

# Potentialermittlung für den Ausbau der Wasserkraftnutzung in Deutschland

## *Kurzfassung*

Auftraggeber:



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit

Bearbeitung:

Ingenieurbüro Floecksmühle  
wasser umwelt energie



Universität Stuttgart  
Institut für Strömungsmechanik und  
Hydraulische Strömungsmaschinen



**FICHTNER** GmbH & Co. KG

Aachen, im September 2010

Bearbeitende Büros	Arbeitsbereiche
<p><b>Ingenieurbüro Floecksmühle, Aachen</b></p> <p>Bachstraße 62-64 52066 Aachen Projektleitung: Pia Anderer Projektaufsicht: Ulrich Dumont E-Mail: <a href="mailto:ib@floecksmuehle.com">ib@floecksmuehle.com</a></p>	<p><b>Projektleitung</b></p> <p>Linienpotential Kleine Wasserkraft</p> <p>Literaturrecherche</p>
<p><b>Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen der Universität Stuttgart (IHS)</b></p> <p>Abteilung Strömungsmechanik, Anlagendynamik und Meeresenergie</p> <p>Pfaffenwaldring 10 D-70569 Stuttgart Dr. A. Ruprecht E-Mail: <a href="mailto:Albert.ruprecht@ihs.uni-stuttgart.de">Albert.ruprecht@ihs.uni-stuttgart.de</a></p>	<p>Große Wasserkraft</p> <p>Neue Techniken</p>
<p><b>Hydrotec Ing.-Ges. für Wasser und Umwelt mbH</b></p> <p>Bachstraße 62-64 52066 Aachen Ulrich Wolf-Schumann E-Mail: <a href="mailto:mail@hydrotec.de">mail@hydrotec.de</a></p>	<p>Einfluss Klimaveränderung</p> <p>Linienpotential</p>
<p><b>Fichtner GmbH &amp; Co. KG</b></p> <p>Sarweystr. 3 70191 Stuttgart</p> <p>Dr.-Ing. Stephan Heimerl E-Mail: <a href="mailto:Stephan.Heimerl@fichtner.de">Stephan.Heimerl@fichtner.de</a></p> <p>ERNEUERBARE ENERGIEN UND UMWELT Wasserkraft - Abteilungsleiter im Projektbereich Wasserkraft</p>	<p>Große Wasserkraft</p> <p>Literaturrecherche</p>

## Inhalt

<b>1 Einführung .....</b>	<b>4</b>
<b>2 Der Potentialbegriff .....</b>	<b>5</b>
<b>3 Aktuelle Wasserkraftnutzung.....</b>	<b>6</b>
<b>4 Das Linienpotential deutscher Gewässer .....</b>	<b>9</b>
<b>5 Das technische Potential.....</b>	<b>11</b>
<b>6 EG-Wasserrahmenrichtlinie und Wasserkraftnutzung .....</b>	<b>11</b>
<b>7 Das Zubaupotential an großen Gewässern .....</b>	<b>13</b>
<b>7.1 Das Zubaupotential an Wasserkraftanlagen mit <math>P &gt; 1</math> MW .....</b>	<b>15</b>
<b>7.2 Das realisierbare Zubaupotential an großen Gewässern.....</b>	<b>17</b>
<b>8 Das Zubaupotential für mittelgroße und kleine Gewässer .....</b>	<b>18</b>
<b>9 Neue Techniken und neue Technologien zur Nutzung der Wasserkraft .....</b>	<b>21</b>
<b>10 Auswirkungen der Klimaveränderung auf die Wasserkraftnutzung .....</b>	<b>22</b>
<b>11 Zusammenfassung.....</b>	<b>23</b>
<b>12 Literatur .....</b>	<b>25</b>

# 1

## Einführung

Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt, 2030 einen Deckungsanteil der erneuerbaren Energien am gesamten Stromverbrauch von 45 % zu erreichen. Derzeit stellen sie insgesamt einen Anteil von etwa 14 % bereit, die Wasserkraft hat daran einen Anteil von ca. 25 %.

Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) wurde auf der Grundlage einer für ganz Deutschland einheitlichen Methode das zusätzlich ausbaubare Wasserkraftpotential als Ausgangsbasis für eine deutsche Ausbaustrategie ermittelt.

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts erschienen zahlreiche Veröffentlichungen zum Thema Wasserkraft und Wasserkraftpotential [1] bis [9], die Angaben zum genutzten und zum zusätzlich nutzbaren Potential enthalten. Sie basieren im Wesentlichen auf zwei Methoden:

- der Standort-Methode, bei der die Ausbaumöglichkeiten in der Regel an vorhandenen, ggf. aber auch neu zu errichtenden Stauanlagen betrachtet werden und
- der Linienpotential-Methode, bei der das natürlich vorhandene, aber nur theoretisch verfügbare Wasserkraftpotential aus Abfluss und Höhendifferenzen ermittelt wird.

In dem hier beschriebenen Vorhaben wurde mit Hilfe der Standort-Methode das Zubaupotential bestehender Wasserkraftanlagen mit  $P \geq 1$  MW untersucht. Da für kleinere Anlagen aufgrund der unzulänglichen Datenlage eine Standort-Analyse nicht Deutschland weit einheitlich möglich war, wurde für alle deutschen Gewässer ab einer Einzugsgebietsgröße  $\geq 10$  km<sup>2</sup> das natürlich vorhandene Linienpotential ermittelt und daraus das gesamte technisch vorhandene Potential abgeschätzt.

## 2

**Der Potentialbegriff**

Als Potential wird in der Physik die Fähigkeit definiert, Arbeit zu verrichten. Die Einheit ist die einer Arbeit bzw. Energie: Wh bzw. kWh, MWh, GWh etc.

Der theoretische, maximal verfügbare Energievorrat eines Gewässers wird als Abflusslinienpotential oder Linienpotential  $E_L$  bezeichnet. Dieses wird aus der Linienleistung  $P_{L,MQ}$  ermittelt, die sich entlang eines Gewässern abschnittsweise aus dem durchschnittlichen jährlichen Abfluss  $MQ_i$  und dem vorhandenen Gefälle  $\Delta h_i$ , ohne Berücksichtigung jedweder Verluste ergibt. Durch Multiplikation mit der Stundenzahl eines Jahres erhält man das theoretische Linienpotential:

$$E_{L,i} = P_{L,MQ,i} \cdot 8\,760 \text{ h} \quad \text{Potential des Abschnitts } i \quad (1)$$

mit der Linienleistung:

$$P_{L,MQ,i} = MQ_i \cdot \Delta h_i \cdot \rho_w \cdot g \quad (2)$$

$$E_{L,k} = \sum E_{L,i} \quad \text{Potential der Gewässerstrecke } k$$

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$  (Erdbeschleunigung)

$\rho_w = 1.000 \text{ kg/m}^3$  (Dichte von Wasser).

Das theoretische Linienpotential  $E_L$  ist eine Größe, die grundsätzlich nur zu einem bestimmten Teil in elektrische Energie umgewandelt werden kann.

## Aktuelle Wasserkraftnutzung

Die Wasserkraft gilt in der Bundesrepublik Deutschland als relativ gut ausgebaut, da an den meisten potentiellen Standorten mit einer Leistung  $\geq 1$  MW bereits Wasserkraftanlagen installiert sind. Die Stromerzeugung aus Wasserkraft unterlag in den letzten Jahrzehnten natürlichen jährlichen Schwankungen von über  $\pm 15$  %. Daher ist beim Vergleich veröffentlichter Zahlen sowohl auf Zeitangaben als auch auf den räumlichen Umfang der Ermittlungen zu achten.

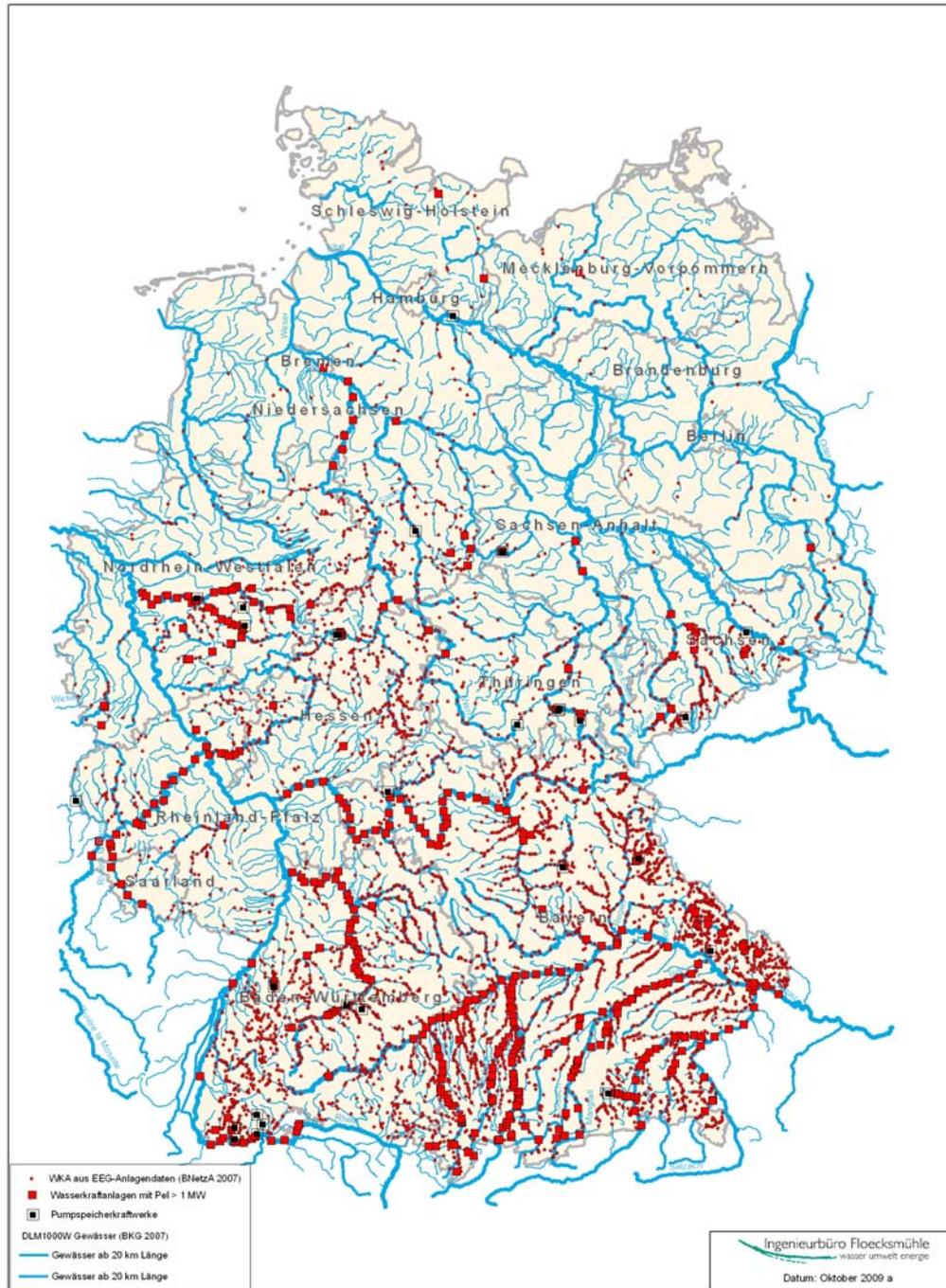
Die Zahl der in Betrieb befindlichen Wasserkraftanlagen (WKA) wird für Anfang 2007 mit etwa 7.300 angegeben [5]. In der vorliegenden Untersuchung wurden 6.484 WKA ermittelt, die in 2007 eine Vergütung nach dem Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) erhielten. Weitere 171 WKA mit  $P \geq 1$  MW ohne EEG-Vergütung und 31 Pumpspeicherkraftwerke kommen hinzu, so dass die Daten 6.686 von WKA ausgewertet werden konnten. Die Standorte der großen WKA sind bekannt und die technischen Daten weitgehend veröffentlicht.

Bild 1 zeigt deutlich die Konzentration der Wasserkraftanlagen im mittel- und süddeutschen Raum und entlang der großen Gewässer. Nicht dargestellt wurden die zusätzlichen 600 bis 900 Wasserkraftanlagen, deren Zahl auf der Grundlage bekannter Daten für Bayern, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz auf Gesamtdeutschland hochgerechnet wurden.

Zu 6.656 WKA lagen Angaben zur installierten Leistung vor, die etwa 4,05 GW beträgt. Zusätzlich ist in 31 Pumpspeicherkraftwerken eine Turbinenleistung von ca. 6,6 GW installiert.

Als Ergebnis der Recherche beträgt die durchschnittlich generierte Jahresarbeit 20,9 TWh. Dieser Wert beinhaltet das Regelarbeitsvermögen (RAV= langjähriger Mittelwert) der WKA mit  $P \geq 1$  MW, den regenerativen Anteil aus natürlichem Zufluss zu Pumpspeicherkraftwerken und die Jahresarbeit der WKA mit  $P < 1$  MW, für die eine mittlere Jahresarbeit auf der Grundlage langjähriger mittlerer Abflüsse abgeschätzt wurde. 84 % der gesamten Jahresarbeit wurde von den 406 Wasserkraftanlagen der Leistung  $P \geq 1$  MW bereit gestellt (Tabelle 1).

Den größten Beitrag zum genutzten Potential liefern die Länder Bayern und Baden-Württemberg, in denen zusammen etwa 80 % der Jahresarbeit erzeugt wird (Bild 2 und Bild 3).



**Bild 1: Bestand der genutzten Wasserkraftanlagen in Deutschland; berücksichtigt wurden Wasserkraftanlagen mit EEG-Vergütung [11], WKA mit  $P_{\text{inst}} \geq 1 \text{ MW}$  und Pumpspeicherkraftwerke (DLM1000W: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)**

**Tabelle 1: Anzahl, installierte Leistung und Jahresarbeit deutscher Wasserkraftanlagen (Stand März 2010).**

	WKA mit P ≥ 1 MW	WKA mit P < 1 MW	Pumpspeicherkraftwerke	gesamt
Zahl der WKA	406	6.250 + im Mittel ca. 750 WKA mit Betrieb für Eigenbedarf <sup>a</sup>	31	ca. 7.400
Installierte Leistung [GW]	3,40 <sup>b</sup>	0,65	--	4,05
Jahresarbeit D [TWh]	17,5 <sup>b</sup> (RAV)	2,8 <sup>c</sup>	0,6 <sup>d</sup>	20,9

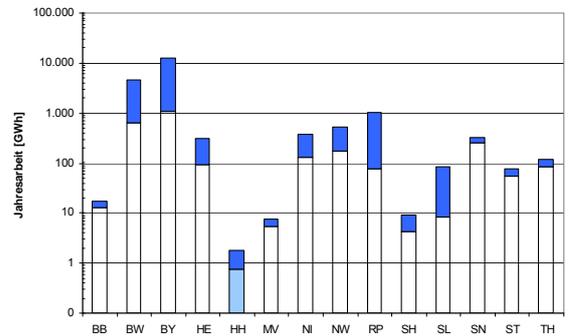
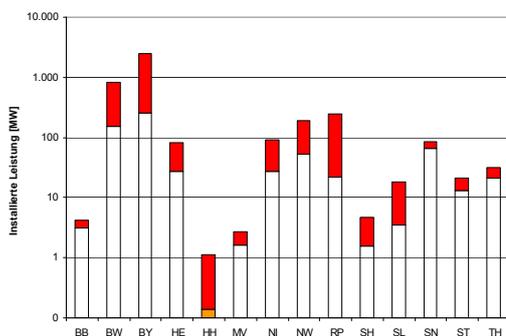
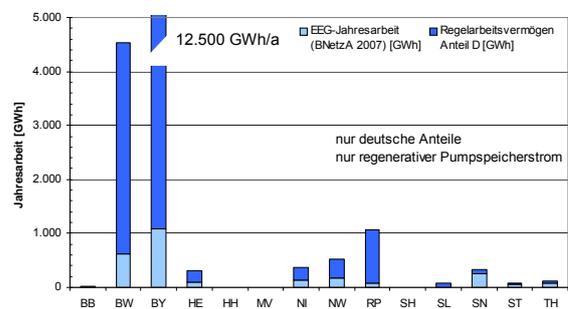
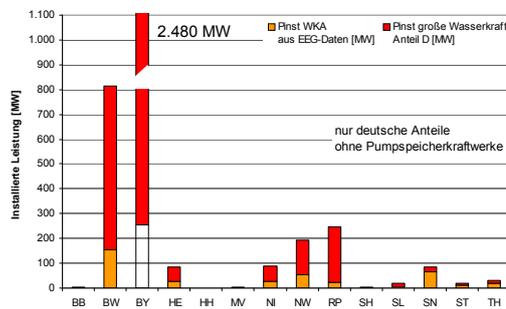
<sup>a</sup> WKA mit Betrieb für Eigenbedarf wurden wegen fehlender Daten nicht bei installierter Leistung und Jahresarbeit berücksichtigt;

<sup>b</sup> Bei Grenzkraftwerken wurde nur der deutsche Anteil berücksichtigt;

<sup>c</sup> Näherung an langjährigen Mittelwert;

<sup>d</sup> langjähriger Mittelwert aus natürlichen Zufluss;

RAV: Regelarbeitsvermögen



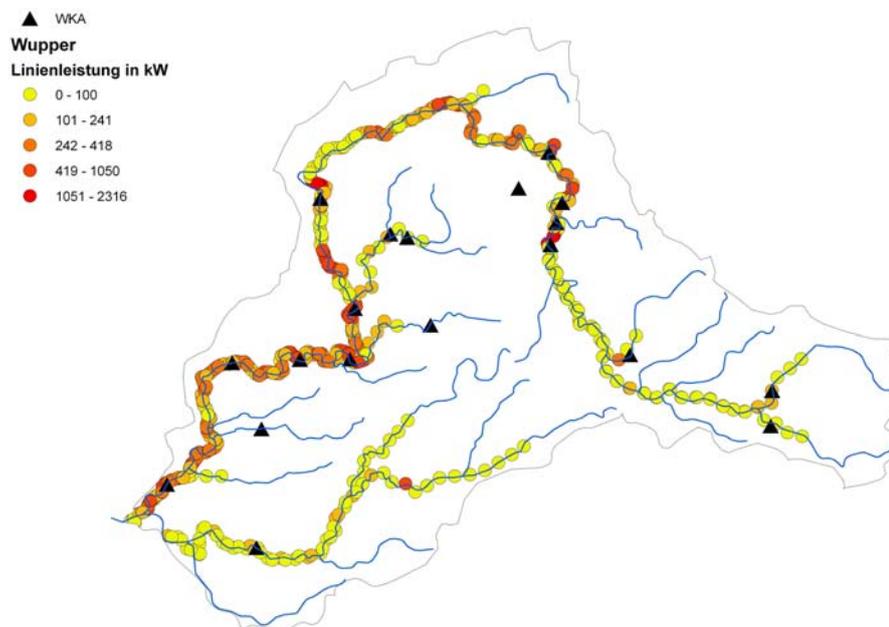
**Bild 2: Installierte Leistung der WKA; Stand 2007, untere Abbildung mit logarithmischer y-Achse.**

**Bild 3: Jahresarbeit der WKA, Stand 2007; untere Abbildung mit logarithmischer y-Achse.**

## Das Linienpotential deutscher Gewässer

Während das Zubaupotential großer WKA Standort spezifisch ermittelt werden konnte, wurde zur Erfassung des Potentials an Standorten mit  $P < 1$  MW das Linienpotential für ganz Deutschland berechnet. Dazu wurden digital vorliegende Daten zur Geländemorphologie und zu den Abflüssen in einem Geografischen Informationssystem (GIS) verarbeitet.

Bild 4 zeigt am Beispiel der Wupper die im GIS aus Höhendifferenzen und Abflüssen berechnete Linienleistung, die für 10 km Abschnitte aggregiert wurde.



**Bild 4: Berechnete Linienleistungen, aggregiert für 10 km Abschnitte; Abstufung von gelb (geringes) nach rot (hohes Potential). Die Dreiecke zeigen in Betrieb befindliche WKA.**

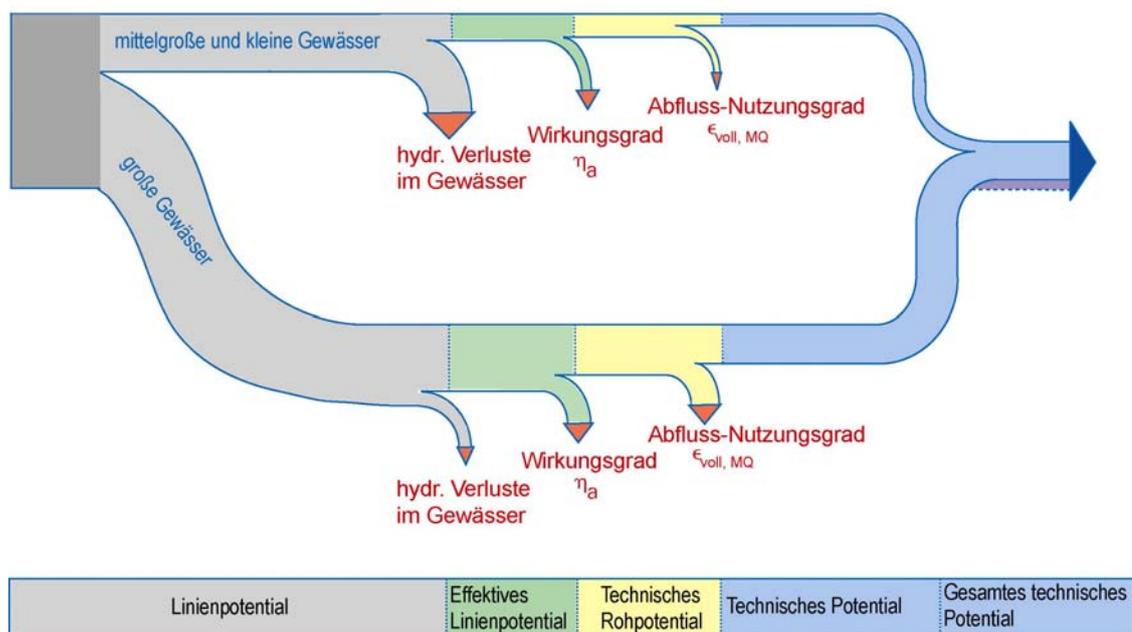
Das theoretische Linienpotential wurde für alle Gewässer in Deutschland für Einzugsgebiete größer 10 km<sup>2</sup> ermittelt zu

$$E_L = 92,6 \text{ TWh.}$$

Das theoretische Linienpotential kann nie vollständig genutzt werden:

- Fließverluste der Gewässer (u. a. Turbulenzen, Geschiebetransport) und Anlagenverluste reduzieren das Linienpotential auf das technische Rohpotential.
- Turbinen können nicht den gesamten jährlichen Abfluss verarbeiten. Unter Berücksichtigung der realen Nutzungsmöglichkeiten ergibt sich das technische Potential.

Die genannten Verluste wurden für große und mittelgroße bis kleine Gewässer spezifisch bestimmt. Die Untersuchung zeigte, dass für große Gewässer maximal etwa 60 % des Linienpotentials technisch genutzt werden kann, während bei mittelgroßen bis kleinen Gewässern dieser Prozentsatz je nach angenommenem Ausbaugrad auf etwa 20 % zurückgeht (Bild 5).



**Bild 5:** Aus dem Linienpotential wurde das technische Potential differenziert für große sowie für mittelgroße und kleine Gewässer ermittelt. Die gestrichelte Linie deutet die Spanne bei der Ermittlung des technischen Potentials an.

## 5

### Das technische Potential

Das technische Potential  $E_{\text{tech}}$  stellt den maximalen Wert dar, der unter realen Bedingungen genutzt werden kann. Bei der Herleitung des technischen Potentials für ganz Deutschland waren Annahmen und Näherungen bezüglich der Anlagenwirkungsgrade, Jahresvolllaststunden und Fließverluste erforderlich. Die Fließverluste und die Jahresvolllaststunden gingen dabei als Spanne in die Berechnungen ein. Daher wird das technische Potential der 25 größten deutschen Flüsse zu 28,4 bis 36,0 TWh und der mittelgroßen und kleinen Gewässer zu 4,8 bis 6,1 TWh angegeben.

Das technische Potential aller Gewässer in Deutschland beträgt demnach:

$$E_{\text{tech}} = 33,2 \text{ bis } 42,1 \text{ TWh.}$$

Dieses technische Potential beinhaltet das genutzte Potential von

$$E_a = 20,9 \text{ TWh.}$$

## 6

### EG-Wasserrahmenrichtlinie und Wasserkraftnutzung

Die Bundesländer haben die Fließgewässer in ihren Flussgebietseinheiten dahingehend bewertet, ob der gute Zustand/ Potential der Gewässer bis zum Jahr 2015 erreicht werden kann. Es hat sich gezeigt, dass weniger als 10 % der Wasserkörper dieses Ziel erreichen würden, wenn keine weiteren Verbesserungsmaßnahmen an den Flüssen durchgeführt werden. Als häufigste Ursachen der Zielverfehlung sind neben Nähr- und Schadstoffbelastungen die morphologischen Beeinträchtigungen der Gewässerstrukturen und die zahlreichen Querbauwerke in den Fließgewässern zu nennen. Unterstützt wird diese Einschätzung durch den hohen Prozentsatz an Gewässerabschnitten, die aufgrund ihrer intensiven Nutzung und der gewässerstrukturellen Defizite als erheblich verändert (heavily modified water bodies, HMWB) ausgewiesen wurden.

Um eine Aussage zu dem noch ökologisch-verträglich erschließbaren Wasserkraftpotential treffen zu können, würde sich im Hinblick auf die Zielerreichung der EG-WRRL die Frage stellen, welcher Grad der Nutzung im jeweiligen

Wasserkörper nicht zu einer Verfehlung des jeweiligen Umweltziels führt und wie groß das noch zu erschließende Potential wäre.

Eine Analyse der Wasserkörper bezogenen Bewertung der Bundesländer bzgl. der HMWB-Abschnitte als auch der bundesweit vorliegenden Strukturgütekartierung erbrachte dahingehend keinen Aufschluss (vgl. Berichtsteil Materialien, Abschnitt K).

Nach Einschätzung der Bundesländer resultieren die hauptsächlichen Beeinträchtigungen der Hydromorphologie der Fließgewässer aus der landwirtschaftlichen Nutzung, dem Hochwasserschutz, der Urbanisierung, der Schiffbarmachung und der Wasserkraftnutzung. Diese Aussage unterstreicht, dass die hydromorphologische Beeinträchtigung i.d.R. nicht monokausal auf eine Nutzung zurückzuführen ist.

Bei einem Neubau einer Wasserkraftanlage werden die physischen Veränderungen am betroffenen Oberflächenwasserkörper i.d.R. dazu führen, dass der gute ökologische Zustand nach EG-Wasserrahmenrichtlinie nicht erreicht wird oder eine Verschlechterung des Zustands des Oberflächenwasserkörpers eintritt. In beiden Fällen läge ein Verstoß gegen die EG-Wasserrahmenrichtlinie vor, wenn keine Rechtfertigungsgründe vorgebracht werden können.

In der EG-WRRL werden die Bedingungen beschrieben (Artikel 4 (7)), unter denen derartige „neue Änderungen der physischen Eigenschaften“ eines Wasserkörpers nicht gegen die Richtlinie verstoßen, auch wenn die Umweltziele verfehlt werden. Die folgenden Bedingungen müssen nachweislich erfüllt sein (WRRL Artikel 4 (7) bzw. WHG § 31 (2)):

1. a. Die Gründe für den Neubau sind von übergeordnetem öffentlichen Interesse oder  
b. der Nutzen des Neubaus für die Gesundheit oder Sicherheit des Menschen oder  
c. für die nachhaltige Entwicklung  
ist größer als der Nutzen, den die Erreichung der Bewirtschaftungsziele der WRRL für die Umwelt und die Allgemeinheit hat,
2. Die Ziele, die mit dem Neubau verfolgt werden, können nicht mit anderen geeigneten Maßnahmen erreicht werden, die wesentlich geringere nachteilige Auswirkungen auf die Umwelt haben, technisch durchführbar und nicht mit unverhältnismäßig hohem Aufwand verbunden sind.
3. Es werden alle praktisch geeigneten Maßnahmen ergriffen, um die nachteiligen Auswirkungen auf den Gewässerzustand zu verringern.

Über die Erfüllung der o.g. Gründe ist der Kommission zu berichten (Artikel 4 (7)). Die Ziele des Ausbaus sind alle sechs Jahre zu überprüfen.

Die Regelung des WHG unterstreicht, dass die eingangs getroffene Feststellung, dass es i.d.R. einer Einzelfallentscheidung und einer breiten gesellschaftliche orientierten Abwägung bedarf, ob ein Wasserkraftanlagenneubau erfolgen kann. Eine quantifizierbare Aussage zu dem noch erschließbaren ökologisch-verträglichen Wasserkraftpotential kann daher nicht getroffen werden.

## 7

### Das Zubaupotential an großen Gewässern

Das theoretisch verfügbare technische Potential der großen Flüsse beträgt etwa

$$E_{\text{tech,g}} = 28,4 \text{ bis } 36,0 \text{ TWh.}$$

Dieses technische Potential beinhaltet das genutzte Potential von

$$E_{\text{a,g}} = 17,5 \text{ TWh.}$$

Das bisher nicht genutzte technische Potential von 10,9 bis 18,5 TWh (im Mittel 14,7 TWh) besteht aus folgenden Teilen (Tabelle 2):

- Das Potential der „**frei fließenden Strecken**“ beträgt

$$E_{\text{tech,frei}} = 9,5 \text{ bis } 12,0 \text{ TWh} \quad (\text{im Mittel } 10,75 \text{ TWh}).$$

- Das technische **Verbesserungspotential** nach dem Ergebnis der Standort-Methode durch Ausbau bestehender Standorte von WKA ( $P \geq 1 \text{ MW}$ ) ergibt

$$\Delta E = 2,55 \text{ TWh.}$$

- Das Zubaupotential an ungenutzten Querbauwerken (mit Möglichkeit zum Bau von WKA mit  $P \geq 1 \text{ MW}$ )

$$E_{\text{QBW,g}} = 0,1 \text{ bis } 0,12 \text{ TWh.}$$

- Es verbleibt ein technisches **Restpotential** von 1,3 TWh.



**Tabelle 2: Ermittlung des Restpotentials an großen Gewässern**

Spanne	Mittelwert	
10,9 bis 18,5 TWh	14,7 TWh	Technisches Potential der großen Flüsse
9,5 bis 12,0 TWh	- 10,75 TWh	Technisches Potential „frei fließender Strecken“, das nicht realisierbar erscheint
2,55 + 0,12 TWh	- 2,67 TWh	Zubaupotential durch Modernisierung und Neubau großer Anlagen
<b>= 1,3 TWh Restpotential</b>		

## 7.1

### Das Zubaupotential an Wasserkraftanlagen mit $P \geq 1$ MW

Für Wasserkraftanlagen mit  $P \geq 1$  MW konnte eine Standort spezifische Analyse durchgeführt werden. Dabei wurde vor allem das zusätzliche Potential durch die Modernisierung und den Ausbau bestehender Kraftwerke berücksichtigt. Es lässt sich durch drei wesentliche Teilpotentiale beschreiben:

- das Potential durch Erhöhung des Anlagenwirkungsgrades,
- das Potential durch Erhöhung des Ausbaugrades,
- das Potential durch Stauzielerhöhung.

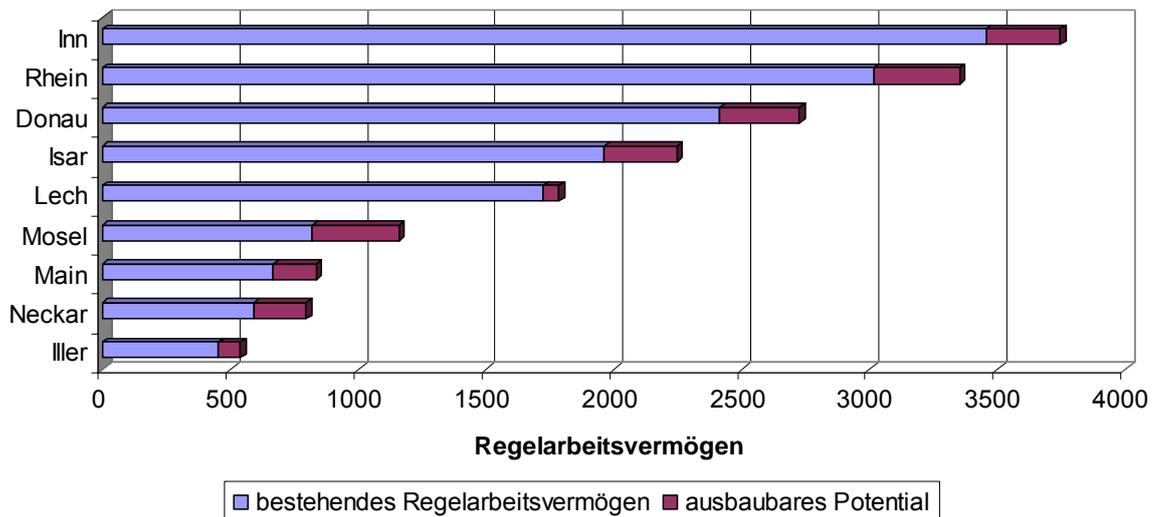
Die Ermittlung des Ausbaupotentials basiert auf den Hauptdaten der jeweiligen Wasserkraftanlagen. Ausgehend von den von HEIMERL&GIESECKE [6] ermittelten Daten wurden bei den Betreibern weitere Informationen zu den Anlagen angefragt.

Die Untersuchung führte zu dem Ergebnis, dass durch Anlagenverbesserungen ein zusätzliches Potential von 1.120 GWh generiert werden kann. Anlagenverbesserungen sind nicht mit negativen Auswirkungen auf die Gewässerökologie verbunden. Das Potential durch Erhöhung des Ausbaugrades wurde zu 1.430 GWh bestimmt, wobei hier die ökologischen Auswirkungen jeweils standortspezifisch zu überprüfen sind. Gleiches gilt für eine Stauzielerhöhung, die auf Grund der zu erwartenden vergleichsweise großen Eingriffe an den Standorten nicht bezüglich des Zubaupotentials untersucht wurde.

Für die Bundesrepublik Deutschland beträgt also das berechnete zusätzliche Potential an Standorten mit  $P > 1$  MW 2.550 GWh/a. Dies bedeutet eine Erhöhung der durch große Laufwasserkraftanlagen gewonnenen Energie um fast 15 %.

Die Umsetzung dieses Potentials kann alleine durch Maßnahmen an vorhandenen Standorten erfolgen. Dabei müssen die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen dies zulassen und die Erhöhung des Ausbaugrades muss genehmigungsfähig sein.

Der Großteil des verfügbaren Ausbaupotentials (fast 80 %) konzentriert sich dabei ebenso wie das bereits genutzte Potential auf neun große Flüsse (Bild 6). An Rhein, Donau und Mosel beträgt das Potential durch Erhöhung des Anlagenwirkungsgrades und des Ausbaugrades fast 1.000 GWh, weitere 1.000 GWh sind an Inn, Isar, Neckar, Main, Iller und Lech zu gewinnen. Dieses technische Potential reduziert sich aber, da davon auszugehen ist, dass die frei fließenden Strecken erhalten bleiben sollen.



**Bild 6: Bestehendes Regelarbeitsvermögen sowie ermitteltes Zubaupotential an neun großen Flüssen durch Erhöhung des Ausbauwirkungsgrades und des Ausbaugrades an Wasserkraftanlagen  $P > 1$  MW**

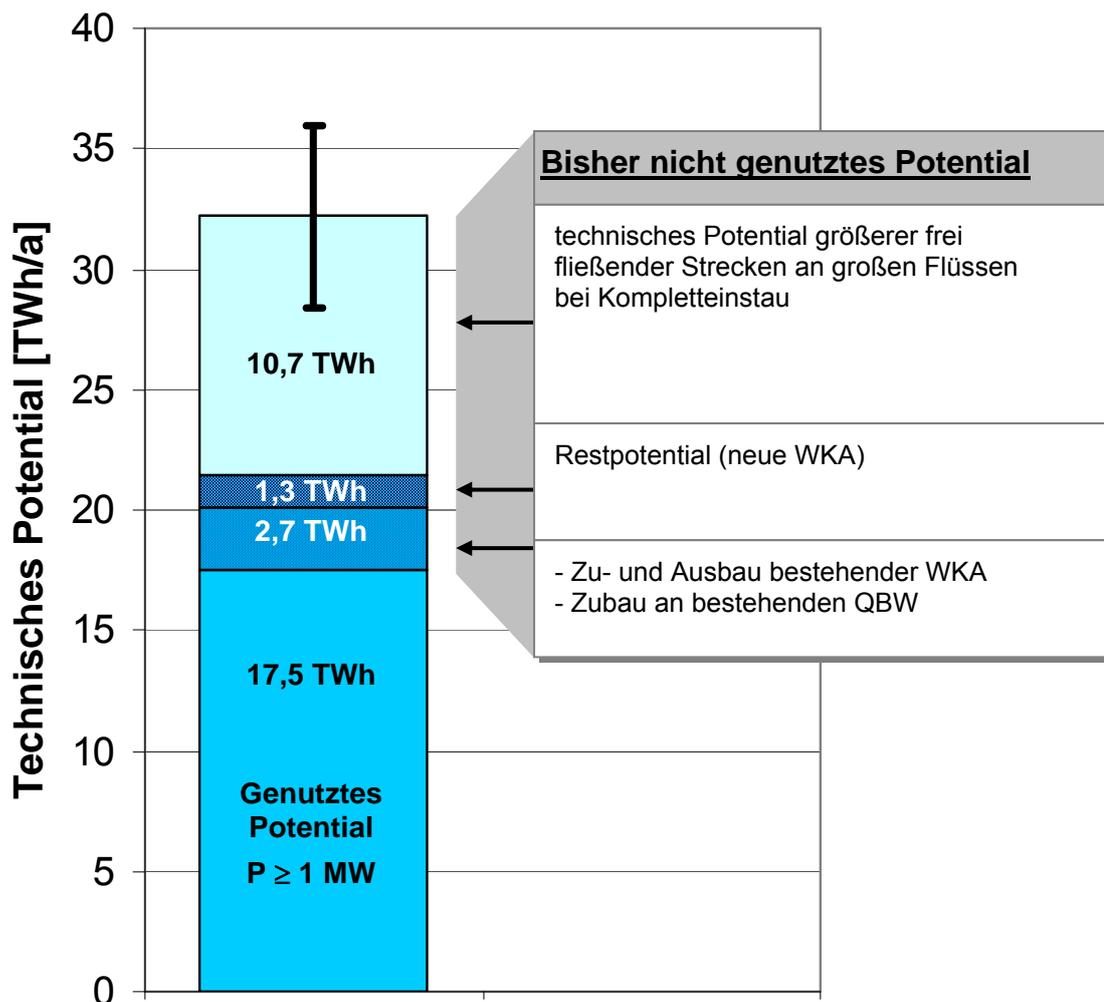
Das zusätzliche Potential durch Erhöhung des Stauzieles konnte nicht abschließend beziffert werden, da hierzu eine detaillierte Betrachtung der komplexen Verhältnisse vor Ort jeder einzelnen Anlage notwendig gewesen wäre. Eine Stauerhöhung kann voraussichtlich nur für ca. 5 bis 10 % der Anlagen realisiert werden. Bei einer Stauzielerhöhung in Höhe von 10 bis 20 % würde sich die gesamte Energieausbeute um 0,5 bis 2 %, d.h. um 80 bis 350 GWh, steigern lassen.

## 7.2

### Das realisierbare Zubaupotential an großen Gewässern

Das technische Verbesserungspotential und das Zubaupotential an bestehenden Querbauwerken befindet sich an bestehenden Standorten. Daher kann erwartet werden, dass dieses **Zubaupotential von ca. 2,7 TWh realisierbar** ist.

Die Nutzung des **Restpotentials von ca. 1,3 TWh** wäre nur bei durchgehendem Aufstau und dem Neubau von optimierten Wasserkraftanlagen bzw. durch vollständigen Neubau von WKA außerhalb der „größeren frei fließenden Gewässerstrecken“ realisierbar. Die Verwirklichung eines derartigen Ausbaus ist vor dem Hintergrund ökologischer Anforderungen sowie aufgrund unterschiedlicher Nutzungsansprüche, wie Besiedlung, Hochwasserschutz, Infrastruktur etc. als schwierig einzuschätzen.



**Bild 7: Aufteilung des technischen Potentials großer Gewässer**

8

## **Das Zubaupotential für mittelgroße und kleine Gewässer**

Zur Zeit werden vom technischen Potential, das an mittelgroßen und kleinen Gewässern 4,8 bis 6,1 TWh beträgt, etwa 2,8 TWh genutzt. Hinzu kommen etwa 0,6 TWh, die durch den natürlichen Zufluss von Pumpspeicherkraftwerken erzeugt werden. Das verbleibende, zusätzlich vorhandene **technische Zubaupotential von 1,4 bis 2,7 TWh** (mittlere Annahme 2,1 TWh) wird durch folgende Bedingungen verringert (Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.):

- **Minderung des Zubaupotentials an frei fließenden Strecken durch nutzungsbedingte Restriktionen bzw. Schutzvorschriften:**

Bestehende nutzungsbedingte Restriktionen (Besiedlung, Landwirtschaft, Hochwasserschutz etc.) haben erheblichen Einfluss auf die Verfügbarkeit neuer Wasserkraftstandorte, die innerhalb des Vorhabens nicht quantifiziert werden konnten.

Nimmt man an, dass in den frei fließenden Gewässerstrecken und in Gewässerstrecken in NATURA-2000-Gebieten aufgrund der dortigen Restriktionen nur etwa 50% der Gewässerstrecken für die Wasserkraftnutzung zur Verfügung stehen, vermindert sich das technische Zubaupotential um 0,7 bis 1,35 TWh.

- **Minderung des Zubaupotentials durch ökologische Abflüsse:** Ökologische Abflüsse bedienen Bypässe und Fischaufstiegsanlagen und stellen bei Ausleitungskraftwerken den Abfluss und die Durchwanderbarkeit im Mutterbett sicher. Ihre Größe liegt im Bereich 5 – 10% von MQ. Unter der Annahme, dass die ökologischen Abflüsse etwa 10 % betragen, vermindert sich das Zubaupotential um 0,07 bis 0,135 TWh.

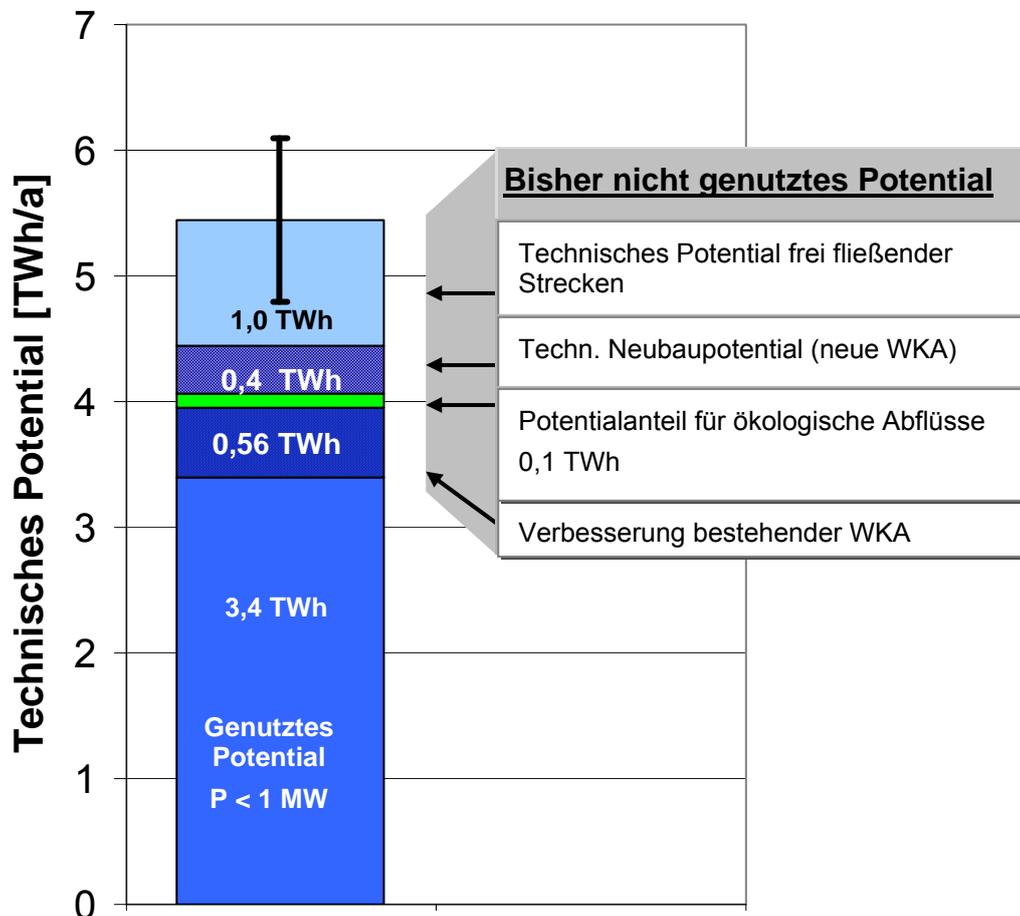
Es verbleibt ein technisches Zubaupotential an mittelgroßen und kleinen Gewässern von etwa 0,63 bis 1,22 TWh.

Dieses beinhaltet neben dem Potential für den **Neubau von Wasserkraftanlagen** auch das **technische Verbesserungspotential** an bestehenden WKA. Die Berechnung geht davon aus, dass neben Verbesserungen der Wirkungsgrade, der

Steuerung, der Rechenreinigung, der Betriebsführung auch eine verbesserte Ausnutzung der Fallhöhen erfolgen kann. Das Verbesserungspotential wird von vielen Autoren auf 20% des genutzten Potentials beziffert. Unter der Annahme, dass die Pumpspeicherkraftwerke über einen hohen technischen Standard verfügen, wird das technische Verbesserungspotential an den übrigen bestehenden Wasserkraftanlagen (2,8 TWh) zu 0,56 TWh berechnet.

Für den Neubau von Wasserkraftanlagen verbleibt also die Differenz aus dem technischen Zubaupotential von 0,63 bis 1,22 TWh (im Mittel 1 TWh) und dem technischen Verbesserungspotential von 0,56 TWh. Das Neubaupotential liegt somit zwischen 0,07 und 0,66 TWh (im Mittel etwa 0,4 TWh).

0,63 bis 1,22 TWh	-	0,56 TWh	=	0,07 und 0,66 TWh
Technisches Zubaupotential		Technisches Verbesserungspotential		Technisches Neubaupotential



### **Bild 8: Aufteilung des technischen Potentials mittelgroßer und kleiner Gewässer**

Das Neubaupotential von 0,07 bis 0,66 TWh wäre dann nutzbar, wenn außerhalb „frei fließender Gewässerstrecken“ und außerhalb der Strecken in NATURA-2000-Gebieten an bestehenden Querbauwerken neue Wasserkraftanlagen gebaut würden oder wenn durch den Neubau von optimierten Wasserkraftanlagen bestehende Anlagen ersetzt würden.

Die Spanne repräsentiert die Unsicherheit bei der Umsetzung des Ausbaus.

### **Realisierbares Zusatzpotential an mittelgroßen und kleinen Gewässern**

Mit dem EEG 2009 sind in Analogie zu Untersuchungen aus Rheinland-Pfalz [8] und Nordrhein-Westfalen [9] etwa 60 % des mittleren Zubaupotentials von ca. 1 TWh, d.h. etwa 0,6 TWh wirtschaftlich realisierbar.

Bei einer Volllaststundenzahl von etwa 4.500 h/a entspricht das einer installierten Leistung von

$$600 \text{ GWh} / 4.500 \text{ h} = 133 \text{ MW.}$$

Der Zubau von neuen Wasserkraftanlagen (0,07 bis 0,66 TWh) wäre nach EEG 2009 für etwa  $0,6 \cdot (0,07 \text{ bis } 0,66 \text{ TWh/a}) = 0,04 \text{ bis } 0,4 \text{ TWh/a}$  oder entsprechend etwa 9 bis 90 MW wirtschaftlich. Würde diese Leistung durch Anlagen einer mittleren Leistung von 200 kW realisiert, entspräche das dem Bau von 45 bis 450 zusätzlichen kleinen Wasserkraftanlagen.

Basierend auf diesen Überlegungen wird für die Wasserkraftnutzung an mittelgroßen und kleinen Gewässern ein **technisch-ökonomisch-ökologisches Zubaupotential** von etwa 0,4 TWh bzw. 12 % abgeschätzt.

## **Neue Techniken und neue Technologien zur Nutzung der Wasserkraft**

Durch den Einsatz neuer Techniken kann die Energieerzeugung von Wasserkraftanlagen gesteigert werden. Folgende Möglichkeiten stehen hier zur Verfügung:

- Durch verbesserte Auslegungsmethoden und den Einsatz neuer Turbinen bzw. Laufrädern kann eine Wirkungsgradsteigerung im Vergleich zu 60 Jahre alten Turbinen von 5 bis 11 % erzielt werden.
- Die meisten großen Kraftwerke besitzen bereits eine sehr weit gehende, optimierte Betriebsführung. Insgesamt wird geschätzt, dass durch Verbesserungen in diesem Bereich eine Steigerung der Energieausbeute von 3 bis 10 % möglich ist.
- Bei variabler Turbinendrehzahl kann sich eine Turbine besser an wechselnde Abflüsse oder Fallhöhen anpassen und so bei einem relativ hohen Wirkungsgrad betrieben werden.
- Durch den Einsatz von Hochtemperatur-Supraleitenden-Generatoren (HTS) könnte in der Wasserkraft schätzungsweise eine Erhöhung der Jahresarbeit um 2 bis 4 % erreicht werden. Zu Kosten und Zuverlässigkeit liegen bisher keine Erfahrungswerte vor.
- Very-Low-Head-Turbinen (VLH-Turbinen) wurden als preisgünstige Lösung für kleine Fallhöhen konzipiert. Auch hier gibt es noch keine Erfahrungen hinsichtlich Kosten, Wirkungsgraden und Betrieb.
- Wasserräder und Wasserkraftschnecken mit neuen Fertigungsmethoden und modernen Getrieben und Steuerungen können für sehr kleine Anlagen eine sinnvolle Alternative darstellen.

Häufig werden Wasserkraftmaschinen mit freier Umströmung als neue Konzepte vorgestellt, die vielfach ähnlich einem Windrad konzipiert sind. Sie sollen nur die kinetische Energie des Wassers ohne einen Aufstau des Gewässers nutzen. Bei den vorhandenen Strömungsgeschwindigkeiten der deutschen Gewässer von 2 bis 3 m/s sind dabei jedoch auch mit Rotordurchmessern von 2 m nur Leistungen von max. 5 bis 20 kW zu erwarten. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass insbesondere betriebliche Risiken wie z.B. Hochwasserabfuhr, Geschwemmsel, Schifffahrt, aber auch ökologische Bedenken einem verbreiteten Einsatz dieser Konzepte entgegen stehen.

## Auswirkungen der Klimaveränderung auf die Wasserkraftnutzung

Bei der Untersuchung der Entwicklung der Energiegewinnung aus Wasserkraft durch die zu erwartenden Klimaveränderungen stand die Fragestellung im Vordergrund, ob die Energieausbeute aus der Wasserkraft zu- oder abnimmt und inwieweit die Energieerzeugung an deutschen Gewässern in Zukunft verlässlich, planbar und ausfallsicher sein wird. Untersucht wurden v. a. Laufwasserkraftwerke in den südlichen Bundesländern.

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 Wasserkraftanlagen am Hochrhein, Lech und Main zeigen, dass deren Erzeugung sehr sensitiv auf Schwankungen des Wasserdargebots reagiert. Je nach Szenario ergeben sich Veränderungen der Energieerzeugung von +7 % bis -12 %. Erhöhte Erzeugungen ergeben sich bei Vorgabe tendenziell niederschlagsreicher Szenarien oder - soweit Gewässer alpinen Quellen haben - aus den in der näheren Zukunft absehbare zusätzlichen Schmelzwasserabflüsse der Gletscher. Um mögliche Mindererzeugungen der Wasserkraft zu kompensieren oder gering zu halten, empfiehlt es sich, die vorhandenen Möglichkeiten zur Optimierung der Anlagen zu nutzen. Hierzu gehören:

- Verbesserung der maschinellen Ausrüstung,
- Veränderung der Kraftwerksauslegung,
- Automatisierung und Optimierung betrieblicher Abläufe,
- Verringerung der Betriebsrisiken und Sicherung von Wasserkraftanlagen.

Zur Steigerung der Wertigkeit der erneuerbaren Energie Wasserkraft wird empfohlen, die im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energien bessere Vorhersagbarkeit weiter aufzuwerten und kontinuierlich betriebene Vorhersagemodelle weiter zu entwickeln.

## Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht fasst die Ergebnisse der Studie „Potentialermittlung für den Ausbau der Wasserkraftnutzung in Deutschland als Grundlage für die Entwicklung einer geeigneten Ausbaustrategie“, die im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit erstellt wurde, zusammen.

Als Ausgangspunkt der Untersuchung wurde die heutige Nutzung der Wasserkraft in Deutschland ermittelt. Demnach sind in Deutschland zur Zeit etwa 7.400 Wasserkraftanlagen (WKA) mit einer Gesamtleistung von ca. 4,05 GW in Betrieb. Der langjährige Mittelwert des genutzten Wasserkraftpotentials beträgt einschließlich der Erzeugung aus dem natürlichen Zufluss der Pump-speicherkraftwerke etwa 20,9 TWh. In diesen Werten sind die ausländischen Anteile von WKA an deutschen Grenzgewässern und die rein für die Eigenversorgung arbeitenden WKA nicht enthalten.

Der relevante Wert zur Bestimmung des Zubaupotentials ist das technische Potential. Dieses wurde aus dem theoretischen Linienpotential der deutschen Gewässer durch Berücksichtigung der Fließverluste und unter Einbeziehung der realen Wirkungs- und Ausbaugrade von Wasserkraftanlagen abgeleitet. Als Ergebnis der Untersuchung wird das technische Potential für Deutschland auf 33,2 bis 42,1 TWh beziffert.

Das ermittelte technische Potential ist das Ergebnis einer rein physikalischen bzw. technischen Untersuchung. Es stellt das theoretisch maximal nutzbare Potential und damit die Obergrenze des nutzbaren Wasserkraftpotentials dar. Dabei wurden neue Technologien wie Generatoren mit verbesserten Wirkungsgraden und Turbinen im Bereich sehr kleiner Fallhöhen berücksichtigt, auch wenn diese sich noch in der Erprobungsphase befinden. Häufig vorgeschlagene Wasserkraftanlagen, die die hydraulische Energie der Gewässer ohne Aufstau nutzen, würden ein zusätzliches Potential an den bisher frei Gewässerstrecken nutzen. Ein verbreiteter Einsatz dieser technischen Konzepte wird jedoch wegen der zu erwartenden betrieblichen Probleme sowie unterschiedlicher Restriktionen als wenig wahrscheinlich eingeschätzt.

Aus dem technischen Potential von 33,2 bis 42,1 TWh verbleibt nach Abzug des genutzten Potentials von 20,9 TWh ein technisches Zubaupotential von etwa 12,3 bis 21,2 TWh. Die Realisierbarkeit dieses technischen Zubaupotentials wurde differenziert für große und mittelgroße und kleine Gewässer betrachtet:

- An Elbe, Oder, Donau und Rhein existieren große frei fließende Strecken, die einen erheblichen Anteil des ermittelten technischen Zubaupotentials beinhalten. Geht man davon aus, dass diese frei fließenden Strecken erhalten bleiben sollen, reduziert sich das technische Zubaupotential an den großen Gewässern auf im Mittel 4,0 TWh.

- Der größte Anteil dieses technischen Zubaupotentials an den großen Gewässern kann mit 2,55 TWh an bestehenden Standorten von WKA mit  $P \geq 1$  MW durch technische Verbesserungen, durch Erhöhung des Anlagenwirkungsgrades und des Ausbaugrades realisiert werden.
- Die Errichtung von neuen WKA mit  $P \geq 1$  MW an bestehenden Querbauwerken führt zu einer zusätzlichen jährlichen Erzeugung von etwa 0,12 TWh.
- An den großen Gewässern können somit ca. 2,7 TWh des Zubaupotentials von 4,0 TWh durch den Umbau bestehender Standorte von Querbauwerken oder Wasserkraftanlagen genutzt werden. Die verbleibenden 1,3 TWh könnten nur durch den Neubau von Staustufen mit Wasserkraftanlagen in bisher ungenutzten Gewässerstrecken realisiert werden. Derartige Neubauten werden jedoch wegen der bestehenden Randbedingungen, Nutzungen und Restriktionen als eher unwahrscheinlich eingeschätzt.
- An mittelgroßen und kleinen Gewässern konnte als Ergebnis der Studie ein technisch-ökologisch-ökonomisches Zubaupotential von etwa 0,4 TWh entsprechend einem weiteren Ausbau um 12 % ermittelt werden.

In der Studie wurden weiterhin die Auswirkungen der erwarteten Klimaveränderung auf die Nutzung der Wasserkraft in Deutschland untersucht. Danach muss mit einer Mindererzeugung von Wasserkraftanlagen bis zu ca. 15% der heutigen Jahreserzeugung gerechnet werden. Durch rechtzeitige technische Anpassungsstrategien können diese Auswirkungen gemindert werden.

In den nächsten Jahrzehnten stehen aufgrund ablaufender Konzessionen vermehrt Neugenehmigungen von Wasserkraftanlagen an. Es ist zu erwarten, dass die bisher nur in begrenztem Umfang erforderlichen Modernisierungen dann vermehrt durchgeführt werden. Damit besteht die Chance, einen Großteil des Zubaupotentials zu realisieren, das an bestehenden Standorten durch bessere Wirkungsgrade oder Vergrößerung des Ausbaudurchflusses vorliegt. Darüber hinaus können gleichzeitig die neuesten technischen und ökologischen Standards berücksichtigt werden. Voraussetzung für die Realisierung des Zubaupotentials ist, dass die Erlöse ausreichen, um den Zubau und die Anpassungsmaßnahmen zu finanzieren.

Bei einem weiteren Ausbau des Wasserkraftpotentials müssen die bestehenden gesetzlichen Vorschriften, insbesondere EG-WRRL, FFH-RL und WHG beachtet werden. Dem Ausbau stehen häufig lokale und regionale Restriktionen durch andere Nutzungsansprüche entgegen. Diese Aspekte wurden in der vorliegenden Studie grundsätzlich berücksichtigt. Das ermittelte Zubaupotential stellt daher die Obergrenze des möglichen Zubaus dar. Davon werden 3,3 TWh als voraussichtlich realisierbar eingeschätzt.

## 12

### Literatur

- [1] Keller, H.; Ruprecht, C.; Vogel, Fr.: Die Wasserkräfte des Berg- und Hügellandes in Preußen und benachbarten Staatsgebieten ("Preußenstudie"). Studie im Auftrag der Preußischen Herren Minister der öffentlichen Arbeiten, für Handel und Gewerbe und für Landwirtschaft, Domänen und Forsten, 1914.
- [2] Frohnholzer, J.: Systematik der Wasserkräfte in der Bundesrepublik Deutschland, Stand 1962. In: Selbstverlag der Bayerischen Wasserkraftwerke AG, München, 1963.
- [3] Hildebrand, H.; Kern, K.: Ermittlung des Wasserkraftpotentials von Baden-Württemberg. Gutachten des Institutes für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe im Auftrag des Ministeriums für Wirtschaft, Mittelstand und Technologie Baden-Württemberg, 1986.
- [4] Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.): Bericht über den weiteren Ausbau der Wasserkraftnutzung in Bayern. München, 1995.
- [5] Wagner, E.; Rindelhardt, U.: Stromgewinnung aus regenerativer Wasserkraft in Deutschland – Überblick. In: ew 106 (2007), Heft 25-26.
- [6] Heimerl, S.; Giesecke, J.: Wasserkraftanteil an der elektrischen Stromerzeugung in Deutschland 2003. In: Wasserwirtschaft 94 (2004), Heft 10, S. 28-40.
- [7] Rindelhardt, U.: Wasserkraftnutzung in Ostdeutschland. In: Wasserwirtschaft 97 (2007), Heft 6, S. 33-36.
- [8] Anderer, P.; Dumont, U.; Linnenweber, Ch.; Schneider, B.: Das Wasserkraftpotential in Rheinland-Pfalz, In: Korrespondenz Wasserwirtschaft (2009), Heft 4, S. 223-227.
- [9] Anderer, P.; Dumont, U.; Kolf, R.: Das Wasserkraftpotential in Nordrhein-Westfalen, In: Wasser und Abfall (2007), Heft 7-8, S. 16-20.