

TEXTE

23/2012

# Abschätzung möglicher Klimafolgen für die Wasserkraftnutzung in Deutschland und Aufstellung von Anpassungsstrategien

Schlussbericht zu Teilprojekt 3

Kurzfassung



UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES  
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,  
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 3708 97 200  
UBA-FB 001604

## **Effiziente Maßnahmen und Kriterien zur Verbesserung des ökologischen Zustands an Wasserkraftanlagen**

**Wasserkraft als erneuerbare Energie**

## **Schlussbericht zu Teilprojekt 3 Abschätzung möglicher Klimafolgen für die Wasserkraftnutzung in Deutschland und Aufstellung möglicher Anpassungsstrategien**

**Kurzfassung**

von

**Ulrich Wolf-Schumann**  
Hydrotec - Ing.-Ges. für Wasser und Umwelt mbH, Aachen

**Ulrich Dumont**  
Ingenieurbüro Floecksmühle, Aachen

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

**UMWELTBUNDESAMT**

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter <http://www.uba.de/uba-info-medien/4288.html> verfügbar. Hier finden Sie eine Langfassung und weitere Berichte.

Die in der Studie geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

ISSN 1862-4804

|                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                     |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Durchführung<br>der Studie: | Ingenieurbüro Floecksmühle<br>Bachstraße 62-64<br>52066 Aachen                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Hydrotec<br>Ing.-Ges. für Wasser und Umwelt mbH<br>Bachstraße 62-64<br>52066 Aachen |
| Abschlussdatum:             | November 2010                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                                                                                     |
| Herausgeber:                | Umweltbundesamt<br>Wörlitzer Platz 1<br>06844 Dessau-Roßlau<br>Tel.: 0340/2103-0<br>Telefax: 0340/2103 2285<br>E-Mail: <a href="mailto:info@umweltbundesamt.de">info@umweltbundesamt.de</a><br>Internet: <a href="http://www.umweltbundesamt.de">http://www.umweltbundesamt.de</a><br><a href="http://fuer-mensch-und-umwelt.de/">http://fuer-mensch-und-umwelt.de/</a> |                                                                                     |
| Redaktion:                  | Fachgebiet II 2.4 Binnengewässer<br>Stephan Naumann                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                     |

Dessau-Roßlau, Mai 2012

## Inhaltsverzeichnis

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1 Vorwort .....                                                                                              | 1  |
| 2 Klimamodelle .....                                                                                         | 1  |
| 3 Stand der Forschung zu Wasserkraft und Klimawandel .....                                                   | 4  |
| 3.1 GLOWA Danube .....                                                                                       | 4  |
| 3.2 WASKlim .....                                                                                            | 5  |
| 3.3 KLIWA .....                                                                                              | 5  |
| 3.4 KLIWAS .....                                                                                             | 5  |
| 3.5 Aussagen der vorliegenden Untersuchungen .....                                                           | 6  |
| 4 Szenarienrechnungen an Beispielanlagen .....                                                               | 7  |
| 4.1 Veränderung Halbjahresniederschläge .....                                                                | 9  |
| 4.2 Ausgeprägtere Abflussextrema .....                                                                       | 10 |
| 4.3 Veränderungen im Abflussregime .....                                                                     | 12 |
| 5 Anpassungsmöglichkeiten der Wasserkraftanlagen .....                                                       | 13 |
| 5.1 Beeinflussung der Abflüsse und des hydrologischen Regimes .....                                          | 13 |
| 5.2 Veränderung der Kraftwerksauslegung .....                                                                | 14 |
| 5.3 Verbesserung der maschinellen Ausrüstung, Automatisierung und<br>Optimierung betrieblicher Abläufe ..... | 14 |
| 5.4 Erhalt der Wertigkeit der erzeugten Energie durch Planbarkeit .....                                      | 15 |
| 5.5 Verringerung der Vulnerabilität und Sicherung der Wasserkraftanlagen .....                               | 15 |
| 6 Zusammenfassung .....                                                                                      | 16 |
| 7 Literatur .....                                                                                            | 16 |



## 1

## Vorwort

Die Studie „Wasserkraft als erneuerbare Energie“ gliedert sich in drei Teilprojekte

- Teilprojekt 1:  
Methodik für die Erfassung und Bewertung von Fischwanderbewegungen an Wasserkraftanlagen.
- Teilprojekt 2:  
Aktualisierung des Wissensstandes in Bezug auf wasserrechtliche Regelungen und umgesetzte Maßnahmen an Wasserkraftanlagen.
- Teilprojekt 3:  
Abschätzung möglicher Klimafolgen für die Wasserkraftnutzung in Deutschland und Aufstellung möglicher Anpassungsstrategien.

In der vorliegenden Kurzfassung zu Teilprojekt 3 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 Laufwasserkraftwerke in den südlichen Bundesländern.

## 2

## 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. Abb. 2-1 stellt damit berechnete Klimaprojektionen von 1901 bis 2100 dar und zeigt eindeutig erheblich ansteigende Temperaturen jedoch eher indifferente Entwicklungen der Niederschläge bis 2100.

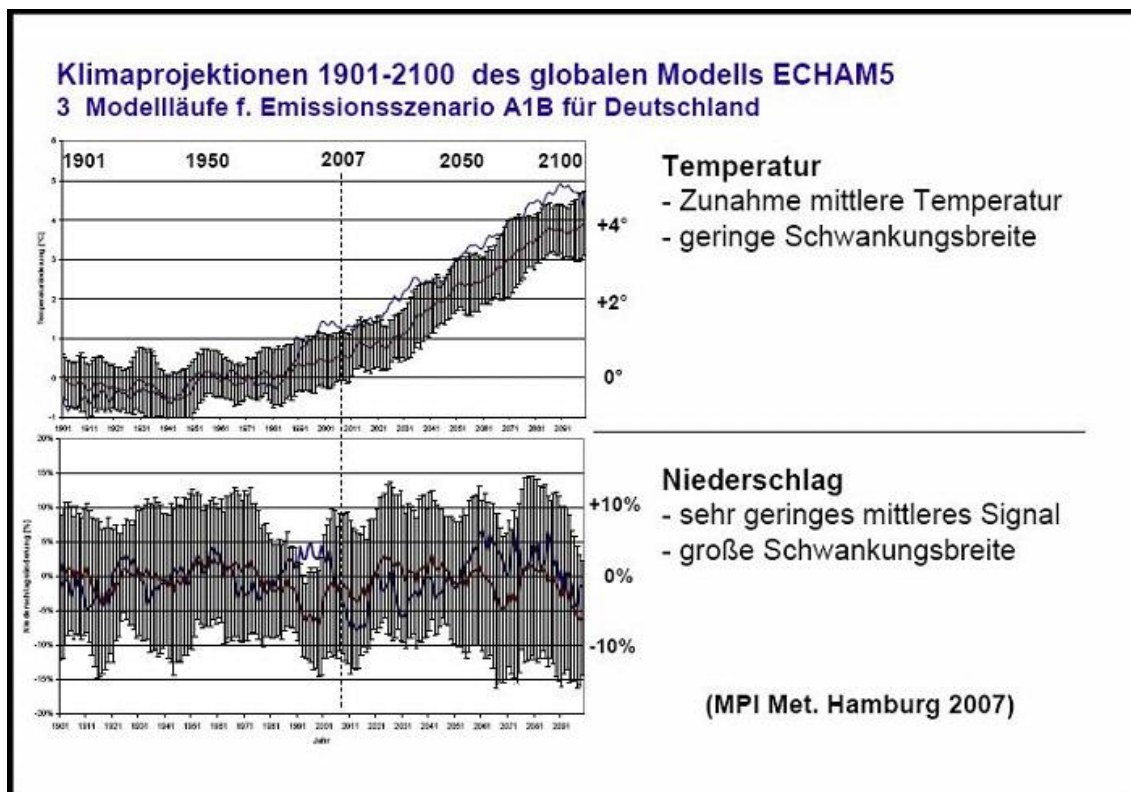


Abb. 2-1: Klimaprojektion 1901 - 2100 des Globalmodells ECHAM5. Emissionsszenario A1B (Quelle: KLIWAS)

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 (Abb. 2-2). Dabei ist die Temperaturänderung im Vergleich der Verfahren fast einheitlich, während die Änderung in der Niederschlagsmenge (Abb. 2-3) 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, während 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.

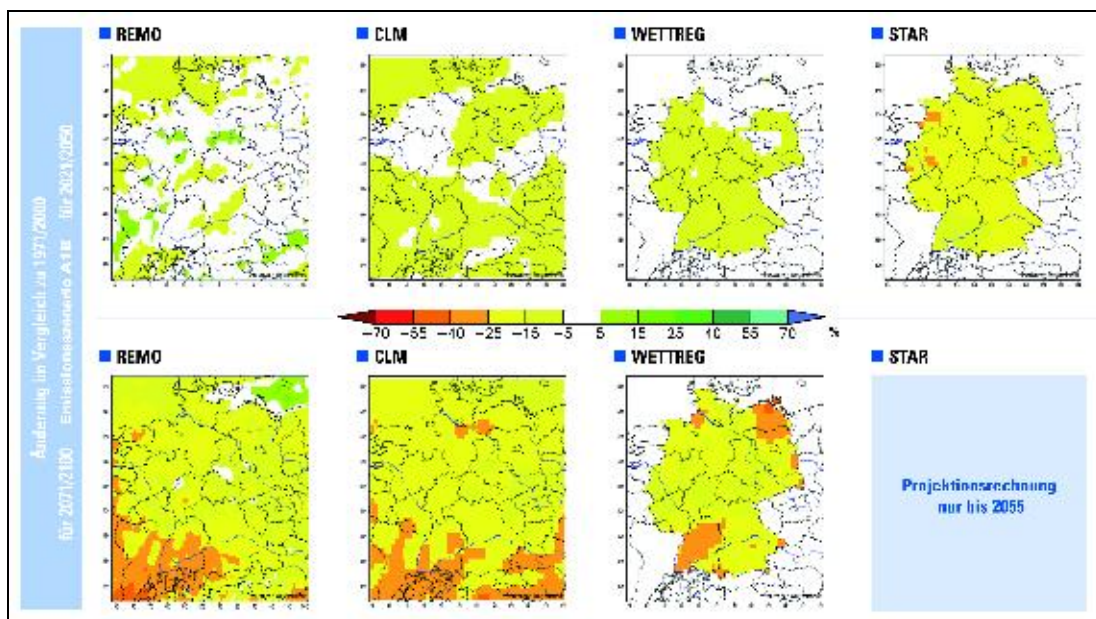


Abb. 2-2: Vergleich der Ergebnisse von 4 regionalen Klimamodellen für Deutschland. Sommerniederschläge für die nahe und ferne Zukunft (Quelle: DWD).

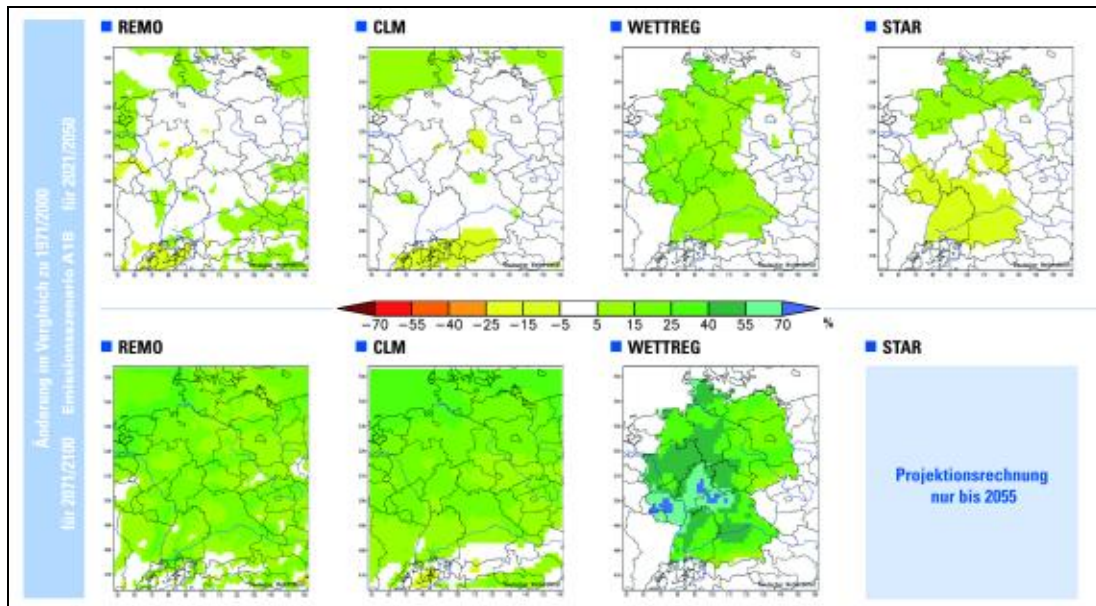


Abb. 2-3: Vergleich der Ergebnisse für Deutschland von 4 regionalen Klimamodellen. Winterniederschläge für die nahe und ferne Zukunft (Quelle: DWD).

## 3

## Stand der Forschung zu Wasserkraft und Klimawandel

Einige Untersuchungen der Klimafolgenforschung in Deutschland haben sich entweder explizit mit der Wasserkraft befasst oder liefern Aussagen zu der Entwicklung der Abflüsse.

## 3.1

### GLOWA Danube

Im Projekt GLOWA Danube (Globaler Wandel des Wasserkreislaufes, gefördert durch BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung), StMWFK (Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst), LMU München Ludwig-Maximilians-Universität München und MWK Baden Württemberg (Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst 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].

### 3.2

#### WASKlim

Das Projekt WASKlim, unter dem Titel „Entwicklung eines übertragbaren Konzeptes zur Bestimmung der Anpassungsfähigkeit sensibler Sektoren an den Klimawandel am Beispiel der Wasserwirtschaft“, hat im Auftrag des 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 Rückgang des mittleren Abflusses MQ von 16 %.

### 3.3

#### KLIWA

Das Projekt KLIWA der Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie der 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 und Wasserhaushaltsmodelle mehrfach erweitert und Aussagen zum künftigen Wasserdargebot wurden indifferenter. Wenige Aussagen zur Wasserkraft nennen für den Alpenraum einen Rückgang der Energieerzeugung um 7 % [4].

### 3.4

#### KLIWAS

Das vom Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung beauftragte Forschungsprogramm KLIWAS soll die Folgen des Klimawandels auf Wasserstraßen und die Schifffahrt ermitteln. Ergebnisse zum Abflussregime der Bundeswas-

serstraßen, 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 liefern nutzbare Ausgangsdaten.

### 3.5

#### 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 indifferent, in der zweiten 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.

Abb. 3-1 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 indifferent.

- An der Donau wird im Zeitraum 2011 - 2035 von einem Rückgang der Energieproduktion zwischen 1 und 4 % und für 2036 - 2060 um 9 bis 15 % im Vergleich zum Referenzzeitraum (1971 - 2000) ausgegangen [6].

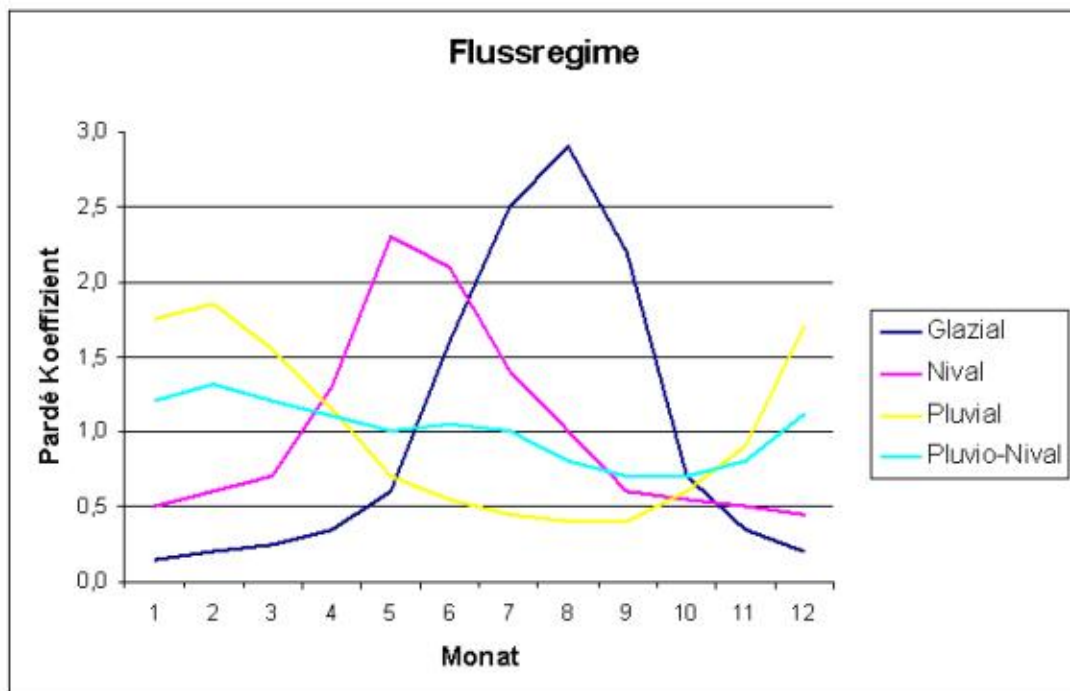


Abb. 3-1: Hydrologische Flussregime in Deutschland (Verändert nach BELZ et al. 2007)

|              |                                                      |
|--------------|------------------------------------------------------|
| glazial      | von Gletscherschmelzprozessen beeinflusst            |
| nival        | von Schneeniederschlägen beeinflusst                 |
| nivo-pluvial | sowohl durch Schnee als auch durch Regen beeinflusst |
| pluvial      | von Regen beeinflusst                                |

4

## Szenarienrechnungen an Beispielanlagen

Im Rahmen der Forschungsprojekte [8] 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.

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: Wasserkraftanlage (WKA) am Hochrhein zwischen Bodensee und Basel mit nival-glazialem 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 Ausbauzufluss 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 pluvialem 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 Ausbauzufluss 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 Ausbauzufluss 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. Sie wurden wie oben beschrieben modifiziert oder wie es die vorliegenden Szenarien aus anderen Klima-Projekten, v. a. GLOWA-Danube und KLIWAS, als möglich erwarten lassen.

Abb. 4-1 zeigt die Ganglinie der Energieerzeugung des Referenzlaufs 1961 - 2003, Tageswerte 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 aus. Sowohl Winter- wie Sommerhalbjahr entsprachen in etwa dem langjährigen MQ.

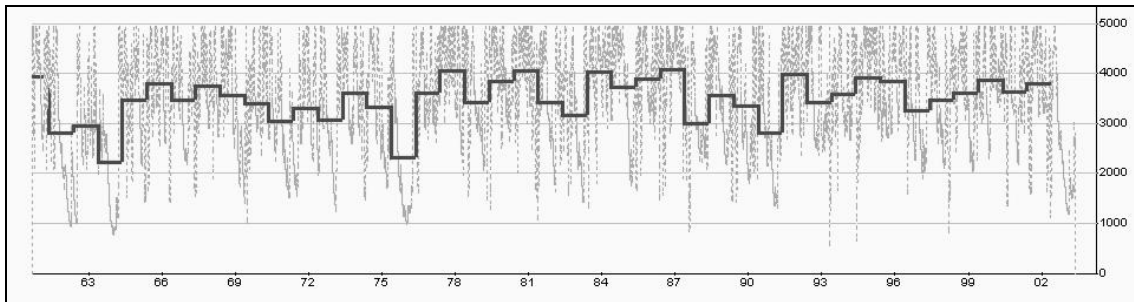


Abb. 4-1: Berechnete Energieerzeugung einer Beispielanlage für den Zeitraum 1961 – 2003 (Tageswerte und Jahresmittel) [8]

## 4.1

### 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 Abb. 2-1 und Abb. 2-2 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 Nie-

derschlagsdargebots im Winter vollständig und im Sommer etwa hälftig als Abflussänderung 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 (Tab. 4-1).

Tab. 4-1: Szenarien mit veränderten Halbjahresniederschlägen und der daraus berechneten Änderung des mittleren Abflusses DMQ und mittleren langjährigen Energieerzeugung DW der WKA

|                                | Hochrhein |        | Lech   |        | Main<br>Mündung |        | Main Oberlauf<br>2 * Kaplan |        | Main Oberlauf<br>1 * Francis |        |
|--------------------------------|-----------|--------|--------|--------|-----------------|--------|-----------------------------|--------|------------------------------|--------|
| Variation<br>Niederschlag      | DMQ       | DW     | DMQ    | DW     | DMQ             | DW     | DMQ                         | DW     | DMQ                          | DW     |
| Sommer Nieder-<br>schlag -10 % | -2,9 %    | -1,5 % | -3,0 % | -2,4 % | -1,7 %          | -1,5 % | -1,6 %                      | -1,7 % | -1,6 %                       | -2,2 % |
| Winter Nieder-<br>schlag -10 % | -5,0 %    | -3,4 % | -5,2 % | -5,0 % | -6,0 %          | -1,1 % | -6,1 %                      | -1,3 % | -6,1 %                       | -2,0 % |
| Winter Nieder-<br>schlag +10 % | 5,0 %     | 2,7 %  | 5,2 %  | 4,5 %  | 6,0 %           | 0,7 %  | 6,2 %                       | 0,8 %  | 6,2 %                        | 1,3 %  |

Szenarien mit verändertem Abflussregime und daraus berechneten Änderung des mittleren Abflusses DMQ und mittleren langjährigen Energieerzeugung DW der WKA

□ = Mindererzeugung zwischen 0,5 % und 2,5 %

■ = Mindererzeugung größer 2,5 %

## 4.2

### Ausgeprägtere Abflussextrema

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



- Alle Abflüsse, die größer als das im Durchschnitt zweimal jährlich auftretende Hochwasser sind, wurden pauschal um 25 % erhöht. Bei einer 50-jährigen Reihe werden somit 100 Hochwasserereignisse erhöht.
- Wie 1. aber die Abflussreihe wurde soweit reduziert, 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 (Tab. 4-2). Die Anlage am Main reagiert sowohl auf Niedrigwasser als auch auf Hochwasserzunahmen wesentlich empfindlicher. Die jeweiligen wasserbaulichen Gegebenheiten, die Maschinenausstattung und vor allem das hydrologische Regime bestimmen den Einzelfall.

Tab. 4-2: Szenarien mit veränderten Extrema und der daraus berechneten Änderung des mittleren Abflusses DMQ und mittleren langjährigen Energieerzeugung DW der WKA

|                                           | Hochrhein |        | Lech   |        | Main Mündung |        | Main Oberlauf 2 * Kaplan |        | Main Oberlauf 1 * Francis |        |
|-------------------------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------------|--------|--------------------------|--------|---------------------------|--------|
| Variation Extrema                         | 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 % |

Szenarien mit verändertem Abflussregime und daraus berechneten Änderung des mittleren Abflusses DMQ und mittleren langjährigen Energieerzeugung DW der WKA

□ = Mindererzeugung zwischen 0,5 % und 2,5 %

■ = Mindererzeugung größer 2,5 %

### 4.3

#### Veränderungen im Abflussregime

Weniger Schneefall im Winter und frühere Schneeschmelze im Frühjahr werden zu einer Vorverlagerung der Abflüsse im Jahr führen. Exemplarisch hierfür wurde ein aus dem GLOWA-Projekt übernommene Szenario für den Hochrhein und den Lech angesetzt [9]. Für beide Anlagen ergibt sich ein Abflusszuwachs und eine um ca. 2,5 % größere Energieerzeugung (Tab. 4-3).

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, 2 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 (gemäß [10]). Es ergeben sich Energieeinbußen in ähnlicher Größenordnung.

Tab. 4-3: Szenarien mit veränderten Abflussregime und der daraus berechneten Änderung des mittleren Abflusses DMQ und mittleren langjährigen Energieerzeugung DW der WKA

|                                 | Hochrhein |       | Lech  |       | Main Mündung |        | Main Oberlauf 2 * Kaplan |        | Main Oberlauf 1 * Francis |         |
|---------------------------------|-----------|-------|-------|-------|--------------|--------|--------------------------|--------|---------------------------|---------|
|                                 | DMQ       | DW    | DMQ   | DW    | DMQ          | DW     | DMQ                      | DW     | DMQ                       | DW      |
| Variation nach GLOWA bzw. KLIWA |           |       |       |       |              |        |                          |        |                           |         |
| 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 % |

Szenarien mit verändertem Abflussregime und daraus berechneten Änderung des mittleren Abflusses DMQ und mittleren langjährigen Energieerzeugung DW der WKA

■ = Mindererzeugung größer 2,5 %

## 5

### Anpassungsmöglichkeiten der Wasserkraftanlagen

Die DAS (Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel) 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.

#### 5.1 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 wird. Sie lassen sich ökonomisch bei großen Fallhöhen realisieren. Jedoch wird der Einfluss dieser Maßnahmen auf die Gesamterzeugung der deutschen Was-

Wasserkraftwerke begrenzt sein, denn nur ein Teil Wasserkraftressourcen hat das notwendige Gefälle und die erforderlichen Eingriffe in die Landschaft sind sehr groß.

## 5.2 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 und technische Grenzen entgegen.

## 5.3

### 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 WKA durch neue Laufräder 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 von Bedeutung. Um dies zu erreichen müssen entsprechende Turbinentypen eingesetzt oder ein optimierter Staffelbetrieb mit mehreren Maschinensätzen vorgesehen werden.

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

## 5.4

## 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.

## 5.5

## Verringerung der Vulnerabilität und Sicherung der Wasserkraftanlagen

Wasserkraftanlagen unterliegen standortbedingt in aller Regel großen Hochwasserrisiken. Klimaänderungen bedeuten keine grundsätzliche Veränderung der Vulnerabilität, können gleichwohl die Sicherheitsanforderungen anheben und bei der Nachrüstung bestehender Anlagen Grenzen der Wirtschaftlichkeit überschreiten.

Es wird empfohlen, Synergiepotenziale bei der Bewirtschaftung und Nutzung der Gewässer auszuschöpfen. So sollte bei baulichen Maßnahmen eine entsprechende Vorsorge getroffen und das Verhalten von Investoren an die Anforderungen durch den Klimawandel angepasst werden.

Positive Synergieeffekte für die Wasserkraft ergeben sich beispielsweise, wenn der Hochwasserrückhalt verbessert und eine Talsperrenbewirtschaftung z.B. neben dem Ziel der Wasserversorgung auf eine angepasste Abflussregelung ausgerichtet wird.

## 6

## Zusammenfassung

Das Klima hat einen erheblichen Einfluss auf die Energieerzeugung und Ertragssituation der Wasserkraftenergie. Auf der Basis der bisher vorliegenden Berechnungen wird in Deutschland allgemein 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 Wasserkraftanlage 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 EE Wasserkraft wird empfohlen, die im Vergleich zu anderen EE bessere Vorhersagbarkeit weiter aufzuwerten und kontinuierlich betriebene Vorhersagemodelle weiter zu entwickeln.

## 7

## Literatur

- [1] Pachauri, R. K.; Reisinger, A. (Hrsg.): Climate Change 2007. Synthesis Report. (IPCC Fourth Assessment Report (AR4). Genf, Schweiz: IPCC, 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 in Bonn.
- [3] DWD: Downloads im April 2010 von [www.dwd.de](http://www.dwd.de).
- [4] LUBW, BLfU, LUWG, DWD (Hrsg.): 3. KLIWA-Symposium am 25. Und 26.10.2006 in Stuttgart. Fachvorträge. Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. KLIWA-Berichte, Heft 10. Karlsruhe: E&B, 2006.

- [5] Kuhn, M.; Olefs, M: StartClim2007.E. Auswirkung von Klimaänderungen auf das Abflussverhalten von vergletscherten Einzugsgebieten im Hinblick auf Speicherkraftwerke. Wien: IMGI, 2007.  
Abrufbar unter:  
[http://www.austroclim.at/fileadmin/user\\_upload/reports/StCI07E.pdf](http://www.austroclim.at/fileadmin/user_upload/reports/StCI07E.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 (Hg.): 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. Schriftenreihe der KHR. Koblenz, Lelystad, 2007 (S. 377).
- [8] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (Hg.): Potenzialermittlung für den Ausbau der Wasserkraftnutzung in Deutschland als Grundlage für die Entwicklung einer geeigneten Ausbaustrategie. Veröffentlichung in Vorbereitung.
- [9] Maurer, Wolfram: Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. München: LMU, 2006.
- [10] Krahe, P u a.: Wirkungsabschätzung von Unsicherheiten der Klimamodellierung in Abflussprojektionen. Auswertung eines Multimodell-Ensembles für das Rheingebiet. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 53, 5, 2009, S. 316 - 331.
- [11] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Beschluss des Bundeskabinetts am 17. Dezember 2008.
- [12] UBA (Hg.): Effiziente Maßnahmen und Kriterien zur Verbesserung des ökologischen Zustands an Wasserkraftanlagen. FKZ 3708 97 200. Veröffentlichung in Vorbereitung.