

Ulrich Wolf-Schumann und Ulrich Dumont

# Einfluss der Klimaveränderung auf die Wasserkraftnutzung in Deutschland

Im Teilprojekt „Klima und Wasserkraft“ des BMU-Projektes „Wasserkraftpotenzial in Deutschland“ sowie in der Studie für das Umweltbundesamt „Effiziente Maßnahmen und Kriterien zur Verbesserung des ökologischen Zustands an Wasserkraftanlagen“ wurde die Entwicklung der Energiegewinnung aus Wasserkraft durch die zu erwartenden Klimaveränderungen untersucht. Im Vordergrund stand die Fragestellung, ob die Energieausbeute aus der Wasserkraft zu- oder abnimmt und inwieweit die Energieerzeugung an deutschen Gewässern in Zukunft verlässlich, planbar und ausfallsicher sein wird. Untersucht wurden v. a. Laufwasserkraftwerke in den südlichen Bundesländern.

## 1 Klimamodelle

Globale Klimamodelle berechnen großräumige Änderungen unter Voraussetzung verschiedener Emissionsszenarien, die nach der Einteilung des SRES 2000 (Special Report on Emissions Scenarios) des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) unterschieden werden. Die im Folgenden getroffenen Aussagen beruhen auf dem Emissionsszenario A1B, das mit einem rapiden Wirtschaftswachstum, einem Wachstum der Bevölkerung bis Mitte des 21. Jahrhunderts, einer raschen Einführung effizienter Technologien und einem ausgewogenen Verhältnis aller Energieträger rechnet [1]. Das deutsche globale Klimamodell ECHAM5 wurde am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) in Hamburg entwickelt. **Bild 1** stellt damit berechnete Klimaprojektionen von 1901 bis 2100 dar und zeigt eindeutig erheblich ansteigende Temperaturen jedoch eher indifferente Entwicklungen der Niederschläge bis 2100. Auch andere Globalmodelle oder weitere Treibhausgasszenarien zeigen die Temperaturänderungen unstrittig und die Niederschlagsentwicklungen mit breiten Ergebniskorridoren an.

Ebenso wie im globalen Maßstab gibt es für Regionen eine Reihe von Klimaprojektionsmodellen (Downscaling-Verfahren). Sie gehen alle von den Ergebnissen globaler Klimamodelle aus, verwenden aber unterschiedliche Ansätze, um die Auswirkungen eines veränderten Weltklimas in einem bestimmten Gebiet zu beschreiben. Der Deutsche

Wetterdienst hat Berechnungen mit den vier Downscaling-Verfahren REMO, CLM, WETTREG und STAR vorgenommen [3].

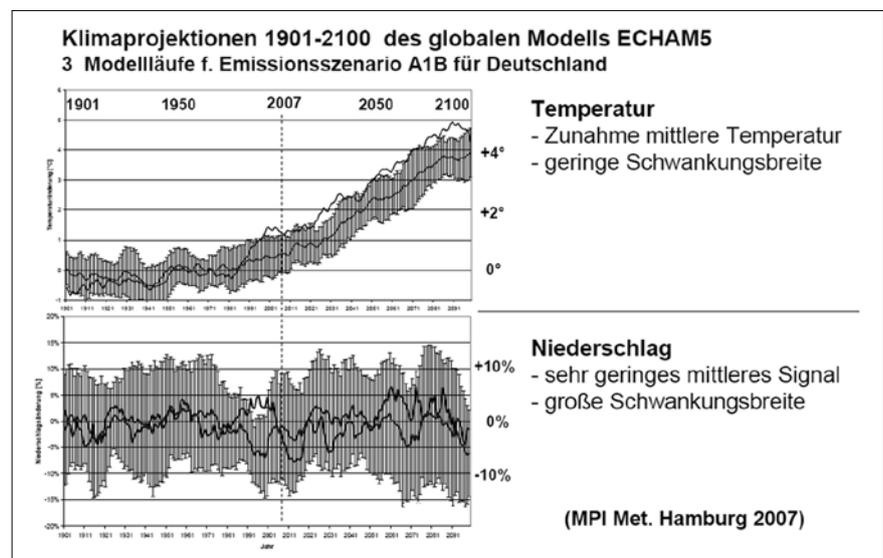
Das Ergebnis zeigt insgesamt einen deutlichen Trend der Niederschlags- und Temperaturänderungen in Deutschland in den nächsten 90 Jahren (**Bild 2**). Dabei ist die Temperaturänderung im Vergleich der Verfahren fast einheitlich, während die Änderung in der Niederschlagsmenge (**Bild 3**) stark variiert.

Die Änderung der Niederschläge fällt in der ersten Periode (2021 bis 2050) gering aus. Im Sommer ist von einer leichten Abnahme der Niederschläge auszugehen, wäh-

rend sich die Verhältnisse im Winter je nach Modell und Region unterschiedlich entwickeln. Im Zeitraum 2071 bis 2100 werden die Niederschläge im Sommer deutlicher abnehmen. In den Wintermonaten sind zusätzliche Niederschläge zu erwarten, wobei die Schwankungsbreite der einzelnen Modelle von 10 % bis über 70 % reicht.

## 2 Stand der Forschung zu Wasserkraft und Klimawandel

Einige Untersuchungen der Klimafolgenforschung in Deutschland haben sich ent-



**Bild 1:** Klimaprojektion 1901 bis 2100 des MPI Globalmodells ECHAM5, Emissionsszenario A1B [2]

weder explizit mit der Wasserkraft befasst oder liefern Aussagen zu der Entwicklung der Abflüsse.

### 2.1 GLOWA Danube

Im Projekt GLOWA Danube (Globaler Wandel des Wasserkreislaufes, gefördert durch BMBF, StMWFK, LMU München und MWK Baden-Württemberg) wurden Einflüsse des Klimawandels auf die Wasserressourcen der Oberen Donau untersucht.

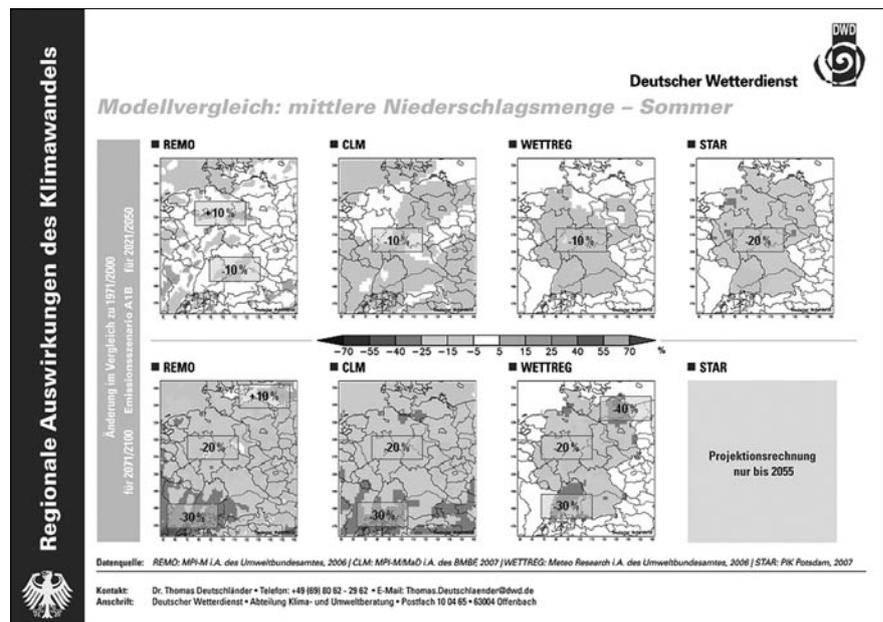
Mit dem ausgewählten Klimaszenario wurden für die nahe Zukunft bis 2035 moderate Erzeugungsrückgänge von knapp 2 % ermittelt, für den Folgezeitraum bis 2060 ergaben sich Mindererzeugungen von ca. 10 %. [9]

### 2.2 WASKlim

Das Projekt „Entwicklung eines übertragbaren Konzeptes zur Bestimmung der Anpassungsfähigkeit sensibler Sektoren an den Klimawandel am Beispiel der Wasserwirtschaft“ (WASKlim) hat im Auftrag des Umweltbundesamtes (UBA) Anpassungsstrategien der Wasserwirtschaft an den Klimawandel erarbeitet. Bzgl. der Wasserkraftnutzung wurden für die nahe Zukunft indifferente Aussagen erarbeitet, für die ferne Zukunft wurde hingegen ein deutlicher Rückgang ermittelt, z. B. für die Iller ein MQ-Rückgang von 16 %.

### 2.3 KLIWA

Das Projekt KLIWA der Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-



**Bild 2:** Vergleich der Ergebnisse von 4 regionalen Klimamodellen für Deutschland: Sommerniederschläge für die nahe (obere Reihe) und ferne Zukunft (untere Reihe) [nach 3]

Pfalz sowie des DWD untersucht bereits seit 1998 Klimaänderung und Wasserwirtschaft. In den ersten Jahren lieferte das Projekt vergleichsweise eindeutig orientierte Aussagen zu Hoch- und Niedrigwasser, wodurch u. a. Bemessungswerte für die Extrema angehoben wurden. In den letzten Jahren hat sich das Spektrum der verwendeten Szenarien, Globalmodelle, Regionalisierungen sowie Wasserhaushaltsmodelle mehrfach erweitert und die

Aussagen zum künftigen Wasserdargebot wurden indifferenter. Die wenigen getroffenen Aussagen zur Wasserkraft nennen für den Alpenraum einen Rückgang der Energieerzeugung um 7 % [4].

### 2.4 KLIWAS

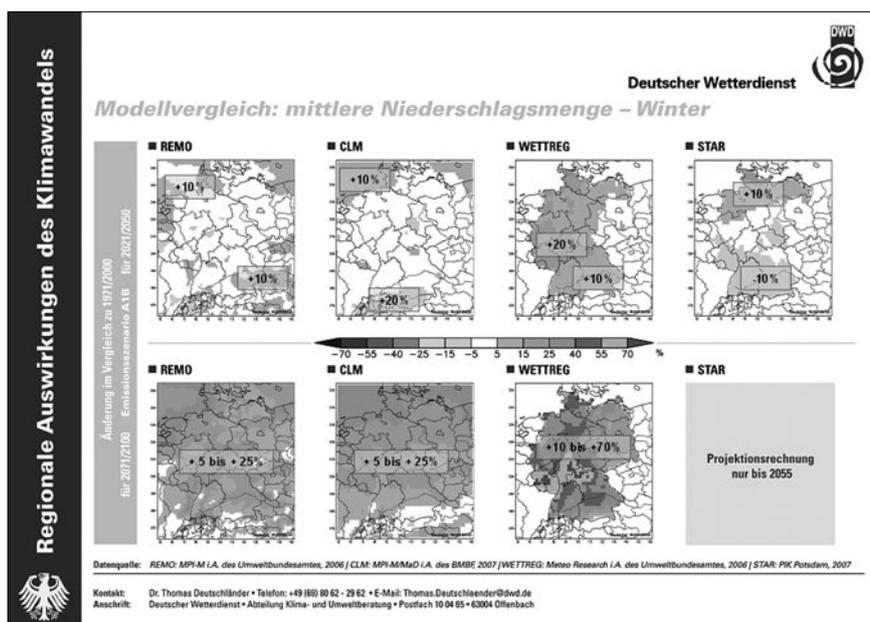
Das vom BMVBS beauftragte Forschungsprogramm KLIWAS soll die Folgen des Klimawandels auf Wasserstraßen und die Schifffahrt ermitteln. Ergebnisse zum Abflussregime der Bundeswasserstraßen, die auch für die Beurteilung der künftigen Energieerzeugung aus Wasserkraft wertvoll sind, sollen 2010 zunächst für das Rhein-Einzugsgebiet und anschließend für das Elbe-Einzugsgebiet geliefert werden.

Das Projekt befasst sich intensiv mit Unsicherheiten in Bezug auf den Klimawandel und bezieht die vorhandenen Modelle für die globalen und regionalen Klimaänderungen umfassend ein. Auch wenn die Wasserkraft selbst als Fragestellung unberücksichtigt bleibt, sind die Aussagen zur Wasserführung im Rhein und allen Nebengewässern für die Wasserkraft wertvoll und werden nutzbare Ausgangsdaten liefern.

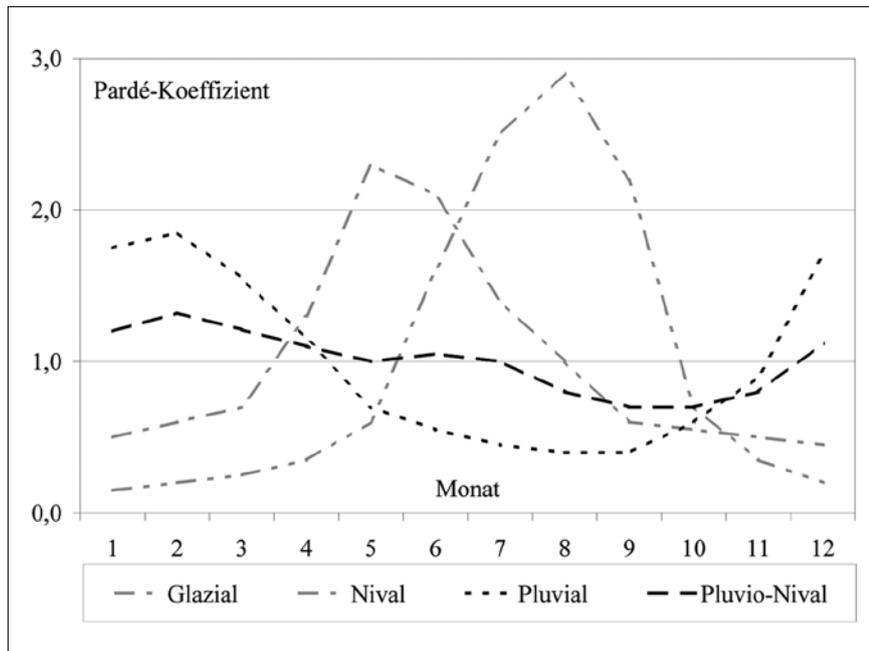
### 2.5 Aussagen der vorliegenden Untersuchungen

Die durch den Klimawandel zu erwartende Entwicklung der Wasserkraftnutzung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- In der nahen Zukunft sind die Erwartungen nicht einheitlich, in der zweiten



**Bild 3:** Vergleich der Ergebnisse für Deutschland von 4 regionalen Klimamodellen: Winterniederschläge für die nahe (obere Reihe) und ferne (untere Reihe) Zukunft [nach 3]



**Bild 4:** Hydrologische Flussregime in Deutschland (nach [7])

Hälfte des 21. Jh. wird ein Rückgang der Energiegewinnung mit Wasserkraftanlagen erwartet. Zusätzliche Probleme werden bei steigenden Temperaturen trockenere Sommer und extreme Hochwasserereignisse darstellen.

- In glazialen Abflussregimen wird der Niedrigwasserabfluss in der ersten Hälfte des 21. Jh. ansteigen und einen positiven Effekt bewirken. Danach wird die Gletscherspende wieder abnehmen, da sich die schmelzfähige Oberfläche der Gletscher mit der Zeit immer weiter verringert [5]. Ende dieses Jh. werden die glazialen Abflussregime verschwunden sein und alle betroffenen Gewässer einen nivo-pluvialen Charakter haben. Einflüsse des glazialen Schmelzwassers sind im Rhein und einigen Donau-Zuflüssen bemerkbar.

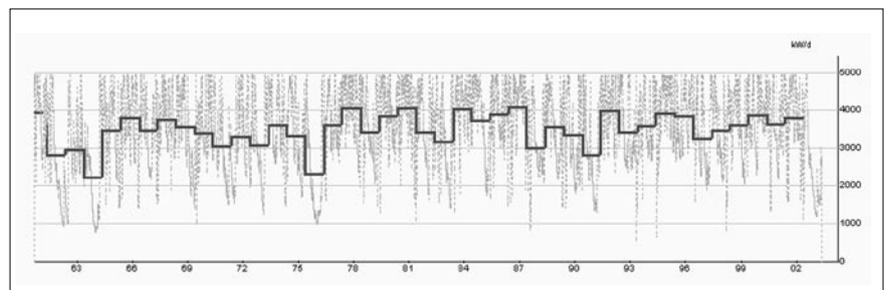
**Bild 4** zeigt die Jahresverläufe der Abflussregime anhand der Pardé-Koeffizienten, die die mittleren Monatsabflüsse mit dem mittleren Jahresabfluss vergleichen.

- Für den Rhein werden relativ einheitlich milde, niederschlagsreiche Winter mit einer Zunahme der Abflüsse erwartet. Die Erwartungen für den Sommer sind weniger sicher. Sie gehen oft von einer Zunahme der Trockenperioden aus. Aussagen für das ganze Jahr und den Mittelwasserabfluss sind indifferenter.
- An der Donau wird im Zeitraum 2011 bis 2035 von einem Rückgang der Energieproduktion zwischen 1 und 4 % und

für 2036 bis 2060 um 9 bis 15 % im Vergleich zum Referenzzeitraum (1971 bis 2000) ausgegangen [6].

### 3 Szenarienrechnungen an Beispielanlagen

Im Rahmen der Forschungsprojekte [8] bzw. [13] und [12] waren u. a. die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserkraftanlagen in Deutschland zu untersuchen. Dazu wurden die Änderungen in der Energiegewinnung an Wasserkraftanlagen mit unterschiedlichem Standortcharakter für verschiedene, vom Klimawandel geprägte Abflussszenarien berechnet. Diese Berechnungen sind nicht als Prognosen zu verstehen. Vielmehr sollte untersucht werden, wie die Beispielanlagen auf mögliche Änderungen des Klimas und des Abflussregimes reagieren.



**Bild 5:** Berechnete Energieerzeugung einer Beispielanlage für den Zeitraum 1961-2003 (Tageswerte und Jahresmittel) [8]

Als mögliche Auswirkungen des Klimawandels wurden angenommen:

- Änderung der Winter- bzw. Sommerabflüsse;
- Zunahme der Extrema (Hochwasser, Niedrigwasser);
- Verschiebungen im Jahresgang.

Als beispielhafte Standorte wurden ausgewählt:

- Standort 1: WKA am Hochrhein zwischen Bodensee und Basel mit nival-glazialen Abflussregime und einem Einzugsgebiet von 36 000 km<sup>2</sup>. Der Ausbaudurchfluss von 1 460 m<sup>3</sup>/s ist ca. 40 % größer als MQ, die Ausbaufallhöhe beträgt 11,20 m. Mit einer Ausbauleistung von 120 MW gehört die Laufwasserkraftanlage zu den größten in Deutschland.
- Standort 2: WKA am Lech im Donaugebiet mit nivalem Abflussregime. Das Einzugsgebiet umfasst 4 100 km<sup>2</sup>, der Ausbaudurchfluss beträgt 180 m<sup>3</sup>/s bei einem MQ von 118 m<sup>3</sup>/s, die Ausbaufallhöhe 8,10 m und die Ausbauleistung 11,2 MW.
- Standort 3: Als typisch für Gewässer wie Neckar, Mosel etc. mit pluvialen bzw. pluvio-nivalem Regime wurden 2 Standorte am Main gewählt.
- Standort 3a: Fiktive WKA am unteren Main. Das Einzugsgebiet beträgt 25 000 km<sup>2</sup>, der Ausbaudurchfluss 200 m<sup>3</sup>/s, die Ausbaufallhöhe 5,90 m und die Ausbauleistung 8,8 MW.
- Standort 3b: Fiktive WKA am Main im Bereich Schweinfurt. Das Einzugsgebiet beträgt 12 700 km<sup>2</sup>, der Ausbaudurchfluss 120 m<sup>3</sup>/s, die Ausbaufallhöhe 4,20 m und die Ausbauleistung 3,7 MW.

Berechnet wurden 50-jährige Energieerzeugungszeitreihen auf Basis historischer Abflussganglinien. Die Variationen wurden mit trockeneren und feuchteren Halbjahren berechnet und die Vergrößerung der Extrema wurde wie oben beschrieben modifiziert. Die komplexeren Ände-

rungen im Jahrgang nutzen publizierte Szenarien der Klima-Projekte GLOWA-Danube [9] und KLIWAS [10]. Eine detaillierte Beschreibung enthält [12].

**Bild 5** zeigt die Ganglinie der Energieerzeugung des Referenzlaufs 1961 bis 2003 mit Tageswerten und Jahresmittel. Die jährlichen Werte schwankten zwischen 2 200 und 4 100 GWh/a. Besonders ertragreiche Jahre waren 1978, 1981 und 1987. Hier traten weder besonders große Abflüsse, noch nennenswerte Niedrigwasserabflüsse auf. Sowohl Winter- als auch Sommerhalbjahr entsprachen in etwa dem langjährigen MQ.

### 3.1 Veränderung Halbjahresniederschläge

Bei geänderten Temperaturentwicklungen können signifikante Änderungen für das Winter- und Sommerhalbjahr erwartet werden. V. a. die hydrologischen Prozesse Schnee und Verdunstung haben in den Halbjahren unterschiedliche Relevanz. Die in den Bildern 1 und 2 dargestellten Szenarien für die nahe und ferne Zukunft zeigen für den Sommer eher Niederschlagsminderungen und für

den Winter sowohl Minderungen als auch Steigerungen.

Niederschlagsänderungen bewirken gleichgerichtete Abflussänderungen. Für die Variationsrechnungen wurde angenommen, dass sich Änderungen des Niederschlagsdargebots im Winter vollständig und im Sommer etwa hälftig als Abflussänderungen auswirken.

Die Änderungen der Energieerzeugung sind geringer als die Abflussänderungen. Die größere Relevanz hat das Winterhalbjahr. Hier zeigt sich, dass die Reduktion bei Abflussminderungen deutlicher ausfällt als die Mehrerzeugungen bei Abflusszuwachsen. Die Anlagen verhalten sich recht unterschiedlich. Bei den Anlagen am Main zeigen sich geringere Auswirkungen, die Anlage am Lech reagiert deutlicher (**Tabelle 1**).

### 3.2 Ausgeprägtere Abflussextrema

Zur Ermittlung der Empfindlichkeit der Beispielanlagen gegenüber Änderungen im Hoch- und Niedrigwasserbereich wurden folgende Szenarien pragmatisch untersucht:

- Alle Abflüsse, die größer als das im Durchschnitt zweimal jährlich auf-

tretende Hochwasser sind, wurden pauschal um 25 % erhöht. Bei einer 50-jährigen Reihe werden somit 100 Hochwasserereignisse erhöht.

- Wie 1., wobei die Abflussreihe aber soweit reduziert wurde, dass sich ein unveränderter Mittelwasserabfluss ergibt. Dies ist eine pessimistische Annahme, denn bei größeren Hochwässern werden sich geringere Verdunstungen und somit größere Abflusshöhen ergeben.
- Alle Abflüsse geringer als MQ werden bis maximal zum langjährigen Niedrigwasserabfluss reduziert. Hierdurch verringert sich das Abflussvolumen und die Niedrigwasserzeiten verlängern sich.
- Kombination von 1. und 3.

Eine Zunahme der Hochwasser bedeutet Energieeinbußen, die allerdings erst dann besonders ausgeprägt sind, wenn die zusätzliche Abflusshöhe der Hochwasserwellen in anderen Perioden fehlt.

Niedrigwasserperioden mit verringerten Abflüssen reduzieren bei allen Anlagen den Ertrag.

Die Anlagen am Hochrhein und am Lech zeigen nur geringe Abhängigkeiten (**Tabelle 2**). Die Anlagen am Main reagieren sowohl auf Niedrigwasser als auch auf

**Tab. 1: Szenarien mit veränderten Halbjahresniederschlägen und der daraus berechneten Änderung des mittleren Abflusses DMQ und mittleren langjährigen Energieerzeugung DW der Wasserkraftanlagen**

Variation Niederschlag	Hochrhein		Lech		Main-Mündung		Main-Oberlauf 2*Kaplan		Main-Oberlauf 1*Francis	
	DMQ	DW	DMQ	DW	DMQ	DW	DMQ	DW	DMQ	DW
Sommer Niederschlag -10 %	-2,9 %	-1,5 %*	-3,0 %	-2,4 %*	-1,7 %	-1,5 %*	-1,6 %	-1,7 %*	-1,6 %	-2,2 %*
Winter Niederschlag -10 %	-5,0 %	-3,4 %**	-5,2 %	-5,0 %**	-6,0 %	-1,1 %*	-6,1 %	-1,3 %*	-6,1 %	-2,0 %*
Winter Niederschlag +10 %	5,0 %	2,7 %	5,2 %	4,5 %	6,0 %	0,7 %	6,2 %	0,8 %	6,2 %	1,3 %
Legende	* Mindererzeugung zwischen 0,5 % und 2,5 % ** Mindererzeugung größer 2,5 %									

**Tab. 2: Szenarien mit veränderten Extrema und der daraus berechneten Änderung des mittleren Abflusses DMQ und mittleren langjährigen Energieerzeugung DW der Wasserkraftanlagen**

Variation Extrema	Hochrhein		Lech		Main-Mündung		Main-Oberlauf 2*Kaplan		Main-Oberlauf 1*Francis	
	DMQ	DW	DMQ	DW	DMQ	DW	DMQ	DW	DMQ	DW
1) Hochwasser (> HQ0,5) +25 %	0,8 %	-0,2 %	1,2 %	-0,2 %	4,5 %	-0,6 %*	2,9 %	-0,4 %	2,9 %	-0,4 %
2) Hochwasser (> HQ0,5) +25 %, MQ konst.	0,0 %	-0,8 %*	0,0 %	-1,3 %*	0,0 %	-2,2 %*	0,0 %	-3,8 %**	0,0 %	-5,5 %**
3) niedrige Abflüsse (< MQ) reduziert	-0,5 %	-0,7 %*	-0,4 %	-0,7 %*	-2,2 %	-3,8 %**	-2,4 %	-4,7 %**	-2,4 %	-4,5 %**
4) Kombination 1) und 3)	0,3 %	-0,8 %*	0,8 %	-0,9 %*	2,3 %	-4,4 %**	0,5 %	-5,1 %**	0,5 %	-4,9 %**
Legende	* Mindererzeugung zwischen 0,5 % und 2,5 % ** Mindererzeugung größer 2,5 %									

Hochwasserzunahmen wesentlich empfindlicher. Die jeweiligen wasserbaulichen Gegebenheiten, die Maschinenausstattung und vor allem das hydrologische Regime bestimmen den Einzelfall.

**3.3 Veränderungen im Abflussregime**

Weniger Schneefall im Winter und eine frühere Schneeschmelze im Frühjahr werden zu einer Vorverlagerung der Abflüsse im Jahr führen. Exemplarisch hierfür wurde ein aus dem GLOWA-Projekt übernommenes Szenario für den Hochrhein und den Lech angesetzt [9]. Für beide Anlagen ergibt sich ein Abflusszuwachs und eine um ca. 2,5 % größere Energieerzeugung (Tabelle 3).

In den deutschen Mittelgebirgen sind die Aussagen der Klimamodellierungen uneinheitlicher. Daher wurden aus einer Kette von Szenarien, die die BfG für den Main publiziert hat, zwei ausgeprägte Jahresgänge ausgewählt. Das Szenario „BfG REMO“ beinhaltet eine außergewöhnliche Abflusszunahme in Höhe von 24 % [10]. Die Beispielanlage am Main erzeugt damit allerdings nur geringfügig mehr Energie.

Das Szenario „BfG STAR“ enthält ein um ca. 10 % geringeres MQ [10]. Es ergeben sich Energieeinbußen in ähnlicher Größenordnung.

**4 Anpassungsmöglichkeiten der Wasserkraftanlagen**

Die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) unterscheidet Auswirkungen der Klimaänderungen auf die erneuerbaren Energien hinsichtlich Ertrag und Sicherheit der Anlagen [11]. Im Folgenden werden fünf grundsätzliche Maßnahmen hinsichtlich der Energieerzeugung vorgestellt.

**4.1 Beeinflussung der Abflüsse und des hydrologischen Regimes**

Veränderungen des Abflussregimes lassen sich durch eine veränderte Wasserspeicherung zumindest teilweise ausgleichen.

Speicherkraftwerke steigern die Wertigkeit der EE, indem bedarfsorientiert Strom erzeugt werden kann. Sie lassen sich ökonomisch insbesondere bei großen Fallhöhen realisieren. Damit wird jedoch der Einfluss dieser Maßnahmen auf die Gesamterzeugung der deutschen Wasserkraftwerke begrenzt sein, denn nur ein Teil der Wasserkraftressourcen verfügt über das notwendige Gefälle und die erforderlichen Eingriffe in die Landschaft sind meist sehr groß.

**4.2 Veränderung der Kraftwerksauslegung**

Eine Erhöhung des Ausbaugrades steigert die Energieausbeute aus Wasserkraftanlagen. Wird dieser weitere Ausbau an bestehenden Standorten vorgenommen, passen sich Wasserkraftanlagen auch an ungünstig veränderte Abflussregime an. Voraussetzung ist jedoch, dass die Anlagen nach ihrer Erweiterung auch im Teillastbereich mit hohem Wirkungsgrad arbeiten.

Mindererzeugungen durch geringere Abflüsse oder ein ungünstigeres Abflussverhalten können durch Erhöhung der Fallhöhe kompensiert werden. In der Regel stehen dem jedoch enge topographische, bauliche, technische und ökologische Grenzen entgegen.

**4.3 Verbesserung der maschinellen Ausrüstung, Automatisierung und Optimierung betrieblicher Abläufe**

Die Energieausbeute aus Wasserkraftanlagen kann durch Verbesserung der Maschinenwirkungsgrade erhöht werden. Auch bei hoch entwickelten Maschinenwirkungsgraden lassen sich insbesondere bei großen

Wasserkraftanlagen durch neue Laufräder etc. erhebliche Verbesserungen erzielen.

Die Erhöhung des Ausbaugrades führt zwangsläufig zur Verlängerung der Zeiten, in denen die Standorte im Teillastbetrieb gefahren werden. Daher ist nicht nur der maximale Wirkungsgrad, sondern ein möglichst optimaler Verlauf der Wirkungsgradkurve bei unterschiedlicher Beaufschlagung von Bedeutung. Um dies zu erreichen, müssen entsprechende Turbinentypen eingesetzt oder ein optimierter Staffelpbetrieb mit mehreren Maschinensätzen vorgesehen werden.

Bei kleinen Wasserkraftanlagen besteht ein Verbesserungspotenzial um 10 bis 15 % v. a. durch den Einsatz automatischer Steuerungen und Rechenreinigungsmaschinen. Im gleichen Sinn wirken Verbesserungen im Anlagenmanagement: automatische Wehre, Einlauf- und Spülschütze vermindern händische Arbeit und Stillstandszeiten.

**4.4 Erhalt der Wertigkeit der erzeugten Energie durch Planbarkeit**

Der Zufluss – nicht die Nachfrage – bestimmt die Energieerzeugung. Deshalb sind Kenntnis und Planbarkeit des hydrologischen Systems unerlässlich. Der mittlere Jahresgang ist standortbezogen bekannt, im Tagesbereich lassen sich gute Voraussagen machen. Niedrigwasserabflüsse kündigen sich allmählich an. Auch Hochwasserabflüsse sind vorhersehbar, insbesondere wenn für Flussgebiete kooperativ Mess-, Vorhersage- und Warnsysteme weiter ausgebaut werden. Mit ihnen können die Netzintegration des erzeugten Stroms und die Substitution von konventioneller Erzeugung verbessert werden.

**4.5 Verringerung der Betriebsrisiken und Sicherung von Wasserkraftanlagen**

Wasserkraftanlagen unterliegen standortbedingt in aller Regel großen Hoch-

**Tab. 3: Szenarien mit verändertem Abflussregime und daraus berechneten Änderung des mittleren Abflusses DMQ und mittleren langjährigen Energieerzeugung DW der Wasserkraftanlagen**

Variation nach GLOWA bzw. KLIWA	Hochrhein		Lech		Main-Mündung		Main-Oberlauf 2*Kaplan		Main-Oberlauf 1*Francis	
	DMQ	DW	DMQ	DW	DMQ	DW	DMQ	DW	DMQ	DW
GLOWA Vorverlagerung	1,2 %	2,6 %	1,2 %	2,6 %	–	–	–	–	–	–
BfG REMO	–	–	–	–	24,3 %	3,2 %	24,4 %	6,4 %	24,4 %	6,3 %
BfG STAR	–	–	–	–	-10,1 %	-8,6 %**	-9,7 %	-7,5 %**	-9,7 %	-12,2 %**
Legende	* Mindererzeugung zwischen 0,5 % und 2,5 %									
	** Mindererzeugung größer 2,5 %									

wasserrisiken und sind daher auf diese geeignet vorbereitet. Klimaänderungen werden absehbar zu höheren Sicherheitsanforderungen führen. Eventuell nötige Nachrüstungen gefährden u. U. die Wirtschaftlichkeit.

Es wird empfohlen neben dem baulichen Hochwasserschutz auch die Verhaltensvorsorge zu fördern. Der Betrieb der Anlagen und der Wehre sollte umsichtig und vorausschauend erfolgen. Auch können Synergien erschlossen werden, indem andere Planungen, z. B. für den Talsperrenbetrieb oder die Errichtung von Retentionsmaßnahmen, koordiniert werden.

## 5 Zusammenfassung

Das Klima hat wie dargestellt einen erheblichen Einfluss auf die Energieerzeugung und die Ertragssituation der Wasserkraft. Auf der Basis der bisher vorliegenden Berechnungen wird in Deutschland allge-

mein für die nähere Zukunft mit einer Mindererzeugung aus Wasserkraft um 1 bis 4 %, für die fernere Zukunft von bis zu 15 % gerechnet.

Exemplarische Simulationsrechnungen für ausgewählte Wasserkraftanlagen am Hochrhein, Lech und Main zeigen, dass deren Ertrag sehr sensitiv auf Schwankungen des Wasserdargebots reagiert. Je nach Szenario ergeben sich Veränderungen der Energieerzeugung von +9 % bis -9 %.

Um mögliche Mindererzeugungen der Wasserkraft zu kompensieren oder gering zu halten, empfiehlt es sich, die vorhandenen Möglichkeiten zur Optimierung der Anlagen zu nutzen. Zur Steigerung der Wertigkeit der erneuerbaren Energie Wasserkraft wird empfohlen, die im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien bessere Vorhersagbarkeit weiter aufzuwerten und kontinuierlich betriebene Vorhersagemodelle weiter zu entwickeln.

Ulrich Wolf-Schumann and Ulrich Dumont

### The Influence of Climate Change on the Use of Hydro Power in Germany

Climate Change has a high influence on the energy production and the earning of hydro power plants. On basis of the existing evaluations there will be a minor production of hydro power in Germany. In the near future the production will decrease about 1 to 4 % and in the further future about 15 %. Computer simulations for selected water-power plants at the rivers Rhine, Lech and Main demonstrate that their earning responses sensitively to variabilities of water supply. According to the circumstances the variability balances from +9 % to -9 %. To counterbalance possible minor productions of hydro power it is recommended to use the existent potential to optimize the plants and to improve operation and maintenance.

Ульрих Вольф-Шуманн и Ульрих Дюмо

### Влияние изменений климата на использование гидроэнергии в Германии

В отдельном подпроекте „Климат и гидроэнергия“ проекта Министерства экологии, защиты природы и обеспечения безопасности ядерных реакторов (BMU) под названием „Гидроэнергетический потенциал в Германии“, а также в исследовании „Эффективные меры и критерии по улучшению экологического состояния гидроэлектростанций“, проведенном для федерального Ведомства по экологии, осуществлялось изучение развития производства гидроэлектроэнергии в аспекте связи с ожидаемыми изменениями климата. На переднем плане была постановка вопроса, увеличатся или уменьшится выработка гидроэлектроэнергии, и насколько надежной, планируемой и безаварийной будет получение энергии с использованием водных ресурсов в Германии в будущем. Исследовались, прежде всего, гидроэлектростанции на незарегулированном стоке в южных федеральных землях.

## Autoren

### Dipl.-Ing. Ulrich Wolf-Schumann

Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH  
Bachstraße 62-64  
52066 Aachen  
u.wolf-schumann@hydrotec.de

### Dipl.-Ing. Ulrich Dumont

Ingenieurbüro Floecksmühle  
Bachstraße 62-64, 52066 Aachen  
ib@floecksmuehle.com

## Literatur

- [1] Pachauri, R. K.; Reisinger, A. (Hrsg.): Climate Change 2007. Synthesis Report. (IPCC Fourth Assessment Report (AR4). Genf, 2007.
- [2] Rudolf, B.; Becker, P.; Heinrich, H.: Klimaszenarien für Schifffahrt und Wasserstraßen. Vortrag im Rahmen der 1. KLIWAS-Statuskonferenz am 18. und 19. März 2009, Bonn.
- [3] DWD: www.dwd.de (April 2010).
- [4] LUBW, BLFU, LUWG, DWD (Hrsg.): 3. KLIWA-Symposium am 25./26.10.2006 in Stuttgart. Fachvorträge. Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. In: KLIWA-Berichte (2006), Heft 10 (www.kliwa.de).
- [5] Kuhn, M.; Olefs, M.: StartClim2007.E. Auswirkung von Klimaänderungen auf das Abflussverhalten von vergletscherten Einzugsgebieten im Hinblick auf Speicherkraftwerke. Wien: IMG1, 2007 (www.austroclim.at/fileadmin/user\_upload/reports/StCl07E.pdf; Stand: 10.03.2010)
- [6] Koch, F.; Reiter, A.; Bach, H.: Teilprojekt Hydrologie/Fernerkundung. Auswirkungen des Klimawandels auf die Energiegewinnung aus Wasserkraft und auf die Talsperrenbewirtschaftung. In: LMU (Hrsg.): Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. München: LMU, 2010.
- [7] Belz, J. W. u. a. (Hrsg.): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert. Analyse, Veränderungen, Trends. In: Schriftenreihe der KHR. Koblenz: Lelystad, 2007.
- [8] BMU (Hrsg.): Potenzialermittlung für den Ausbau der Wasserkraftnutzung in Deutschland als Grundlage für die Entwicklung einer geeigneten Ausbaustrategie. (Veröffentlichung in Vorbereitung).
- [9] Maurer, W.: Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. München: LMU, 2006.
- [10] Krahe, P. et al.: Wirkungsabschätzung von Unsicherheiten der Klimamodellierung in Abflussprojektionen. Auswertung eines Multimodell-Ensembles für das Rheingebiet. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 53 (2009), Heft 5, S. 316-331.
- [11] BMU (Hrsg.): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Beschluss des Bundeskabinetts am 17. Dezember 2008.
- [12] UBA (Hrsg.): Effiziente Maßnahmen und Kriterien zur Verbesserung des ökologischen Zustands an Wasserkraftanlagen. FKZ 3708 97 200 (Veröffentlichung in Vorbereitung).
- [13] Anderer, P.; Dumont, U.; Heimerl, S.; Ruprecht, A. und Wolf-Schumann, U.: Das Wasserkraftpotenzial in Deutschland. In: Wasserwirtschaft 100 (2010), Heft 9, S. 12.