür zu wecken.

## Literatur

- BMU (2007): Time to Adapt – Climate Change and the European Water Dimension, Vulnerability – Impacts – Adaptation, 12–14 February 2007. Berlin, Presentations: <http://www.climate-water-adaptation-berlin2007.org/presentations.htm>
- BMU (2009): Dem Klimawandel begegnen – Die Deutsche Anpassungsstrategie. Berlin: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- EEA (2007): European Environment Agency: Climate change and water adaptation issues. EEA Technical Report Nr. 2/2007, Luxembourg, 110 S., URL: [http://www.eea.europa.eu/publications/technical\\_report\\_2007\\_2](http://www.eea.europa.eu/publications/technical_report_2007_2) (Zugriff am 23.09.2011).
- EU (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik (2000L0060-DE-16.12.2001). Brüssel.
- EU (2007): Richtlinie 2007/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. Amtsblatt der Europäischen Union L 288/27, Brüssel.
- Grambow, M. (2008): Wassermanagement. Integriertes Wasser-Ressourcenmanagement von der Theorie zur Umsetzung. Vieweg-Verlag, Wiesbaden, 291 S.
- Grambow, M. (2009): Integriertes Wasser-Ressourcenmanagement als Antwort auf drängende Wasserfragen – die Nachhaltigkeit als Dreh- und Angelpunkt einer globalen zukunftsfähigen Entwicklung. *uwf – UmweltWirtschaftsForum* 17 (3), 235–242.
- Grüne Liga (2011): Wetlands for Clear Water. Grüne Liga Netzwerk Ökologischer Bewegungen. Berlin, 21. Mai 2011, 4 S.
- Grünewald, U. (1977): Stochastische Simulation von Tagesmittelwerten des Durchflusses in Hochwasserzeiten. *Wasserwirtschaft – Wassertechnik* 27 (1), 28–31; 27 (2), 51–53.
- Grünewald, U. (2001): Wasserwirtschaftliche Planungen. In: Lecher, K., H.-P. Lühr, U. Zanke (Hrsg.): Taschenbuch der Wasserwirtschaft, 8. Auflage, Verlag Paul Parey, Berlin, S. 1123–1163.
- Grünewald, U. (2003): Leitthema 1: Wasser in der Landschaft, In: Wasserforschung im Spannungsfeld zwischen Gegenwartsbewältigung und Zukunftssicherung. Denkschrift der Senatskommission für Wasserforschung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), WILEY-VCH, Weinheim, S. 14–36.
- Grünewald, U. (2011): Vielzahl von Hochwasser im Jahr 2010 an Oder, Neiße, Spree und Schwarzer Elster – eine Herausforderung nicht nur für die wasserwirtschaftliche Praxis. In: Blöschl, G., Merz, R. (Hrsg.): Hydrologie und Wasserwirtschaft – von der Theorie zur Praxis. Beiträge zum Tag der Hydrologie am 24./25. März 2011 an der Technischen Universität Wien. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 30.11, S. 21–28.
- Hüttl, R., Emmermann, R., Germer, S., Naumann, M., Bens, O. (Hrsg.) (2011): Globaler Wandel

- und Regionale Entwicklung – Anpassungsstrategien in der Region Berlin-Brandenburg. Springer, Heidelberg, 198 S.
- Hüttl, R.F., Bens, O. (Hrsg.) (2012): Geoessource Wasser – Herausforderung globaler Globaler Wandel. Beiträge zu einer integrierten Wasserressourcenbewirtschaftung in Deutschland (acatech STUDIE), Springer, Heidelberg, 262 S.
- HAD (2003): Hydrologischer Atlas von Deutschland. CD-ROM. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Bonn.
- Heathcote, I.W. (1998): Integrated watershed management: principles and practice. Wiley, New York.
- IKSE (2005): Internationale Kommission zum Schutz der Elbe: Die Elbe und ihr Einzugsgebiet. IKSE, Magdeburg, 258 S.
- IKSE (2009): Internationale Kommission zum Schutz der Elbe: Internationale Flussgebietseinheit Elbe. Internationaler Bewirtschaftungsplan für die Flussgebietseinheit Elbe nach Artikel 13 der Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Teil A. IKSE, Magdeburg, 120 S.
- Koch, H., Grünewald, U., Kaltofen, M., Kaden, S. (2009): Anpassungsstrategien für die Wasserbewirtschaftung an den globalen Wandel im Einzugsgebiet der Spree. KW Korrespondenz Wasserwirtschaft, 2009 (2) Nr. 11, S. 600–605.
- Koch, H., Grünewald, U. (2011): Anpassungsoptionen der Wasserbewirtschaftung an den globalen Wandel in Deutschland. Deutsche Akademie der Technikwissenschaften. acatech Materialien Nr. 5, München, 34 S., URL: <http://www.acatech.de/de/publikationen/materialienbaende/uebersicht/detail/artikel/anpassungsoptionen-der-wasserbewirtschaftung-an-den-globalen-wandel-in-deutschland.html> (Zugriff am 05.10.2011).
- Loucks, D.P., E. van Beek (2005): Water Resources Systems Planning and Management. UNESCO, 2005, 680 S.
- Merz, B., Bittner, R., Grünewald, U., Piroth, K. (Hrsg.) (2011): Management von Hochwasserrisiken mit Beiträgen aus den RIMAX-Forschungsprojekten. Schweizerbart, Stuttgart, 248 S.
- Meyer, M., Ebner von Eschenbach, A.-D. (2011): Überregionale Wasserbewirtschaftung des Kanalsystems zwischen Rhein und Oder. Wasserwirtschaft, 6/2011, 10–14.
- OECD (2008): Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung: OECD-Umweltausblick bis 2030. Paris, OECD Publishing, 520 S.
- Paul, L., Ihle, T., Prien, K.-J. (2011): Integrale Bewirtschaftung von Trinkwassertalsperren: Konflikt zwischen Hochwasserschutz und Trinkwasserversorgung. In: Blöschl, G., Merz, R. (Hrsg.): Hydrologie und Wasserwirtschaft – von der Theorie zur Praxis. Beiträge zum Tag der Hydrologie am 24./25. März 2011 an der Technischen Universität Wien. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 30, 266–272.
- Pielke, Roger A. jr. (2007): The honest broker. Cambridge: Cambridge University Press., 198 S.
- Socher, M., Dornack, S., Sieber, H.U. (2008): Management of Dams in Trans-National River Basins – a Preliminary Sustainability Impact Assessment for the Upper Elbe River Basin. In: Schmidt, M., Glasson, J., Emmelin, L., Helbron, H. (Eds.): Standards and Thresholds for Impact Assessment. Springer, Heidelberg.
- TAC (2000): Technical Advisory Committee: Integrated Water Resources Management. TAC Background Papers Nr. 4, Global Water Partnership, Stockholm, 67 S.
- von Storch, H. (2009a): On adaptation – a secondary concern? Eur. Phys. J. Special Topics, 13–20.
- von Storch, H. (2009b): Klimaforschung und Politikberatung – zwischen Bringschuld und Postnormalität. Leviathan 37, 305–317.
- Wasserwirtschaftsamt Ansbach (2010): Überleitung Donau-Main. Wasserwirtschaftsamt Ansbach, Oktober 2010.

# Landschaftswandel, globaler Wandel und regionale Anpassung: Perspektiven



Die zukünftige Anlegestelle an dem sich füllenden Ilsesee, Großräschen.  
(Foto: Kaiser, Deutsches GeoForschungsZentrum, 2010)



# Globaler Wandel, Klimawandel und regionale Anpassung

Hans von Storch

Institut für Küstenforschung, Helmholtz-Zentrum Geesthacht und Klimacampus Hamburg

hvonstorch@web.de

**Zusammenfassung:** Die Welt ändert sich, und ein wesentlicher Treiber in diesem globalen Wandel ist der nicht-intendierte Klimawandel als Folge von vor allem der Freisetzung strahlungsaktiver Gase und Substanzen in die Atmosphäre. Für den Laien nicht immer erkennbar ist, worauf die Feststellung, dass es in ungewöhnlichem Maße „wärmer“ werde, basiert, und warum dies auf den „menschengemachten Treibhauseffekt“ zurückzuführen sei – dahinter stehen die Konzepte von „Detektion“ und „Attribution“.

Der erfolgreiche statistische Detektion-Nachweis, wonach derzeit Veränderungen vorstatten gehen, die mit rein natürlichen Abläufen nicht vereinbar sind, und das Attribution-Plausibilitätsargument, das unser bisheriges Verständnis der Wirkung verschiedener Einflussfaktoren auf das Klima zwingend auf die verstärkte Gegenwart der Treibhausgase als wesentlichen Verursacher verweist, klären auf wissenschaftlich überzeugende Weise die Wirkungskette auf und motivieren eine „Klimaschutzpolitik“ der Verminderung der Emissionen, oder zumindest der Verminderung des Anwachsens dieser Emissionen. Auch unter sehr positiven Annahmen wird so eine Klimapolitik aber nicht weitere Klimaänderungen verhindern können, so dass das Thema der Anpassung unserer dringenden Aufmerksamkeit bedarf. Gerade regional und lokal werden sich diese Änderungen auf „das Leben“ auswirken. Um die Auswirkung abschätzen zu können, ist Wissen über die regionale Manifestation des menschengemachten Klimawandels erforderlich; es sind Reaktionsoptionen zu entwickeln, um mit den regionalen und lokalen Herausforderungen umgehen zu können. Für diesen Zweck sind „Regionale Klimaservices“ zu entwickeln.

**Schlüsselwörter:** Klimaänderungsszenarien, Detektion, Attribution, CoastDat.

**Abstract:** The world is changing, and a major driver of this global change is climate change, which unintentionally is caused by the release of radiatively active substances into the atmosphere. For laypeople it is not always clear what the basis of assertions is that the present warming is exceptional, and why this warming is causally related to the anthropogenic greenhouse-effect – the concepts of “detection” and “attribution” are often unknown.

The successful statistical detection argument, which clarifies that present changes are incompatible with purely natural dynamics, and the attribution plausibility argument, that our present knowledge cannot explain this warming without a key contribution by greenhouse gases in the atmosphere, describes scientifically convincingly the cause-and-effect. The arguments motivate a “climate protection policy” which aims at a reduction of the growth of these emissions. But even under optimistic assumptions, such a climate protection policy will be unable to stop the warming; for some time, some warming will prevail – which makes adaptation policies mandatory. In particular on local and regional scales, these changes will have an effect. Thus, knowledge needs to be generated about the regional manifestation of climate change; options for dealing with these changes are necessary. To do so, “regional climate services” are required.

**Keywords:** climate change scenarios, detection, attribution, CoastDat.

## Detektion und Attribution

Die Welt verändert sich – in vielerlei Hinsicht. So beschreiben Steffen et al. (2005) massive und zuletzt beschleunigte Veränderungen etwa bei der Kanalisation von Flüssen, der Verwendung von Kunstdünger und von Papier, dem Umfang der Telekommunikation, der Anzahl der Kraftwagen, dem Umfang des internationalen Tourismus, der landwirtschaftlich genutzten Fläche bzw. dem Verlust an tropischem Regenwald, der Gesamtzahl der Bevölkerung oder auch bei der Anzahl von McDonald's Restaurants. Gleichzeitig steigt die Temperatur an – wie bei vielen der eben genannten Aspekte des menschlichen Lebens und Wirkens – in den letzten Jahrzehnten beschleunigt (s. Abbildung 1).

Im Falle etwa des Papierverbrauchs wissen wir, dass die derzeitige Entwicklung neuartig ist, einfach weil in früheren Jahrhunderten nur sehr wenig bis gar kein Papier verwendet wurde. Wir wissen auch, was hinter dem erhöhten Papierverbrauch steht – nämlich die Nutzung durch den Menschen.

Die gleiche Frage ist im Falle der Temperatur nicht so einfach zu beantworten: Ist die

Erwärmung jenseits des „Normalen“, und falls ja – wodurch wird diese „Anomalie“ bewirkt?

„Normal“ mündet in die Frage: Liegen Veränderungen vor, die stärker sind als in historischen Zeiten der vielleicht letzten 2000 Jahre? Zur Feststellung dieses „jenseits des Normalen“ wird in der Regel ein statistischer Hypothesentest verwendet, der die Nullhypothese hinterfragt, ob die Erwärmung der letzten Jahrzehnte keine Veränderung „jenseits des Normalen“ sei. Wenn wir aber finden, dass der jüngste Trend kaum einer Population historischer Trends entstammen kann, dann stellen wir fest, dass wir einen Klimawandel „detektiert“ haben, womit noch nichts über die Gründe gesagt ist, außer dass es einen Grund geben sollte, der in der Vergangenheit nicht wirksam war. Statt **Detektion** ist auch von **Nachweis** die Rede.

Da die Ergebnisse von statistischen Tests in ihrem Gewicht asymmetrisch sind – eine Ablehnung der Nullhypothese (Akzeptanz der alternativen Hypothese) ist eine definitive Aussage, die mit einer wohldefinierten Wahrscheinlichkeit einer Falschaussage verbunden ist, während eine Nicht-Ablehnung durchaus

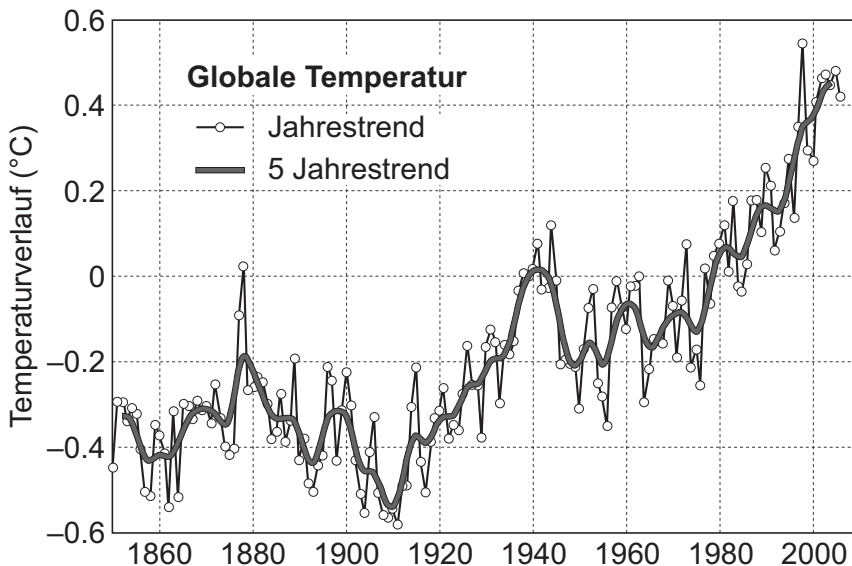


Abbildung 1. Entwicklung der global gemittelten Temperatur der Luft bis 2007 (Zorita, pers. Mitt.).



nicht als Akzeptanz der Null-Hypothese gewertet werden kann, sondern nur als Hinweis, dass die Daten eben keine Ablehnung zulassen – ist die Detektion eine recht robuste Aussage.

Dagegen ist der Zugang zur Verknüpfung mit Gründen, die **Attribution** oder auch **Zuweisung**, ein Plausibilitätsargument, das gestützt wird durch eben die Nicht-Ablehnung einer Nullhypothese, die beschreibt, dass die Veränderungen als Summe einer Reihe von gegebenen Gründen (insb. Treibhausgase) darstellbar sind.

Der Detektion/Attributions-Zugang wurde im Wesentlichen von Hasselmann (1979, 1993 und 1998) entwickelt. Weiter unten werden wir auf die konkreten Ergebnisse bzgl. der Detektion und Attribution auf der globalen und regionalen Skala zu sprechen kommen.

Häufig versuchen fachferne Kollegen, das Problem von Detektion und Attribution dadurch zu umschiffen, indem getestet wird, ob der **Trend signifikant** sei. Wenn dies der Fall ist, also die Null-Hypothese eines verschwindenden Trends abgewiesen wird, wird geschlossen, er sei ungewöhnlich und habe daher vermutlich etwas mit dem bekannten gleichzeitigen Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen zu tun.

Diese Folgerung ist aber nicht richtig – denn Zurückweisung<sup>1</sup> der Nullhypothese, dass es keinen von Null verschiedenen Trend gäbe, impliziert nur, dass, wenn wir in gleicher Weise nochmals Daten erheben, diese wahrscheinlich ebenfalls einen von Null verschiedenen Trend zeigen werden.

Dies sei an dem Beispiel der jahreszeitlichen nordeuropäischen Erwärmung von April bis Juli erläutert. Dieser Trend ist „signifikant“. Aber die Signifikanz der April-Juli-Erwärmung impliziert nicht, dass der Trend über den Juli hinaus etwa bis in den Oktober anhält. Tatsäch-

lich ist in dieser Region der Oktober in der Regel kühler als der Juli.

Die Feststellung der Signifikanz von Trends kann eine Voraussetzung dafür sein, dass ein *anthropogener Trend* konstatiert wird. Behauptungen aber, dass dieser Trend sich *in Zukunft* fortsetzen wird, erfordert die Einsicht, dass die dynamische Ursache für den gegenwärtigen Trend bekannt ist und diese auch in Zukunft weiter bestehen wird.

## Detektion in der globalen Temperaturverteilung

Die ersten Detektion-Nachweise entstanden – auf der Basis des Hasselmann'schen Ansatzes – in den 1990er Jahren. Damals war die Erwärmung noch relativ schwach ausgeprägt, so dass das „Signal-zu-Rauschen“ Verhältnis schwach war. Man half sich dadurch, dass man – mit Erfolg – die Muster der beobachteten Temperaturänderungen auf jene Muster projizierte, die Klimamodelle in Szenarien-Rechnungen als plausible Zukünfte vorgaben. Getestet wurde dann der Regressionskoeffizient dieser Projektion. Dies hatte den zusätzlichen Vorteil, dass geprüft wurde, inwieweit die beobachtete räumliche Verteilung der Temperaturänderung konsistent ist mit den durch Modelle als plausibel beschriebenen Änderungen als Folge erhöhter Treibhausgaskonzentrationen. Eine Schwäche der frühen Arbeiten war der relativ geringe Umfang an Daten, die die natürliche Variabilität beschrieben; hier wurden neben Beobachtungsdaten auch Modelldaten herangezogen.

Die Arbeit von Hegerl et al. (1996) hatte Pioniercharakter; den Stand der Dinge beschrieben seinerzeit Zwiers (1999) und IDAG (2005).

In der Zwischenzeit hat sich die Datenlage verbessert, sowohl weil es mehr geprüfte Daten aus historischen Zeiten gibt, aber auch weil das „Signal-zu-Rauschen“ Verhältnis besser geworden ist. Ein relativ einfacher Zugang wurde von Rybski et al. (2006) realisiert, wonach ein ungewöhnlicher Temperaturwandel sich schon seit den 1980–90er Jahren herauschält aus dem Rauschen der natürlichen Klimaschwankungen, selbst wenn man „long memory“ voraussetzt. Für diese Untersuchung wurden keine

1 Häufig wird bei solchen Unterfangen der Test insofern falsch durchgeführt, als dass die serielle Abhängigkeit in der Zeitserie nicht berücksichtigt wird – was den Test „liberal“ macht, also mit einer zu häufigen Zurückweisung der Null-Hypothese einhergeht, sofern diese denn tatsächlich richtig ist. Vgl. Kulkarni & von Storch (1995).

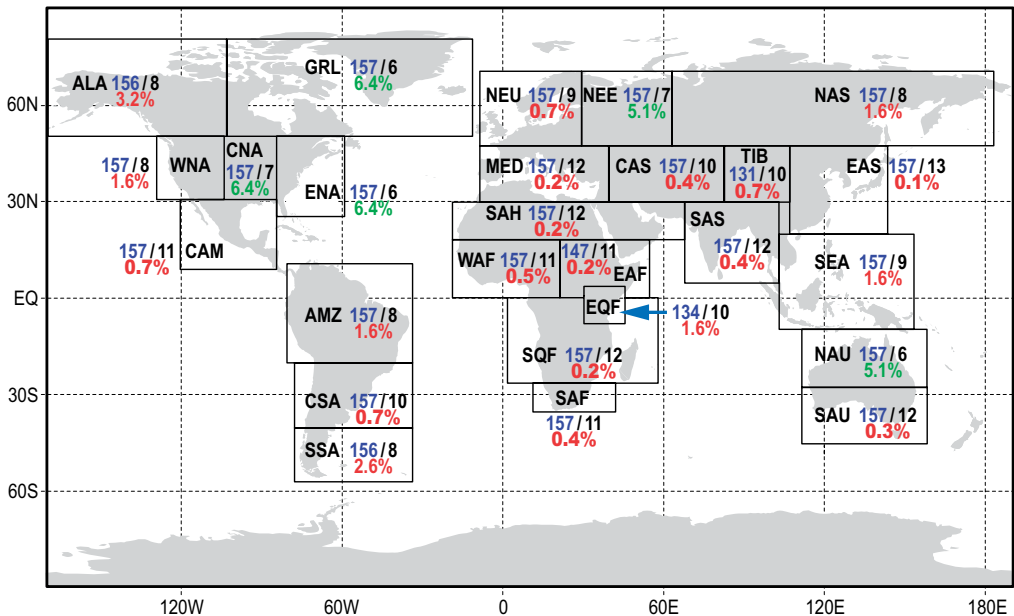
Modelldaten verwendet, sondern nur instrumentelle und Proxy-Daten.

Ein anderer einfacher Zugang, der keine Modelldaten verwendet, wurde von Zorita et al. (2009) vorgestellt. Er beruhte auf der Beobachtung, dass in den 17 Jahren vor dem 4. IPCC-Bericht in 2007 sich die warmen Jahre häuften – im Intervall 1991–2006 finden sich die 12 wärmsten Jahre seit 1881 (126 Jahre). Daher wurde die Frage gestellt, wie wahrscheinlich ist das Ereignis  $E = „in\ einer\ Serie\ von\ 126\ Zahlen\ häufen\ sich\ die\ 12\ (oder\ mehr)\ größten\ Zahlen\ in\ den\ letzten\ 17\ Stellen\ der\ Serie“$  unter der Annahme der Stationarität der Zeitserie. Unter Verwendung von verschiedenen Annahmen über die serielle Korrelation in den Daten (long oder short memory) ergab eine konservative Schätzung eine Wahrscheinlichkeit von nur 0.1–1 % – was den Autoren ausreichend klein erschien, um die Nullhypothese abzulehnen, wonach die jüngsten *globalen*

*Temperaturtrends* im Rahmen der historischen Schwankungen verlaufen.

Ein weiterer Hinweis auf die Richtigkeit dieses Schlusses ist, dass das Ereignis  $E$  niemals in einer historischen Modellsimulation – mit solaren und vulkanischen Antrieben – während der prä-industriellen Periode 1000–1850 gefunden wurde.

Man kann diese Übung auch mit den Verläufen subkontinentaler Temperaturen machen. „Subkontinental“ soll hier stehen für große Gebiete, die große Teile von Kontinenten wie Afrika oder Südamerika abdecken (siehe Abbildung 2; Zorita et al. 2009). Auch in diesem Fall werden die letzten 17 Jahre betrachtet, inwieweit Jahresmittelwerte zu den höchsten in der Gesamtzeitreihe gehören. Die Länge dieser Zeitreihe variiert, die Anzahl der höchsten Werte auch. Es zeigt sich, dass fast alle Gebiete mit der Annahme der Stationarität unverträglich sind (Risiko:



**Abbildung 2.** Wahrscheinlichkeit  $p$ , dass in den letzten 17 Jahren  $m$  (schwarz) der vorliegenden  $n$  (blau) Jahreswerte der Temperatur in den markierten Gebieten („Giorgi-Boxen“) zu den höchsten Werten gehören. Es wird long-memory angenommen, das für die verschiedenen Boxen separat geschätzt wird, daher sind die Wahrscheinlichkeiten in SSA und ALA verschieden, obwohl  $m$  und  $n$  gleich sind. Wahrscheinlichkeiten größer 5 % sind in grün angegeben, solche kleiner als 1 % in fettem rot (nach Zorita et al. 2009). Darstellung der Werte in der Schreibweise  $n/m$ .

< 5 %). Wir schließen daraus, dass auch in den subkontinentalen Gebieten Einflüsse am Werk sein müssen, die zu jüngsten Veränderungen geführt haben, die im Rahmen des „Normalen“ unwahrscheinlich sind.

Damit gelingt auch die Detektion auf subkontinentalen Skalen; bisweilen gelingt dies sogar für lokale Zeitserien, die zwar viel variabler sind von Jahr zu Jahr, die aber ggf. auch eine wesentlich längere Zeit abdecken.

## Attribution

Die Attribution wird in der Regel mit Hilfe von Modellresultaten gestaltet (IDAG 2005). Aus Szenarienrechnungen werden die typischen Reaktionsmuster auf spezifische Antriebe, also insbesondere erhöhte Treibhausgaskonzentration, bestimmte Konzentrationen industrieller Aerosole oder auch vulkanische Aerosole oder Sonnenaktivität für den derzeitigen Zeitpunkt bestimmt. Dann wird eine Regression der beobachteten Temperaturverteilungen auf diese Muster durchgeführt, und die dabei entstehenden Regressionskoeffizienten werden getestet, ob sie mit dem Wert 1 unverträglich sind. Sind sie verträglich, dann wird die Hypothese akzeptiert<sup>2</sup>, dass die beobachtete Änderung verursacht wurde durch die Beiträge, deren Regressionskoeffizient statistisch konsistent mit der 1 ist.

Offensichtlich ist das Argument zugunsten einer Attribution schwächer als das Detektionsargument; insbesondere ist es möglich, dass wesentliche Antriebe gar nicht in die Analyse eingehen, und daher das Signal fälschlich anderen Antrieben zugewiesen wird. Auch muss man sich auf Modelle und deren Reaktionsmuster verlassen; zieht man mehrere heran, verbreitert sich das Intervall der akzeptablen Regressionskoeffizienten. Wir haben es hier

2 Der Ausdruck „akzeptieren“ ist unglücklich, wenn gleich leider üblich. Wie vorher erläutert handelt es sich nur um die Feststellung, dass die Befunde, die gegen die Nullhypothese sprechen, zu schwach sind, um diese abzulehnen; dies kann nicht als positiver Beweis für die Richtigkeit der Nullhypothese gelten. Was bleibt ist „Wir haben keine bessere Erklärung“.

also mit einem recht komplexen Plausibilitätsargument zu tun, dessen kritische Diskussion und Hinterfragung nur aus fachnaher Perspektive möglich ist.

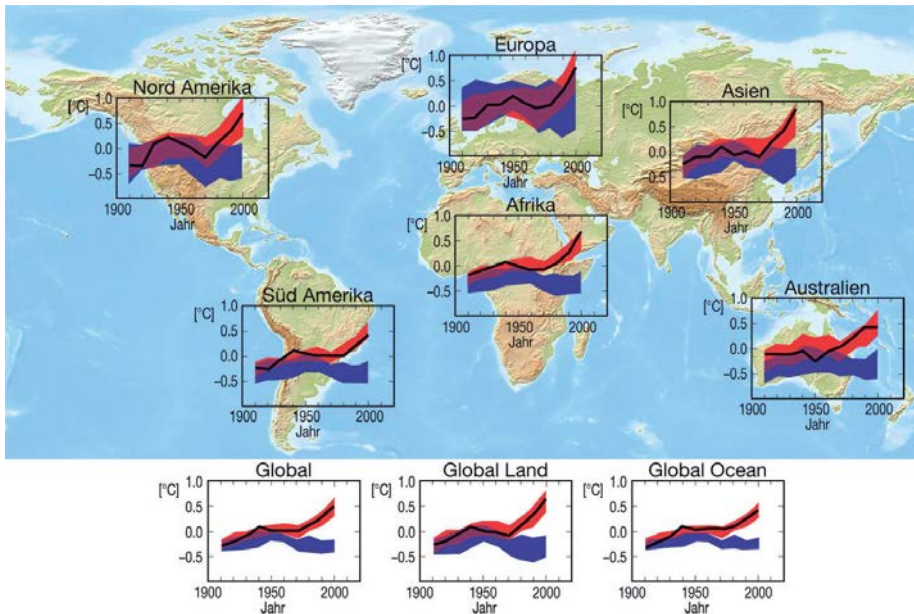
Viel einfacher ist der Zugang, der im IPCC-Report verwendet wurde, nämlich die Prüfung, inwieweit Klimamodellsimulationen den beobachteten Temperaturverlauf (etwa Abbildung 1) nachempfinden können, wenn entweder nur natürliche Antriebe oder auch anthropogene Antriebe wirksam sind. Dies zeigt Abbildung 3 – wobei das dunkle Band ein Ensemble von Temperaturentwicklungen zeigt mit Simulationen, die nur natürlichen Antrieben ausgesetzt sind, und das helle Band jene aus einem Ensemble mit Simulationen mit natürlichen und anthropogenen Antrieben. Die schwarzen Linien zeigen die als 10-jährige Mittel gepackte beobachtete Temperaturentwicklung. Offenbar können die Modelle die Entwicklung der letzten Jahrzehnte nur darstellen, wenn anthropogene Antriebe berücksichtigt werden. Dies ist vor allem die erhöhte Konzentration von Treibhausgasen.

Demnach können wir mit **unserem heutigen Wissen** den zuvor als nicht im Rahmen historischer Klimaschwankungen erklärbar beschriebenen jüngsten Klimawandel *nur dadurch konsistent deuten, wenn wir die erhöhte Gegenwart von Treibhausgasen als wesentlichen treibenden Faktor betrachten*.

## Szenarien – mögliche Zukünfte aber keine Vorhersagen<sup>3</sup>

Szenarien beschreiben denkbare zukünftige Entwicklungen (Schwartz 1991). Im Gegensatz zu Vorhersagen stehen bei Szenarien nicht Eintrittswahrscheinlichkeit und Treffgenauigkeit im Vordergrund, sondern es werden Faktoren und Zusammenhänge ermittelt, die künftige Entwicklungen beeinflussen können. Szenarien sind plausibel und in sich konsistent, aber nicht unbedingt wahrscheinlich. Mit Szenarien wird häufig das Ziel verfolgt, Verantwortungs-

3 Teilweise wörtlich übernommen aus von Storch & Meinke (2011). Dort werden auch die gängigen Emissionsszenarien beschrieben.



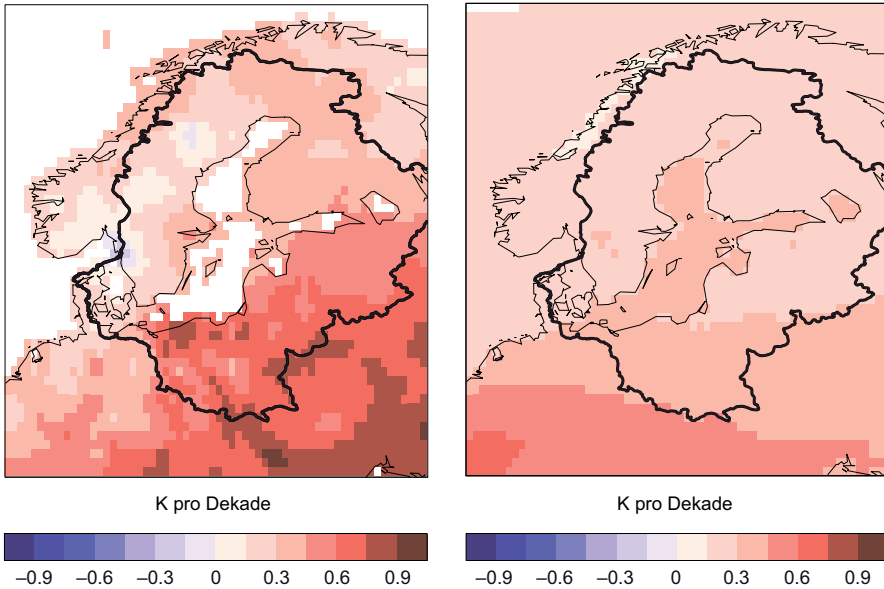
**Abbildung 3.** Beobachtete Temperaturentwicklung auf dem Globus und verschiedenen Gebieten (schwarze Linien), sowie Ensembles der Temperaturentwicklung mit Modellen, die entweder nur natürliche Faktoren (dunkel) oder nur anthropogene Faktoren (hell) berücksichtigen (nach IPCC 2007).

träger mit möglichen zukünftigen Situationen zu konfrontieren, damit diese planbar werden. Oft ermöglicht der Einsatz von Szenarien rechtzeitige Entscheidungen, durch die künftige Entwicklungen mit unerwünschten Folgen vermieden oder die Wahrscheinlichkeit für wünschenswerte Entwicklungen erhöht werden können.

In der Klimaforschung werden Szenarien seit dem Beginn des IPCC-Prozesses Ende der 1980er-Jahre intensiv genutzt (Houghton et al. 1990, 1992, 1995, 2001, Solomon et al. 2007). Grundlage bilden **Gesellschaftsszenarien**, in denen Bevölkerungsentwicklung, Wirtschaftswachstum, Globalisierung sowie der langfristige Umgang mit natürlichen Ressourcen und fossilen Energieträgern in unterschiedlicher Weise abgebildet werden. Aus den verschiedenen Gesellschaftsszenarien werden mögliche zukünftige Entwicklungen von anthropogenen Emissionen klimatisch wirksamer Substanzen abgeleitet. Dabei handelt es sich vor allem um Kohlendioxid, aber auch um Methan und Aerosole industriellen Ursprungs. Im nächsten Schritt wird auf Basis dieser **Emissionsszena-**

**rien** mit komplexen globalen numerischen Klimamodellen abgeschätzt, welche klimatischen Folgen die zukünftigen Emissionen haben können. Diese **globalen Klimaänderungsszenarien** geben Auskunft über die erwarteten global-skaligen Klimaänderungen, die aufgrund der jeweiligen Emissionsentwicklung plausibel erscheinen.

Regionale Details, beispielsweise für die Niederschlags- und Windverhältnisse in mitteleuropäischen Ländern, liefern sie nicht. Um diese zu erhalten, wird die Methode des „dynamischen Downscaling“ verwendet. Dabei werden für bestimmte Regionen regionale Klimamodelle mit horizontalen Gittern von 10 bis 50 km von den groß-skaligen Zirkulationsverhältnissen angetrieben, die vorher in globalen Klimamodellen simuliert wurden. So ergeben sich **regionale Klimaänderungsszenarien**. Diese beschreiben, wie das regionale Klima sich auf Skalen von etwa fünfzig, hundert oder zweihundert Kilometern entwickeln könnte. Hierin sind auch seltene und kurzzeitige Ereignisse enthalten, wie Starkniederschläge oder extreme Stürme.



**Abbildung 4.** 30-jährige Trends (1973–2002) der sommerlichen Temperatur im Einzugsbereich der Ostsee, abgeleitet aus Beobachtungsdaten (links). Nach einer Szenarienrechnung zu erwartende Trends (Bhend, pers. Mitt.). Alle Trends sind positiv.

Wenn die Szenarienrechnungen, unabhängig vom Emissionsszenario und von der verwendeten Modellkonfiguration, zu ähnlichen Resultaten kommen, dann sieht man diese Aussagen für recht zuverlässig an: In diesem Sinne erscheint sicher für die Zukunft: die Fortsetzung der Erwärmung, weniger Meereis, höherer Meeresspiegel. Sicher ist: mehr Starkregen. Gestritten wird über Fragen, was derzeit und in Zukunft mit den tropischen Wirbelstürmen passiert, in welchem Maße die Wasservorräte der Antarktis und Grönlands abschmelzen werden.

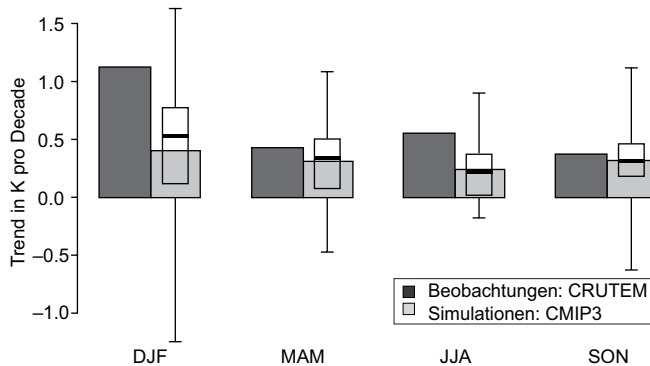
Es wird noch oft spekuliert, dass sich alle Art von Krankheiten notwendigerweise ausbreiten würden, dass es Flüchtlingsströme und Klimakriege geben würde. Dies beruht auf der sehr einfachen und lange diskreditierten Sichtweise des klimatischen Determinismus (Stehr & von Storch 1999), wonach nämlich nicht der Mensch solche Aspekte des sozialen Zusammenlebens bestimmen würde sondern die Natur. Immerhin hatten wir in Nordeuropa vor 300 Jahren Malaria, die seitdem ausgerottet wurde – obwohl es wärmer und nicht etwa kälter geworden ist. Hier wird aus Gründen der

politischen Opportunität eine Menge Unsinn geredet.

Nachdem der menschengemachte Klimawandel als real identifiziert wurde und die sich laufend weiter erhöhenden Konzentrationen von Treibhausgasen als Verursacher dieser Entwicklung, ist klar, dass sich die Entwicklung auch in Zukunft fortsetzen wird und die Gesellschaft sich entscheiden muss, wie sie mit dieser Perspektive umgehen will. Mögliche gesellschaftliche Antworten auf die Herausforderung des menschengemachten Klimawandels sind:

- a) *Begrenzung des Klimawandels* durch Reduktion der weltweiten Emissionen von Treibhausgasen,
- b) *Anpassung* an den Klimawandel, der durch Klimaschutzmaßnahmen nicht vermieden werden kann.

Dabei muss klar sein, dass eine Klimaschutzpolitik, also eine wirksame Begrenzung der Emissionen, nur in Maßen möglich ist. Selbst wenn das ambitionierte Ziel der Begrenzung der Erderwärmung auf 2 Grad gelingen sollte (Geden 2010), verbleibt ein Wandel, der etwa dem Dop-



**Abbildung 5.** 30-jährige Trends (1978–2007) in verschiedenen Jahreszeiten im Gebietsmittel der Lufttemperatur des Ostsee-Einzugsgebiets aus Beobachtungen abgeleitet (jeweils links in schwarz) sowie Erwartungen für solche Trends aus einem Ensemble von Szenarienrechnungen (Mittel: grau, die Boxplots zeigen Minimum und Maximum (Whiskers), 25 und 75 Perzentil (Box), und Median (dicke Linie in der Box)) (Bhend, pers. Mitteilung).

pelten des jetzt schon eingetretenen Klimawandels entspricht. Anpassung ist daher in jedem Falle geboten, und dies ist vor allem eine Herausforderung an Kommunen und Länder.

Für den Umgang mit dieser Herausforderung werden Szenarien benötigt, um die Möglichkeiten, Gefährdungen und Notwendigkeiten durch zukünftige Entwicklungen im Klima und in der Nutzung natürlicher Ressourcen und Risiken abzuschätzen. Dazu kommt es darauf an, dass die Szenarienrechnungen wirklich etwas über die Zukunft aussagen. Diese Frage kann man grundsätzlich nicht wirklich beantworten, aber *ein* sinnvoller Test besteht darin zu prüfen, ob die gegenwärtigen Veränderungen konsistent mit den von den Szenarien in Aussicht gestellten Veränderungen sind. Wir sprechen von **Konsistenzchecks** (Bhend & von Storch 2007, 2009; Barkhordarian et al. 2011).

Im Folgenden sei dies für den Fall des Ostsee-Einzugsgebiets diskutiert (Bhend & von Storch 2007, 2009). Abbildung 4 zeigt den 1973–2002-Trend der Temperaturänderung im Sommer (Juni, Juli und August) sowie die Erwartung eines Klimamodells, das auf erhöhte Treibhausgaskonzentrationen reagiert. Wenngleich sich die beiden Karten im Detail unterscheiden, so sind sie doch in der Erwärmung im Wesentlichen ähnlich.

Der Vergleich wird in Abbildung 5 systematischer dargestellt. Er zeigt den 1978–

2007-Trend im Gebietsmittel der jahreszeitlich gemittelten Temperatur, sowie die Trends in einer Reihe von Szenarienrechnungen (der vertikale Strich deutet die Bandbreite an). In allen Jahreszeiten stimmen die Vorzeichen im Mittel überein, und die Bandbreiten in den Szenarien sind so breit, dass der beobachtete Trend problemlos innerhalb dieser Bandbreite zu liegen kommt.

Auch für die Trends in den Niederschlagssummen finden wir ein ähnliches Resultat. Die beobachteten Trends<sup>4</sup> fallen in die breiten Bereiche der von den Klimamodellen vorgeschlagenen Trends. Der gegenwärtige Wandel ist also konsistent mit der erwarteten Zukunft. Ungeachtet dessen kann man aber feststellen, dass im Winter (DJF) und Frühjahr (MAM) die derzeitigen Zuwächse deutlich größer ausfallen als die Ensemblemittel; im Sommer und Herbst aber verweisen die meisten Modellergebnisse ebenfalls auf vermehrte Niederschlagsmengen, während derzeit im Sommer (JJA) kaum

<sup>4</sup> Die Ausdrucksweise „beobachtete Niederschlagssummen“ täuscht über die Tatsache hinweg, dass der Prozess aus einzelnen Messungen dieser Größe, also zeitliche Summen und räumliche Mittel, durchaus problematisch ist, und verschiedene Methoden sehr wohl zu deutlich anderen Zahlen kommen können. Dies soll hier aber nicht weiter vertieft werden.