



WBGU

WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT DER BUNDESREGIERUNG
GLOBALE UMWELTVERÄNDERUNGEN

materialien

Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Burkhard Horlacher:

Globale Potenziale der Wasserkraft

**Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten 2003
"Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit"**

Berlin, Heidelberg 2003

Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten 2003
"Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit"
Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag
ISBN 3-540-40160-1
Verfügbar als Volltext im Internet unter http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003.html

Autor: Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Burkhard Horlacher
Titel: Globale Potenziale der Wasserkraft
Dresden: Technische Universität, 2002
Veröffentlicht als Volltext im Internet unter http://www.wbgu.de/wbgu_jg2003_ex03.pdf

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen
Geschäftsstelle
Reichpietschufer 60–62, 8. OG.
10785 Berlin

Telefon (030) 263948 0
Fax (030) 263948 50
E-Mail wbgu@wbgu.de
Internet <http://www.wbgu.de>

Alle WBGU-Gutachten können von der Internetwebsite <http://www.wbgu.de> in deutscher und englischer Sprache herunter geladen werden.

Globale Potenziale der Wasserkraft

(Endfassung)

Hans-Burkhard Horlacher

Inhalt

| | | |
|------------|---|-----------|
| 1 | <i>Einleitung</i> | 2 |
| 2 | <i>Leistung und Arbeitsvermögen von Wasserkraftanlagen</i> | 2 |
| 3 | <i>Technik der Wasserkraftnutzung</i> | 4 |
| 4 | <i>Ökologische Aspekte</i> | 6 |
| 5 | <i>Wasserkraftpotenziale</i> | 7 |
| 5.1 | Definition der Wasserkraftpotenziale | 7 |
| | Theoretisches Potenzial | 8 |
| | Technisches Potenzial | 9 |
| | Ausschöpfbares Potenzial | 9 |
| 5.2 | Potenziale der Wasserkraft in der Bundesrepublik Deutschland | 10 |
| 5.3 | Globale Wasserkraftpotenziale | 12 |
| 6 | <i>Perspektiven der Wasserkraftnutzung</i> | 18 |
| | Schrifttum: | 19 |

1 Einleitung

Die Wasserkraft nimmt weltweit die dritte Stelle in der Erzeugung von elektrischer Energie mit ca. 19 % nach Kohle (40 %) und Öl / Gas (24 %) ein. Sie ist damit die wichtigste erneuerbare Energiequelle und leistet einen bedeutsamen Beitrag zur Reduktion der CO₂-Emission und somit zur Minderung der Gefahr einer globalen Klimaveränderung. Durch die Einwirkung der Sonne wird Wasser, wie im Wasserkreislauf beschrieben, auf ein höheres ausnutzbares Energieniveau gehoben. Die Energieumwandlung selbst ist mit keinem oder nur geringen Umweltbelastungen verbunden. Der bei der Errichtung und dem Betrieb einer Wasserkraftanlage ohne Zweifel vorhandene erhebliche Eingriff in den Naturhaushalt kann bei sorgfältiger Planung und Berücksichtigung aller ökologischen Belange sehr abgemindert werden. Dieser Energiequelle kann man die Nachhaltigkeit zuweisen. Die schnelle Bereitstellung der Energie aus Wasserkraft sowie deren wirtschaftliche Speicherung zeichnen darüber hinaus die Wasserkraft aus. Sie trägt insgesamt dazu bei, die elektrische Energie in großen Netzen wirtschaftlicher und sicherer bereitstellen zu können.

Es ist somit verständlich, dass man bestrebt ist, die Wasserkraftnutzung durch den Bau neuer Anlagen oder durch Rekonstruktion und Modernisierung alter Anlagen zu erweitern, weltweit gesehen bestehen hierfür noch beträchtliche Möglichkeiten.

2 Leistung und Arbeitsvermögen von Wasserkraftanlagen

Wenn man von der Wasserkraftnutzung spricht, wird dabei in der Regel die Ausnutzung der Lageenergie verstanden. Ein Volumenstrom Q (m³/s) fließt von einem höheren Energieniveau zu einem tieferen, wobei mit einer Turbine und einem Generator elektrische Energie erzeugt werden kann, die dem Produkt aus dem Volumenstrom und der Differenz des Energieniveaus (Fallhöhe) proportional ist. Die Leistung P errechnet sich bekanntlich aus der Beziehung

$$P = \eta \cdot g \cdot Q \cdot h_F \quad [\text{W}]$$

| | | |
|-----|-------------------------------|---|
| mit | η [-] | Gesamtwirkungsgrad der Anlage ($\sim 0,7 - 0,85$) |
| | g [m/s^2] | Normalbeschleunigung |
| | Q [m^3/s] | Durchfluss durch die Turbine (n) |
| | h_F [m] | Fallhöhe |

Wie man sehr schnell feststellen kann, werden selbst bei kleinen Wasserkraftanlagen große Leistungen erzeugt, so dass man zur Leistungsbeschreibung Abkürzungen für die Zehnerpotenzen verwendet: ($10^3 \text{ W} = \text{kW}$, $10^4 \text{ W} = \text{MW}$, $10^8 \text{ W} = \text{GW}$, $10^{12} \text{ W} = \text{TW}$ und $10^{15} \text{ W} = \text{PW}$).

Aus obiger Gleichung wird das Bestreben verständlich, Wasserkraftanlagen zu bauen, bei denen sowohl der Durchfluss als auch die Fallhöhe groß sind. Dies lässt sich jedoch bei den geographischen und hydrologischen Gegebenheiten der Erde meistens nicht verwirklichen.

So lassen sich bei Anlagen, die in Flüssen errichtet werden, große Durchflüsse bei geringer Fallhöhe erzielen. Als Beispiel möge hier die große Wasserkraftanlage Itaipu (12 600 MW) mit einem Durchsatz von maximal $12\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ genannt sein.

In Gebirgen können dagegen große Fallhöhen erreicht werden, wobei dann die Durchflüsse kleiner ausfallen. Hier kann die Wasserkraftanlage Cleuson-Dixence in der Schweiz genannt werden, deren Fallhöhe im Endausbau 1883 m beträgt.

Neben der Leistung einer Wasserkraftanlage interessiert besonders deren Energieerzeugung (Arbeitsvermögen). Das Arbeitsvermögen einer Wasserkraftanlage errechnet sich bekanntlich aus dem Produkt der Leistung und der vorgegebenen Zeiteinheit.

$$A = P \cdot t \quad [\text{Ws}]$$

Gewöhnlich wird als Zeiteinheit eine Stunde (h) gewählt.

Der mögliche turbinierbare Abfluss eines Gewässers hängt mittelbar von dem Niederschlagsgeschehen (Nass- oder Trockenjahr) des Einzugsgebietes ab, folglich unterliegt auch die Energieerzeugung in jedem Jahr Schwankungen. Das Arbeitsvermögen einer Wasserkraftanlage wird daher meistens auf ein Jahr bezogen, z.B. GWh/a oder TWh/a.

3 Technik der Wasserkraftnutzung

Durch den Aufstau eines Gewässers wird in der Regel die zur Wasserkraftnutzung erforderliche Fallhöhe erreicht. Durch ein Sperrenbauwerk wird ein Staubecken geschaffen, wobei es für die Wasserkraftnutzung wichtig ist, ob in dem Staubecken Wasser gespeichert werden kann. Ist dies, wie bei vielen Flusskraftwerken, nicht der Fall, so wird der Abfluss entsprechend der Ganglinie durch die Turbinen abgearbeitet. Die Energieerzeugung ist somit direkt vom natürlichen Abflussgeschehen eines Gewässers abhängig. Man ist daher bestrebt, diese Wasserkraftanlagen ständig mit größtmöglicher Leistung laufen zu lassen. Sie dienen zur Grundlastabdeckung des Bedarfs in einem elektrischen Versorgungsnetz.

Solche Laufwasserkraftwerke werden mit geringen Stauhöhen (ca. 5 bis 20 m) im Flussquerschnitt selbst oder in Seiten- bzw. Umgehungskanälen (Ausleitungskraftwerk) errichtet. Bei kleinen Anlagen dient als Sperrenbauwerk ein festes Wehr, bei mittleren und größeren Anlagen werden bewegliche Wehre angeordnet. Bei flachen und breiten Talquerschnitten müssen neben dem Sperrenbauwerk auch seitliche Dämme errichtet werden, um den Staubereich einzugrenzen. Es wird verständlich, dass diese Stauhaltungsdämme um so länger werden, je geringer das Gefälle eines Flusses ist. Alle Bauwerke müssen so bemessen werden, dass ein Hochwasser schadlos abgeführt werden kann. Als Bemessungshochwasser wird ein Hochwasser mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren herangezogen.

Im Krafthaus selbst werden die Turbinen und die Generatoren angeordnet. Weitere wichtige Komponenten sind der Rechen, die Einlaufspirale und der Saugschlauch. Der Rechen verhindert, dass Treibgut zur Turbine gelangt. Er muss von Zeit zu Zeit mit Hilfe von Rechenreinigungsmaschinen (meist automatisch betrieben) gereinigt werden. Die Einlaufspirale dient zur gleichmäßigen Beaufschlagung der Turbine. Bei Laufwasserkraftwerken kommen propellerartige Turbinen mit vertikaler und horizontaler Achse zum Einsatz (u.a. Kaplan-, Rohr- oder Straflowturbinen). Durch den Saugschlauch wird das turbinierte Wasser verlustarm dem Unterlauf zugeführt.

Besteht die Möglichkeit, Wasser in dem Staubecken zu speichern und es erst bei Bedarf energiewirtschaftlich zu nutzen, so werden solche Kraftwerke zur Spitzenstromerzeugung

herangezogen werden. Ein großer Vorteil der Wasserkraftanlagen ist hier ihre schnelle Einsatzbereitschaft (z.B. 1000 MW in ca. 5 bis 10 min). Mit Hilfe dieser Spitzenkraftwerke können schnelle extreme Laständerungen in einem elektrischen Versorgungsnetz ausgeglichen werden. Für ein Versorgungsnetz sind daher gerade diese Spitzenkraftwerke sehr wichtig und unverzichtbar.

Die bewirtschaftbaren Speicher erfüllen meistens neben der Energieerzeugung weitere wasserwirtschaftlich bedeutsame Aufgaben, z.B. Hochwasserschutz, Bewässerung, Wassergewinnung. Darüber hinaus sind auch soziale und ökologische Aspekte zu nennen: Schaffung von Naherholungs- oder Naturschutzgebieten, Fischerei. Man spricht von Mehrzweckprojekten.

Um große Speicher errichten zu können, werden ganze Täler mit Talsperren aufgestaut. In solchen Speichern kann dann meistens die jährliche Abflussfracht eines ganzen Einzugsgebietes gespeichert werden. Durch Beileitungen können so gegebenenfalls weitere Einzugsgebiete energiewirtschaftlich erschlossen werden. Solche großen Speicher können nur in Gebirgen gebaut werden, wobei man dann meistens nicht nur die Fallhöhe des Aufstaus ausnützt, sondern das gestaute Wasser mit Druckleitungen zu einem in einem tiefer gelegenen Tal angeordneten Krafthaus leitet. Wie schon erwähnt, können hier Druckhöhen bis nahezu 2000 m erreicht werden. Bei Wasserkraftanlagen mit mittleren Fallhöhen kommen Francisturbinen zum Einsatz, bei größeren Fallhöhen Peltonturbinen.

Die bei Wasserkraftanlagen verwendete Technik kann als ausgereift und in hohem Maß als zuverlässig bezeichnet werden. Bei der Errichtung werden hohe Investitionen benötigt. Die Wasserkraftanlagen zeichnen durch ihre lange Betriebslebensdauer (bis zu 100 Jahren und mehr), durch ihre niedrigen Betriebskosten und ihren geringen Wartungsaufwand aus. Sie weisen im Vergleich zu allen anderen Energieerzeugungsanlagen den höchsten Wirkungsgrad auf. Sie sind mit anerkannter Technik (vielfach automatisch) einfach und mit geringen Betriebskosten zu betreiben. Das Betriebsmittel Wasser ist erneuerbar und nicht den Veränderungen des Weltmarktes, wie z. B. Rohöl, unterworfen. Für viele Länder kann durch die Wasserkraft der elektrische Energiebedarf zu 90% und mehr gedeckt werden (z. B. Äthiopien, Bhutan, Burundi, Laos, Lesotho, Kamerun, Kongo, Kirgisien, Malawi, Mozambique, Namibia, Nepal,

Norwegen, Paraguay, Rep. Kongo, Rep. Zentr. Afrika, Ruanda, Sambia, Uganda). Zu erwähnen ist schließlich, dass heute nur mit Speichieranlagen (Pumpspeicherwerke) große Energiemengen wirtschaftlich gespeichert werden können.

4 Ökologische Aspekte

Der Aufstau eines Gewässers stellt einen massiven Eingriff in sein Ökosystem dar. Der natürliche Geschiebe- und Schwebstoffhaushalt wird gestört. Die Durchgängigkeit für Fische und andere aquatische Lebewesen wird behindert. Durch die Errichtung einer Stauhaltung wird aus dem Fließgewässer ein See mit geringer Durchströmung, d.h. es tritt eine Veränderung des Gewässercharakters ein. Durch Stauhaltungsdämme erfolgt eine Abtrennung des Gewässers von seiner Auenregion. Bei Ausleitungskraftwerken wird dem Mutterbett Wasser entzogen, was zu einer Beeinträchtigung der Abflussdynamik führen kann.

Diese kurze Schilderung zeigt wesentliche Eingriffe in den Naturhaushalt, die bei der Errichtung einer Stauhaltung für eine Wasserkraftanlage unbedingt zu beachten sind. Die Auswirkungen davon reichen weit über den eigentlichen Kraftwerksbereich hinaus.

Bei der Planung, beim Bau und beim Betrieb einer Wasserkraftanlage muss man daher bestrebt sein, schädliche ökologische Folgen zu vermeiden bzw. zu minimieren sowie durch Ausgleichsmaßnahmen die Gesamtsituation zu kompensieren oder zu bessern. Hier sollen nur einige Aspekte zusammengestellt werden:

- Einbeziehung der Auengebiete in den Stauraum,
- variable, natürliche Ufergestaltung des Stauraumes,
- Schaffen von Flachwasserzonen,
- Anordnung von Fischaufstiegsanlagen (Durchgängigkeit auch für Sohlbewohner),
- geringe Rechenabstände,
- Mindestwasserführung im Mutterbett.

Viele unserer Flüsse befinden sich heute nicht mehr im naturbelassenen Zustand, sondern sind im Zuge der Industrialisierung in einen kanalartiges Fließgewässer umgestaltet

worden. Als Gründe hierfür sind die Schifffahrt oder der Hochwasserschutz zu nennen. Hier kann man beim Bau einer Wasserkraftanlage, bei dem obige ökologischen Maßnahmen gleichlaufend berücksichtigt werden, Naturnähe für das Gewässer wieder zurückgewinnen.

Die Begradigung von Flussläufen führt häufig zur Erosionserscheinungen an der Sohle und zur Eintiefung des Flusses. Die Folge davon ist eine Grundwasserabsenkung in den Vorländern. Hier konnte vielfach mit Stauhaltungen, in die auch ein Wasserkraftwerk z.T. eingebunden worden ist, eine dauerhafte Abhilfe geschaffen werden.

Generell ist festzuhalten, sich bei kleinen Anlagen die ökologischen Forderungen in der Regel besser beherrschen lassen. Es ist jedoch zu bedenken, dass es aus ökologischer Sicht weitaus günstiger ist, große Anlagen auszubauen, da hier der Nutzen in Form von eingespartem Kohlendioxid-Ausstoßes im Vergleich zu dem Eingriff in die Natur günstiger ausfällt (s. Tabelle 2).

Für jedes Wasserkraftprojekt – sowohl für kleine Kraftwerke unter 1 MW wie auch für große - wird heute weltweit eine umfassende Umweltverträglichkeitsuntersuchung bei Beginn der Planungen durchgeführt. Veränderungen hinsichtlich der Sedimentation, der Flora, der Fauna und der Wasserqualität können heute sehr genau vorausgesagt und dadurch schon frühzeitig effektive Gegenmaßnahmen geplant werden. Bei Großprojekten können durch Umwelt Managementprogramme, die sich über die gesamte Betriebszeit erstrecken, die Eingriffe in die Umwelt erheblich gemindert und somit der Erfolg ständig überwacht werden. Großprojekte müssen heute die Kriterien der Nachhaltigkeit erfüllen und einen Nutzen für die unmittelbar betroffene Bevölkerung bringen.

5 Wasserkraftpotenziale

5.1 Definition der Wasserkraftpotenziale

Zur Charakterisierung eines Gebietes oder eines Landes bezüglich seiner Wasserkraftmöglichkeiten ermittelt man sogenannte Wasserkraftpotenziale.

Es wird zwischen dem theoretischen, dem technischen, dem wirtschaftlichen und dem ausschöpfbaren Potenzial unterschieden.

Theoretisches Potenzial

Als das theoretische Potenzial wird die potentielle Energie aller Gewässer eines Gebietes definiert, ohne dass physikalische, technische und wirtschaftliche Nutzungsgrenzen beachtet werden. Die theoretischen Potenziale können aufgrund u.a. technischer Restriktionen (z.B. Hochwässer und des damit verbundenen, ungenutzt abfließenden Wassers), baulicher Einschränkungen infolge der Topographie und vorhandener oder geplanter Bebauung, umweltrelevanter Belange und wirtschaftlicher Einschränkungen nur zum kleinen Teil in Nutzenergie umgewandelt werden.

Man unterscheidet zwischen Flächen- und Linienpotenzial. Das Flächen- oder Gebietspotenzial bildet in der Regel die theoretische Obergrenze des Wasserkraftpotenzials eines Untersuchungsgebietes. Das Flächenpotenzial bezeichnet diejenige Energie, die durch eine nahezu lückenlose Bedeckung des Gebietes mit Speicherbecken zu gewinnen wäre. Das Potenzial ergibt sich aus dem Produkt der mittleren jährlichen Abflussspende mit der geodätischen Höhendifferenz der jeweiligen Teilflächen des Untersuchungsgebietes zu einem Referenzniveau; es wird in der Regel auf ein Jahr bezogen. Die Summe der Teilflächenpotenziale führt auf die flächenbezogene Maßzahl des gesamten Gebietes.

Das Linien- oder theoretische Flusspotenzial beschreibt das Arbeitsvermögen eines Flusslaufes oder Fließgewässerabschnitts. Es berechnet sich aus dem Produkt aus dem langjährigen mittleren Abfluss und der Fallhöhe einer bestimmten Flussstrecke. Die Aufsummierung ergibt das Linienpotenzial des gesamten Flusslaufes. Wird ein Gebiet mit mehreren Flussläufen betrachtet, muss definiert werden, Gewässer welcher Größenordnung mit einbezogen werden sollen.

Sowohl Flächen- als auch Linienpotenziale können entweder als Leistungspotenziale (in kW/km) oder als das jährliche Arbeitsvermögen (in kW/km² oder kW/km) angegeben werden. Wenn bei der Flächen- und Linienpotenzialbestimmung die Einzugsgebiete aller betrachteten Fließgewässer im Untersuchungsgebiet liegen, ist das Flächenpotenzial in der Regel größer als das Linienpotenzial. Ist das nicht der Fall, wird ein Teil des Abflusses

„importiert“. Das Linienpotenzial kann dann das Flächenpotenzial des Untersuchungsgebietes übersteigen.

Technisches Potenzial

Das technische Potenzial des Energieträgers Wasser bezeichnet das Arbeitsvermögen, welches unter Berücksichtigung technischer, ökologischer, infrastruktureller und anderer Belange tatsächlich nutzbar ist. Selbst beim vollständigen Flussausbau kann wegen nicht horizontal verlaufender Wasserspiegel (Staulinie) im Oberwasser eines Kraftwerkes nie die gesamte geodätische Fallhöhe ausgenutzt werden. Auch reduzieren Fallhöhenschwankungen infolge von Wasserstandsänderungen im Unterwasser bei unterschiedlichen Durchflüssen die technisch mögliche Stromerzeugung. Ökologische Forderungen, z.B. Mindestwasserauflagen, können das nutzbare Potenzial zusätzlich erheblich einschränken. Auch ist der Gesamtwirkungsgrad einer Wasserkraftanlage meist kleiner als 75 %. Weiterhin liegt die Anlagenverfügbarkeit bei den üblichen Wasserkraftanlagen aufgrund von Wartungs- und Reparaturarbeiten im Mittel zwischen 93 und 97 %. Näherungsweise liegt daher das technische Potenzial bei 20 bis 35 % des theoretischen Potenzials.

Wirtschaftliches Potenzial

Das wirtschaftlich nutzbare bzw. ausbauwürdige Potenzial entspricht dem Anteil des Technischen Wasserkraftpotenzials, der wirtschaftlich im Vergleich zu anderen Energieformen genutzt werden kann. Als Kriterium dafür wird die Amortisation des investierten Kapitals innerhalb der Anlagennutzungsdauer herangezogen. Hierbei sind u.a. die Kosten für die Nutzung alternativer Energien, die Höhe des Diskontsatzes und die Struktur des Versorgungssystems (Inselbetrieb oder Verbund) zu berücksichtigen.

Ausschöpfbares Potenzial

Das ausschöpfbare oder Erwartungspotenzial beschreibt den zu erwartenden tatsächlichen Beitrag zur Energieversorgung. Es ist in der Regel geringer als das wirtschaftliche Potenzial, da es im allgemeinen nicht sofort, sondern allenfalls innerhalb eines längeren Zeitraumes vollständig erschließbar ist. Dies liegt u.a. in den nur begrenzten Kapazitäten für die Herstellung von Wasserkraftanlagen, der noch gegebenen funktionsfähig

vorhandenen Anlagen sowie einer Vielzahl sonstiger Hemmnisse (u.a. mangelnde Information, rechtliche und administrative Begrenzungen) begründet, die selbst einer wirtschaftlichen Nutzung entgegenstehen. Das Erwartungspotenzial kann aber auch größer als das wirtschaftliche Potenzial sein, wenn eine staatliche Förderung gewährt wird (z.B. Kleinwasserkraftwerk).

Gerade bei Kleinwasserkraftwerken (< 0,5 MW) ist eine staatliche Förderung dringend geboten, da sie wegen der hohen Investitionskosten sehr schnell im Vergleich zu anderen Stromerzeugungsarten unwirtschaftlich werden.

Werden noch in die Stromerzeugungspotenziale die Transport- bzw. Netzverluste (ca. 5 %) berücksichtigt, so spricht man von **Endenergiepotenzialen**.

5.2 *Potenziale der Wasserkraft in der Bundesrepublik Deutschland*

Das wassertechnische Arbeitsvermögen und das Regelarbeitsvermögen in der Bundesrepublik Deutschland und in den einzelnen Bundesländern können der Tabelle 1 entnommen werden. Demnach liegt das technische Potenzial der Wasserkraftnutzung in der Bundesrepublik bei ca. 24 TWh/a. Bayern und Baden-Württemberg sind aufgrund der hier befindlichen Mittelgebirge und den vergleichsweise hohen mittleren Niederschlägen durch das größte wassertechnische Arbeitsvermögen gekennzeichnet (80 % bezogen auf das Gesamtpotenzial der BRD). Topographisch bedingt konzentriert sich - entsprechend den vorhandenen Potenzialen - die Wasserkraftnutzung im wesentlichen auf die Länder Bayern, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, Hessen und Thüringen. Es ist hervorzuheben, dass ca. 70 % der Energie aus Wasserkraft an den großen Flussläufen Inn, Rhein, Donau, Lech, Isar, Main, Neckar und Saar gewonnen wird. Im Norden Deutschlands sind kaum Möglichkeiten einer Wasserkraftanlage gegeben.

In der Tabelle 1 ist neben dem technischen Arbeitsvermögen auch das Regelarbeitsvermögen aufgeführt. Hieraus ist ersichtlich, dass ca. 6 bis 7 TWh/a noch ausbaubar sind. Zur Steigerung des derzeit genutzten Wasserkraftpotenzials ist grundsätzlich eine Revitalisierung stillgelegter Anlagen, ein Ausbau bzw. eine Modernisierung bestehender Anlagen und ein Neubau möglich.

Tabelle 1: Technisch mögliches Arbeitsvermögen und Regelarbeitsvermögen in einzelnen Bundesländern und in der Bundesrepublik Deutschland

| | Technisches Arbeitsvermögen in GWh/a | Regelarbeitsvermögen in GWh/a |
|-------------------------------|---|----------------------------------|
| Baden- Württemberg | 6294 | 3970 |
| Bayern | 13614 | 11006 |
| Brandenburg | 101 | 7 |
| Hessen | 815 | 287 |
| Mecklenburg-Vorpommern | 45 | . |
| Niedersachsen | 350 | 233 |
| Nordrhein-Westfalen | 700 | 388 |
| Rheinland-Pfalz | 1500 | 849 |
| Saarland | 169 | 133 |
| Sachsen | 320 | 75 |
| Sachsen-Anhalt | 362 | 14 |
| Schleswig-Holstein | ca. 5 | 5 |
| Thüringen | 414 | 62 |
| Bundesrepublik Deutschland | ca. 24 689 | ca. 17 029 |

Tabelle 2: Proz. Anteil der Wasserkraftanlagen in der BRD in verschiedenen Leistungsgruppen und deren Anteil an der Energieerzeugung

| Kraftwerksleistung in MW | proz. Anteil an der gesamten Anzahl der Wasserkraftanlagen | proz. Anteil an der Energieerzeugung |
|-----------------------------|---|--------------------------------------|
| < 1 | 93.2 | 8 |
| 1 – 10 | 5.2 | 25.2 |
| 10 – 20 | 0.9 | 19.4 |
| 20 – 50 | 0.5 | 26.8 |
| > 50 | 0.2 | 20.5 |

Die Mehrzahl der Wasserkraftanlagen mit einer installierten Leistung von mehr als 1 MW wurde vor 1960 gebaut; hier können Modernisierungen der maschinellen Ausstattung und der hydraulischen Auslegung zu einer Leistungssteigerung bis zu 30 %

führen. Da bei dem Ausbau und der Modernisierung auf die bereits vorhandene Bausubstanz und auf noch gültige Wasserrechte zurückgegriffen werden kann, sind die Hemmnisse deutlich geringer als bei Neubauten. Dabei bedingt beispielsweise eine Vergrößerung der Ausbauwassermenge eine entsprechende Leistung, die bei Großwasserkraftanlagen bei 15 % und mehr liegen kann. Durch künstliche Retentionsmaßnahmen im Rahmen des Hochwasserschutzes könnte beispielsweise die Wasserführung eines Flusslaufes besser reguliert und damit auch die Wasserkraftnutzung erhöht werden. Darüber hinaus weisen ältere Wasserkraftmaschinen Wirkungsgrade auf, die unterhalb des heute Machbaren liegen; nach dem aktuellen Stand der Technik wäre hierdurch eine Steigerung von 5 % der Jahresenergieerzeugung möglich.

5.3 *Globale Wasserkraftpotenziale*

Wie die vorausgegangenen Erläuterungen gezeigt haben, ist in Deutschland die Wasserkraft zum großen Teil ausgenutzt. Wenn man dagegen die Wasserkraftnutzung der Erde insgesamt betrachtet, so liegen hier noch erhebliche Entwicklungsmöglichkeiten vor.

Das theoretische Wasserkraftpotenzial der Erde wird auf ca. 40 000 TWh/a geschätzt. Davon können 13 000 TWh/a als technisches Potenzial und ca. 8000 TWh/a als wirtschaftliches Potenzial eingestuft werden.

Nachfolgende Tabelle zeigt, wie sich dieses wirtschaftliche Potenzial auf die Kontinente der Erde verteilt, und wie es bisher ausgenutzt wurde, wobei hier und bei den nachfolgenden Tabellen auf aktuelle Daten aus dem Jahr 2001 zurückgegriffen wurde.

Tabelle 3: Wasserkraftpotenziale der Kontinente

| Kontinent | theoretisches Potenzial TWh/a | technisches Potenzial TWh/a | wirtschaftliches Potenzial TWh/a | derzeit installierte Leistung (GW)/ erzeugter Strom(TWh/a) | z.Z. im Bau befindliche Wasserkraftanlagen (MW) | geplante Wasserkraftanlagen (GW) |
|------------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|---|----------------------------------|
| Afrika | 3876 | 1888 | 1100 | 20.6/80.6 | 1806 | 75 |
| Asien | 19400 | 6800 | 3600 | 241/793 | 68664 | 154 |
| Australien | 600 | 270 | 107 | 13.3/42.0 | 175 | 0.74 |
| Europa | 3220 | 1035 | 791 | 175.6/593.4 | 1978 | 8 |
| Nord-und Mittelamerika | 6312 | 1663 | 1000 | 158/700 | 3931 | 12.1 |
| Südamerika | 6200 | 2700 | 1600 | 111.5/531.2 | 11438 | 38.8 |
| Welt | 39608 | 14356 | 8198 | 720/2740.2 | 87992 | 288.6 |

Tabelle 4: Proz. Wasserkraftnutzung der Kontinente

| Kontinent | proz. Wasserkraftnutzung (erzeugter elektr. Strom/wirtschaftliches Potenzial) |
|------------------------|---|
| Afrika | 7.3 |
| Asien | 22 |
| Australien | 39 |
| Europa | 75 |
| Nord-und Mittelamerika | 70 |
| Südamerika | 19.7 |
| Welt | 33.4 |

In den Tabellen 5a bis f sind für einzelne Länder mit einem theoretischen Wasserkraftpotenzial ≥ 50 TWh/a getrennt nach Kontinenten weitere Angaben bezüglich der Wasserkraftnutzung zusammengestellt worden. Hieraus ist auch zu entnehmen, dass 50% des elektrischen Strom von 5 Ländern erzeugt wird, diese sind: Kanada, USA, Brasilien, China und Russland.

Tabelle 5a: Wasserkraftpotenziale einzelner Länder in Afrika

| Land | theoretisches Potenzial TWh/a | technisches Potenzial TWh/a | wirtschaftliches Potenzial TWh/a | derzeit installierte Leistung (MW)/ erzeugter Strom(GWh/a) | z.Z.im Bau befindliche Wasserkraftanlagen (MW) | geplante Wasserkraftanlagen (MW) |
|------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|--|----------------------------------|
| Ägypten | 125 | | 50 | 2810/13697 | 64.8 | 112 |
| Angola | 150 | 90 | 65 | 290/1000 | 520 | 16500 |
| Äthiopien | 650 | | 260 | 451/2151 | 184 | 352 |
| Gabun | 200 | 80 | 32,5 | 168/830 | | |
| Kamerun | 294 | 115 | 103 | 725/3300 | 0 | 600 |
| Kongo | 125 | 50 | | 89/352 | | 380 |
| Rep. Kongo | 1397 | 774 | 419 | 2515/5813 | 4.5 | 40000 |
| Madagaskar | 321 | 180 | 49 | 105/540 | 42 | 350 |
| Mosambik | 50 | 37.6 | 31.7 | 2180/11548 | 0 | 2000 |
| Sambia | 52.5 | 28.8 | 11.0 | 1669/7782 | 60 | 2000 |
| Südafrika | 73 | 11 | 4.7 | 668/1520 | | |

Tabelle 5b: Wasserkraftpotenziale einzelner Länder in Asien

| Land | theoretisches Potenzial TH/a | technisches Potenzial TH/a | wirtschaftliches Potenzial TH/a | derzeit installierte Leistung (MW)/ erzeugter Strom(GWh/a) | z.Z. im Bau befindliche Wasserkraftanlagen (MW) | geplante Wasserkraftanlagen (MW) |
|----------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------------|--|---|----------------------------------|
| Bhutan | 263 | 70 | 56 | 413.7/2000 | 1117 | 1230 |
| Burma | 876.6 | 130 | | 360/1528 | 1165 | 640 |
| Volkrep. China | 5920 | 2200 | 1270 | 79350/243000 | 35000 | 50000 |
| China Taipe | 102.7 | 20.1 | 8 | 4502/8843 | 61.2 | 96 |
| Georgien | 139 | 68 | 32 | 2800/6000 | 700 | 700 |
| Indien | 2637.8 | 660 | | 23766/74481 | 5274 | 25000 |
| Indonesien | 2147 | 401.6 | 40 | 4300/9370 | 363 | 2000 |
| Israel | 88 | | | 7/10 | | |
| Irak | 225 | 90 | 67 | 910/586 | | |
| Japan | 717.6 | 135.5 | 114.2 | 27504/95332 | 889 | |
| Kambodscha | 87.6 | | 24 | 1/5 | 10 | 595 |
| Kasachstan | 163 | 62 | 27 | 2200/7000 | 305 | |
| Kirgisien | 162.5 | 99.2 | 55.2 | 2949/12138 | 690 | 1260 |
| Laos | 232.5 | 63 | 42 | 621/1000 | 150 | 3761 |
| Malaysia | 230 | 123 | | 2079/5720 | 300 | 3000 |
| Mongolei | 56 | 22 | | 3/4 | | 40 |
| Nepal | 727 | 179 | 14.7 | 258/1233 | 265 | 2876 |
| Pakistan | 263 | | | 5100/22448 | 1469 | 7215 |
| Persien | 176 | 88 | 50 | 2000/3650 | 7946 | 8730 |
| Russland | 2295 | 1670 | 852 | 44600/167000 | 6542 | 11549 |
| Tadschikistan | 527 | | 263.5 | 4054/15000 | 620 | 3600 |
| Thailand | 56 | 19 | 18 | 2342/3436 | 550 | 660 |
| Türkei | 433 | 215 | 123 | 11643/42216 | 3538 | 20129 |
| Usbekistan | 88 | 27.4 | 15 | 1710/6835 | 249 | 913 |
| Vietnam | 300 | 100 | 80 | 4149/18197 | 600 | 8112 |

Tabelle 5c Wasserkraftpotenziale einzelner Länder in Australien

| Land | theoretisches Potenzial TWh/a | technisches Potenzial TWh/a | wirtschaftliches Potenzial TWh/a | derzeit installierte Leistung (MW)/ erzeugter Strom(GWh/a) | z.Z. im Bau befindliche Wasserkraftanlagen (MW) | geplante Wasserkraftanlagen (MW) |
|------------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|---|----------------------------------|
| Australien | 264 | | 30 | 7650/17300 | | |
| Neu Seeland | 152 | 77 | 40 | 5175/22880 | 175 | 650 |
| Papua Neu Guinea | 175 | 122.6 | 36.8 | 219/748 | | 22.8 |

Tabelle 5d: Wasserkraftpotenziale einzelner Länder in Europa

| Land | theoretisches Potenzial TWh/a | technisches Potenzial TWh/a | wirtschaftliches Potenzial TWh/a | derzeit installierte Leistung (MW)/ erzeugter Strom(GWh/a) | z.Z. im Bau befindliche Wasserkraftanlagen (MW) | geplante Wasserkraftanlagen (MW) |
|--------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|---|----------------------------------|
| Frankreich | 200 | | 71.5 | 25200/79300 | | |
| Griechenland | 80 | 15 | 12 | 3080/5000 | 477 | 260 |
| Grönland | 800 | 15 | | 30/174.4 | | 20 |
| Deutschland | 120 | 26 | 20 | 4331/24816 | 5 | 1060 |
| Island | 187 | 64 | 44 | 1270/6599 | 110 | 753 |
| Italien | 150 | 69 | 54 | 15267/50900 | | 3100 |
| Norwegen | 560 | 200 | 187 | 27569/142200 | | |
| Österreich | 150 | | 53.7 | 11800/41930 | | 100 |
| Romänien | 70 | 40 | 30 | 5860/16000 | 170 | 500 |
| Schweden | 200 | 130 | 90 | 16200/65000 | 3 | |
| Schweiz | 144 | 41 | 35.5 | 13240/34643 | 12 | |
| Spanien | 138 | 70 | 41 | 20076/36042 | 150 | |

Tabelle 5e: Wasserkraftpotenziale einzelner Länder in Nord- und Mittelamerika

| Land | theoretisches Potenzial TWh/a | technisches Potenzial TWh/a | wirtschaftliches Potenzial TWh/a | derzeit installierte Leistung (MW)/ erzeugter Strom(GWh/a) | z.Z. im Bau befindliche Wasserkraftanlagen (MW) | geplante Wasserkraftanlagen (MW) |
|----------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|---|----------------------------------|
| Costa Rica | 223 | 43.1 | | 1233/5690 | 350 | 393 |
| Dominika. Rep. | 50 | 9 | 6 | 411.5/1050 | | 300 |
| Kanada | 1332 | 981 | 536 | 67121/353302 | 2400 | 6500 |
| Mexiko | 154 | 64 | 38 | 10500/24616 | | 2555 |
| USA | 4485 | 528.5 | 376 | 76000/300000 | | |

Tabelle 5f: Wasserkraftpotenziale einzelner Länder in Südamerika

| Land | theoretisches Potenzial TWh/a | technisches Potenzial TWh/a | wirtschaftliches Potenzial TWh/a | derzeit installierte Leistung (MW)/ erzeugter Strom(GWh/a) | z.Z. im Bau befindliche Wasserkraftanlagen (MW) | geplante Wasserkraft-Anklagen (MW) |
|-------------|-------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|--|---|------------------------------------|
| Argentinien | 172 | 130 | | 9581/3200 | 351 | 7900 |
| Bolivien | 178 | 126 | 50 | 330/1688 | 83.5 | 700 |
| Brasilien | 2280 | 1300 | 763 | 59853/298563 | 6284 | 10000 |
| Chile | 227.2 | 162.2 | | 5000/16000 | 609 | 2000 |
| Ecuador | 166.8 | 133.5 | 105.9 | 1692/7610 | | 1190 |
| Kolumbien | 1000 | 200 | 140 | 8948/3700 | 400 | 10000 |
| Paraguay | 111 | 85 | 68 | 8100/52659 | 700 | 1790 |
| Peru | 1576.9 | | 260 | 2900/15500 | 150 | 1500 |
| Venezuela | 345 | 260.7 | 100 | 13224/62885 | 2860 | 2640 |

Wie man den Tabelle 3 und 4 entnehmen kann, ist das wirtschaftliche Potenzial der Erde bisher nur zu ca. einem Drittel ausgenutzt worden, wobei der Grad der Ausnutzung zwischen den Ländern und Regionen sich erheblich unterscheidet. So sind noch große Wasserkraftpotenziale in Afrika, Asien und in Südamerika vorhanden.

In den nächsten 3 bis 5 Jahren ist zu erwarten, dass zu der bisher installierten Kraftwerksleistung von 720 GW weitere gerade im Bau befindliche Projekte mit einer Leistung von 88 GW hinzukommen. Die meisten Länder, z. B. China und Türkei, planen die Realisierung von weiteren Großprojekten bis etwa zum Jahr 2025. In dieser Zeitspanne könnten dann Wasserkraftwerke, vorwiegend in Afrika, Asien und Südamerika, mit einer Leistung von ca. 290 GW errichtet werden, so dass sich bis zum Jahr 2025 die heutige Wasserkraftnutzung um 50% erhöht hätte. Hält diese positive Entwicklung der Wasserkraftnutzung an, wobei dies aus heutiger Sicht sehr wahrscheinlich ist, so ist eine weitere Zunahme der Leistung um 360 GW bis zum Jahr 2050 eine realistische Annahme, was eine Verdoppelung der derzeitigen Wasserkraftnutzung bedeuten würde.

Die Volksrepublik China hat die ehrgeizigsten Ziel bei der weiteren Nutzung der Wasserkraft. An erster Stelle ist hier die Fertigstellung des Three Georges Projektes mit 18200 MW zu nennen. Insgesamt sind Wasserkraftwerke mit einer Gesamtleistung vom 35 GW im Bau und Projekte mit einer Leistung von 50 GW in Planung. Weitere Länder mit großen Plänen bezüglich der zukünftigen Wasserkraftnutzung sind: Brasilien, Indien, Kolumbien, Persien, Republik Kongo, Russland und Türkei.

6 Perspektiven der Wasserkraftnutzung

Es kann sicher davon ausgegangen werden, dass sich die Menschheit bis zur Mitte des nächsten Jahrhunderts verdoppeln wird (auf ca. 11 Mia. Menschen). Der Energiebedarf wird sich sehr wahrscheinlich mehr als verdoppeln, da der Bevölkerungszuwachs ausschließlich in den Entwicklungsländern stattfindet, wo bekanntlich ein erheblicher Bedarf an Energie besteht. Die Prognosen gehen daher von einer Zunahme der Energie aus, die unseren heutigen Verbrauch um das 2- bis 3-fache übersteigt. Vor dem Hintergrund, dass die Energieoptionen - Rohöl, Erdgas, Uran - im diesem Jahrhundert nahezu aufgebraucht sein werden, gewinnen zunehmend die erneuerbaren Energien an Bedeutung.

Als prognostizierte Ziele sollen die erneuerbaren Energien –Wind, Sonne, Geothermie, Biomasse – am Ende dieses Jahrhunderts den Hauptteil an der Energiebedarfsdeckung

übernehmen. Aus heutiger Sicht ist eine Verdopplung der Wasserkraftnutzung bis zum Jahr 2050 eine realistische Prognose. Hierzu müssten dann Wasserkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 720 GW errichtet werden. Megaprojekte mit einer Leistung von 10000 MW und mehr, wie Itaipu und Three Georges, werden dabei eine Ausnahme sein. Die Mehrheit der neuen Projekte wird in dem Leistungsbereich zwischen 100 und 1000 MW liegen. Geht man von einer mittleren Kraftwerksgröße von 300 MW aus, so müssten bis zum Jahr 2050 ca. 2400 neue Kraftwerke gebaut werden, wobei schon bis zum Jahr 2025 die Hälfte der Kraftwerke in Betrieb gehen könnten.

Geht man von einer niedrigen spezifischen Investition von 1250 €/kW aus, so müsste ca. 900 Mia. € an Investitionen bis zum Jahr 2050 getätigt werden. Diese hohen finanziellen Aufwendungen können vorteilhaft, wie heute schon weltweit geschehen, durch private Investoren vorgenommen werden. Von Seiten der Politik müssen dafür in den einzelnen Ländern sichere politische und wirtschaftliche Verhältnisse garantiert werden, um globale Investoren anzuwerben. Die Wasserkraft ist wegen ihrer langen Betriebslebenszeit für solche Investitionen bestens geeignet. Die Stromgestehungskosten der Wasserkraft sind von vielen Faktoren abhängig und für internationale Projekte nicht genau vorauszusagen. Sie werden für Großprojekte > 100 MW bei ca. 2.5 - 5 Cent/kWh liegen.

In den Jahren 2050 bis 2100 ist dann ein Ausbau des restlichen wirtschaftlichen Potenzials um weitere 720 GW möglich. Die Wasserkraft kann damit auch bei einer Steigerung des Bedarfs an elektrischer Energie um 200% bis zum Jahr 2100 ihren Anteil von ca. 20% bei der Deckung aufrecht erhalten. Sie bleibt damit auch zukünftig eine bedeutende und unverzichtbare Energiequelle.

Schrifttum:

- [1] Kaltschmitt, M. und Wiese, A. (Hrsg.):
Erneuerbare Energieträger in Deutschland - Potenziale und Kosten
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1993

- [2] Horlacher, H.-B. und Kaltschmitt, M.:
Potenziale, Kosten einer Wasserkraftnutzung vor dem Hintergrund des sonstigen regenerativen Energiegebotes in Deutschland
Hydroenergia 93, Tagungsband, München, 1993

- [3] Horlacher, H.-B. und Kaltschmitt, M.:
Potenziale, Kosten und Nutzungsgrenzen regenerativer Energiequellen zur Stromerzeugung in
Deutschland
Wasserwirtschaft 84, 1994, 2, S. 80 - 84

- [4] Kaltschmitt, M. und Wiese, A.:
Erneuerbare Energien, Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1995

- [5] Survey of Energy Resources 2001, 19th Edition
World Energy Council, London

- [6] Global Energy Perspectives to 2050 and Beyond
World Energy Council, London, 1995

- [7] World Atlas & Industry Guide 2002, 2001, 2000, 1999, Hydropower & Dams, Aqua-Media
International, Sutton, England

- [8] WCD-Report Dams and Development, A New Framework for Decision-Making,
Earthscan Publication Ltd, London, 2001