Pia Anderer, Ulrich Dumont, Stephan Heimerl, Albert Ruprecht und Ulrich Wolf-Schumann

Das Wasserkraftpotenzial in Deutschland

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 etwa 25 %. Im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) wurde auf der Grundlage einer für ganz Deutschland einheitlichen Methode mit Hilfe des Linienpotenzials das zusätzlich ausbaubare Wasserkraftpotenzial als Ausgangsbasis für eine deutsche Ausbaustrategie ermittelt.

1 Einführung

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts erschienen zahlreiche Veröffentlichungen zum Thema Wasserkraft und Wasserkraftpotenzial [1] bis [8], die Angaben zum genutzten und zum zusätzlich nutzbaren Potenzial enthalten.

Viele dieser Untersuchungen basieren auf der Standortmethode, bei der die Ausbaumöglichkeiten an vorhandenen, teilweise auch neu zu errichtenden Stauanlagen betrachtet werden. Andere Studien ermitteln das gesamte natürlich vorhandene Potenzial bestimmter Regionen als Linienpotenzial [1], [2].

In der vorliegenden Studie wurde systematisch das natürlich vorhandene Linienpotenzial, das genutzte und das zusätzlich nutzbare Wasserkraftpotenzial aller deutschen Gewässer ab einem Einzugsgebiet >10 km² detailliert untersucht. Aus methodischen Gründen kann bei einer derartigen Betrachtung nur die Laufwasserkraft untersucht werden. Zusätzliche Effekte durch die theoretisch mögliche Nutzung der Wasserkraftpotentiale in Speicherkraftwerken waren nicht Gegenstand der Betrachtungen.

Die verwendeten Methoden werden von Anderer et al. [13] in dieser Ausgabe der WasserWirtschaft vorgestellt.

2 Der Potenzialbegriff

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

Der theoretische, maximal verfügbare Energievorrat eines Gewässers wird als Abflusslinienpotenzial oder Linienpotenzial E_L bezeichnet. Dieses wird aus der Linienleistung $P_{L,MQ}$ ermittelt, die sich entlang eines Gewässern abschnittweise aus dem durchschnittlichen jährlichen Abfluss MQ_i und dem vorhandenen Gefälle Δh_i ohne Berücksichtigung der Fließverluste ergibt. Durch Multiplikation mit der Stundenzahl eines Jahres erhält man das Theoretische Linienpotenzial zu:

$$E_L = P_{L,MQ} \cdot 8\,760\ \text{h} \qquad (1)$$

mit der Linienleistung:

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

$g = 9{,}81\ \text{m/s}^2$ Erdbeschleunigung
$\rho_w = 1\,000\ \text{kg/m}^3$ Dichte von Wasser

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

3 Aktuelle Wasserkraftnutzung

Die Stromerzeugung aus Wasserkraft unterlag in den letzten Jahrzehnten natürlichen jährlichen Schwankungen von über ±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 WKA angegeben [5]. In der vorliegenden Untersuchung wurden für 2007 6 484 WKA ermittelt, die eine Vergütung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) erhielten. Weitere 169 WKA mit P ≥ 1 MW ohne EEG-Vergütung und 31 Pumpspeicherkraftwerke kommen hinzu. 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 WKA, die für den Eigenbedarf wirtschaften.

Die installierte Leistung der ermittelten WKA betrug in 2007 etwa 4,04 GW (**Tabelle 1**). Zusätzlich ist in 31 Pumpspeicherkraftwerken eine Turbinenleistung von ca. 6,6 GW installiert.

Die erzeugte Jahresarbeit wurde ermittelt zu 20,9 TWh. Dieser Wert beinhaltet das Regelarbeitsvermögen (RAV) der WKA mit $P_{inst} \geq 1$ MW (RAV = langjähriger Mittelwert), den regenerativen Anteil aus natürlichem Zufluss zu Pumpspeicherkraftwerken und die Jahresarbeit der WKA mit $P_{inst} < 1$ MW, deren mittlere Jahresarbeit mit den langjährigen mittleren Abflüssen abgeschätzt wurde. 84 % der gesamten Jahresarbeit wurde von den 406 Wasserkraftanlagen der Leistung $P_{inst} \geq 1$ MW erzeugt (Tabelle 1).

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

4 Bestehende Untersuchungen zum Ausbaupotenzial

Zahlreiche Studien beschäftigten sich mit der Ermittlung des Wasserkraftpotenzials für Deutschland, wobei mit unterschiedlichen Ansätzen und Untersuchungsmethoden gearbeitet wurde. Die Abschätzungen für das ausbaubare Potenzial reichen bis zu 31,9 TWh/a (**Tabelle 2**), was einem Zubau von ca. 50 % entspräche.

5 Das Linienpotenzial deutscher Gewässer

Für die Gewässer in Deutschland wurde das theoretische Linienpotenzial aus digital vorliegenden Abfluss- und Höhendaten ermittelt. Betrachtet wurden Einzugsgebiete größer 10 km². Das theoretische Linienpotenzial beträgt insgesamt:

E_L = 92,6 TWh.

Der Rhein verfügt mit einem deutschen Anteil von 21,1 TWh über das größte Potenzial der deutschen Flüsse. Abschnitte, in denen der Rhein Grenzfluss ist, sind in diesem Wert nur anteilig enthalten.

Dieses Linienpotenzial kann aus mehreren Gründen nicht vollständig genutzt werden:

- Fließverluste der Gewässer (hydromorphologische Verluste) und Anlageverluste reduzieren das Linienpotenzial und es ergibt sich das technische Rohpotenzial.
- Turbinen können nicht die gesamte jährliche Abflussmenge verarbeiten. Unter Berücksichtigung der realen Nutzungsmöglichkeiten (ausgedrückt durch den Abfluss-Nutzungsgrad ε_{voll}) ergibt sich das technische Potenzial.
- In bestimmten Flussabschnitten, wie z. B. an Mittel-, bzw. Niederrhein oder der Elbe, scheint eine zusätzliche Wasserkraftnutzung derzeit nicht realisierbar bzw. genehmigungsfähig.

Durch Aufteilung des Linienpotenzials auf große und mittelgroße bis kleine Gewässer können die dargestellten Gegebenheiten spezifisch berücksichtigt werden.

6 Das gesamte technische Potenzial

Das technische Potenzial E_{tech} stellt den maximalen Wert dar, der unter realen Bedingungen genutzt werden kann. Bei der Herleitung des technischen Potenzials für ganz Deutschland waren Annahmen und Näherungen erforderlich, so dass bestimmte Parameter, wie z. B. die Fließverluste, als Spanne in die Berechnungen eingingen. Somit ergibt sich das technische Potenzial der 25 größten deutschen Gewässer von 28,4 bis 36,0 TWh und der mittelgroßen und kleinen Gewässer von 4,8 bis 6,1 TWh. Das gesamte technische Potenzial beträgt damit:

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

Im Vergleich zum genutzten Potenzial von 20,9 TWh besteht theoretisch ein technisches Zubaupotenzial von:

$E_{tech,zus}$ = 12,3 bis 21,2 TWh.

7 Das nicht genutzte technische Wasserkraftpotenzial

7.1 Große Gewässer

Vom technischen Potenzial der großen Gewässer werden bereits 17,5 TWh (RAV) genutzt, so dass hier theoretisch ein technisches Zubaupotenzial von 10,9 bis 18,5 TWh besteht.

Dieses bisher nicht genutzte Potenzial kann folgendermaßen untergliedert werden (**Bild 3**):

- Das technische Verbesserungspotenzial nach dem Ergebnis der Standort-Me-

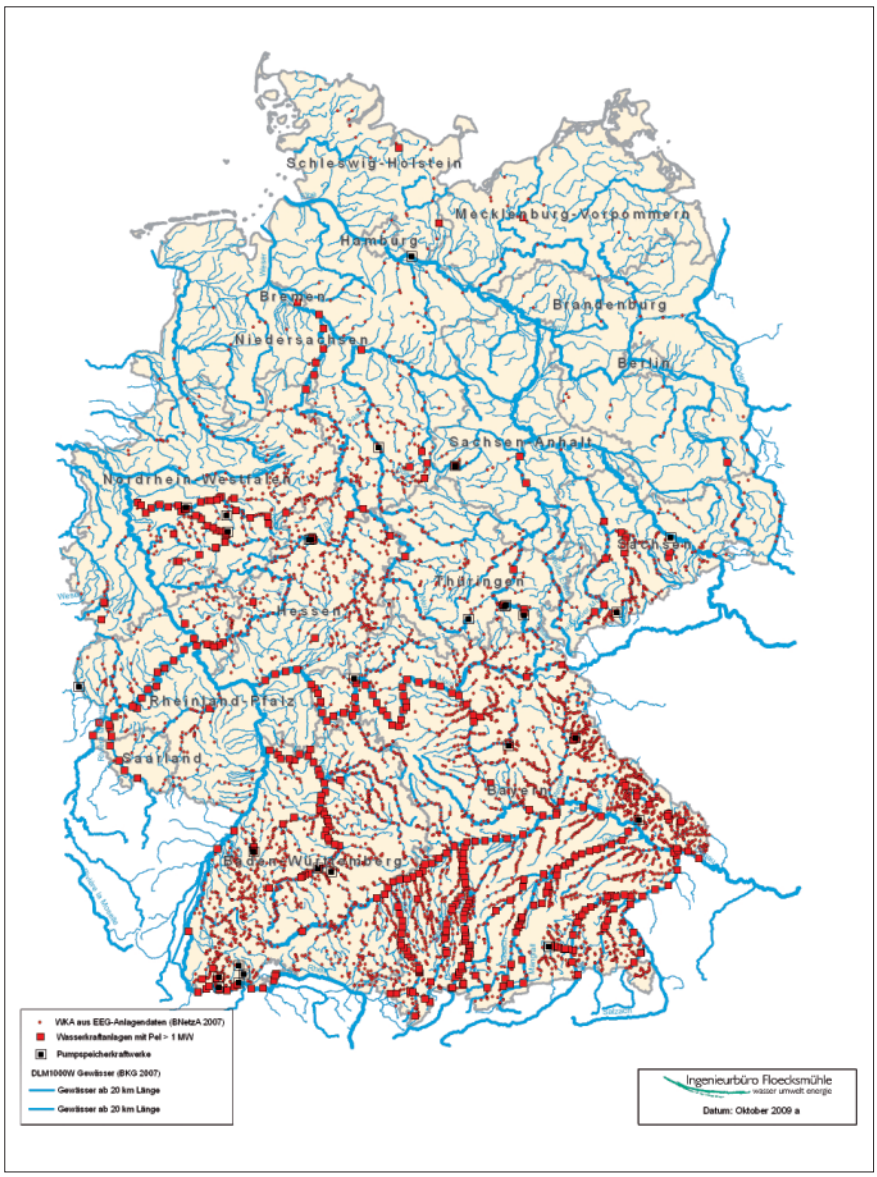

Bild 1: Bestand der genutzten Wasserkraftanlagen in Deutschland; berücksichtigt wurden Wasserkraftanlagen mit EEG-Vergütung [11], WKA mit $P_{inst} \geq 1$ MW und Pumpspeicherkraftwerke (DLM1000W: Bundesamt für Kartographie und Geodäsie)

thode (siehe Beitrag Anderer et al. [13] in dieser Ausgabe) durch Ausbau bestehender Standorte von WKA (P ≥ 1 MW) mit E_{gewinn} = 2,55 TWh.

- Das Zubaupotenzial an ungenutzten Querbauwerken (mit Möglichkeit zum Bau von WKA mit P ≥ 1 MW) mit $E_{QBW,g}$ = 0,1 bis 0,12 TWh.
- Das Potenzial der „frei fließenden Strecken" mit $E_{tech,frei}$ = 9,5 bis 12,0 TWh. Die großen Gewässer sind in der Regel stark ausgebaut. Die heute noch existierenden „frei fließende Strecken" an Elbe, Oder und Donau oder am Rhein unterhalb von Iffezheim bis zur niederländischen Grenze sind im das Technischen Potenzial enthalten, da die Nutzung der Strecken unter rein technischen Erwägungen grundsätzlich möglich wäre. Die Nutzung einiger dieser Abschnitte wird von Zeit zu Zeit diskutiert, erscheint aber momentan nicht genehmigungsfähig.
- Es verbleiben etwa 1,3 TWh, die das technische Restpotenzial darstellen.

7.2 Realisierbares Zubaupotenzial an großen Gewässern

Das technische Verbesserungspotenzial und das Zubaupotenzial an bestehenden Querbauwerken befindet sich an bestehenden Standorten. Daher kann erwartet werden, dass dieses Zubaupotenzial von ca. 2,7 TWh realisierbar ist. Die Nutzung des Restpotenzials wäre nur bei durchgehendem Aufstau und dem Neubau von optimierten Wasserkraftanlagen bzw. durch vollständigen Neubau außerhalb der „frei fließenden Gewässerstrecken" realisierbar.

Tab. 1: Installierte Leistung und Jahresarbeit deutscher Wasserkraftanlagen ohne Eigenverbrauch, Stand 2007

	WKA mit $P_{inst} \geq 1$ MW	WKA mit $P_{inst} < 1$ MW	Pumpspeicher-kraftwerke	gesamt
Zahl der WKA	406	6 240 + 600 bis 900 mit Betrieb für Eigenbedarf	31	ca. 7 400
Installierte Leistung* [GW]	3,39	0,65	–	4,04
Jahresarbeit D* [TWh]	17,5**	2,8***	0,6#	20,9

* Bei Grenzkraftwerken wurde nur der deutsche Anteil berücksichtigt
** RAV
*** Näherung an langjährigen Mittelwert
# langjähriger Mittelwert aus natürlichen Zufluss

Eine generelle Aussage zur Verwirklichung eines derartigen Ausbaus ist jedoch aufgrund unterschiedlicher Nutzungsansprüche, wie Besiedlung, Hochwasserschutz, Infrastruktur etc., und bei Berücksichtigung von gesetzlichen Regelungen, wie EG-WRRL und WHG, schwierig. Möglich scheint dagegen die Ausnutzung des Zubaupotenzials der großen Wasserkraft von 2,7 TWh an vorhandenen Standorten.

7.3 Mittelgroße und kleine Gewässer

3,4 TWh des technisch vorhandenen Potenzials von 4,8 bis 6,1 TWh werden zur Zeit genutzt. Das zusätzlich vorhandene Potenzial von 1,4 bis 2,7 TWh (mittlere Annahme 2,1 TWh) kann folgendermaßen aufgeteilt werden (**Bild 4**):

- Das technische Verbesserungspotenzial bestehender WKA (Wirkungsgrade, Steuerung, Rechenreinigung, Betriebsverbesserungen) wird von vielen Autoren auf 20 % des genutzten Potenzials (2,8 TWh für WKA < 1 MW) beziffert. Dies entspricht einer Jahresarbeit von etwa 0,56 TWh.
- Ökologische Abflüsse stellen bei Ausleitungskraftwerken den Abfluss und die Durchwanderbarkeit im Mutterbett sicher und bedienen Bypässe und Fischaufstiegsanlagen. Ihre Größe liegt im Bereich 5 bis 10 % von MQ, so dass mit einer Minderung des Zubaupotenzials von maximal 10 % oder 0,1 TWh gerechnet werden müssen.
- Potenzial an frei fließenden Strecken in NATURA-2000-Gebieten: Bei der Herleitung des technischen Potenzials wurde ein starker Ausbau der kleinen und mittelgroßen Gewässer angesetzt. Etwa 50 % der Gewässerstrecken liegen jedoch in NATURA-2000-Gebieten, in denen aufgrund der dortigen Restriktionen nur geringe Zubaupotenziale erwartet werden. Nimmt man darüber hinaus an, dass wie für NRW der maximal zulässige Anteil an Stau- und Ausleitungsstrecken, der noch als „gering-

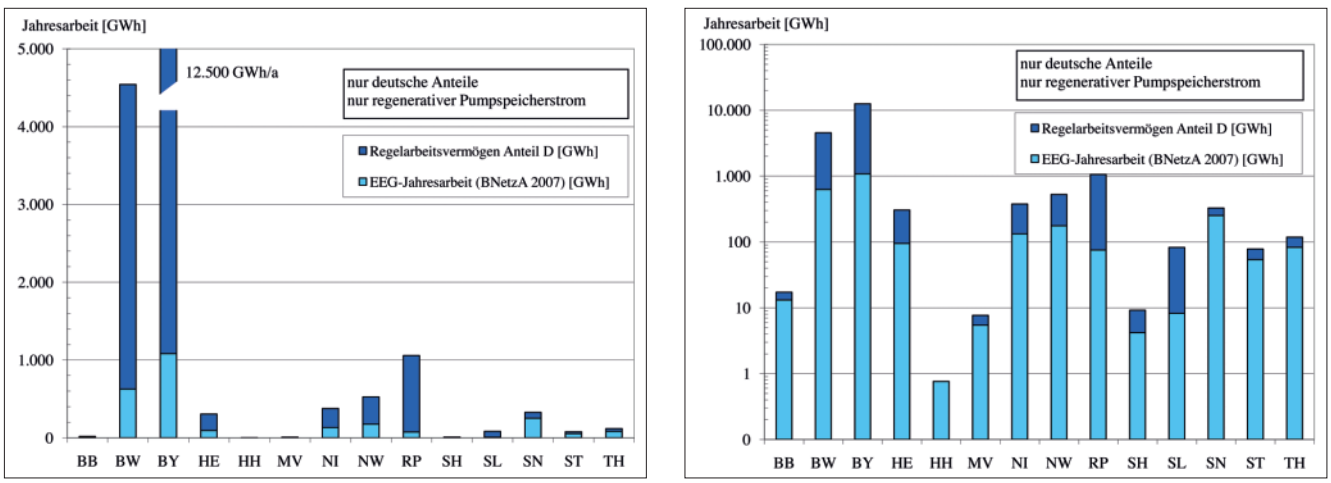

Bild 2: Jahresarbeit Deutscher Wasserkraftanlagen, Stand 2007; dargestellt ist die EEG vergütete Strommenge für WKA mit P_{inst} < 1 MW und das Regelarbeitsvermögen (RAV) für WKA mit $P_{inst} \geq 1$ MW (In der rechten Abbildung wurden die Werte logarithmisch aufgetragen, damit auch die kleineren Anteile sichtbar werden.)

Tab. 2: Zusammenstellung verschiedener Veröffentlichungen zum gesamten nutzbaren Wasserkraftpotenzial

Quelle	Auswertung	Gesamtes nutzbares Potenzial
Frohnholzer 1962 [2]	WKA Bestand, WKA in Bau oder geplant; einige Standorte wurden inzwischen ausgebaut (Alte Bundesländer)	21,84 TWh/a (RAV)
Wagner & Rindelhardt 2007 [5]	VDEW Statistik und Befragung der Länder (Gesamtdeutschland)	24,9 TWh/a
BEE 2009 [10]	Befragung Branchenverbände (Gesamtdeutschland)	31,9 TWh/a bei einem Ausbau auf 6,5 GW bis 2020

fügige“ Beeinträchtigung im Sinne der WRRL angegeben werden kann, mit 25 % beziffert wird [12], so reduziert sich das verfügbare technische Potenzial um etwa 1 TWh.

Das Restpotenzial an mittelgroßen und kleinen Gewässern beträgt demnach:

2,1 TWh - 0,56 TWh - 0,1 TWh - 1 TWh = 0,44 TWh.

Dieses Restpotenzial wäre dann nutzbar, wenn außerhalb „frei fließenden Gewässerstrecken“ und Strecken in NATURA-2000-Gebieten an bestehenden Querbauwerken neue Wasserkraftanlagen gebaut würden oder wenn durch den Neubau von optimierten Wasserkraftanlagen bestehende Anlagen ersetzt würden.

Mit dem EEG 2009 sind in Analogie zu Untersuchungen aus Rheinland-Pfalz [8] und Nordrhein-Westfalen [9] von dem Restpotential von 0,44 TWh und dem technischen Verbesserungspotential von 0,56 TWh zur Zeit etwa 60 %, d. h. 0,6 TWh durch Neubau wirtschaftlich realisierbar. Würde dieser Zubau durch Wasserkraftanlagen einer mittleren Leistung von 200 kW realisiert, entspräche das bei Volllaststunden von 4 000 h dem Bau von 750 zusätzlichen kleinen Wasserkraftanlagen.

Für die kleine Wasserkraft wird somit ein technisch-ökonomisch-ökologisches Potenzial von etwa 0,6 TWh bzw. ein realisierbares Zubaupotenzial von etwa 18 % abgeschätzt.

8 Zusammenfassung

In 2007 betrug die installierte Leistung der Wasserkraftanlagen in Deutschland etwa 4,0 GW. In diesem Wert sind die ausländischen Anteile von WKA an deutschen Grenzgewässern nicht enthalten. Der langjährige Mittelwert des genutzten Wasserkraftpotenzials liegt bei einer Jahresarbeit von 20,9 TWh abgeschätzt, einschließlich der Erzeugung aus dem natürlichen Zufluss der Pumpspeicherkraftwerke.

Das theoretische Linienpotenzial der Gewässer wurde für Deutschland zu etwa 92,6 TWh ermittelt. Nach Abzug der Fließverluste der Gewässer und unter Einbeziehung der realen Wirkungs- und Ausbaugrade von Wasserkraftanlagen ergibt sich ein technisches Gesamtpotenzial von 33,2 bis 42,1 TWh.

Nach Abzug des genutzten Potenzials verbleibt somit ein technisches Zubaupotenzial von etwa 12,3 bis 21,2 TWh, das theoretisch genutzt werden könnte.

Unter der Annahme, dass die größeren, bisher frei fließenden Strecken an Elbe, Oder, Donau und Rhein erhalten bleiben sollen, reduziert sich dieses Zubaupotenzial an den großen Gewässern auf etwa 4 TWh, von denen ca. 2,7 TWh durch den Umbau bestehender Standorte genutzt werden können.

An mittelgroßen und kleinen Gewässern ergibt sich unter Berücksichtigung der bestehenden Randbedingungen und Restriktionen ein technisch-ökologisch-ökonomisches Potenzial von etwa 0,6 TWh, bzw. ein Zubaupotenzial von 18 %.

Das ermittelte technische Potenzial stellt als Ergebnis einer rein physikalisch/bzw. technischen Untersuchung das theoretisch maximal nutzbare Potenzial und damit die Obergrenze des realisierbaren Wasserkraftpotenzials dar.

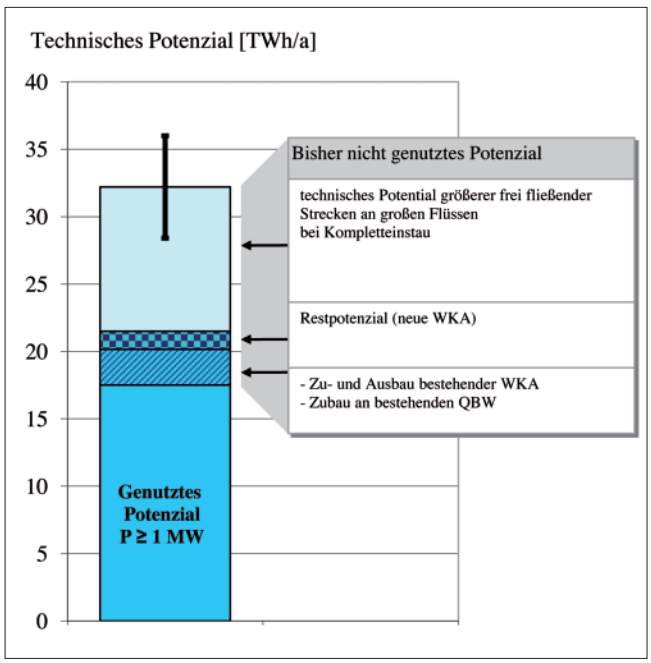

Bild 3: Aufteilung des technischen Potenzials großer Gewässer

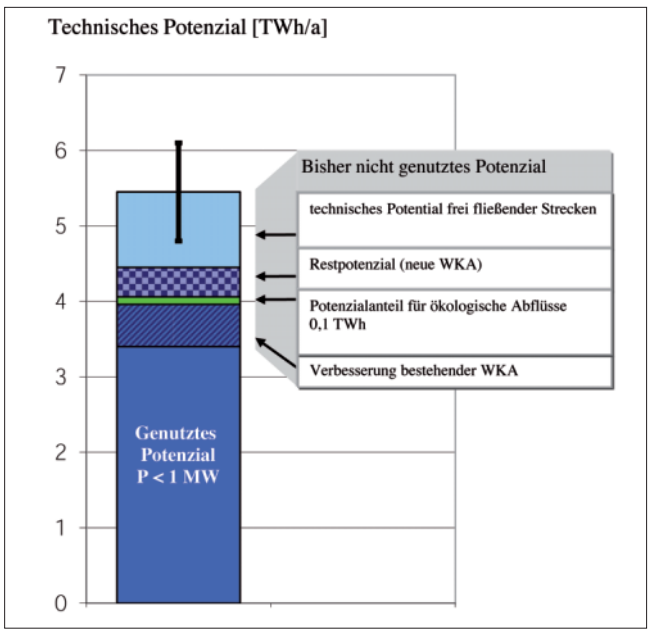

Bild 4: Aufteilung des technischen Potenzials mittelgroßer und kleiner Gewässer

Der Anteil dieses theoretischen Wertes des dargestellten Zubaupotenzials von ca. 3,3 TWh/a, der tatsächlich realisiert werden kann, hängt also weniger von technischen Fragestellungen als vielmehr elementar von politisch-gesellschaftlichen Entscheidungen ab.

Danksagung

Wir bedanken uns bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern aus Behörden und Verbänden für die bereitwillige und hilfreiche Unterstützung während der Untersuchungen sowie für anregende Diskussionen u. a. in den Sitzungen des Expertenbeirates Wasserkraft.

Autoren

Dipl.-Phys. Pia Anderer
Dipl.-Ing. Ulrich Dumont
Ingenieurbüro Floecksmühle
Bachstraße 62-64
52066 Aachen
ib@floecksmuehle.com

Dr. Stephan Heimerl
Fichtner GmbH & Co. KG
Sarweystr. 3
70191 Stuttgart
Stephan.Heimerl@Fichtner.de

Dr. Albert Ruprecht
Institut für Strömungsmechanik und
Hydraulische Strömungsmaschinen
der Universität Stuttgart (IHS)
Pfaffenwaldring 10
70569 Stuttgart
ruprecht@ihs.uni-stuttgart.de

Dipl.-Ing. Ulrich Wolf-Schumann
Hydrotec Ingenieurgesellschaft
für Wasser und Umwelt mbH
Bachstraße 62-64
52066 Aachen
uws@hydrotec.de

Literatur

[1] Keller, H.; Ruprecht, C.; Vogel, F.: 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 Wasserkraftpotenzials 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.; Gieseke, 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 Wasserkraftpotenzial in Rheinland-Pfalz, In: Korrespondenz Wasserwirtschaft (2009), Heft 4, S. 223-227.

[9] Anderer, P.; Dumont, U.; Kolf, R.: Das Wasserkraftpotenzial in Nordrhein-Westfalen, In: Wasser und Abfall (2007), Heft 7-8, S. 16-20.

[10] BEE (Hrsg.): Strom-Ausbauprognose der Erneuerbare-Energien-Branche, Stromversorgung 2020, Wege in eine moderne Energiewirtschaft. Berlin, 2009.

[11] BNetzA (Hrsg.): Durch die Bundesnetzagentur zusammengestellte Daten zu Wasserkraftanlagen, deren in 2007 eingespeister Strom nach EEG 2004 vergütet wurde, 2007.

[12] Dumont, U.; P. Anderer; U. Schwevers: Handbuch Querbauwerke. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Düsseldorf, 2005.

[13] Anderer, P.; Dumont, U.; Stark, B.; Wolf-Schumann, U.: Vom Linienpotenzial zum technischen Wasserkraftpotenzial – Methode. In: WasserWirtschaft 100 (2010), Heft 9, S. 17.

Pia Anderer, Ulrich Dumont, Stephan Heimerl, Albert Ruprecht and Ulrich Wolf-Schumann

The Hydropower Potential of Germany

Germany has set a goal for the year 2030 to cover 45 % of its electric power consumption through renewable energies. Currently about 14 % of electricity are provided by renewable energy sources, 25 % of which come from hydro power. As a basis for a German development strategy, the Federal Ministry of Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) has commissioned further research to determine the additionally usable potential of hydropower throughout Germany, using the consistent method of line potential calculation.

Пиа Андерер, Ульрих Дюмо, Штефан Хаймерль, Альберт Рупрехт и Ульрих Вольф-Шуманн

Гидроэнергетический потенциал Германии

Германия поставила себе целью к 2030 году обеспечить долю «чистой» энергией в потреблении электрической энергии в целом в размере 45 %. В настоящее время энергии этого вида вырабатывается примерно 14 %, при этом доля гидроэнергии составляет около 25 %. По поручению федерального Министерства экологии, защиты природы и обеспечения безопасности ядерных реакторов (BMU) на основе единого для всей Германии метода с применением линейного потенциала просчитывается требующий дополнительного развития гидроэнергетический потенциал в Германии в качестве исходной базы для разработки стратегии использования энергетических ресурсов.

Anzeigen-Service
(0611) 7878 338