TEXTE
23/2012

Klimafolgen für die Wasserkraftnutzung in Deutschland und Aufstellung von Anpassungsstrategien

Umwelt Bundes Amt
Für Mensch und Umwelt

| TEXTE | 23/2012

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungskennzahl 3708 97 200
UBA-FB 001604

Klimafolgen für die Wasserkraftnutzung in Deutschland und Aufstellung von Anpassungsstrategien

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 Kurzfassung und weitere Berichte.

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

ISSN 1862-4804

Durchführung der Studie:

Ingenieurbüro Floecksmühle
Bachstraße 62-64
52066 Aachen

Hydrotec
Ing.-Ges. für Wasser und Umwelt mbH
Bachstraße 62-64
52066 Aachen

Abschlussdatum: November 2010

Herausgeber: Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
E-Mail: info@umweltbundesamt.de
Internet: http://www.umweltbundesamt.de
http://fuer-mensch-und-umwelt.de/

Redaktion: Fachgebiet II 2.4 Binnengewässer
Stephan Naumann

Dessau-Roßlau, Mai 2012

Inhaltsverzeichnis

1 Glossar und Abkürzungsverzeichnis 1

2 Vorwort 2

3 Zielsetzung und Aufgabenstellung 4

4 Klimaprojekte in Deutschland 6

4.1 GLOWA Danube 6

4.2 KLIWA 6

4.3 KLIWAS 7

4.4 WASKlim 7

5 Auswirkungen des Klimas auf die Wasserkraft 8

5.1 Klimamodellierung 8

5.2 Temperatur und Niederschlag 9

5.3 Abflussverhalten 11

5.4 Änderung des Abflussverhaltens durch die Klimaveränderung 12

5.5 Extremereignisse 14

5.6 Auswirkungen der Abflussveränderungen auf die Wasserkraft 15

6 Beispielrechnungen 17

6.1 Szenarien 17

6.1.1 Ausgewählte Standorte 21

6.1.2 Ausgewählte Turbinentypen 21

6.1.3 Ausgewählte Zeitreihen 22

6.2 Beispielanlage 1 am Hochrhein 23

6.2.1 Untersuchungsgebiet Hochrhein 23

6.2.2 Kenndaten der Wasserkraftanlage 1 23

6.3 Beispielanlage 2 am Lech 24

6.3.1 Untersuchungsgebiet Lech.....24

6.3.2 Kenndaten der Wasserkraftanlage 2 25

6.4 Beispielanlage 3a am Main.....27

6.4.1 Kenndaten der Wasserkraftanlage 3a.....27

6.4.2 Beispielanlagen 3b1 und 3b2 am Main 28

6.4.3 Abflussszenarien und WKA.....28

6.5 Ergebnisse der Beispielanlagen 1 bis 3 29

6.5.1 Veränderung der Halbjahresniederschläge.....29

6.5.2 Ausgeprägtere Abflussextrema 31

6.5.3 Veränderungen im Abflussregime 33

6.5.4 Zusammenfassung Szenarienrechnung.....35

7 Anpassung 36

7.1 Mögliche Anpassungsstrategien 36

7.1.1 Abflüsse und das hydrologische Regime.....36

7.1.2 Veränderung der Kraftwerksauslegung.....37

7.1.3 Maschinelle Ausrüstung, Automatisierung und betriebliche Abläufe.....37

7.1.4 Wertigkeit der erzeugten Energie durch Planbarkeit 38

7.1.5 Vulnerabilität und Sicherung der Wasserkraftanlagen.....38

7.1.6 Anpassungsstrategien für die hier betrachteten Anlagen 39

8 Zusammenfassung.....41

9 Ausblick 42

10 Literatur 43

Abbildungsverzeichnis

Abb. 5-1: Klimaprojektion 1901 - 2100 des Globalmodells ECHAM5. Emissionsszenario A1B (Quelle: KLIWAS) 9

Abb. 5-2: Vergleich der Ergebnisse von 4 regionalen Klimamodellen für Deutschland. Sommerniederschläge für die nahe und ferne Zukunft. (Quelle: DWD) 10

Abb. 5-3: Vergleich der Ergebnisse für Deutschland von 4 regionalen Klimamodellen. Winterniederschläge für die nahe und ferne Zukunft. (Quelle: DWD).....11

Abb. 5-4: Hydrologische Flussregime in Deutschland (Quelle: Verändert nach BELZ et al. 2007) 12

Abb. 5-5: Prognostizierter Wandel der saisonalen Abflüsse der Salzach am Pegel Laufen (Quelle: WEBER & PRASCH 2009).....13

Abb. 6-1: Kenndaten WKA 2 am Lech 26

Abb. 6-2: Szenarien mit veränderten Halbjahresniederschlägen und der daraus berechneten Änderung der mittleren langjährigen Energieerzeugung DW der Wasserkraftanlagen.....30

Abb. 6-3: Szenarien mit veränderten Extrema der Abflüsse und der daraus berechneten Änderung der mittleren langjährigen Energieerzeugung DW der Wasserkraftanlagen.....32

Abb. 6-4: Szenarien mit veränderten Abflussregimes und die daraus berechnete Änderung der mittleren langjährigen Energieerzeugung DW der Wasserkraftanlagen.....34

Tabellenverzeichnis

Tab. 5-1: Anteil des nival beeinflussten Linienpotentials der deutschen Gewässer 16

Tab. 6-1: Untersuchte Abflussszenarien.....19

Tab. 6-2: Kenndaten der Beispielanlage 1 am Hochrhein.....24

Tab. 6-3: Kenndaten der Beispielanlage 2 am Lech 26

Tab. 6-4: Szenarien mit veränderten Halbjahresniederschlägen und der daraus berechneten Änderung der mittleren langjährigen Energieerzeugung DW der Wasserkraftanlagen.....29

Tab. 6-5: Szenarien mit veränderten Extrema und der daraus berechneten Änderung der mittleren langjährigen Energieerzeugung DW der Wasserkraftanlagen.....31

Tab. 6-6: Szenarien mit verändertem Abflussregime und daraus berechnete Änderung der mittleren mittleren langjährigen Energieerzeugung DW der Wasserkraftanlagen.....33

1
Glossar und Abkürzungsverzeichnis

Begriff/Abkürzung	Bedeutung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BMVBS	Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
EZG	Einzugsgebiet
Evapotranspiration	Summe aus Transpiration (Verdunstung von Pflanzenoberflächen) und Evaporation (Bodenverdunstung) Transpiration
glazial	von Gletscherschmelzprozessen beeinflusst
LMU München	Ludwig-Maximilians-Universität München
MQ	Mittlerer jährlicher Abfluss
MWK Baden-Württemberg	Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg
nival	von Schneeniederschlägen beeinflusst
nivo-pluvial	sowohl durch Schnee als auch durch Regen beeinflusst
pluvial	von Regen beeinflusst
StMWFK	Bayerisches Staatsministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst
UBA	Umweltbundesamt
WKA	Wasserkraftanlage(n)

2 Vorwort

Ausgangslage

In Deutschland gibt es zahlreiche Querbauwerke, die teilweise zur Energieerzeugung aus Wasserkraft genutzt werden. Diese Querverbauungen unterbrechen die Durchgängigkeit der Gewässer, deren Wiederherstellung ein erklärtes Ziel der EG Wasserrahmenrichtlinie ist. Das Wassergesetz (WHG) in der Fassung vom 31.7.2009 formuliert in §34 und §35 die Anforderungen zur Herstellung der Durchgängigkeit und zum Schutz von Fischpopulationen an Wasserkraftanlagen. Während für die Verbesserungen der flussaufwärts gerichteten Durchgängigkeit mittlerweile ein anerkannter und bewährter Stand der Technik genutzt werden kann (vgl. DWA 2010), befinden sich Techniken zum Schutz von Fischen vor dem Eindringen in sie gefährdende Anlagen und zu Abwehreinrichtungen noch in der Entwicklung. Vor dem Hintergrund der aktuellen gesetzlichen Forderung ist daher die Erarbeitung von weiteren Techniken für den Fischschutz und den Fischabstieg eine wichtige Voraussetzung für den Ausbau der Wasserkraftnutzung. Die Wasserkraftnutzung wird neben den aktuellen Anforderungen hinsichtlich der Wiederherstellung der Durchgängigkeit auch von möglichen Abflussveränderungen der Gewässer in Folge des Klimawandels beeinflusst. Für die Sicherstellung der künftigen Wasserkraftnutzung ist die Kenntnis dieser Veränderung von Bedeutung, um ggf. Anpassungsstrategien zu entwickeln.

Projektziel

Das Vorhaben soll die wissenschaftlich-technischen Kenntnisse und die vorliegenden Erfahrungen hinsichtlich Fischschutz- und Fischabstiegsanlagen ermitteln, damit diese für die weitere Entwicklung derartiger Systeme genutzt werden können. Des Weiteren sollen die landesspezifischen Anforderungen an Bau und Betrieb von Wasserkraftanlagen, der Stand der Anlagenausstattung in Bezug auf Fischauf- und Fischabstiegsanlagen und bestehende Mindestabflussregelungen ermittelt werden. Mögliche Anpassungsstrategien der Wasserkraftnutzung an die Veränderungen des Abflussverhaltens der Gewässer infolge des Klimawandels sollen zusammengestellt werden.

Das Vorhaben ist in 3 Teilprojekte gegliedert:

- 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.

Dieser Berichtsteil beinhaltet die Ergebnisse des Teilprojektes 3.

3 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Im Teilprojekt „Klima und Wasserkraft“ wurde die Entwicklung der Energiegewinnung aus Wasserkraft durch die zu erwartenden Klimaveränderungen untersucht. Dabei steht die Fragestellung im Vordergrund, ob die Energieausbeute aus der Wasserkraft zunimmt oder abnimmt. Zudem ist es von Interesse zu ermitteln, inwieweit die Energieerzeugung an deutschen Gewässern in Zukunft verlässlich, planbar und ausfallsicher sein wird.

Nur wenige Untersuchungen der Klimafolgenforschung in Deutschland haben sich bereits explizit mit der Wasserkraft befasst. Häufiger dargestellt werden Aussagen zu den Abflüssen, deren Entwicklung in den kommenden Jahrzehnten bisher allerdings allenfalls ansatzweise vorausgesagt werden kann.

Von besonderem Interesse sind die Bundesländer Bayern und Baden-Württemberg mit hoher Anlagendichte und großem Wasserkraftpotenzial. Daher wurden neben den deutschen Mittelgebirgslandschaften auch die glazial und nival beeinflussten Abflussregime der Alpen betrachtet.

Die Untersuchung beschränkte sich auf Laufwasserkraftwerke, da sie unmittelbar von den Abflüssen in den Gewässern abhängen. Speicherkraftwerke und Pumpspeicheranlagen folgen in Konzeptionierung und Betrieb auch energiewirtschaftlichen Kriterien, im Zusammenhang mit den erneuerbaren Energiequellen Wind und PV mit zunehmender Relevanz.

Bei großen Speichervolumina im Vergleich zum Zufluss besitzen Speicherkraftwerke eine höhere Flexibilität gegenüber Änderungen in der saisonalen Wasserführung der sie speisenden Fließgewässer. Auf Änderungen des Dargebots, die z.B. bei Speichern mit Gletscherzuflüssen wahrscheinlich sind, reagieren sie entsprechend empfindlich. Speicherkraftwerke in Deutschland zeigen grundsätzlich ähnliche Abhängigkeiten von klimatischen Entwicklungen wie Laufwasserkraftwerke.

Zur künftigen Entwicklung der Temperaturen lassen sich aufgrund der physikalischen Kenntnisse und Verfahren vergleichsweise einheitliche Schlüsse ziehen, während der Wasserhaushalt, im Besonderen die Niederschlagsentwicklung, von sehr komplexen meteorologischen Prozessen abhängen. Sie sind daher sowohl in den kurzfristigen Vorhersagen wie in den Klimamodellen mit großen Unsicherheiten behaftet.

Als Teil der Aufgabenstellung soll daher exemplarisch aufgezeigt werden, welche Konsequenzen bei unterschiedlichen Szenarien, die von der Klimaforschung als möglich oder wahrscheinlich angesehen werden, sich für die Wasserkraft ergeben könnten.

Für den Betrieb und ggf. den Ausbau der Wasserkraft sind neben der Menge der erzeugten Energie weitere Aspekte von besonderer Bedeutung. Hochwasser können häufiger oder extremer werden, Wasserkraftanlagen sind entsprechend so auszustatten, dass Hochwasserschäden begrenzt und Betriebsabläufe möglichst unbeeinflusst bleiben. Niedrigwasserentwicklungen sind ebenfalls von Belang, da auch sie Stillstandzeiten der Laufwasserkraftanlagen bedingen.

4 Klimaprojekte in Deutschland

Grundlage der Betrachtung sind laufende Projekte zur Klimaentwicklung in Deutschland, deren Zielsetzungen und bereits publizierte Teilergebnisse im Folgenden zusammengefasst werden.

4.1 GLOWA Danube

Im Projekt GLOWA Danube (Globaler Wandel des Wasserkreislaufes, gefördert durch BMBF, StMWFK, LMU München und MWK Baden Württemberg) wird seit 2001 für verschiedene Szenarien die Einflüsse des Klimawandels, der Bevölkerungsentwicklung und der Landnutzung auf die Wasserressourcen der Oberen Donau untersucht.

Ein Aspekt der Untersuchungen befasst sich mit den Wasserkräften im Donaueinzugsgebiet und berechnet für ein ausgewähltes Klimaszenario den Einfluss auf die Energieerzeugung. Für die nahe Zukunft bis 2035 wurden moderate Rückgänge von knapp 2 % ermittelt, für den Folgezeitraum bis 2060 ergeben sich Mindererzeugungen von ca. 10 %.

4.2 KLIWA

Die Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie der Deutsche Wetterdienst haben bereits 1998 das Kooperationsvorhaben *„Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft"* (KLIWA.de) vereinbart.

Bisher publizierte Ergebnisse und Empfehlungen befassen sich mit den verschiedenen Teilbereichen der Wasserwirtschaft, insbesondere Hochwasserabflüssen (Heft 2), Niedrig- und Mittelwasserabflüssen (Heft 3, 14) und Niederschlägen (Heft 7, 8).

Bedingt durch die bereits über 10-jährige Aktivität hat sich das Spektrum der verwendeten Szenarien, Globalmodelle, Regionalisierungen und Wasserhaushaltsmodellen mehrfach erweitert [BECKER 2009; BARDOSSY 2009]. Aussagen zur Wasserkraft und zum Wasserdargebot zeigen Bandbreiten und definieren weiteren Untersuchungsbedarf.

4.3 KLIWAS

Der Schwerpunkt des vom BMVBS beauftragten Forschungsprogramms KLIWAS ist die Ermittlung der Folgen des Klimawandels auf Wasserstraßen und die Schifffahrt. Ziel ist die Konzeption entsprechender Anpassungsstrategien, um sowohl die Gewässer als Verkehrswege zu sichern, als auch die Gewässerqualität der Flüsse und Küsten zu bewahren. Das Pilotprojekt *„Hydrologie und Binnenschifffahrt"* der BfG läuft seit dem Jahr 2007. 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 möglichst 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. Sie werden voraussichtlich 2011 publiziert.

4.4 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. Dazu wurden unter anderem drei mesoskalige Testgebiete (Iller, Wupper, Salza) hinsichtlich des Wasserhaushalts, des zukünftigen Wasserbedarfs und des ökologischen Gewässerzustandes untersucht.

5 Auswirkungen des Klimas auf die Wasserkraft

5.1 Klimamodellierung

Zur Bestimmung der Veränderungen im Rahmen des Klimawandels bedarf es einer Kette von Szenarien, Modellen und Regionalisierungsverfahren. Globale Klimamodelle berechnen großräumige Änderungen unter Voraussetzung verschiedener Klimaszenarien. Die Ergebnisse dieser Berechnungen werden mittels Regionalisierungsverfahren („Regional Downscaling“) auf kleinere Gebiete übertragen.

Die Klimaszenarien werden nach der Einteilung des SRES 2000 (Special Report on Emissions Scenarios) des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) unterschieden.

Das Szenario A1 geht von einem rapiden globalen Wirtschaftswachstum, einem Wachstum der Bevölkerung mit Höhepunkt in der Mitte des 21. Jahrhunderts und einer raschen Einführung effizienter Technologien aus. Das Szenario A1 ist nochmals in drei Untergruppen unterteilt; A1Fl beschreibt eine Entwicklung unter einseitiger Nutzung fossiler Brennstoffe, A1T setzt den Gebrauch nicht fossiler Energieträger voraus. Im Szenario A1B ist das Verhältnis ausgeglichen.

Das Szenario B1 rechnet mit einer homogenen, zusammenwachsenden Welt, sowie einer stärkeren Verlagerung der Wirtschaft hin zu Service- und Informationsdienstleistungen, bei gleicher Bevölkerungsentwicklung wie in A1.

Ebenso wie die Wirtschaft wächst die Weltbevölkerung nach dem Szenario B2 nur mäßig, unter der Annahme, dass auf lokaler Ebene nachhaltig gewirtschaftet wird.

Szenario A2 stellt eine sehr heterogene Welt mit starkem Anstieg der Weltbevölkerung und geringer wirtschaftlicher und technologischer Entwicklung dar [IPCC 2007].

Globalmodelle

Globale Klimamodelle bilden atmosphärische, ozeanische und terrestrische Prozesse stark vereinfacht ab. Sie haben eine sehr grobe Auflösung und bedürfen für eine Nutzung auf regionaler Ebene einer weiteren Bearbeitung. Bekannte Modelle sind das vom britischen Hadley Centre entwickelte HadCM3, das für einige Studien des

IPCC-Berichts verwendet wurde, oder die Modelle des am Max-Planck-Institut entwickelten ECHAM4 bzw. ECHAM5.

Regionalisierungsverfahren

Mit verschiedenen statischen oder dynamischen Regionalisierungsverfahren werden die Ergebnisse der globalen Klimamodelle, die die Rahmenbedingungen setzen, auf die regionale Ebene herunter gerechnet. Regionale Klimamodelle haben mit bis zu 1 km² eine deutlich höhere Auflösung als Globalmodelle (mehrere hundert km²). CLM, REMO, STAR oder WETTREG sind bekannte Downscaling-Verfahren, die in Deutschland zur Anwendung kommen.

5.2 Temperatur und Niederschlag

Die Globalmodelle zeigen trotz der enthaltenen Unsicherheiten eine eindeutigen Anstieg der Temperaturen für den Zeitraum bis 2100, während für die Niederschläge eine großer Schwankungsbreite ohne einheitliche Tendenz berechnet wird (Abb. 5-1).

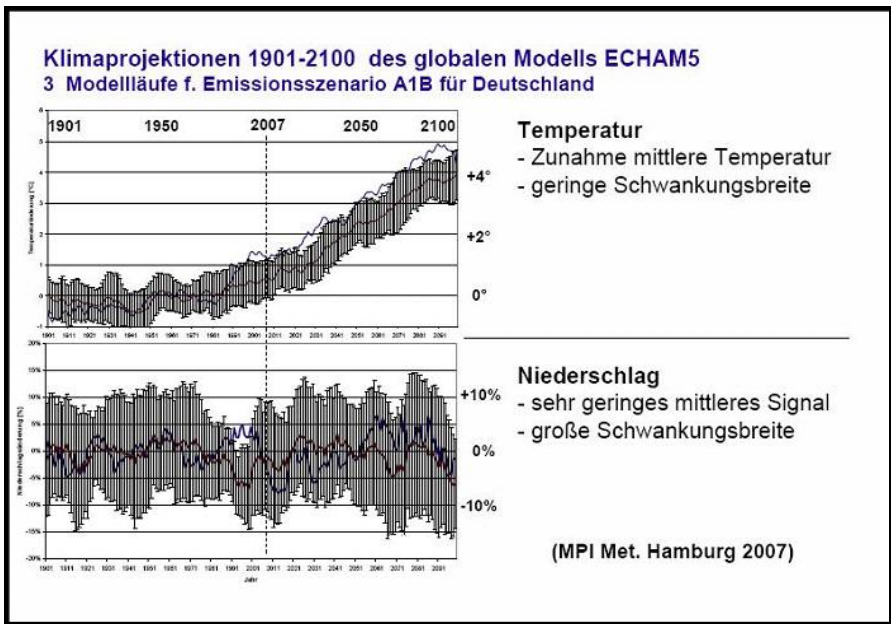


Abb. 5-1: Klimaprojektion 1901 - 2100 des Globalmodells ECHAM5. Emissionsszenario A1B (Quelle: KLIWAS)

Die Temperaturen werden demnach im Sommer und im Winter im Zeitraum 2021 - 2050 gleichermaßen um ca. 1 °C ansteigen. Im Zeitraum 2071 - 2100 wird ein weiterer Temperaturanstieg eintreten, der jedoch im Winter stärker sein wird als im Sommer. Im Vergleich zur Referenzperiode 1971 - 2000 könnten dann die Durchschnittstemperaturen im Winter um bis 5 °C höher liegen. Die maximale Temperaturdifferenz zwischen den einzelnen Modellen beträgt für einige Regionen in Deutschland im Sommer bis zu 2,5 °C.

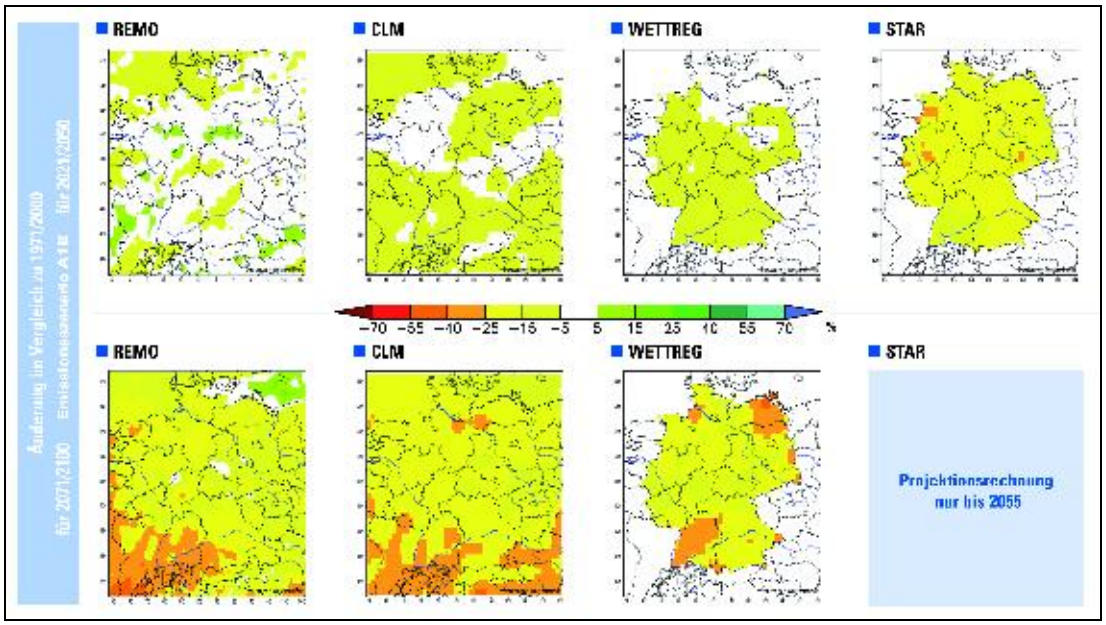


Abb. 5-2: Vergleich der Ergebnisse von 4 regionalen Klimamodellen für Deutschland. Sommerniederschläge für die nahe und ferne Zukunft. (Quelle: DWD)

Berechnungen des Deutschen Wetterdienstes mit vier verschiedenen, statischen und dynamischen Downscaling-Verfahren (REMO, CLM, WETTREG, STAR) zeigen ebenfalls einen einheitlichen Trend der Temperaturänderungen für die deutschen Regionen in Deutschland in den nächsten 90 Jahren, während die Änderung in der Niederschlagsmenge stark variiert. Sie 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 regional 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.

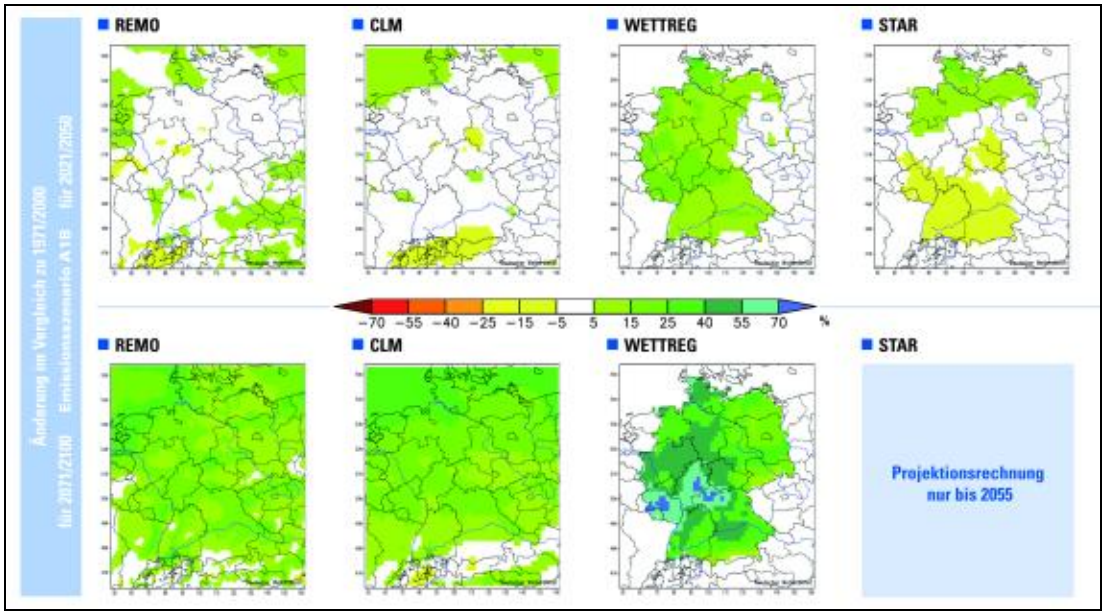


Abb. 5-3: Vergleich der Ergebnisse für Deutschland von 4 regionalen Klimamodellen. Winterniederschläge für die nahe und ferne Zukunft. (Quelle: DWD)

5.3 Abflussverhalten

In Deutschland existieren drei Typen von einfachen Abflussregimen. In einem pluvialen Flussregime kommt der Abfluss durch Niederschläge (hauptsächlich Regen) zustande, die innerhalb kurzer Zeit oberflächennah abfließen. Aufgrund der hohen Evapotranspiration im Sommer findet sich in Deutschland im Spätsommer das Minimum der Abflusskurve, während das Maximum des pluvialen Regimes in den milden, regenreichen Wintermonaten liegt.

Nivale Abflussregime sind durch Schmelzwasser geprägt und weisen ein hohes Abflussmaximum im Frühjahr auf. In der Regel wird dieser Spitzenabfluss durch die alljährliche Schneeschmelze bedingt.

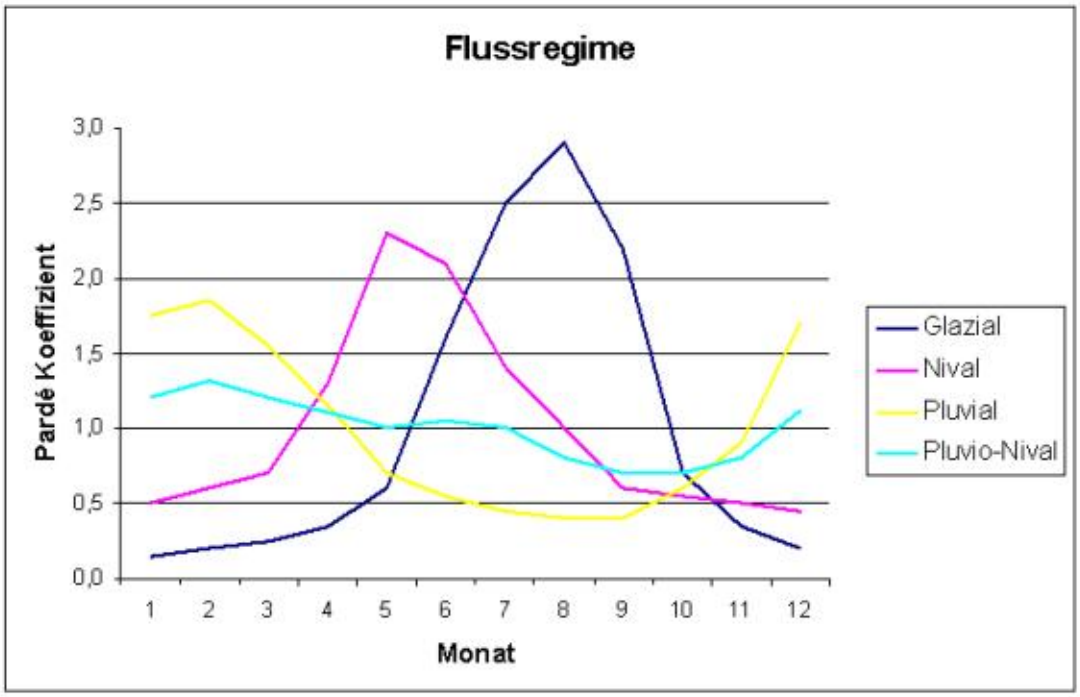


Abb. 5-4: Hydrologische Flussregime in Deutschland (Quelle: Verändert nach BELZ et al. 2007)

Glaziale Abflussregime finden sich nur im Alpenraum. Sie werden durch das sommerliche Abschmelzen des Gletschereises geprägt, wobei der höchste Abfluss im Juli/August erreicht wird.

Besonders bei großen Flüssen treten komplexe Regime auf, deren Abflussganglinien geringere Schwankungen aufweisen.

Ist mehr als eine der oben genannten Speisungsarten relevant, spricht man von einem komplexen Regime ersten Grades. Ein komplexes Regime zweiten Grades liegt bei Flüssen vor, die allein durch Regen gespeist werden und verschiedene Klimazonen durchfließen bzw. bei Flüssen, die auf ihrem Lauf verschiedene Regimebereiche durchströmen und so verschieden gespeist werden. Ein Beispiel für ein komplexes Regime zweiten Grades mit nivo-pluvialem Charakter ist der Rhein.

5.4 Änderung des Abflussverhaltens durch die Klimaveränderung

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 sehr unterschiedliche Bedeutung. Generelle Veränderungen für das Winterhalbjahr (November bis April) und das Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) lassen sich einfach und pragmatisch beschreiben. Sie werden durch Modelle der Klimaforschung (vgl. Abb. 5-2 und Abb. 5-3) bestätigt und daher hier hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Wasserkraft untersucht.

Pluviale Abflussregime

In den pluvialen Abflussregimen wird eine Abnahme der mittleren Abflussmenge in den Sommermonaten erwartet. Damit einher geht die Zunahme der Dauer und Intensität von Niedrigwasserereignissen. Im Winterhalbjahr wird meist eine Zunahme des Abflusses erfolgen. Auch wenn diese prozentual geringer als die Abnahme im Sommer ausfällt, übersteigen die absoluten Mengen die sommerlichen Abflüsse aufgrund des allgemein höheren Abflusses im Winterhalbjahr und es ergibt sich eine Steigerung des mittleren Abflusses.

Nivale Abflussregime

Für nival geprägte Abflussregime wird schon für die nahe Zukunft eine Reduzierung der Abflussmenge und eine Verschiebung des Abflussmaximums aus den frühen Sommermonaten in das Frühjahr prognostiziert. Zudem wird sich die Abflussspitze im Frühjahr abflachen. Das Minimum des Abflusses verschiebt sich aus den Wintermonaten in den Spätsommer (Abb. 5-5).

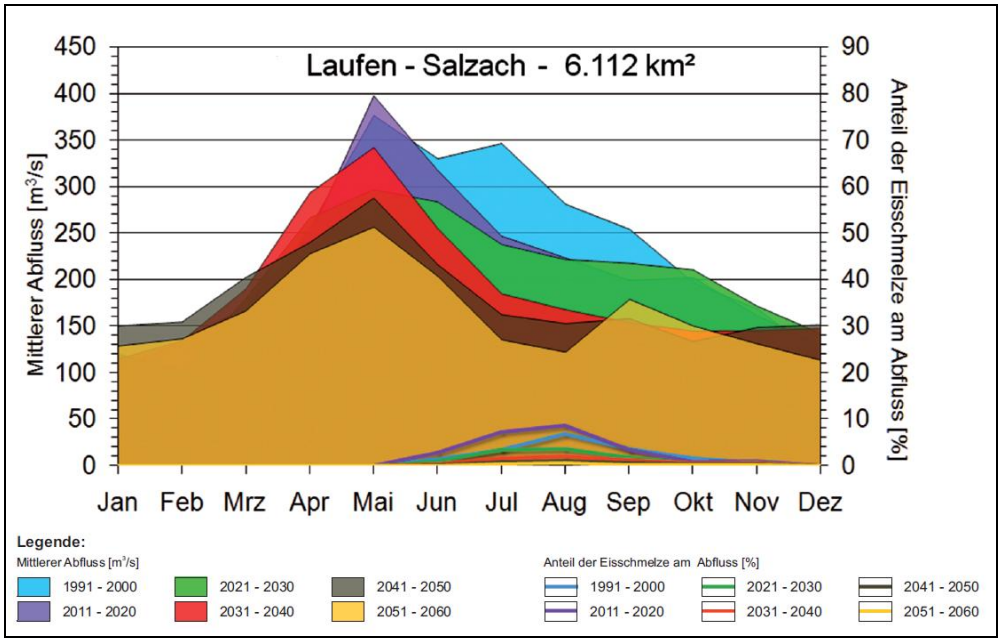


Abb. 5-5: Prognostizierter Wandel der saisonalen Abflüsse der Salzach am Pegel Laufen (Quelle: WEBER & PRASCH 2009)

Voraussichtlich nehmen die Niedrigwasserereignisse in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts ab, bevor sie dann stark zunehmen. Demnach ergäben sich in der nahen Zukunft in den alpin geprägten Bereichen der Einzugsgebiete von Rhein und Donau eher günstigere Bedingungen für die Wasserkraft. Für die übrigen Gewässer und die fernere Zukunft wird hingegen vermehrt mit Niedrigwasser, also mit geringeren Abflüssen gerechnet. In verschiedenen Gewässern in Hessen wird für die nahe Zukunft beispielsweise eine Abnahme des mittleren monatlichen Abflusses von rund 20 % im Sommerhalbjahr prognostiziert [BRAHMER 2007].

Glaziale Abflussregime

Durch steigende Temperaturen im Zuge der Erderwärmung werden die alpinen Gletscher schneller und stärker als bisher abschmelzen. Daraus resultiert eine Veränderung der Abflussregime und des Gebietsabflusses auch in deutschen Gewässern. Prognostiziert wird, dass die Gletscherspende zunächst bis zu einer Erwärmung von 3 °C ansteigen wird, ehe sie dann wieder abnimmt, da sich die schmelzfähige Oberfläche der Gletscher mit der Zeit immer weiter verringert. Es wird angenommen, dass die vielen kleineren Gletscher in den Alpen schon bei einem geringerem Temperaturanstieg um 2 °C das Maximum der Gletscherspende erreichen [KUHN & OLEFS 2007].

5.5 Extremereignisse

Eine Übersicht zum aktuellen Wissensstand der Klimaforschung bezüglich Hoch- und Niedrigwasser lieferte das 4. KLIWA Symposium (*„Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“*, Mainz, 2009). Die vergleichsweise eindeutigen Aussagen aus den Projekten im Zeitraum bis etwa 2007 werden durch die aktuell laufenden Untersuchungen abgeschwächt. Durch Verwendung mehrerer und verbesserter Globalmodelle und den Einsatz einer größeren Anzahl von regionalen Klimamodellen verbreitern sich die Ergebniskorridore. Zum Teil zeigen sich widersprüchliche Tendenzen [PRELLBERG 2009].

Extreme Hochwasser können häufiger auftreten [MAUSER 2009] und sich in ihrem typischen jahreszeitlichen Auftreten verschieben. Die Energieerzeugung aus Wasserkraft wird hiervon kaum beeinträchtigt. Allerdings können an bestehenden Anlagen Investitionen in Anpassungsmaßnahmen zur Minderung des Hochwasserrisikos erforderlich sein, die den wirtschaftlichen Ertrag der Anlage mindern. Die Zunahme von Niedrigwasserabflüssen muss differenziert betrachtet werden. Veränderungen des extremen Niedrigwasserabflusses sind für die Erzeugung kaum relevant, die dann sehr gering ist oder ganz entfällt. Für häufige Niedrigwasser nennt IHRINGER

(2009) gegenläufige Tendenzen für verschiedene Regionen in Süddeutschland, die sich auch in den Erzeugungen darstellen würden. Bauliche Anpassungen sind nicht erforderlich. Mit guten Vorhersagen können betriebliche Abläufe (z.B. Revisionen) optimiert werden.

5.6 Auswirkungen der Abflussveränderungen auf die Wasserkraft

Die durch den Klimawandel zu erwartende Entwicklung der Wasserkraftnutzung lässt sich auf der Basis der vorliegenden Untersuchungen wie folgt zusammenfassen:

- In glazialen Abflussregimen wird der Niedrigwasserabfluss der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts ansteigen und eine positiven Effekt für die Nutzung der Wasserkraft bewirken. Allerdings ist der Anteil von glazialem Schmelzwasser in den bedeutenden deutschen Flüssen vergleichsweise gering. Der mit dem Gletschermodell *Surges* modellierte Anteil an Schmelzwasser lag beispielsweise in der Donau am Pegel Achleiten im Jahresmittel der Jahre 1991 - 2000 bei 1,6 % des Gebietsabflusses [WEBER & PRASCH 2009]. Ende dieses Jahrhunderts werden die glazialen Abflussregime verschwunden sein, so dass alle betroffenen Gewässer einen nivo-pluvialen Charakter haben werden.

- 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.

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

- Allgemein wird erwartet, dass in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts die Gewinnung von Energie an Wasserkraftanlagen zurückgeht. Zusätzliche Probleme werden bei steigenden Temperaturen zukünftig trockenere Sommer und extreme Hochwasserereignisse darstellen.

Die nachfolgende Tabelle zeigt, dass in Deutschland ca. 19 % der Linienleistung und damit in etwa des Linienpotenzials nival beeinflusst sind.

Tab. 5-1: Anteil der nival beeinflussten Linienleistung der deutschen Gewässer

Fluss-Einzugsgebiet	Linienleistung* [MW]	Anteil der Linienleistung der BRD	Nivaler Flächenanteil EZG	Anteil der nivalen Linienleistung BRD*
Iller	279	2 %	25 %	0,5 %
Inn	1.192	9 %	40 %	3,6 %
Isar	557	4 %	12 %	0,5 %
Lech	417	3 %	29 %	0,9 %
Summe Alpen-Donau	2.445	19 %		5,6 %
Donau Gesamt	3.957	30 %		5,6 %
Rhein	6.980	53 %	25 %	13,3 %
Sonstige BRD	2.171	17 %	0 %	0 %
Summe BRD*	13.108	100 %		18,9 %

*inkl. nicht-deutscher Anteile an Grenzgewässern

6 Beispielrechnungen

6.1 Szenarien

Ausgehend vom Stand der Klimaforschung werden modellhafte Abflussszenarien für unterschiedliche Standorte betrachtet und veränderte Energieerzeugung in Wasserkraftanlagen untersucht.

Die ausgewählten Anlagen liegen am Rhein, am Lech und am Main und werden von typischen Abflussregimen für die deutschen Wasserkraftressourcen gespeist. Die Anlagenausstattung entspricht den jeweiligen Gegebenheiten. Sie verfügen über eine, zwei oder vier Maschinensätze mit unterschiedlichen Turbinentypen.

Die Berechnungen dieser Untersuchung verwendeten historische Abflusszeitreihen. Sie wurden mit plausiblen und den vorliegenden Erkenntnissen der Klimaforschung entsprechenden Korrekturen transformiert. Ein detailliertes Rechenmodell, das die spezifischen technischen und hydraulischen Anlageneigenschaften beschreibt, lieferte die Energieerzeugungen. Klima- oder Abflussmodellierungen i.S. von Klimaprojektionen waren im Rahmen dieser Untersuchung nicht machbar, belastbare Abflusszeitreihen standen an den ausgewählten Standorten nicht rechtzeitig zur Verfügung.

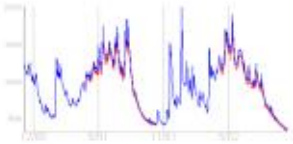
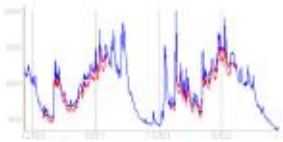
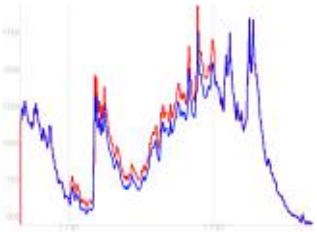
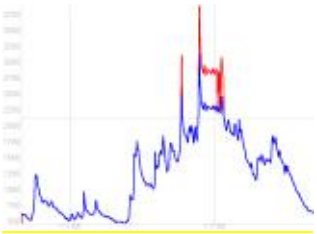
1. Veränderung Halbjahresniederschläge
   Bei geänderten Temperaturentwicklungen können signifikante Änderungen für das Winter- und Sommerhalbjahr erwartet werden. V. a. die hydrologischen Prozesse Schnee und Verdunstung haben in den Halbjahren unterschiedliche Relevanz. Die in den Abb. 5-1, Abb. 5-2 und Abb. 5-3 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 zur Hälfte als Abflussänderungen auswirken.

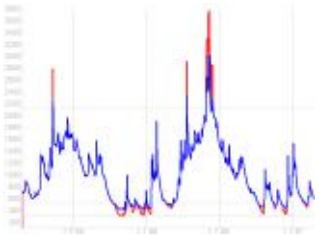
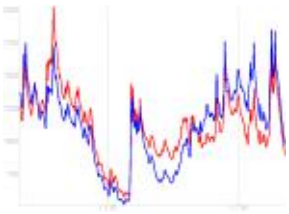
2. Ausgeprägtere Abflussextreme
   Zur Ermittlung der Empfindlichkeit der Beispielanlagen gegenüber Änderungen im Hoch- und Niedrigwasserbereich wurden folgende Szenarien pragmatisch untersucht:
   1) Alle Abflüsse, die größer als das im Durchschnitt zweimal jährlich auftretende Hochwasser sind, wurden pauschal um 25 % erhöht. Bei einer 50-jährigen Reihe werden somit 100 Hochwasserereignisse erhöht.
   2) Wie 1), wobei die Abflussreihe aber soweit reduziert wurde, dass sich ein unveränderter Mittelwasserabfluss ergibt. Dies ist eine aus Sicht der Wasserkraft pessimistische Annahme, denn bei größeren Hochwässern werden sich geringere Verdunstungen und somit größere Abflusshöhen ergeben.
   3) Alle Abflüsse geringer als MQ werden bis maximal zum langjährigen Niedrigwasserabfluss reduziert. Hierdurch verringert sich das Abflussvolumen und die Niedrigwasserzeiten verlängern sich.
   4) Kombination von 1) und 3)

3. Veränderungen im Abflussregime
   Die bereits vorliegenden Untersuchungen (vgl. Kap. 4) zeigen, dass sich die heute für die deutschen Gewässer typischen hydrologischen Abflussregimes verändern werden.
   Mit zunehmender Temperaturerhöhung werden sich die von Schneeprozessen und ggf. der Gletscherschmelze beeinflussten Abflussjahresgänge der süddeutschen Gewässer deutlich verschieben. 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 [MAURER 2006].
   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 %. Das Szenario „BfG STAR“ enthält ein um ca. 10 % geringeres MQ [KRAHE 2009].

Aus diesen Grundannahmen wurden Szenarien entwickelt, die die nachfolgende Tabelle zusammengefasst darstellt. Sie nennt die Wirkung der Klimaszenarien auf die Abflüsse und die numerischen Parameter für die Modifikation der Ausgangsreihen.

Tab. 6-1: Untersuchte Abflussszenarien

Nr.	Klima-szenarien	Wirkung	Konkrete Umsetzung	Beispiel Abflussganglinie (rot: Variation)
1	Veränderung Halbjahresniederschläge			
1.1	Sommer-Niederschlag –10%	Reduzierung Sommerabflüsse	Reduktion der Abfluss-werte vom Mai bis Oktober um 5 %	
1.2	Winter-Niederschlag –10%	Reduzierung der Winterabflüsse	Reduktion der Abfluss-werte vom Januar bis Juni um 10 %	
1.3	Winter-Niederschlag + 10 %	Erhöhung der Winterabflüsse	Erhöhung der Abfluss-werte vom Januar bis Juni um 10 %	
2	Ausgeprägtere Abflussextrema			
2.1	Extremere Hochwasser	Erhöhung Hoch-wasserabflüsse	25 %-Erhöhung aller Abflusswerte die ein halbjähriges Hochwas-ser übertreffen	
2.2	Extremere Hochwasser	Zunahme Hoch-wasser, MQ kon-stant	25 %-Erhöhung aller Abflusswerte die ein halbjähriges Hochwas-ser übertreffen, Reduk-tion der Abflüsse so-dass MQ unverändert bleibt	

Nr.	Klima-szenarien	Wirkung	Konkrete Umsetzung	Beispiel Abflussganglinie (rot: Variation)
2.3	Extremere Niedrigwasser	Verringerung von Niedrigwasserabflüssen	Verringerung der Abflusswerte nach der Formel $[(Q(t)/ MQ/2)^{1,5} *Q(t)$ zwischen NQ und MQ/2	
2.4	Extremere Abflüsse	Zunahme Hoch- und Niedrigwasser	Kombination aus 2.1 und 2.3	
3	Veränderungen im Abflussregime			
3.1	GLOWA Vorverlagerung	Weniger Schneefall und frühere Schneeschmelze	Vgl. MAUSER 2006	
3.2	BfG REMO	Außergewöhnliche Abflusszunahme um 24%	Vgl. KRAHE 2009	
3.3	BfG STAR	Um ca. 10% geringeres MQ	Vgl. KRAHE 2009	

Auswahl der Fallbeispiele und Berechnungsmethodik

Es werden modellhafte Abflussszenarien für unterschiedliche Wasserkraftanlagen in unterschiedlichen Szenarien betrachtet. Die Standorte mit den dort installierten Maschinen und Methoden zur der Jahresarbeit wird nachfolgend beschrieben.

6.1.1 Ausgewählte Standorte

Standort 1: WKA am Hochrhein zwischen Bodensee und Basel mit nival-glazialem Abflussregime

Standort 2: WKA am Lech im Donaugebiet mit nivalem Abflussregime

Standort 3a: WKA am unteren Mainabschnitt mit nivo-pluvialem Regime

Standort 3b: WKA am Oberlauf des Mains bei Schweinfurt mit nivo-pluvialem Regime

6.1.2 Ausgewählte Turbinentypen

In welchem Maße Abflussveränderungen sich auf die Energieerzeugung auswirken, wird auch durch die Maschinentechnische Ausstattung einer WKA beeinflusst. Die untersuchten Wasserkraftanlagen sind mit Kaplan-Turbinen oder Francis-Turbinen ausgestattet.

Die Francisturbine ist eine Überdruckturbine, die mittels eines Saugrohrs an das Unterwasser angeschlossen wird. Sie verfügt über einen beweglichen Leitapparat, der das Wasser unter einem bestimmten Winkel auf die feststehenden Laufradschaufeln leitet. Durch die geringe Anzahl der beweglichen Teile und das feststehende Laufrad ist die Francisturbine sehr robust. Die Francisturbine erreicht Maximalwirkungsgrade von 80 bis etwa 90 %. Durch die feststehenden Laufradschaufeln kann sie jedoch erst bei 50 % Beaufschlagung Wirkungsgrade von 80 % erreichen. 90 % ergeben sich erst bei 70 % Beaufschlagung. Daher sind Francisturbinen für die Nutzung stark schwankender Wassermengen wenig geeignet, es sei denn, man baut mehrere Turbinen ein, die gestaffelt gefahren werden [MUNLV 2005].

Die Kaplanturbine wird als Niederdruckturbine in unterschiedlichen Varianten gebaut: Die Verbindung zum Unterwasser wird ebenfalls mittels eines Saugrohrs realisiert. Sie besitzt verstellbare Leit- und Laufradschaufeln, mit denen sie auf die jeweilige Wassermenge und Fallhöhe eingestellt werden kann. Dadurch weist sie in einem weiten Belastungsbereich einen Wirkungsgrad von 80 bis 95 % auf und ist damit

gut für den Einsatz bei niedrigen Fallhöhen und großen sowie schwankenden Durchflussmengen geeignet.

6.1.3 Ausgewählte Zeitreihen

In der Zeitdimension wurde die Berechnung langjähriger Energieerzeugungszeitreihen gewählt. Basis der Berechnungen sind historische Abflussganglinien, die so modifiziert wurden, wie es die vorliegenden Szenarien aus anderen Klima-Projekten, v. a. GLOWA-Danube und KLIWAS, als möglich erwarten lassen.

Die verwendeten Abflusszeitreihen wurden in Absprache mit dem UBA ohne Klima- oder Abflussmodellierungen i. S. von Klimaprojektionen, die auf konkreten regionalen Niederschlags- und Temperaturzeitreihen basieren, ermittelt.

Die Beschränkung auf modifizierte Jahresgänge eines mittleren oder repräsentativen Jahres wurde nicht weiter verfolgt, um die Heterogenität langjähriger Abflussreihen zu berücksichtigen.

Die jährliche Energieerzeugung wurde mit tagesgenauen Abflusswerten der i. d. R. 50-jährigen Abflusszeitreihen oder der Dauerlinie unter Beachtung der korrespondierenden nutzbaren Fallhöhen ermittelt. Die Maschinenwirkungsgrade und das Schluckvermögen der Turbinen sind abhängig vom Abfluss bzw. der momentanen Wellenleistung der Turbine und gehen mit den bekannten mathematischen Zusammenhängen ebenfalls in die Berechnung ein.

Die Jahresarbeit E_a ergibt sich aus der Addition der Teilerzeugungen die in den Beispielrechnungen in Tagesschritten erfolgten:

$$E_a = \sum (\rho * g * Q_i * H_i * \eta_{Turb} * \eta_{Getr} * \eta_{Gen} * t_i) \qquad [kWh]$$

mit	Q_i	mittlerer Abfluss für Teilzeitraum i in m³/s
	H_i	mittlere zugehörige Fallhöhe in m
	η_{Turb}	Wirkungsgrad Turbinen
	η_{Getr}	Wirkungsgrad Übersetzung
	η_{Gen}	Wirkungsgrad Generator
	t_i	Dauer des Teilzeitraums i in Stunden
	ρ	Dichte von Wasser
	g	Erdbeschleunigung

6.2 Beispielanlage 1 am Hochrhein

6.2.1 Untersuchungsgebiet Hochrhein

Der Hochrhein ist der Teil des Rheins, der zwischen dem Bodensee und Basel liegt. Der Abfluss des Hochrheins ist durch die Abflüsse aus dem Alpenrhein und aus der Aare geprägt. Der Bodensee glättet Hochwasserwellen jedoch deutlich ab. Während einer Hochwassersituation mit einem Zufluss in den Bodensee von 2.500 m^3/s, ist beispielweise ein Abfluss aus dem Bodensee von nur 1.000 m^3/s zu erwarten. Das Einzugsgebiet des Hochrheins hat eine Größe von rund 36.000 km^2. Teile des Einzugsgebietes sind vergletschert, der Rest unterliegt einem nivo-pluvialen Regime.

6.2.2 Kenndaten der Wasserkraftanlage 1

Die Wasserkraftanlage 1 zählt mit einer Ausbauleistung von 120 MW zu den größten Laufwasserkraftanlagen in Deutschland. Der Ausbaudurchfluss von 1.460 m^3/s ist ca. 40 % größer als der mittlere Abfluss von 1.045 m^3/s und wird im Mittel an 68 Tagen überschritten. Die Ausbaufallhöhe beträgt 11,20 m.

Für die Berechnungen wurden Parameter benutzt, die z. T. geschätzt werden mussten. Mögliche Abweichungen zur tatsächlichen realen Situation sind für die folgenden Berechnungen mit Energieszenarien unkritisch, da alle Szenarien dieselben Modelldaten verwenden. Aktuelle Planungen und bevorstehende Umbauten blieben unberücksichtigt.

Die Anlage verfügt über 4 Kaplanturbinen mit direktgekuppeltem Generator. Für die Turbine wurde ein fast gleichbleibend hoher Wirkungsgrad angesetzt. Um tatsächlich vorhandene Einbußen z. B. beim Wechseln der aktiven Turbinenanzahl zu berücksichtigen, wurde der Spitzenwirkungsgrad geringfügig reduziert. Die Generatorkennlinie berücksichtigt Wirkungsgradeinbußen im Übergangsbereich auf die 2. Maschine.

Tab. 6-2: Kenndaten der Beispielanlage 1 am Hochrhein

Lage	Hochrhein
Einzugsgebiet	34.520 km²
Stauziel	280,74 mNN - 281,14 mNN
Ausbaudurchfluss, MQ	1460 m³/s, MQ = 1045 m³/s
Fallhöhe	11,20 m
Unterwasserhöhen, Schlüsselkurve	269 mNN bis ca. 275 mNN bei Q = 6.000 m³/s
Maschinelle Ausstattung	4 Kaplan-Turbinen, ETA = 92 %, P = 120 MW

Als Referenzreihe für die Abflussszenarien wurden die Pegelmessungen aus Rheinfelden verwendet. Es standen Daten für den Zeitraum 1930 bis 2008 zur Verfügung.

6.3 Beispielanlage 2 am Lech

6.3.1 Untersuchungsgebiet Lech

Der Lech ist ein rechtsseitiger Zufluss der Donau. Er entspringt in den Vorarlberger Alpen in Österreich und entwässert auch Teile der Bayerischen Alpen. Das Einzugsgebiet beträgt etwa 4.000 km², die mittleren Abflüsse liegen an der Mündung über 100 m³/s und haben damit eine Größenordnung, die bei anderen mittelgroßen Flüssen in Deutschland wie Main oder Neckar erst bei weitaus größerem Einzugsgebiet erreicht werden. Dank der großen Abflussspenden und großen nutzbaren Fallhöhen wird der Lech intensiv zur Energieerzeugung genutzt.

Das Abflussverhalten des Lechs bis in den Mündungsbereich wird maßgeblich durch den niederschlags- und abflussreichen alpinen Teil des Einzugsgebiets gekennzeichnet. Der Abflussjahresgang wird durch die Schneeschmelzabflüsse geprägt und resultiert in großen Frühjahrs- und Sommerabflüssen.

Die Anlage bzw. der Lech sind Gegenstand des GLOWA Danube-Projekts. Der Global Change Atlas des GLOWA Danube-Projekts beschreibt für den Lech in Zukunft einen Rückgang der Energieproduktion [KOCH et al. 2010]. Im Zeitraum 2011 bis 2035 ist nach dem ausgewählten REMO Modell in den Laufwasserkraftanlagen am Lech von einem Rückgang der Energieproduktion um 1,1 % auszugehen, für den Zeitraum 2036 bis 2060 geht die Jahresarbeit sogar auf - 9,1 % im Vergleich zum Referenzzeitraum (1971 bis 2000) zurück.

6.3.2 Kenndaten der Wasserkraftanlage 2

Die ausgewählte Anlage liegt im unteren Abschnitt des Lechs ca. 5 km oberhalb der Mündung in die Donau. Sie ist Element einer Kette mehrerer hintereinanderliegender Staustufen und gehört zu den größeren Anlagen in Deutschland. Die Ausbauleistung von 11,2 MW wird von zwei Kaplanturbinen generiert, die im langjährigen Jahresmittel 57 GWh Energie erzeugen. Bei einer Fallhöhe von 8,10 m und einem mittleren Abfluss von 118 m^3/s, beträgt der Ausbaudurchfluss 180 m^3/s. Das sind 50 % mehr als MQ.

Für die Berechnungen wurden die vom Betreiber zur Verfügung gestellten Datenblätter zu den Erzeugungsdaten beachtet. Einzelne Parameter mussten geschätzt werden. Geringfügige Abweichungen zur tatsächlichen realen Situation sind möglich, für die folgenden Berechnungen mit Energieszenarien aber unkritisch, da alle Szenarien dieselben Modelldaten verwenden. Die Vergleiche sind somit aussagekräftig.

Tab. 6-3: Auslegungsdaten der Beispielanlage 2 am Lech

Lage	Unterer Lech
Einzugsgebiet	6.117 km²
Stauziel	407,80 m
Ausbauzufluss, MQ	180 m³/s, MQ = 118 m³/s
Fallhöhe	8,1 m
Unterwasserhöhen, Schlüssel-kurve	H = 399,7 mNN bei Q = 200 m³s, 399,95 mNN bei 300 m³/s, 400,3 mNN bei 400 m³/s, 400,68 mNN bei 500 m³/s, 401,1 mNN bei 600 m³/s, 401,45 bei 700 m³/s
Ausbauleistung	11,2 MW
Maschinelle Ausstattung	2 Kaplan-Turbinen a 5.900 kW mit einem Schluckvermögen von je 90 m³/s
Erzeugung	57 Mio. KWh im Regeljahr

Wasserstand:

Stauziel (oben) [m]: 407,80

Q-H-Kurve (unten): WKA_Rain

Wertetabelle:

Q [m³/s]	0	100	180	200	300	400	500	600	700	800	900
H [m]	399.5	399.5	399.6	399.7	399.9	400.2	400.6	401.1	401.4	401.8	402

Wirkungsgrad:

Turbine

Wirkungsgradkurve: WKA_Lech_RN_abs

Wertetabelle:

Q [m³/s]	5	10	20	30	50	90	140	180	200	220	240	260	280
Eta	0.7	0.75	0.8	0.85	0.91	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.92	0.91	0.89

Getriebe

Konstanter Wert [normiert]: 0,98

Generator

Wirkungsgradkurve: Gen_Asy_rel

Wertetabelle:

P [kW]	0	0.25	0.75	1
Eta	0	0.89	0.98	1

Abb. 6-1: Kenndaten WKA 2 am Lech

Als Referenzreihe wurde die vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft bereitgestellten Messwerte des Pegels Augsburg verwendet. Der Pegel liegt kurz vor der Mündung des Lechs in die Donau. Es standen Daten für den Zeitraum von 1959 bis 2009 zur Verfügung.

6.4 Beispielanlage 3a am Main

Die Auswirkungen der zu erwartenden Abflussveränderungen auf die Wasserkraftnutzung in Deutschland wurden an einer fiktiven Wasserkraftanlage am Main untersucht, die geografisch zentral liegt und typisch für Gewässer wie Neckar, Mosel etc. mit pluvialem Abflussregime [BELZ 2007] ist.

Der Main entspringt im Fichtelgebirge und mündet nach ca. 500 km Fließstrecke als größter rechtsseitiger Nebenfluss mit einem Einzugsgebiet von ca. 27.000 km² bei Mainz in den Rhein.

An mehr als 30 der für die Schifffahrt erforderlichen Staustufen sind Laufwasserkraftanlagen errichtet worden. Die Anlagen gehören unterschiedlichen Altersklassen an, haben Ausbauwassermengen zwischen ca. 50 und ca. 200 m³/s und Fallhöhen zwischen 3 und 7 m [FICHTNER 2003]. Die meisten Anlagen sind mit 2 Kaplanturbinen ausgestattet.

6.4.1 Kenndaten der Wasserkraftanlage 3a

Die hier berechnete fiktive Anlage wurde in Anlehnung an die Standorte am unteren Mainabschnitt mit dem im Folgenden genannten Daten berechnet. Aus dem BMU-Projekt sind Auskünfte und Untersuchungen der Universität Stuttgart (Dr. Ruprecht, Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen (IHS)) eingeflossen.

Die Fallhöhe beträgt 6,20 m bei Niedrigwasser, 5,90 m bei einem Ausbauabfluss von 200 m³/s und fällt auf 3,60 m bei einem einjährigen Hochwasser HQ_1. Der mittlere Abfluss MQ beträgt 218 m³/s. Die Kaplan-Turbinen arbeiten mit hohen Wirkungsgraden bis zu 93 %, für die Generatoren wurden Spitzenwirkungsgrade von 96 % angesetzt. Wirkungsgradeinbußen gibt es bei geringen Abflüssen unter 30 % der Ausbauleistung einer Turbine und beim Wechsel zwischen 1 und 2 Maschinen.

6.4.2 Beispielanlagen 3b1 und 3b2 am Main

Die zweite fiktive Anlage mit Daten vom Main verwendet den Pegel Schweinfurt 330 km oberhalb der Mündung in der Rhein. Das Einzugsgebiet umfasst mit 12.715 km² 47 % des Main-Einzugsgebietes. Das Verhältnis gilt ebenfalls für den mittleren Abfluss MQ, der in Schweinfurt für den Referenzraum 1957 - 2007 107 m³/s beträgt.

Die Fallhöhe wurde mit 4,20 m angesetzt, sie verringert sich auf 1,20 m für den jährlich einmal erreichten Hochwasserabfluss HQ_1. Der Ausbaudurchfluss wurde mit 120 m³/s, das sind 10 % über MQ, angesetzt. Die Maschinenausstattung wurde in der Variante 3b1 mit zwei Kaplanturbinen und in Variante 3b2 mit einer Francisturbine festgelegt, um einen Vergleich herstellen zu können.

6.4.3 Abflussszenarien und WKA

Als Referenzreihe wurden gemessene Pegelzeitreihen verwendet:

Beispielanlage 1 am Hochrhein	Messwerte Pegel Rheinfelden, Zeitraum von 1930 - 2008, bereitgestellt von der BfG
Beispielanlage 2 am Lech	Messwerte des Pegels Augsburg, Zeitraum von 1959 - 2009, bereitgestellt vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft
Beispielanlagen 3 am Main	Messwert der Pegel Raunheim und Schweinfurt, Zeitraum 1961 - 2003, bereitgestellt von der BfG

6.5 Ergebnisse der Beispielanlagen 1 bis 3

6.5.1 Veränderung der Halbjahresniederschläge

Zur Ermittlung der Empfindlichkeit der Beispielanlagen gegenüber Änderungen der Sommer, bzw. Winterniederschläge wurden die in Kapitel 6.1 beschriebenen Szenarien 1.1 bis 1.3 untersucht. Die nachfolgende Tabelle stellt die daraus resultierenden Änderungen in der Energieerzeugung zusammen.

Tab. 6-4: Szenarien mit veränderten Halbjahresniederschlägen und der daraus berechneten Änderung der mittleren langjährigen Energieerzeugung DEa der untersuchten Wasserkraftanlagen

Szenario Nr.	Beschreibung	Hoch-rhein	Lech	Main Mün-dung	Main Oberlauf 2*Kaplan	Main Oberlauf 1*Francis
		1	2	3a	3b1	3b2
		DEa [%]	DEa [%]	DEa [%]	DEa [%]	DEa [%]
1.1	Sommer Nieder-schlag - 10 %	-1,5	-2,4	-1,5	-1,7	-2,2
1.2	Winter Niederschlag - 10 %	-3,4	-5,0	-1,1	-1,3	-2,0
1.3	Winter Niederschlag + 10 %	2,7	4,5	0,7	0,8	1,3

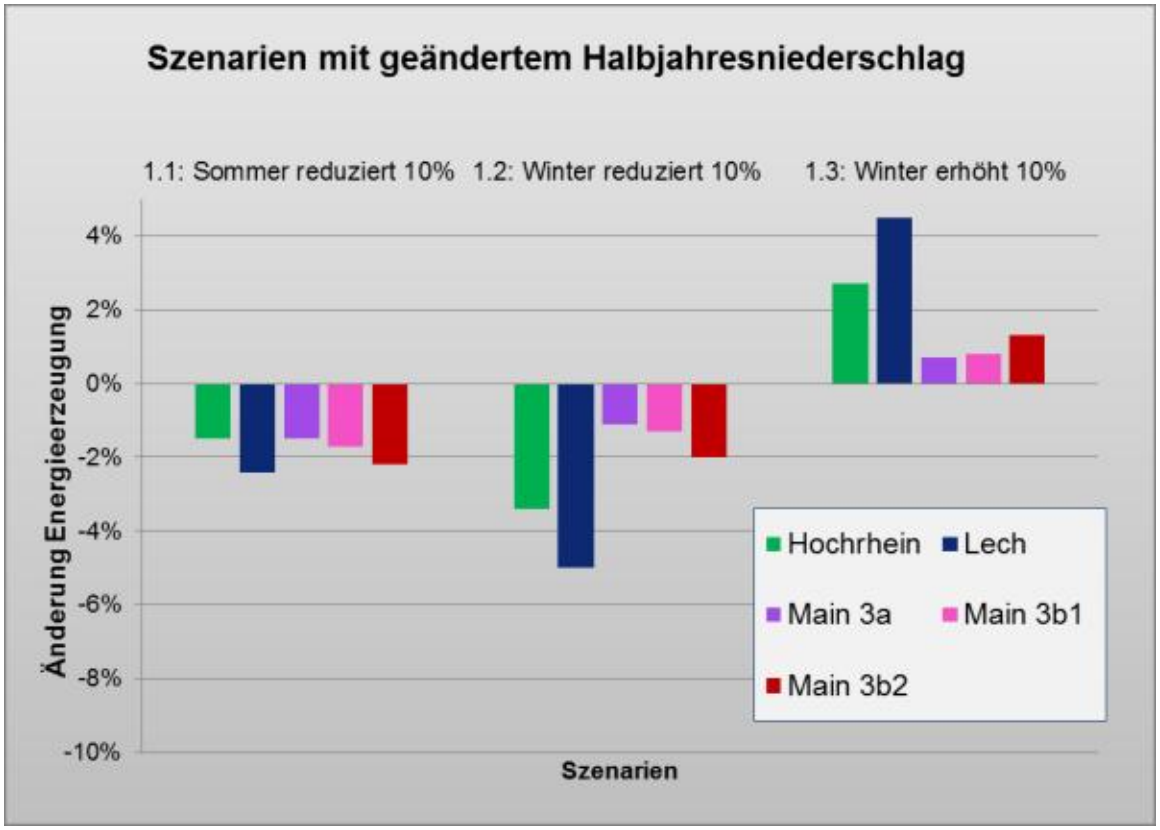


Abb. 6-2: Szenarien mit veränderten Halbjahresniederschlägen und der daraus berechneten Änderung der mittleren langjährigen Energieerzeugung DEa der Wasserkraftanlagen

Niederschlagsänderungen bewirken gleichgerichtete Abflussänderungen und Änderungen der Energieerzeugung. Die Änderungen der Energieerzeugung fallen geringer aus als die Abflussänderungen. Bei Lech und Hochrhein liegt die größere Relevanz bei den Änderungen im Winterhalbjahr. Bei den drei Main-Anlagen lassen sich für die Sommer- und die Winterreduktion nahezu gleiche Erzeugungsminderungen beobachten.

Insgesamt verhalten sich die Anlagen recht unterschiedlich. Bei den Anlagen am Main zeigen sich nur geringe Auswirkungen, wobei die mit der Francis-Turbine ausgestattete Anlage Main 3b2 die stärksten Ausschläge von ca. - 2 % bis + 1,3 % aufweist. Die Anlagen am Hochrhein und am Lech reagieren entsprechend ihrem hohen Ausbaugrad deutlicher.

Alle Anlagen zeigen auf die Reduktion der Sommerniederschläge nur eine geringe Sensitivität.

Der Vergleich der beiden Winterszenarien zeigt, dass die Reduktion bei Abflussminderungen etwas höher ausfällt als die Mehrerzeugungen bei Abflusszuwächsen.

Sollte eine Minderung der Sommerniederschläge und gleichzeitig eine Erhöhung der Winterniederschläge in ungefähr gleicher Größenordnung eintreten – eine Tendenz, die die Mehrzahl der hier betrachteten regionalen Klimamodelle berechnen - wird sich das für die Energieerzeugung der Anlagen mit hohem Ausbaugrad wie die am Lech und am Hochrhein eher positiv auswirken, während die Anlagen am Main mit einer leichten Mindererzeugung rechnen müssen.

Eine Abnahme der Niederschläge im Sommer und im Winter, wie es das regionale Klimamodell STAR für die Zeit bis 2050 vorhersagt, führt besonders an den Anlagen am Hochrhein und am Lech zu einer deutlichen Einbuße in der Energieerzeugung (- 4,9 % bzw. - 7,4 %), während für die drei Anlagen am Main moderatere Mindererzeugungen zwischen - 4,4 % und - 2,6 % berechnet wurden.

6.5.2 Ausgeprägtere Abflussextrema

Zur Ermittlung der Empfindlichkeit der Beispielanlagen gegenüber Änderungen im Hochwasser- und Niedrigwasserbereich wurden die in Kapitel 6.1 beschriebenen Szenarien 2.1 bis 2.4 untersucht. Die nachfolgende Tabelle stellt die daraus resultierenden Änderungen in der Energieerzeugung zusammen.

Tab. 6-5: Szenarien mit veränderten Extrema und der daraus berechneten Änderung der mittleren langjährigen Energieerzeugung DEa der Wasserkraftanlagen

Szenario Nr.	Beschreibung	Hochrhein	Lech	Main Mündung	Main Oberlauf 2*Kaplan	Main Oberlauf 1*Francis
		1	2	3a	3b1	3b2
		DEa [%]	DEa [%]	DEa [%]	DEa [%]	DEa [%]
2.1	HW (> $HQ_{0,5}$) + 25 %	-0,2	-0,2	-0,6	-0,4	-0,4
2.2	HW (> $HQ_{0,5}$) + 25 %, MQ konst.	-0,8	-1,3	-2,2	-3,8	-5,5
2.3	niedrige Abflüsse (< MQ) reduziert	-0,7	-0,7	-3,8	-4,7	-4,5
2.4	Kombination 2.1) und 2.3)	-0,8	-0,9	-4,4	-5,1	-4,9

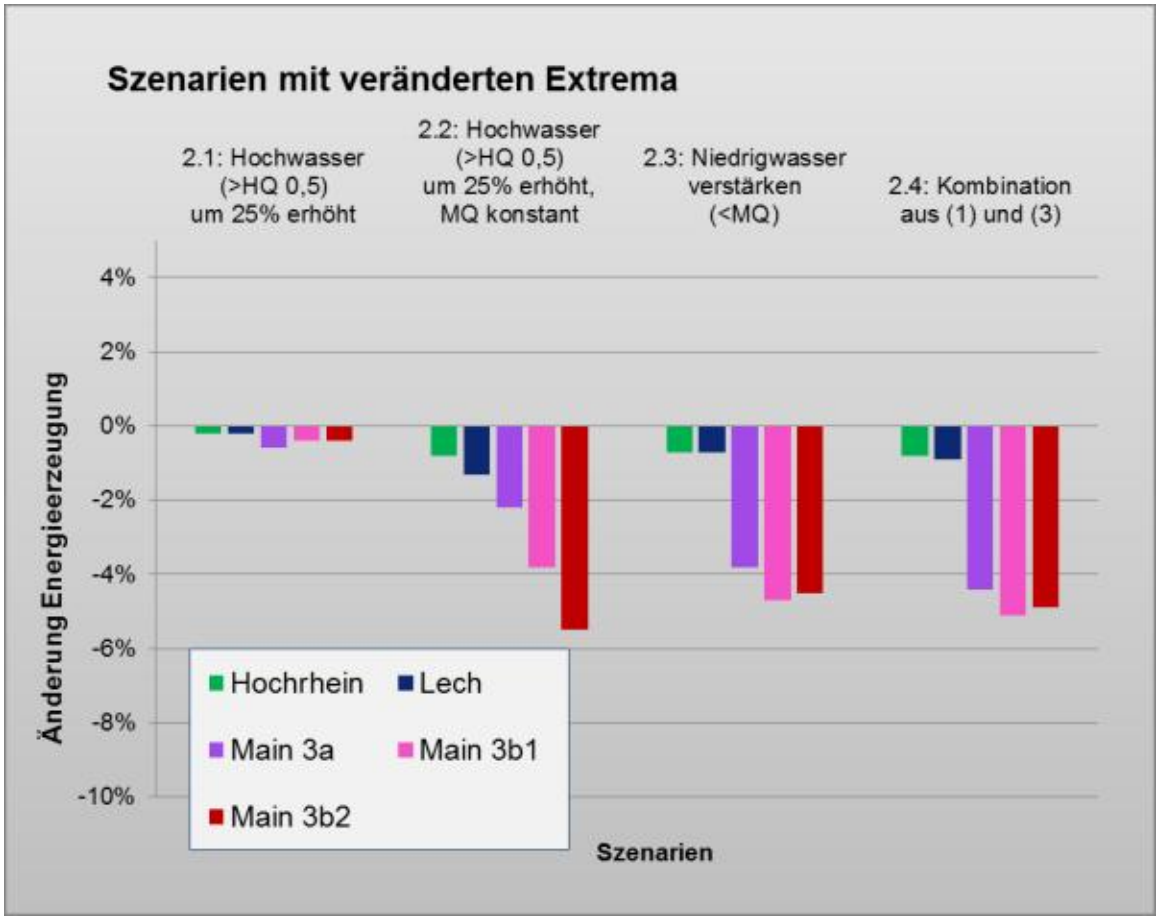


Abb. 6-3: Szenarien mit veränderten Extrema der Abflüsse und der daraus berechneten Änderung der mittleren langjährigen Energieerzeugung DEa der Wasserkraftanlagen

Die Szenarien mit veränderten Extrema zeigen besonders für die Main-Anlagen starke Auswirkungen, währen die Anlagen an Lech und Hochrhein sich relativ robust verhalten. Die jeweiligen wasserbaulichen Gegebenheiten, die Maschinenausstattung und vor allem das hydrologische Regime bestimmen den Einzelfall.

Eine Zunahme der Hochwasser wie in Szenario 2.1 und 2.2 angesetzt, bedeutet für alle Anlagen Energieeinbußen. Dabei besitzt die reine Erhöhung der Hochwasserspitzen in Szenario 2.1 wenig Relevanz, während die zusätzliche Adaption des Mittelwasserflusses sich stärker auswirkt, vor allem bei den Main-Anlagen. Am stärksten beeinträchtigt ist die Energieerzeugung der Anlagen am Oberen Main (3b1 und 3b2).

Niedrigwasserperioden mit verringerten Abflüssen (Szenario 2.3) reduzieren bei allen Anlagen den Ertrag. Auch hier sind die Auswirkungen bei den Anlagen am Main mit ca. 4 % Mindererzeugung am deutlichsten, während die Anlagen an Hochrhein und Lech mit weniger als 1 % Energieeinbußen reagieren.

Szenario 2.4 führt zu vergleichbaren einer Aufsummierung der Ergebnisse aus 2.1 und 2.3.

Die Turbinenart scheint bei diesen Szenarien keinen erheblichen Einfluss zu besitzen.

Sollten diese Szenarien sich bewahrheiten, ist je nach Anlage mit einer geringen bis gravierenden Einbuße in der Energieerzeugung zu rechnen. In jedem Fall werden Anpassungsmaßnahmen zur Minderung des Hochwasserrisikos an Relevanz gewinnen.

6.5.3 Veränderungen im Abflussregime

Zur Ermittlung der Empfindlichkeit der Beispielanlagen gegenüber Änderungen im Abflussregime wurden die in Kapitel 6.1 beschriebenen Szenarien 3.1 bis 3.3 untersucht. Das Szenario GLOWA Vorverlagerung könnte auf die Regimes des Hochrheins und des Lech zutreffen, während die Szenarien BfG REMO und BfG STAR sich auf das Regime des Mains beziehen. Die Berechnungen wurden entsprechend eingegrenzt.

Tab. 6-6: Szenarien mit verändertem Abflussregime und daraus berechnete Änderung der mittleren mittleren langjährigen Energieerzeugung DEa der Wasserkraftanlagen

Szenario Nr.	Beschreibung	Hochrhein	Lech	Main Mündung	Main Oberlauf 2*Kaplan	Main Oberlauf 1*Francis
		1	2	3a	3b1	3b2
		DEa [%]	DEa [%]	DEa [%]	DEa [%]	DEa [%]
	GLOWA Vorverlagerung	2,6	2,6	-	-	-
3.2	BfG REMO	-	-	3,2	6,4	6,3
3.3	BfG STAR	-	-	-8,6	-7,5	-12,2

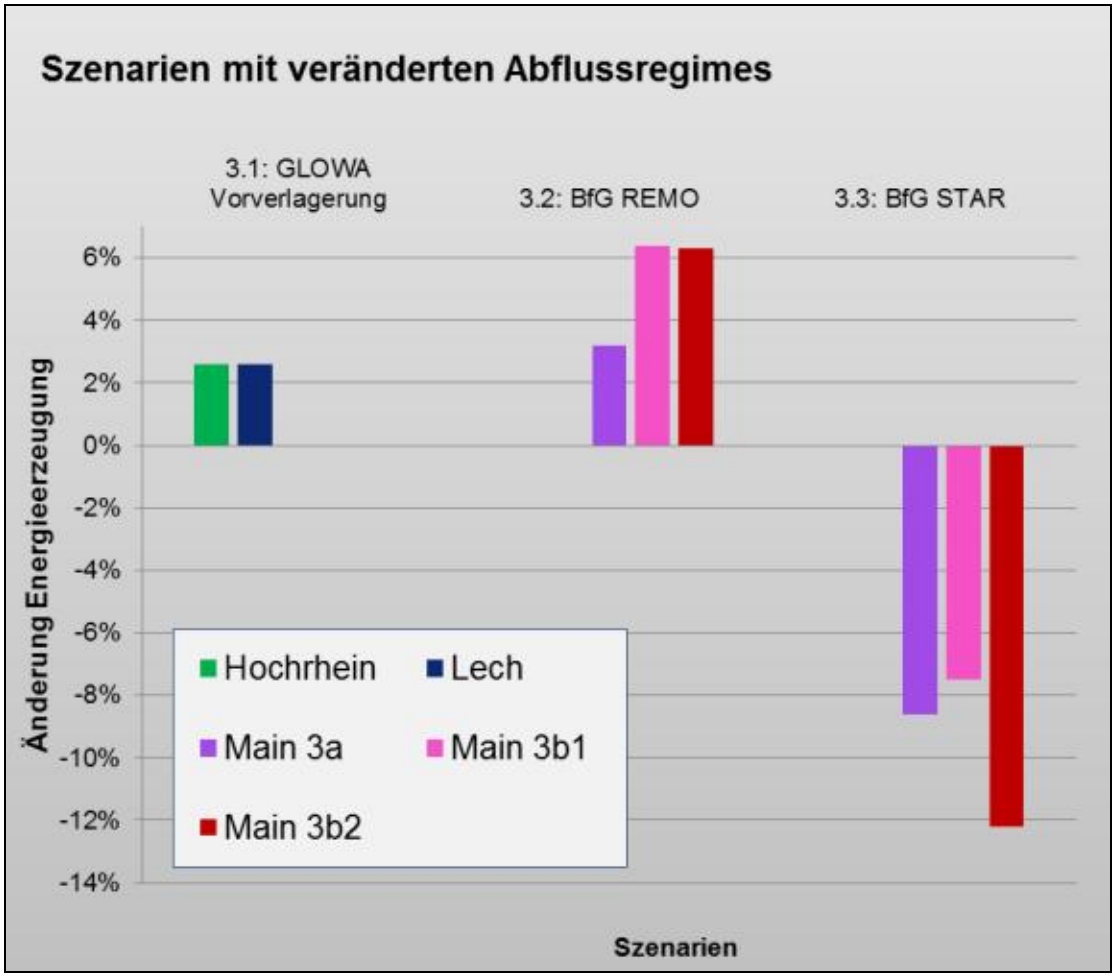


Abb. 6-4: Szenarien mit veränderten Abflussregimes und die daraus berechnete Änderung der mittleren langjährigen Energieerzeugung DEa der Wasserkraftanlagen

Das Szenario GLOWA führt für die Anlagen am Hochrhein und am Lech zu einem Abflusszuwachs von im Mittel 1,2 %, die zu einer entsprechend größeren Energieerzeugung (+ 2,6 %) genutzt werden kann.

Das Szenario „BfG REMO“ beinhaltet eine außergewöhnliche Abflusszunahme in Höhe von 24 %. Die Beispielanlage Main 3a kann diesen mit nur ca. + 3 % Energiezuwachs nur geringfügig nutzen, während für die Anlagen 3b1 und 3b2 eine 6 % höhere Energieerzeugung berechnet wurde.

Das Szenario „BfG STAR“ enthält ein um ca. 10 % geringeres MQ. Es ergeben sich deutliche Energieeinbußen zwischen 7,5 und 12 %. Die Anlage 3b2 verzeichnet eine Mindererzeugung von über 12 %. Es liegt nahe, dass die eingebaute Francis-Turbine bei den niedrigen Zuflüssen in den Arbeitsbereich mit geringerem Wirkungsgrad gerät.

6.5.4 Zusammenfassung Szenarienrechnung

Die Mehrheit der hier betrachteten Szenarien führt zu einer Einbuße in der Energiegewinnung unabhängig von Standort, Abflussregime und Anlagenart. Tendenziell können mögliche Mindererzeugungen nicht durch mögliche Zuwächse in gleicher Größenordnung kompensiert werden.

Die breiten Prognosekorridore für die Niederschlags- und Abflussentwicklung lassen zurzeit keine eindeutigen Aussagen zu. Als unsichere Parameter sind die Jahresniederschlagssummen, die Winterniederschläge und die Entwicklung der Extrema zu nennen.

Die Untersuchungen haben deutlich gemacht, dass die Anlagen generell für ausgeglichene Regime ausgelegt sind, die auch in den Sommermonaten eine nennenswerte Energieerzeugung ermöglichen. Auf Änderungen der Abflüsse können diejenigen Anlagen nicht flexibel genug reagieren, die nur über eine Turbine verfügen, deren Wirkungsgradverlauf (insbesondere bei Francisturbinen) zu steil ist.

Einige der untersuchten Szenarien zeigen, dass der Klimawandel für die Energieerzeugung aus Wasserkraft auch Chancen bieten könnte, wenn nivale Abflussregime vergleichmäßigt werden und im Winter Abflusserhöhungen auftreten.

7 Anpassung

Die DAS (Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel) unterscheidet Auswirkungen der Klimaänderungen auf die erneuerbaren Energien hinsichtlich Ertrag und Sicherheit der Anlagen [DAS 2008]. Im Folgenden werden vier grundsätzliche Maßnahmen hinsichtlich der Energieerzeugung vorgestellt. Die Anlagensicherheit wird in Punkt 5 zusammengefasst.

7.1 Mögliche Anpassungsstrategien

7.1.1 Abflüsse und das hydrologische Regime

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, Veränderungen des Abflussregimes durch eine veränderte/verbesserte Wasserspeicherung zumindest teilweise auszugleichen. Dabei werden heute nicht nutzbare Abflussanteile zeitlich zurückgehalten, um sie während der Perioden mit niedrigem Abfluss wieder abzugeben. Weiterhin können Wassertransfers über natürliche Wasserscheiden vorgenommen werden.

Die Speicherung kann in Talsperren geschehen und für konkrete Standorte großen Einfluss hinsichtlich der Energieerzeugung haben. Jedoch wird der Einfluss dieser Maßnahmen auf die Gesamterzeugung der deutschen Wasserkraftwerke angesichts des geringen Anteils der alpinen Gewässer begrenzt sein, während die erforderlichen Eingriffe in die Landschaft sehr groß sind.

Als weitere Möglichkeit zur Beeinflussung des Abflussverhaltens sind auch Grundwasserentnahmen und -anreicherungen zu nennen. Der anthropogene Einfluss auf das Grundwasser spielt jedoch zumeist nur in flachen Gegenden eine Rolle. In Regionen mit hoher Reliefenergie und daraus resultierenden großen Wasserkräften ist die Einflussnahme auf das Grundwasser zu vernachlässigen.

7.1.2 Veränderung der Kraftwerksauslegung

Eine Erhöhung der Energieausbeute aus Wasserkraftanlagen kann durch eine Erhöhung des Ausbaugrades erreicht werden. Während heute bei der Großen Wasserkraft mit Ausbaugraden von 1,1 bis 1,25 und mehr gearbeitet wird, ist für die Erhöhung der Potenzialnutzung ein Ausbaugrad von bis zu 1,4 oder 1,5 realisierbar und darstellbar. Wenn dieser weitere Ausbau an bestehenden Standorten vorgenommen wird, sind gleichermaßen alle Möglichkeiten zur Anpassung von Wasserkraftanlagen an veränderte Abflussregime ausgenutzt. 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. Auch wenn entsprechende Genehmigungsverfahren als eine mögliche Maßnahme vereinfacht würden, so bestehen in der Regel dennoch enge topographische, bauliche und technische Grenzen für eine Erhöhung der Ausbaufallhöhe.

Häufig werden die dargestellten Veränderungen nur im Zug der Generalrevision eines Standortes zu realisieren sein.

7.1.3 Maschinelle Ausrüstung, Automatisierung und betriebliche Abläufe

Grundsätzlich kann die Energieausbeute aus Wasserkraftanlagen durch Verbesserung des Wirkungsgrades erhöht werden. Dies betrifft insbesondere Turbinen, Generatoren und Getriebe bzw. deren Wegfall durch direkte Kopplung von Turbine und Generator. Auch wenn die Maschinenwirkungsgrade bereits hoch entwickelt sind, so lassen sich doch durch neue Laufräder nicht unerhebliche Verbesserungen erzielen. Insbesondere bei großen Wasserkraftanlagen ergeben sich erhebliche Steigerungen der Energieerzeugung. Die beschriebenen Modernisierungsmaßnahmen werden häufig dann erfolgen, wenn keine Revisionen oder Umbauten erforderlich sind.

Die Erhöhung des Ausbaugrades entsprechend Punkt 2 führt zwangsläufig zur Verlängerung der Zeiten, in den 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 immer noch ein erhebliches Verbesserungspotenzial durch Einsatz automatischer Steuerungen und Rechenreinigungsmaschinen. Pro Standort kann so die Energieerzeugung typischerweise um 10 bis 15 % gesteigert werden. Im gleichen Sinn wirken Verbesserungen im Anlagenmanagement: automatische Wehre, Einlauf- und Spülschütze vermindern Stillstandzeiten und händische Arbeit.

7.1.4 Wertigkeit der erzeugten Energie durch Planbarkeit

Die Erzeugung von Energie aus Wasserkraft wird durch naturräumliche Gegebenheiten limitiert: der Zufluss – nicht aber die Nachfrage - bestimmt die Energieerzeugung. Hilfreich sind Kenntnisse und Planbarkeit zum hydrologischen System. Der Jahresgang ist im Mittel 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. Durch Einsatz dieser Systeme kann die Netzintegration des erzeugten Stroms und die Substitution von konventioneller Erzeugung verbessert werden.

7.1.5 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.

Mit Hinweis auf die deutsche Anpassungsstrategie wird empfohlen, Synergiepotenziale zu nutzen und Vorsorge, außer im baulichen Bereich, auch auf das Verhalten von Stakeholdern zu beziehen. Positive Synergieeffekte für die Wasserkraft ergeben sich beispielsweise, wenn Hochwasserrückhaltebecken ausgebaut und Talsperrenbewirtschaftung auf die Ziele Tourismus, Wasserversorgung und Abflussregelung ausgerichtet werden.

7.1.6 Anpassungsstrategien für die hier betrachteten Anlagen

Tabelle 7-1: Zusammenstellung der untersuchten Anlagen und den Szenarien mit den gravierendsten Auswirkungen

	Hochrhein	Lech	Main 3a	Main 3 b1	Main 3 b2
Abflussregime	nival-glazial	nival	pluvial	pluvial	pluvial
Turbinen	4 Kaplan	2 Kaplan	2 Kaplan	2 Kaplan	1 Francis
Ausbaugrad	1,4	1,5	0,9	1,1	1,1
Szenario mit den gravierendsten Auswirkungen	1.2: -10% Winter-Nieder-schlag DEa: -3,4%	1.2: -10% Winter-Nieder-schlag DEa: -5,0%	3.3: BfG STAR DEa: -8,6%	3.3: BfG STAR DEa: -7,5%	3.3: BfG STAR DEa: -12,2%

Die Anlagen am Hochrhein und am Lech mit hohen Ausbaugraden reagieren empfindlich auf Abflussänderungen, wie sie z.B. im Szenario 1.2 mit 10 % geringerem Winterniederschlag ausgeprägt angesetzt wurden. Mit vier bzw. zwei Kaplanturbinen können sie trotz Abflussschwankungen mit hohen Wirkungsgraden Energie erzeugen und, bei den gegebenen Fallhöhen, auch Hochwasserperiode vergleichsweise gut nutzen. Anpassungsmaßnahmen können daher nur auf die Wertigkeit der Energie durch Vorhersagen und ggf. Verbesserung betrieblicher Aspekte zielen. Die Anlagen am Main mit pluvialem Regime reagieren insgesamt sensibler auf die Abflussänderungen in den Szenarien. Am gravierendsten wirkt sich das Szenario BfG STAR aus. Aber auch eine Verstärkung der Niedrigwasserextrema führt zu Mindererzeugungen zwischen 3,8 und 5,1 %.

Verbesserungspotenzial besteht für die Main-Anlagen in einer Erhöhung des vergleichsweise niedrigen Ausbaugrads durch eine Optimierung der Turbinenanlagen.

Die Anlage Main 3b2 kann mit nur einer Francis-Turbine am unflexibelsten auf Abflussschwankungen reagieren. Hier sollte der Einbau einer weiteren Francis-Turbine oder die Umstellung auf zwei Kaplan-Turbinen erwogen werden.

Für den Neubau von WKA-Anlagen lassen sich aus den Untersuchungen die folgenden Empfehlungen formulieren:

- Einsatz mehrerer Kaplanturbinen
- Hoher Ausbaugrad $> 1,4$
- Variierbare Fallhöhe
- Hoher Automationsgrad der Steuerungen und Maschinen
- Einsatz von operativen Mess-, Vorhersage und Warnsystemen
- Optimaler baulicher Schutz vor Schäden durch Hochwasser.

8
Zusammenfassung

Der aktuelle Stand der Klimaforschung beschreibt einheitlich einen signifikanten Temperaturanstieg sowohl für die nähere Zukunft (bis ca. 2050), als auch für die ferne Zukunft (bis zum Ende des Jahrhunderts). Dies hat einen erheblichen Einfluss auf das Abflussverhalten der Gewässer und damit auf die Energieerzeugung und Ertragssituation von Wasserkraftanlagen.

Aussagen zur Entwicklung der Niederschläge in Deutschland sind durch eine vergleichsweise große Schwankungsbreite gekennzeichnet und variieren je nach Modell und Region.

Abflüsse folgen in erster Linie den Niederschlägen. Da der Wasserhaushalt und die Abflussregime weiterhin von sommerlichen Verdunstungen und Schneeschmelzprozessen erheblich beeinflusst werden, zeigen viele Modellierungen scheinbar eindeutige Tendenzen mit Abflussabnahmen in den Sommermonaten und Abflusszunahmen zum Frühjahr hin. Sie müssen aber zurückhaltend kommentiert werden, da sie vornehmlich in der fernen – und somit schwerer vorhersagbaren - Zukunft signifikant werden und dort größere Ensembles von Globalmodellen und Regionalisierungsverfahren breite Ergebniskorridore offen lassen.

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 jährliche Erzeugung sehr sensitiv auf Schwankungen des Wasserdargebots reagiert. Die Mehrzahl der betrachteten Szenarien führen zu Mindererzeugungen bis zu ca. 10 %. Einzelne, ebenfalls plausible Niederschlags- und Abflusssszenarien resultieren in einer gesteigerten Energieerzeugung bis etwa 5 %.

Um mögliche Mindererzeugungen aus Wasserkraft zu kompensieren, empfiehlt es sich in allen Fällen eine Automatisierung und der Einsatz von gut regelbaren Maschinensätzen. Ggf. mögliche Speicherungen und Fallhöhensteigerung verbessern die Energieausbeute und Anpassungsfähigkeit.

9 Ausblick

Bis auf die Beispielanlage 3b2 (WKA im Mittelgebirge mit einer Francisturbine) gehören alle untersuchten Anlagen zur großen Wasserkraft in Deutschland und sind mit jeweils mindestens 2 Kaplanturbinen technisch sehr gut ausgestattet.

Andere Turbinentypen und Anlagen mit nur einer Turbine reagieren empfindlicher auf Abweichungen vom geplanten Anlagenzustand. Fallhöhenveränderungen und Verschiebungen der hydrologischen Daten ergeben signifikante Einbußen.

Anzuraten wären weitere Beispielrechnung auch für die kleine Wasserkraft. Allerdings verlieren die bisher bekannten Abflussmodellierungen für die verschiedenen Klimaszenarien mit zunehmender Regionalisierung an Aussagekraft und Einheitlichkeit. Wir empfehlen insofern synchron zu den aktuell laufenden Projekten der Klimafolgenforschung, die Sensitivität der Wasserkraft weiter zu evaluieren

Die Berechnungen dieser Untersuchung verwendeten historische Abflusszeitreihen. Sie wurden mit plausiblen und den vorliegenden Erkenntnissen der Klimaforschung entsprechenden Korrekturen transformiert. Ein detailliertes Rechenmodell, das die spezifischen technischen und hydraulischen Anlageneigenschaften beschreibt, lieferte die Energieerzeugungen. Zukünftig stehen auch generierte Abflusszeitreihen für viele Flussgebiete und Standorte zur Verfügung. Es wird daher vorgeschlagen auch die generierten Reihen mit dem genannten detaillierten WK-Rechenmodell zu untersuchen.

Zur Steigerung der Wertigkeit der Erneuerbaren Energien im Bereich Wasserkraft wird empfohlen, die im Vergleich zu anderen EE bessere Vorhersagbarkeit weiter aufzuwerten und, wie für dem Bereich der Windenergie bekannt, kontinuierlich betriebene Vorhersagemodelle weiter zu entwickeln. Synergien mit der Hoch- und Niedrigwasservorhersage sind vorgegeben. Ein „offline-Modus“ kann dann auch die z. Z. noch wenig befriedigenden Szenarienrechnungen laufend verbessern.

10 Literatur

BACHHIESL, M. & O. PIRKER (2000): Zuflussvorhersage im Verbund. In: Wiener Mitteilungen Band 164: Niederschlag-Abfluss Modellierung - Simulation und Prognose. Wien. S. 57 - 72.

BÁRDOSSY, A. (2009): Auswirkung des Klimawandels auf Extremniederschläge. In: 4. KLIWA-Symposium im Dezember 2009 in Mainz „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft".

BECKER, P. (2009): Klimaforschungslandschaft in Deutschland und die Rolle des Deutschen Wetterdienstes. In: 4. KLIWA-Symposium im Dezember 2009 in Mainz „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft".

BELZ, J. W. BELZ, J.U., BRAHMER, G., BUITEVELD, H., ENGEL, H., GRABHER, R., HODEL, H., KRAHE, P., LAMMERSEN, R., LARINA, M., MENDEL, H.-G., MEUSER, A., MÜLLER, G., PLONKA, B., PFISTER, L. & W. VAN VUUREN (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert - Analyse, Veränderungen, Trends. Schriftenreihe der KHR, Koblenz und Lelystad. S. 377.

BRAHMER, G. (2007): Klimawandel und seine Konsequenzen für die Wasserwirtschaft in Hessen. In: KLIWA Berichte Heft 10: 3. KLIWA-Symposium am 25. und 26.10.2006 in Stuttgart. Fachvorträge Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Arbeitskreis KLIWA (Hrsg.). Karlsruhe. S. 211 - 222.

BUWAL, BWG, & METEOSCHWEIZ (2004): Auswirkungen des Hitzesommers 2003 auf die Gewässer. Schriftenreihe Umwelt Nr. 369. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern. S. 174.

DAS 2008: Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Beschluss des Bundeskabinetts am 17. Dezember 2008.

DWD 2010: Downloads im April 2010 von der Homepage des DWD (www.dwd.de).

FICHTNER: Die Wettbewerbsfähigkeit von großen Laufwasserkraftwerken im liberalisierten deutschen Strommarkt. Stuttgart. 2003.

HÄNGGI, P. & C. PLATTNER (2009): Projekt Klimaänderung und Wasserkraftnutzung - Schlussbericht der Vorstudie, 2. Auflage. Bern, Davos.

IHRINGER, J. (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf Niedrigwasser. In: 4. KLIWA-Symposium im Dezember 2009 in Mainz. „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“.

IPCC FOURTH ASSESSMENT REPORT (AR4) CLIMATE CHANGE 2007 (2007): Synthesis Report. Pachauri, R. K. und Reisinger, A. (Hrsg.) IPCC, Genf, Schweiz.

KRAHE, P., NILSON, E., CARAMBIA, M., MAURER, T., TOMASSINI, L., BÜLOW, K., JACOB, D. & H. MOSER, (2009): Wirkungsabschätzung von Unsicherheiten der Klimamodellierung in Abflussprojektionen – Auswertung eines Multimodell-Ensembles für das Rheingebiet. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 53 (2009) 5, S. 316 - 331.

KOCH, F., REITER, A. & H. BACH (2010): Teilprojekt Hydrologie/Fernerkundung - Auswirkungen des Klimawandels auf die Energiegewinnung aus Wasserkraft und auf die Talsperrenbewirtschaftung. In: GLOWA-Danube-Projekt, Universität München, LMU (Hrsg.). Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. München.

KUHN, M. & M. OLEFS (2007): StartClim2007.E. Auswirkung von Klimaänderungen auf das Abflussverhalten von vergletscherten Einzugsgebieten im Hinblick auf Speicherkraftwerke.
Abrufbar unter:
http://www.austroclim.at/fileadmin/user_upload/reports/StCl07E.pdf (Stand: 10.03.2010)

MAUSER, W. (2006): Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. München: LMU.

MAUSER, W. (2009): Teilprojekt Hydrologie/Fernerkundung – Szenarien zur Entwicklung des Hochwassers an der oberen Donau. In: GLOWA-Danube-Projekt, Universität München, LMU (Hrsg.). Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. München.

MUNLV (2005): Handbuch Querbauwerke, Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.)

PRELLBERG, D. (2009): Langjährige Hochwasserabflüsse in Rheinland-Pfalz. In: 4. KLIWA-Symposium im Dezember 2009 in Mainz. „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“.

SCHERZER, J., DISSE, M., JACOBY, C., HEINISCH, T., GRIGORYAN, G., SCHULTZE, B., STADELBACHER, V., NIEDERBERGER J. & H. PÖHLER (2009): WAS-Klim Abschlussbericht. Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (Hrsg.), Dessau, S. 234.

WEBER, M. & M. PRASCH (2009): Teilprojekt Glaziologie – Einfluss der Gletscher auf das Abflussregime und dessen Veränderung. In: GLOWA-Danube-Projekt, Universität München, LMU (Hrsg.). Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. München.

ZABEL, F. (2009): Teilprojekt Hydrologie/Fernerkundung – Änderung des Wasserhaushalts im Zuge des Klimawandels. In: GLOWA-Danube-Projekt, Universität München, LMU (Hrsg.). Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. München.

Wir danken

der BfG für die Bereitstellung folgender Unterlagen aus dem KLIWA-Projekt:

- Abflusszeitreihen verschiedener Pegel an deutschen Wasserstraßen
- ausgewählter langjähriger Abflussganglinien (1960 – 2000) für verschiedene Referenzpunkte im Rheineinzugsgebiet
- Informationen und Auskünfte zum Stand des KLIWA Projektes

Prof. Dr. W. Mauser für die Zustellung des Global Change Atlas in der neuesten Version.

Verwendete EDV-Programmsysteme

ArcGIS®, Version 9.2	ESRI, Redlands, CA, USA
HPPT, Version 4.0	Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aachen
TimeView®, Version 2.4	Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Aachen