

Stephan Heimerl *Hrsg.*

# Wasserkraft- projekte

Ausgewählte Beiträge aus der  
Fachzeitschrift WasserWirtschaft

---

# Wasserkraftprojekte

---

Stephan Heimerl (Hrsg.)

# Wasserkraftprojekte

Ausgewählte Beiträge aus der  
Fachzeitschrift *WasserWirtschaft*

Mit 287 Abbildungen und 37 Tabellen

 Springer Vieweg

Dr. Stephan Heimerl  
Stuttgart, Deutschland

ISBN 978-3-658-00995-3  
DOI 10.1007/978-3-658-00996-0

ISBN 978-3-658-00996-0 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg  
© Springer Fachmedien Wiesbaden 2013

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist ein Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media  
[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)



**Dr.-Ing. Stephan Heimerl**

Chefredakteur der Fachzeitschrift WasserWirtschaft,  
Stuttgart

## Wasserkraft – die Grande Dame der erneuerbaren Energien

Die Wasserkraft stellt eine der ältesten Techniken dar, mit Hilfe derer bereits frühzeitig Energie in größerem Stil gewonnen wurde. War es über viele Jahrtausende die Nutzung mechanischer Energie mittels

verschiedenartigen Wasserrädern, z. B. in Mühlen, Sägen, Hammer-, Schöpf- und Hebewerken, so entstand dann in der Neuzeit mit der technischen Entwicklung insbesondere im 19. Jh. aus dem Wasserrad die Wasserturbine mit all ihren unterschiedlichen Gestaltungsformen. Schließlich konnte mit der Entdeckung des dynamoelektrischen Prinzips durch Werner von Siemens um 1866, der daraufhin den ersten elektrischen Generator entwickelte, sowie der anschließend entwickelten Übertragungstechnik die bis dahin notwendige enge räumliche Verknüpfung von gewässernaher Energieerzeugung und deren maschineller Nutzung über bisher mechanische Transmissionen entkoppelt werden.

In der frühen Entwicklung der Elektrizitätswirtschaft an der Wende ins 20. Jh. waren Wasserkraftanlagen oftmals die einzige Möglichkeit zur Erzeugung von elektrischem Strom und damit zur Versorgung der Bevölkerung und Industrie. Dank der daraufhin rasant zunehmenden Nutzung der Wasserkraft konnte um die Jahrhundertwende vielerorts die Elektrifizierung eingeleitet und so

mit der Grundstein für das heutige Versorgungsnetz gelegt werden.

Bis heute spielt die Wasserkraft eine wichtige Rolle für die Stromerzeugung. So ist eine gesicherte Stromversorgung nur dann gewährleistet, wenn die Erzeugung von elektrischer Energie auf möglichst vielen und unabhängigen Säulen basiert sowie auch die Bedarfsspitzen gut und zuverlässig bedient werden können. Hierzu leisten Wasserkraftanlagen einen wichtigen Beitrag, indem diese gleichfalls wichtige Regelungsfunktionen v. a. in Speicher- und Pumpspeicherkraftwerken übernehmen.

Beim Umgang mit den mannigfaltigen Fragestellungen bei dieser rasanten technischen Entwicklung an der Wende ins 20. Jh. war stets ein fachliches Wissen gefragt, das stark von Erfahrungen und Einsichten geprägt ist, die jeder einzelne Handelnde nicht immer wieder selbst für sich neu machen konnte. Hierfür waren und sind bis heute unabhängige Informations- und Wissensplattformen notwendig, über die diese Erkenntnisse an die Fachkreise in Wissenschaft und Praxis dauer-

haft weitergegeben werden und vom Jungingenieur bis hin zum erfahrenen Senioringenieur reflektiert und aufgenommen werden.

Einen Beitrag zu diesem fachlichen Austausch und Diskurs leistet dabei seit über 100 Jahren die Fachzeitschrift *WasserWirtschaft* mit ihren verschiedenen Vorläuferzeitschriften. So wurden von Anfang bis heute in dieser unabhängigen Fachzeitschrift innovative, zukunftsorientierte sowie qualitativ hochwertige Beiträge wiedergegeben, die die Fachkreise zu Diskussionen anregen sollen, mit dem Ziel, heute und morgen die jeweils beste Lösung finden zu können.

Nachdem das Thema Energie gerade in jüngster Zeit in Verbindung mit der sogenannten Energie- wende in Deutschland wieder einmal in aller Munde ist und seitdem der Energiesektor von starken Umbrüchen gekennzeichnet ist, soll mit diesem vorliegenden Buch ein Einblick in den Be-

reich der Wasserkraft gegeben werden, indem verschiedenartige Beiträge der letzten Jahre aus dieser Fachzeitschrift zusammengeführt und in gebündelter Form dargestellt werden. Dies beinhaltet sowohl die Potenziale in unterschiedlichen Räumen und die aktuellen technischen Entwicklungen als auch Projekte aus verschiedenen Bereichen der Wasserkraft von kleinen bis großen Vorhaben sowie existierenden Anlagen, über Projekte im In- und Ausland bis hin zu den unterschiedlichen Formen der Lauf- und Speicherwasserkraft, der Pumpspeicherkraftwerke sowie neuen innovativen Technologieentwicklungen.





**Dipl.-Ing. Walter Auer**

Vorstandsvorsitzender der Arbeitsgemeinschaft für Alpine Wasserkraft (AGAW), Innsbruck

## Arbeitsgemeinschaft für Alpine Wasserkraft – AGAW

# Wasserkraft für Europa

Vor über 130 Jahren wurde ein Meilenstein für unseren heutigen Wohlstand und Komfort Wirklichkeit. Das erste Wasserkraftwerk zur Stromgewinnung wurde 1880 in England errichtet. Die Verbreitung dieser neuen Technologie – aus Wasserkraft wird Strom – erfolgte ab nun explosionsartig über die ganze Welt. Global gesehen ist die Wasserkraft die wichtigste und kostengünstigste erneuerbare Energiequelle. Sie deckt mittlerweile fast 20 % der weltweiten Stromproduktion, liefert mehr als 3 000 Mrd. Kilowattstunden und ist heute ein entscheidender Wohlfahrtsfaktor sowie wichtiger Bestandteil einer umweltgerechten Energieversorgung.

Die Europäische Union hat bereits vor mehr als einem Vierteljahrhundert beschlossen, der wachsenden Energieabhängigkeit entgegenzutreten. Die Energiewende von fossilen zu erneuerbaren Energien mit den Zielen des Klimaschutzes und der Versorgungssicherheit durch heimische Energiequellen, die Nachhaltigkeit und der Verzicht auf Atomenergie sprechen weiter für die Wasserkraft. Grundsätzlich entwickelt sich für uns in Europa die elektrische Energie immer mehr zur Schlüsselenergie, um die Ziele der Energieeffizienzsteigerung, des Energiesparens und den weite-

ren Umstieg auf erneuerbare Energieträger zu ermöglichen.

Damit dieser Umstieg auch tatsächlich funktioniert, ist die Wasserkraft ein entscheidender Faktor zur Sicherung der technischen Rahmenbedingungen für ein sicheres und funktionierendes Stromversorgungssystem. War es bisher der Bedarf der Kunden, der die Stromproduktion geprägt hat, sind es mittlerweile Wind und Photovoltaik, welche die Stromproduktion wesentlich mitbestimmen. Die physikalische Rahmenbedingung des ständigen Ausgleichs zwischen Bedarf und Produktion hat mit den „neuen Erneuerbaren“ eine neue Dimension bekommen. Die Wasserkraft ist in diesem Zusammenhang jene Kraftwerksart, welche die ständig notwendigen Leistungsanpassungen mit der erforderlichen Geschwindigkeit und Regelfähigkeit bereitstellen kann.

Dass die Wasserkraft mit ihrer Pumpspeichermöglichkeit auch die Stromspeicherung bei bestem Wirkungsgrad und bester Regelfähigkeit übernehmen kann, ist ein weiterer Kernpunkt dieser Technologie. Dies wurde auch durch die zuständigen Ministerien Deutschlands, der Schweiz und Österreichs im Frühjahr 2012 mit

der gemeinsamen Initiative für den Ausbau der notwendigen Stromleitungs- und Speicherkapazitäten bestätigt. Ein starkes Zeichen mit einer positiven Zukunftssicht für eine neue Energieinfrastruktur für Europa.

In diesem Kontext ist die Initiative für eine umfassende Darstellung der Wasserkraft mit diesem Buch durch Beiträge aus der Fachzeitschrift *WasserWirtschaft* besonders hervorzuheben. Die Förderung der sachlichen und fachlichen Diskussion auf dem heutigen Wissenstand unter Einbezug der ökologischen und ökonomischen Fragestellungen hilft uns Allen, eine erfolgreiche Zukunft zu gestalten. Mit dem Grundsatz: Information schafft Wissen und dieses sollte zu einem gemeinsamen Verständnis führen, sollte es möglich werden, die vielen noch offenen Fragen und Spannungsfelder zwischen ökologischen, ökonomischen und sozialen Anliegen gleichberechtigt zu bearbeiten und für alle Beteiligten verträgliche Lösungen zu finden. Diese Lösungen sollten auch umgesetzt werden. Denn eines ist sicher: Die Lö-

sung von heute, lässt morgen wieder neue Verbesserungen zu.

Die Arbeitsgemeinschaft Alpine Wasserkraft (AGAW) steht daher zum Ausbau der Wasserkraft unter einer ganzheitlichen Betrachtung ökologischer und ökonomischer Aspekte. Sie steht aber auch für sozial vertretbare Bedingungen und Kosten der Wasserkraftnutzung und sieht dieses Buch als wichtigen Beitrag zur ganzheitlichen Betrachtung und Bewertung der Wasserkraft.

*„Du musst Dinge tun, von denen du denkst, dass du sie nicht tun kannst.“*

Ein sehr passender Satz von Eleanor Roosevelt, für unsere Gegenwart und eine lebenswerte Zukunft.

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'W. Roosevelt', written in a cursive style.

# Inhaltsverzeichnis

Streiflichter aus 100 Jahren Entwicklung der Wasserkraftnutzung in Bayern .....	1
<b>Potenziale</b> .....	11
Entwicklungen in der Energiepolitik – Auswirkungen auf die Wasserkraft .....	12
Vom Linienpotenzial zum technischen Wasserkraftpotenzial – Methode .....	18
Ermittlung des Wasserkraftpotenzials an Wasserkraftanlagenstandorten	
mit einer Leistung über 1 MW in Deutschland.....	28
Das Wasserkraftpotenzial in Deutschland und Europa .....	36
Wasserkraftpotenzialanalyse mittels des GIS-Tools Vapidro-Aste	
im Rahmen des EU-Projektes SHARE .....	43
Das Wasserkraftpotenzial in Deutschland.....	52
Zukunft der Wasserkraft in Baden-Württemberg .....	61
Potenziale der Wasserkraft im Einzugsgebiet des Neckars.....	67
Das Wasserkraftpotenzial in Hessen .....	76
Wasserkraftnutzung in Hessen .....	82
Große Laufwasserkraftwerke im Einzugsgebiet der Elbe .....	89
Das Wasserkraftpotenzial Österreichs im Spannungsfeld	
von Umweltpolitik und Klimawandel .....	98
Das Wasserkraftpotenzial des Bundeslandes Salzburg in Österreich .....	106
Ermittlung des Wasserkraftpotenzials der Schweiz .....	114
Wasserkraftpotenzial der Schweiz – Möglichkeiten und Grenzen.....	121
Wasserkraft als Netzdienstleister am Beispiel der E.ON Wasserkraft GmbH .....	129
<b>Projekte</b> .....	135
Kraftwerk Sohlstufe Lehen – Wasserkraftwerke im urbanen Gebiet .....	136
Neubau des Kraftwerkes Bruckhäusl .....	145
Kleinstwasserkraft zur elektrischen Versorgung eines Dorfes	
im Regenwald Ecuadors .....	149
Sanierung von Kleinwasserkraftwerken in Rumänien .....	156
Strategische Umweltprüfung für den Ausbau der Kleinwasserkraft	
im Einzugsgebiet des Aragvi .....	163
Planung und Bau von kleinen und mittelgroßen Wasserkraftanlagen	
in der Türkei .....	171
Ausbau der Wasserkraft in der Türkei.....	176
Wasserkraftanlage Ermenek – Einstau des Reservoirs .....	185
Projektüberblick über den Neubau des RADAG-Wehrkraftwerkes .....	191

Besondere Aspekte der Bauausführung beim Neubau des RADAG-Wehrkraftwerks .....	196
Beschreibung der Elektro- und Leittechnik des neuen RADAG-Wehrkraftwerks .....	206
Details der Maschinenteknik des Neubaus des RADAG-Wehrkraftwerks .....	213
Stahlwasserbauliche Einrichtungen des Wehrkraftwerks Rheinkraftwerk Albbruck-Dogern AG .....	218
Der Merowe-Staudamm und dessen Wasserkraftwerk im Sudan .....	225
Grundlegende Aspekte für den Entwurf des Krafthauses und der Hochwasserentlastungsanlage des Merowe-Staudammes .....	238
Entwurf und Ausführung der Steinschüttdämme und der Schlitzwand des Merowe-Projektes .....	247
Betrieb und Wartung der Wasserkraftanlage Merowe .....	257
Hydrologie, Sedimentation und Stauraumbewirtschaftung des Merowe-Projektes .....	265
Koordination und Durchführung der zeitgleichen Inbetriebnahme der 1 400-MVA-Wasserkraftanlage Merowe und des 500-kV-Höchstspannungsnetzes .....	274
<b>Entwicklungen</b> .....	285
Das Schachtkraftwerk – ein Wasserkraftkonzept in vollständiger Unterwasseranordnung .....	286
Pelton-Turbinen – Beitrag zu Gehäuseabströmung und Lufteintrag in das Unterwasser .....	292
Die Gegendruck-Pelton turbine als Lösung für die Energieproduktion in Trinkwassersystemen .....	304
Wie gut bewährt sich die Wasserkraftschnecke in der Praxis? .....	310
Die Steffturbine – eine auf einem Umlaufband beruhende Kleinwasserkraftanlage .....	319
Die Very-Low-Head-Turbine – Technik und Anwendung .....	327
Entwicklung einer kinetischen Strömungsturbine .....	334
<b>Pumpspeicherkraftwerke</b> .....	341
Ausgleichsenergie – Perspektiven für Pumpspeicher .....	342
Die Renaissance der Pumpspeicher- und Speicherkraftwerke .....	349
Pumpspeichertechnologien im Vergleich .....	354
Kraftwerk Koralpe – Upgrading zum Pumpspeicherkraftwerk .....	363
Wasser als Energiespeicher – neue Ideen und Konzepte .....	373
Das Projekt Energiespeicher Riedl .....	381
Neubauprojekt Pumpspeicherwerk Atdorf – Gesamtkonzeption .....	388

Erweiterung des Pumpspeicherkraftwerkes Vianden in Luxemburg mit einer 11. Maschine .....	396
Sicherheit beim Betrieb von Wasserkraftwerken .....	402
<b>Ökologie und Rahmenbedingungen</b> .....	411
Ökologische Anforderungen durch die WRRL .....	412
Wasserkraft als Sanierungsmotor für hydromorphologische Belastungen? .....	418
Wasserkraft und Gewässerökologie – eine Entscheidungshilfe für Optimierungsansätze .....	428
Fließgewässerkraftwerke zur Wasserkraftnutzung an ökologisch sensiblen Standorten.....	436
Wassernutzungsabgaben auf Wasserkraft – rechtliche und ökonomische Anforderungen .....	444
Nachhaltige Wasserkraftnutzung – Wo stehen wir 10 Jahre nach Erscheinen der WCD-Empfehlungen? .....	450
Das Büro für Wasserkraft NRW – Moderator zwischen Klimaschutz und Gewässerschutz .....	454
Herausforderungen für die „große Wasserkraft“ .....	460

Anton Zeller (WasserWirtschaft 2/2010)

# Streiflichter aus 100 Jahren Entwicklung der Wasserkraftnutzung in Bayern

Jahrtausende erfolgte die Nutzung der Kraft des Wassers mit direkter Kraftkopplung und ca. 70 000 Wasserkraftwerke verrichteten in Deutschland um 1850 ihren Dienst. Mit der Möglichkeit der Fernübertragung des Stromes ab der vorigen Jahrhundertwende ergaben sich enorme Möglichkeiten für die Wasserkraft. In diesem Beitrag wird exemplarisch die Situation in Bayern beleuchtet und die Entwicklung in den letzten 100 Jahre aufgezeigt, die vom Kampf um gerechte Strompreise geprägt ist. Ferner wird auf die derzeitige Nutzung und das noch mögliche Ausbaupotenzial in Bayern eingegangen. Nicht unmaßgeblich an der Entwicklung waren auch die Wasserkraftzeitschriften beteiligt, darunter die „WasserWirtschaft“ sowie das „wassertriebwerk“ und ihre jeweiligen Vorläufer, welche das Gedankengut der Wasserkraft verbreiteten.

## 1 Einleitung

Jahrhunderte, ja Jahrtausende erfolgte eine Nutzung des Wassers in Mühlen und Sägewerken mit direkter Kraftkopplung. Die Energie wurde nur dann erzeugt, wenn sie auch gebraucht wurde. Mit der spannenden Geschichte der zunehmenden Elektrifizierung des Landes vor gut 100 Jahren änderte sich dies recht rasch. Die Wasserkraftwerksbetreiber speisten zunehmend Strom in die örtlichen Netze ein bzw. bauten vielfach selbst die Netze auf. So hatte zum Beispiel Siegsdorf in Oberbayern noch vor München eine der ersten Stromversorgungen Bayerns. Am 17. August 1890 wurde anlässlich der Feuerschützen-Fahnenweihe der Tanzsaal beim Oberwirth mit elektrischem Licht beleuchtet. Den Strom dazu lieferte eine Dynamomaschine, die in der Sagemühle aufgestellt und mittels Wasserkraft betrieben wurde.

Wasserkraftwerksbetreiber, die selbst über keine Netze verfügten, speisten ihre Überschussenergie, die sie in ihren Betrieben nicht benötigten, in das nach und nach wachsende Stromnetz ein. Damit bekam die Frage eines gerechten Strompreises als Lebensader der Wasserkraftwerke eine immer größere Bedeutung.

In Deutschland waren um 1850 zirka 70 000 Wasserkraftwerke in Betrieb. 1900 waren es nur noch rund 55 000 Werke, welche für Energie sorg-

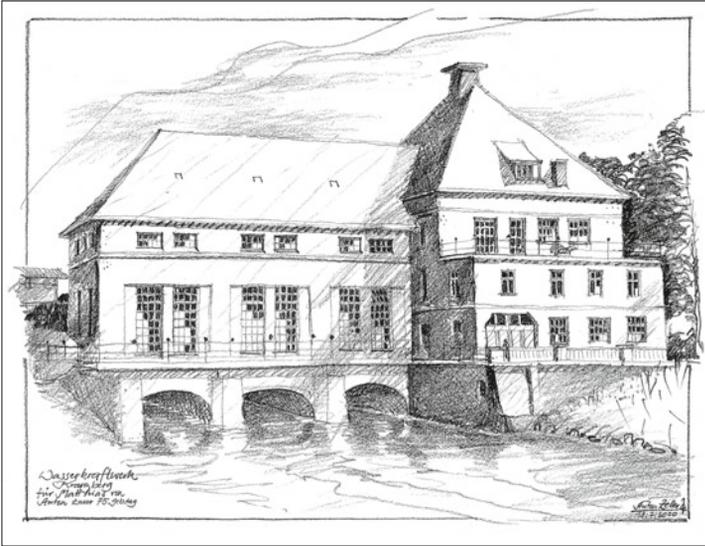
ten, teils durch direkte Kraftkopplung über Transmissionen, teils durch Stromerzeugung in ersten Ansätzen. In der Zeit bis nach dem 2. Weltkrieg surrten in Deutschland noch rund 35 000 Wasserkraftwerke, die in dieser schwierigen Zeit dafür sorgten, dass die Lichter nicht ausgingen.

## 2 Wie sah die Entwicklung der Wasserkraft in Bayern aus?

Der Wasserkraftausbau hat auch in Bayern mit der Nutzung der kleinen Wasserkräfte begonnen. Historische Nachweise für das Bestehen von Wassernutzungsanlagen lassen sich bis ins frühe Mittelalter zurückverfolgen. So haben bei der Erfassung aller bayerischen Wasserkraftwerke im Jahre 1926 noch 32 Anlagen bestanden, deren Inbetriebnahme in den Jahren von 1000 bis 1200 n. Chr. nachweisbar war.

In Bayern, dem wasserkraftreichen Land, waren um 1850 bereits 6 400 Wasserkraftwerke in Betrieb, die zusammen etwa 60 000 kW mechanischer Leistung aufwiesen.

Der Errichtung von Mahlmühlen sowie Hammer- und Sägewerken auf dem Land folgte allmählich in den städtischen Ansiedlungen auch der Bau von Wasserkraftanlagen für die Textilindustrie, Bleistift- und Spiegelglasfabrikation.



**Bild 1:** Wasserkraftwerk Kranzberg/Amper, Inbetriebnahme 1911 mit 3 Francis-Turbinen à 800 kW (Zeichnung: Anton Zeller)

Mit der Entwicklung der Turbinen, die es ermöglichten, größere Zuflüsse und Fallhöhen zu nutzen, vollzog sich in Bayern um 1875 der Übergang zum Bau leistungsstärkerer Anlagen.

Die Möglichkeit der Fernübertragung elektrischer Energie und der Aufschwung von Industrie und Gewerbe förderten den Wasserkraftausbau in der Folgezeit nachhaltig. Um 1900 gab es in Bayern bereits 10 200 Wasserkraftanlagen mit einer Gesamtleistung von 150 000 kW.

In der Schrift „Die Wasserkräfte Bayerns“ der Königlich Obersten Baubehörde im Königlichen Staatsministerium des Innern vom Oktober 1907 wurden erstmals die dem Staat gehörenden Wasserkräfte dargestellt. Es heißt darin:

„In der neueren Zeit wird indessen infolge der ständigen Steigerung der Kohlepreise der Besitz von Wasserkräften immer begehrenswerter. Ausnutzung der Wasserkräfte in ihrem vollem Umfang lautet das Lösungswort ...“

Mit Beginn des letzten Jahrhunderts wurde in zügiger Folge bis zum Ausbruch des ersten Weltkrieges eine Vielzahl von Wasserkraftanlagen errichtet (**Bilder 1 und 2**). Der erste Weltkrieg schränkte dann den Ausbau stark ein.

Nach dem ersten Weltkrieg regte der Geheime Baurat Dr.-Ing. Oskar von Miller an, einen Generalplan der bayerischen Wasserkraftwerke aufzustellen. In der Dokumentation „Wasserkraftausnutzung in Bayern“ der Obersten Baubehörde aus

dem Jahre 1926 registrierte man in Bayern einschließlich der damals noch zu Bayern gehörenden Rhein-Pfalz insgesamt 11 603 Wasserkraftanlagen mit einer Ausbauleistung von 687 000 kW und einer jährlichen Erzeugung von 2,5 Mrd. kWh.

Die Wirtschaftskrise Anfang der 1930er Jahre wirkte sich auch auf den Wasserkraftausbau aus, so dass bis zu Beginn des zweiten Weltkrieges verhältnismäßig wenig weitere Wasserkraftanlagen erstellt wurden.

Im „Generalplan der Wasserkräfte Bayerns“ vom Februar 1947 der Obersten Baubehörde werden die Möglichkeiten des weiteren Ausbaues der Wasserkräfte dokumentiert. Kriterium für den Ausbau war die Wirtschaftlichkeit einer Anlage, die unter Zugrundelegung des damals maßgebenden Kohleverrechnungspreises ermittelt wurde.

In der Zeit von 1946 bis 1960 wurden neben kleinen Anlagen insgesamt 54 große Kraftwerke errichtet bzw. erweitert. Der Zugewinn an Leistung betrug 560 000 kW bei einer Jahresarbeit von 2,8 Mio. kWh.

In der Zeit zwischen 1961 und 1973 wurden weitere 30 größere Kraftwerke mit einer Ausbauleistung von 341 000 kW und einem Jahresarbeitsvermögen von 1,8 Mrd. kWh neu errichtet.

Wegen des Vordringens preiswerten Heizöles kam der Wasserkraftausbau fast zum Erliegen. Viele kleinere Anlagen mussten sogar stillgelegt



**Bild 2:** Einweihung des Wasserkraftwerkes Kranzberg/Amper mit Prinz Ludwig, dem späteren König Ludwig III (8. v. l.) am März 1911

werden. Erst die im Herbst 1973 aufgetretene Mineralölkrise machte die heimische Wasserkraft wieder attraktiv und es wurden neue Genehmigungen beantragt.

In den Jahren 1974 bis 1987 entstanden 24 große Wasserkraftanlagen mit einer Ausbauleistung von 280 000 kW und einer Jahresarbeit von rund 1,5 Mrd. kWh. Der überwiegende Teil wurde im Zusammenhang mit flussbaulichen Arbeiten verwirklicht.

Um einen Überblick zu erhalten, erhob die Oberste Baubehörde im Jahr 1980 Daten über den Stand der Wasserkraft und ermittelte 4 244 Wasserkraftanlagen, die zusammen 2,7 Mio. kW leisteten und eine Jahresarbeit von 12,5 Mrd. kWh aufwiesen.

Heute erzeugen die rund 4 500 Bayerischen Wasserkraftwerke insgesamt rund 14,5 Mrd. kWh.

Eine von den Wasserwirtschaftsämtern im Jahre 1980 erstellte Untersuchung ergab, dass von den 1926 in Bayern (ohne Rhein-Pfalz) noch betriebenen 11 114 Wasserkraftanlagen etwa 7 500 Kleinkraftanlagen überwiegend mit Leistungen unter 35 kW stillgelegt oder beseitigt wurden. Die Ausbauleistung dieser Werke betrug insgesamt rund 30 000 kW bei einem Jahresarbeitsvermögen von ca. 150 Mio. kWh.

### 3 Entwicklung der Stromvergütung in Bayern

Die Verhältnisse waren in Bayern überall annähernd gleich. Eine interessante Darstellung der Strompreisvergütungen liegt vom Bereich der Energieversorgung Ostbayern (OBAG), Regensburg, vor. Auch im Bereich der Isar-Amper-Werke war eine ähnliche Situation gegeben. In einem Bericht zum 50-jährigen Bestehen des „Landesverband Bayerischer Wasserkraftwerke, Regensburg“ finden sich interessante Daten zur damaligen Situation, die nachfolgend auszugsweise aufgegriffen werden.

Besonders um die Mitte des vorigen Jahrhunderts war es wegen der unzureichenden Vergütungen ein großes Problem, einigermaßen gerechte Preise für die bis dahin stiefmütterlich behandelten Betriebe zu erreichen. In einer Denkschrift von Richard Heider „Kleinkraftwerke – weiße Kohle für Bayern“ wurde der Gedanke des so genannten Ersparnisprinzips aufgestellt. Den Kleinkraftwerken sollte wenigstens der Betrag zugute kommen, der durch ihre Einspeisung beim Bezug vom übergeordneten Energieversorgungsunternehmen (EVU) eingespart wird.

Anfang 1950 öffnete das Bayer. Staatsministerium für Wirtschaft und Verkehr die Preisschranke. Davor lag die Vergütung der Kleinkraftwerke bei 1,5 Pf/kWh. Dieser unzureichende Preis trieb viele Anlagen in den Ruin. Ab April 1949 wurde ein Zu-

schlag von 15 % wirksam, so dass damals der Durchschnittspreis 1,725 Pf/kWh betrug. Ab 01.05.49 wurde erstmals neben dem Arbeitspreis ein Leistungspreis von 3,36 DM/kW und Monat gezahlt. Dieser Leistungspreis kam allerdings im Durchschnitt wegen der damit verbundenen Bedingungen den Werken im Jahr nur etwa 6 Monate zugute. Für den Zeitraum vom 01.05.49 bis 31.12.50 ergab sich bei 40 % Zuschlag ein Gesamtpreis von 2,5 Pf/kWh, der sich ab 1.1.51 bis 31.3.52 bei weiteren 5 % Zuschlag auf 2,65 Pf/kWh an hob.

Am 10.3.52 wurde die Anordnung By 2/52 des Bayer. Staatsministeriums für Wirtschaft und Verkehr erlassen. Danach sollten die Kleinwasserkraftwerke Preise erhalten, die 10 % unter den Preisen lagen, welche das EVU für den Strombezug an das Bayernwerk zahlt.

Ab 01.04.52 erhöhte sich der Zuschlag auf insgesamt 66 %, der Leistungspreis auf 6,75 DM/kWh und Monat und damit der Gesamtdurchschnittspreis auf 3,4 Pf/kWh. Vom 01.08.52 an war der Zuschlag 80 % und damit der Gesamtpreis 3,45 Pf/kWh. Die Zeit vom 01.01.55 bis 31.12.57 brachte einen Gesamtpreis von 3,7 Pf/kWh.

Inzwischen war von EVU-Seite die Ministerialanordnung By 2/52 durch eine Normenkontrollklage angefochten worden. Diese Klage wurde jedoch vom Verwaltungsgerichtshof am 27.09.59 abgewiesen und die Anordnung bestätigt. Ab 01.04.58 konnte ein Leistungspreis von 9,- DM/kW und Monat erreicht werden, was einem Gesamtdurchschnittspreis von 4,25 Pf/kWh entsprach.

Trotz der allgemeinen Preissteigerungstendenz mussten die Kleinwasserkraftwerke am 06.04.61 eine 5 %ige Strompreissenkung hinnehmen. Am 28.05.63 wurde der Leistungspreis in einen Leistungszuschlag von 2,2 Pf je gelieferte Hochtarif-kWh umgewandelt. Seit der letzten Strompreiserhöhung am 01.01.73 betrug der Gesamtdurchschnittspreis 4,82 Pf/kWh. Im Jahre 1974 brachte die Energiekrise Schwung in die Auseinandersetzungen um den Strompreis. Ab 01.03.1977 galten folgende Strompreise für Lieferung an die OBAG: Hochtarif-Wirkarbeit ganzjährig 5,65 Pf/kWh, Niedertarif-Wirkarbeit ganzjährig 4,66 Pf/kWh, Leistungspreis 2,20 Pf/kWh unverändert. Ab 01.07.1980 galten neue Strompreise: Hochtarif 6,66 Pf/kWh und Niedertarif 5,51 Pf/kWh zzgl. Leistungspreis Hochtarif 3,63 Pf/kWh bzw. Niedertarif 2,91 Pf/kWh.

Wirtschaftsminister Graf Lambsdorff (FDP) wollte alle administrativ festgesetzten Preise und damit auch die By 2/52 beseitigen. Der Bundestagsabgeordnete Matthias Engelsberger erreichte den Erhalt dieser Bayerischen Vorschrift. Ab 01.06.83 erhöht sich der Strompreis um 4,75 %. Auch der Leistungszuschlag wird erhöht. 1989 versucht die OBAG Strompreissenkungen bis 10 % durchzusetzen.

#### 4 Wie es zum **Stromeinspeisungsgesetz (StrEG) und Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)** kam

Hinter den genannten Zahlen verbirgt sich ein zähes Ringen um gerechte Preise für den eingespeisten Strom mit der Versorgungswirtschaft. Mit dem Aufbau der landesweiten Stromversorgung ging ein großes Wasserkraftsterben einher, weil die Stromwirtschaft – insbesondere in den übrigen Bundesländern – den Strom zu diskriminierenden Preisen aufnahm oder deren Abnahme sogar verweigerte. Es verstärkten sich daher in den 1980er Jahren seitens der Politik die Initiativen zu einer gerechteren Vergütung des Stromes aus erneuerbaren Energien, insbesondere auch wegen des gestiegenen Ansehens einer sauberen heimischen und rohstoffschonenden Energieerzeugung. Es kam auch auf Grund des Druckes des Bundesverbandes Deutscher Wasserkraftwerke (BDW) im Jahre 1987 zur sogenannten Verbändevereinbarung, welche bundesweit die Vergütung von rund 5 Pf/kWh auf 8,5 Pf/kWh erhöhte. Aber auch diese Vergütung war bei weitem nicht ausreichend. Die Stromwirtschaft lehnte nach zähen Verhandlungen eine Erhöhung auch nur eines Zehntel Pfennigs kategorisch ab. Bundeswirtschaftsminister Bangemann wollte eine Preiserhöhung von ca. 30 % bewirken. Die EVU stemmten sich dagegen. Aufgrund dieser Situation musste die Politik eingreifen. Hilfreich waren auch die Kartellrechtsprozesse, die Manfred Lüttke, Rheinstetten (Baden-Württemberg) führte, in denen gerichtlich bestätigt wurde, dass zumindest die Beträge zu bezahlen sind, die durch die Einspeisung beim anderweitigen Bezug erspart werden. Matthias Engelsberger gelang es, eine größere Gruppe von Abgeordneten zu formieren und einen Gesetzesentwurf gegen den Widerstand der Stromwirtschaft in den Bun-

destag einzubringen. Dies war der Anfang des Strom-einspeisungsgesetzes (StrEG).

Besonders wichtig war auch, dass die erneuerbaren Energien, die Windkraft lag damals noch in der Wiege, sich insgesamt zu einer starken Gruppe formierten, die schließlich zur Gründung des Bundesverbandes Erneuerbare Energien (BEE) am 13. Dezember 1991 in Weinheim führte.

Mit dem Stromeinspeisungsgesetz, das ab 1991 gerechtere Strompreise für die Wasserkraft brachte, ging es mit der Wasserkraft wieder aufwärts. Auch die Nachfolgeregelung, das EEG, bewirkte, dass sich die Wasserkraft und die erneuerbaren Energien insgesamt besser entwickeln konnten. Details hierzu würden den Umfang des Artikels sprengen und die Gesetzesregelungen sind den meisten Lesern grundsätzlich bekannt. An dieser Stelle wurde daher vor allem die teilweise etwas in Vergessenheit geratene Vorgeschichte zu den beiden bedeutenden Gesetzen dargelegt.

## 5 Potenzial und Ausblick der bayerischen Wasserkraft

Ein Blick auf das wasserkraftreiche Land Bayern zeigt, dass eine wesentlich verstärkte Nutzung der Wasserkraft hierzulande noch möglich ist. In Bayern werden derzeit rund 14,5 Mrd. kWh aus Wasserkraft erzeugt. Bei entsprechenden Rahmenbedingungen könnten mindestens noch weitere



**Bild 3:** Der überwiegende Teil der stillgelegten Wasserkraftwerke wartet auf den Prinzenkuss zu ihrer Wiedererweckung

4 Mrd. kWh genutzt werden, so dass insgesamt mit einer Erzeugung von über 18 Mrd. kWh der ganze Haushaltsstrom im Freistaat gedeckt werden könnte. In welchen Bereichen das Nutzungspotenzial liegt, wird nachstehend kurz zusammengefasst.

### 5.1 Altrechte bzw. stillgelegte Wasserkraftwerke

In Bayern gab es, wie erläutert, ein großes Wasserkraftsterben. Wegen dieser schlechten Rahmenbedingungen wurden in den vergangenen gut 100 Jahren rund 6 000 Wasserkraftwerke stillgelegt. Von diesen stillgelegten Wasserkraftwerken wiederum dürften nach vorsichtigen Schätzungen gut ein Viertel, also 1 500 Anlagen, reaktivierbar sein (**Bild 3**). Die weiteren 4 500 Standorte sind entweder durch Zusammenlegung mit den derzeit noch in Betrieb befindlichen Wasserkraftwerken verschmolzen oder komplett aufgelöst worden.

### 5.2 Steigerungen sind bei allen Größenklassen möglich

Von den derzeit in Bayern erzeugten 14,5 Mrd. kWh werden in kleinen und mittleren Anlagen in der Größenklasse von 1 kW bis 10 MW installierter Leistung ca. 4 Mrd. kWh, in den großen Anlagen über 10 MW rund 10,5 Mrd. kWh erzeugt.

Experten schätzen, dass bei Wasserkraftwerken über 10 MW durch Modernisierungen und Erweiterungen der bestehenden Anlagen sowie Neubauten im Zusammenhang mit flussbau-



**Bild 4:** Wasserkraftwerk der DB Energie AG in Bad Reichenhall, erbaut von 1910 bis 1913 (5 horizontale Francis-Kessel-Turbinen mit insg. 5,2 MW, Jahresarbeit 40 Mio. kWh/a)

chen Sanierungsmaßnahmen die Erzeugung um über 10 % gesteigert werden kann, also in etwa 1, 2 Mrd. kWh.

Das Steigerungspotenzial bei der kleinen und mittleren Wasserkraft bis 10 MW ist prozentual gesehen höher, da für diese Anlagen andere Rahmenbedingungen gegeben waren. Es gliedert sich in folgende Bereiche:

### **Modernisierung bzw. Erneuerung bestehender Anlagen**

Viele der kleinen und mittleren Wasserkraftanlagen bekamen über Jahrzehnte eine zu geringe Vergütung, so dass die Anlagen schließlich stillgelegt oder vielfach in technisch unzureichendem Zustand betrieben wurden. Im Durchschnitt kann man bei einer vorsichtigen Schätzung davon ausgehen, dass die Erzeugung in bestehenden Anlagen durch Modernisierungen und Erweiterungen von derzeit 4 Mrd. kWh durchschnittlich um rund 30 %, d. h. rd. 1,2 Mrd. kWh, gesteigert werden könnten (**Bild 4**).

### **Reaktivierung stillgelegter Anlagen**

Bei den stillgelegten Anlagen handelt es sich in der Regel um Kleinkraftwerke von 10 kW bis mehreren 100 kW und teilweise auch größere Anlagen. Es sind dabei die betrieblichen Anlagen zum Teil noch vorhanden, wie Wehranlagen, Unterwasser- und Oberwassermühlbäche bzw. Ausleitungsgewässer, Kraftwerksgebäude, Turbinen und sonstige maschinelle und elektrische Einrichtungen. Die Einzelteile der Anlagen sind zumeist in einem desolaten Zustand. Die Summe der nutzbaren Erzeugung durch Wiedererrichtung bestehender Anlagen liegt nach groben Abschätzungen in der Höhe von rd. 0,8 Mrd. kWh.

### **Neue Wasserkraftanlagen an bisher noch nicht genutzten Standorten**

Hierunter fallen beispielsweise Wehre, die z. B. aus flussbaulichen Gründen zur Sohlenstützung notwendig sind. Mit der Nutzung der Wasserkraft können diese Wehre mittels Fischtreppe durchgängig gestaltet werden.

Eine weitere Nutzungsmöglichkeit besteht durch sogenannte Restwasserkraftwerke. Diese Anlagen werden im Zusammenhang mit der ökologischen Notwendigkeit der Abgabe von Restwasser gebaut. Vielerorts wird diese Nut-

zung durch Wasserkraftschnecken oder Wasserräder vorgenommen und mit Fischtreppe kombiniert.

Weitere Nutzungsmöglichkeiten ergeben sich an bestehenden Mühlbächen durch den Einsatz von Wasserrädern zur Nutzung des fließenden Wassers. Es genügt hierzu eine Verengung des Wasserlaufes, um mit einer Anhebung des Wasserstandes die Energie des fließenden Wassers nutzen zu können. Speziell dort, wo flussbauliche Maßnahmen notwendig sind, ist eine gute Nutzung der Wasserkraft möglich. Dies ist meist in Zonen gegeben, in denen der Mensch die Natur bereits gestaltet hat (Kulturlandschaft) und so auch eine ökologische Aufwertung erzielbar ist.

Aus den vorgenannten Nutzungsmöglichkeiten ergibt sich eine Größenordnung von rd. 0,8 Mrd. kWh.

### **Gesamtpotenzial**

Zusammengenommen könnte also die Wasserkraftnutzung in Bayern durch kleine und mittlere Anlagen um rund 2,8 Mrd. kWh und durch die große Wasserkraft um ca. 1,2 Mrd. kWh, also insgesamt um 4 Mrd. kWh gesteigert werden. Mit der vorhandenen Nutzung könnte der Strombedarf aller bayerischen Haushalte gedeckt werden. Wie aufgezeigt wurde, liegt insbesondere ein großes Potenzial in der Modernisierung und Erweiterung oder dem Ersatz der teilweise bis zu 100 Jahre alten kleinen und großen Anlagen. Mit einem Erneuerungsschub lässt sich nicht nur der Stromertrag erhöhen, sondern zugleich der gewässerökologische Zustand verbessern.

## **6 Fachzeitschriften als wichtiger Begleiter der Wasserkraft**

### **6.1 Der Kampf um die Wasserkraft um die vorige Jahrhundertwende**

Zeitgleich mit dem ersten Erscheinen der „Wasserwirtschaft“ kam 1906 „Die weiße Kohle“ heraus (**Bild 5**). Diese Fachzeitschrift wurde von Jakob Zinßmeister in München herausgegeben und bildete das Verbandsorgan der Bayerischen Wasserkraftwerksbetreiber und der Bayerischen Wasserwirtschaft. Die Zeitschrift erschien jeweils am 5., 15. und 25. jeden Monats. In der Kopfzeile hieß es: „Laut mitgeteilter Entschliessung des „Königlichen



**Bild 5:** Fachzeitschrift „Die weiße Kohle“

Bayerischen Staatsministeriums des Inneren“ vom 6. April 1908 No. 6203 sind die sämtlichen dem genannten Staatsministerium nachgeordneten Dienststellen ermächtigt, diese Zeitschrift innerhalb der verfügbaren Mittel anzuschaffen“. Leider erlosch mit dem Tode des Schriftleiters Jakob Zinsmeister die Fachzeitschrift „Die weiße Kohle“ im Jahre 1918. Deren Aufgabe übernahmen in der Folge andere Zeitschriften, darunter die Vorläufer der „WasserWirtschaft“ [1], in denen u. a. zahlreiche bedeutende Beiträge auch vom Wasserkraftpionier Oskar von Miller wiedergegeben wurden.

Exemplarisch für die damalige Situation der Betreiber kleinerer Wasserkraftanlagen sei nachfolgend ein Auszug aus der Zeitschrift „Die weiße Kohle“ vom 5. März 1911 wiedergegeben [2]:

### „Elektrische Überlandzentralen

Am 18. Februar 1911 fand in Nürnberg eine aus ganz Bayern stark besuchte Versammlung von Interessenten der kleineren und mittleren Elektrizitätsindustrie statt. Die Versammlung fasste nach mehrstündiger Beratung einstimmig folgende Resolution:

„Die am 18. Februar zu Nürnberg versammelten Besitzer kleiner und mittlerer Elektrizitätswerke Bayerns sehen sich gezwungen, gegen die einseitige Bevorzugung der im Bau bzw. in Vorbereitung begriffenen Überlandzentralen durch die kgl. bayer. Staatsregierung den schärfsten Protest zu erheben. In Sonderheit protestiert die Versammlung dagegen, dass die Regierung bzw. die unteren Verwaltungsbehörden die Gemeinden vom Abschluss von Lieferungsverträgen mit kleineren und mittleren Elektrizitätswerken und vom Bezuge elektrischer Energie aus solchen Werken abzuhalten suchen. Sie



**Bild 6:** Fachzeitschriften „wassertriebwerk“ und „Wasserkraft & Energie“

schädigt dadurch diese Werke auf das schwerste und stellt zumeist ihre Existenz völlig in Frage. Die Versammlung richtet die dringende Bitte an die Staatsregierung, die wohlerworbenen Rechte und die wirtschaftlichen Interessen der kleineren und mittleren Elektrizitätswerke mit derselben Energie und demselben Wohlwollen zu wahren, wie diejenigen der großen Elektrizitätsgesellschaften, die an der Errichtung der Überlandzentralen beteiligt sind.

Diese Resolution soll in nächster Zeit durch eine Abordnung zum Zwecke der eingehenden mündlichen Begründung dem Ministerpräsidenten überreicht werden.“

Anschließend an die Protesterhebung gegen die Staatsregierung konstituierte sich eine „Vereinigung von Besitzern kleiner und mittlerer Elektrizitätswerke in Bayern“.

## 6.2 Das „wassertriebwerk“

Um die Mitte des vorigen Jahrhunderts (1952) wurde die Fachzeitschrift „das wassertriebwerk“ aus der Taufe gehoben. Die damaligen Geburtshelfer waren sich nicht so sicher, ob der Sprößling einen guten und so langen Weg nehmen würde. Die ständige Monatsbeilage in der Zeitschrift „Die Mühle“ war eine Klammer für alle Wasserkraftbetreiber, weit über die Müllerbunde hinaus bis in die Sägewerksverbände, zu den Pappen- und Papierfabriken, zu Schleifereien und Industriebetrieben mit Wasserkraft. Wilhelm Wecker als Initiator und erster Schriftleiter erkannte die Notwendigkeit für eine solche Klammer. Die Fragen um das Wasser waren so vielfältig, dass es nach dem 2. Weltkrieg wieder wichtig wurde, Vereinigungen auf Länderebene anzustreben und in Gesprächen sowie bei Beratungstagen die Interessen zu bündeln und zu koordinieren. In Darmstadt galt das Hessische Bachgesetz, in Koblenz das Preußische Wasserrecht, in Kaiserslautern das Bayerische Wasserrecht und in Stuttgart das Württembergerische Wasserrecht, nicht aber in Freiburg. Rechtsfragen waren somit im ersten Jahrzehnt inhaltsbestimmend. Wilhelm Wecker bearbeitete 100 Exemplare vom „das wassertriebwerk“.

Als nach dem zu frühen Tod von Wilhelm Wecker seine Tochter die Schriftleitung im Jahre 1960 übernahm, wurde das Wasserhaushaltsgesetz (WHG) bundesweit (Westdeutschland) eingeführt. Die neu formierten Bundesländer erließen

nach und nach ihre eigenen Landeswassergesetze. Und so war es wiederum das Wasserrecht, das die Seiten des „wassertriebwerks“ füllen musste. Vor allem den Fragen nach der Aufrechterhaltung alter Rechte und Befugnisse galt das Augenmerk, hatte doch der § 15 WHG hier einheitliches, rechtsstaatliches Fundament gelegt. Die verschiedenen Länder- und Bezirksregierungen sahen das nicht immer so. Frau Dr. Hella M. Wecker hat dabei in enger Zusammenarbeit mit RA Dr. Tratz, Kitzingen, bahnbrechendes geleistet. So mancher Triebwerksbesitzer wäre ohne die Hilfe des „wassertriebwerks“ um sein angestammtes Recht gekommen. An die Zeiten zur Anmeldung alter Rechte mit Fristbindungen sei nur am Rande erinnert. In unermüdlichen Aufrufen waren die Triebwerksbesitzer angehalten worden, nicht leichtfertig auf das Neue, die Bewilligung oder Erlaubnis einzugehen, die von Amts wegen oft vorgeschlagen und zugesichert wurde. Das so genannte Mühlensterben, das auch kleine Sägewerke betraf, machte die Umrüstung vom mechanischen Antrieb der Maschinen auf Stromerzeugung mittels Generator notwendig.

Die folgenden Jahrzehnte und der Tenor der Zeitschrift wurden mehr und mehr von der Stromerzeugung, der Stromeinspeisung in die Netze der EVU und vom Strompreis bestimmt. Die Schriftleitung von Dr. Hella M. Wecker, die 360 Ausgaben bearbeitete, ging ab Mai 1991 an den Autor über, der bisher 224 Ausgaben behandelt hat (**Bild 6**).

Um die Themen rund um die erneuerbaren Energien umfangreicher behandeln zu können, gründeten Klaus Kunis, Verlag Moritz Schäfer, und Anton Zeller 1994 das internationale Quartals-Magazin „Wasserkraft & Energie“.

## Glückwunsch zu über 100 Jahren

### WasserWirtschaft

Ein hundertjähriges Jubiläum bietet Anlass, in Dankbarkeit zurückzublicken und mit Zuversicht nach vorne zu schauen. Innerhalb des vielfältigen Reigens an Fachgebieten, mit denen sich die über 100-jährig jung gebliebene „WasserWirtschaft“ befasst, stellte auch die Wasserkraft ein wichtiges Fachgebiet dar. Es gilt zu danken, dass 100 Jahre das Gedankengut zur Wasserkraft in der „WasserWirtschaft“ verbreitet wurde und sie als Problemlösungs- und Ideenwerkstatt diente. Diese Glückwün-

sche an die „WasserWirtschaft“ richten sich dabei auch besonders an die zahlreichen Schriftleiter, die in ihrem unermüdlichen Tun, im Suchen nach Recht und Gerechtigkeit, im Streben nach dem Erhalten unseres Lebensraumes, der Umwelt und der angemessenen Beschäftigung das Lob und die Anerkennung der wasserwirtschaftlich Tätigen, der Triebwerksbetreiber und vieler anderer verdienen. Die „WasserWirtschaft“ sieht über den nationalen Rand hinaus, hat europäisches Format errungen und kann heute mutig in die Zukunft blicken, wie damals vor 100 Jahren.

#### Autor

#### Regierungsbaumeister Dipl.-Ing. Anton Zeller

Chefredakteur der Fachzeitschriften  
„wassertriebwerk“ und „Wasserkraft & Energie“  
Steinbachweg 34, 83324 Ruhpolding  
antonzeller@t-online.de

#### Literatur

- [1] Murr, S.; Heimerl, S.: 100 Jahrgänge WasserWirtschaft – Einblicke in eine wechselvolle Geschichte. In: WasserWirtschaft 100 (2010), Heft 1-2.
- [2] Engelsberger, M.: Persönliche Auskünfte.

Anton Zeller

#### Aspects of 100 Years of Hydropower Development in Bavaria

For millennia the power of water was used by direct power transformation and in the year 1850 about 70 000 hydroelectric power plants were running in Germany. When remote transmission of electricity became possible around the beginning of the 20<sup>th</sup> century, enormous possibilities for the development of hydropower arose. In this article the situation in Bavaria will be presented as an example and the development in the last hundred years will be shown, which has been marked by the struggle for fair electricity tariffs. In addition, this article will look into the present use of hydropower and its possible development potential. A significant role in the development of hydropower has also been played by the hydropower magazines which have been propagating the idea of hydropower. Among these are the magazines "WasserWirtschaft" as well as the "wassertriebwerk" and their respective predecessors.

Антон Целлер

#### Краткий обзор 100-летней истории развития водных гидроэнергетических ресурсов в Баварии

Использование энергии воды посредством прямого преобразования водной силы происходило на протяжении тысячелетий. В 1850 году в Германии несли свою службу около 70 000 гидроэлектростанций. На рубеже 19-го и 20-го веков благодаря возможности передачи электрической энергии на расстоянии появились уникальные возможности для развития водных энергетических ресурсов. В данной статье в качестве примера рассматривается развитие гидроэнергетики в Баварии за последние 100 лет, сопровождавшееся постоянной борьбой за справедливые цены на электроэнергию. Кроме того, дается обзор современного использования гидроэнергии и существующего на сегодня потенциала в этой области в Баварии. Значительную роль в развитии сыграли журналы по гидроэнергетике, в том числе «WasserWirtschaft» («Водное хозяйство») и «wassertriebwerk» («Гидротурбины») и, соответственно, их предшественники, способствовавшие распространению знаний о гидравлической энергии.

# Potenziale

Hans Bunting (nach WasserWirtschaft 8/2012, verändert)

# Entwicklungen in der Energiepolitik – Auswirkungen auf die Wasserkraft

Durch die Energiewende, die von der deutschen Bundesregierung im Sommer 2011 eingeleitet worden ist, ist erstmalig ein langfristiger Fahrplan für Eckpunkte einer Energielandschaft 2050 veröffentlicht worden. Durch die zunehmende Fokussierung auf Energieeffizienz, den Ausbau erneuerbarer Erzeugungskapazitäten und der Ausweitung der Energieimporte wird sich die Struktur des Strommarktes deutlich ändern. Die Wasserkraft spielt gemäß den Energieszenarien der Bundesregierung dabei nur eine untergeordnete Rolle, die sich weitgehend auf den Zubau von Pumpspeicherkraftwerken im In- und Ausland konzentrieren wird, um das volatile Stromaufkommen aus Wind- und Sonnenenergie auszugleichen.

## 1 Auswirkungen der Energiewende auf die Wasserkraft

Die deutsche Bundesregierung hat mit den Beschlüssen zur Energiewende im Sommer 2011 die langfristige Agenda für den Umbau der deutschen, aber – bedingt durch die besondere Rolle Deutschlands in der europäischen Energiewirtschaft – auch der europäischen Energielandschaft gesetzt. Das übergeordnete Ziel, eine drastische Reduktion der CO<sub>2</sub>-Intensität der Energieerzeugung bei gleichzeitigen Effizienzgewinnen im Energieverbrauch bis 2050, ist gesetzt (**Bild 1**). Einige zentrale Bausteine sind jedoch, so sie denn überhaupt detailliert ausformuliert worden sind, kritisch zu hinterfragen:

- Für den Stromverbrauch wird eine Reduktion durch Effizienzgewinne bis 2050 um 20 % postuliert. Gleichzeitig gehen Fachleute jedoch von einer steigenden Elektrifizierung des Energieverbrauchs aus, so z. B. durch den zunehmenden Einsatz elektrischer Energie im häuslichen Bereich, den Ersatz von Gas durch – mit elektrischen Wärmepumpen verbundene – geothermische Anlagen zur Erzeugung von Wärme sowie den Trend zur Elektromobilität [1].
- Auch die Deckung einer bestehenden Versorgungslücken durch Importe ist kritisch zu sehen. Sollten diese Importe durch z. B. den zunehmenden Bau von Steinkohlekraftwerken außerhalb Deutschlands bedient werden, wür-

de dies lediglich eine Verlagerung der Wertschöpfung ins Ausland bedeuten. Zwar gibt das Energiekonzept vor, dass 80 % der Importe aus erneuerbaren Energiequellen gedeckt werden müssen, allerdings lässt sich dies praktisch nur schwer überprüfen. Das wirtschaftliche Kalkül zum Bau eines Kraftwerks wird ohnehin durch den CO<sub>2</sub>-Preis, die gedeckelte Emissionsmenge und die Struktur (Merit Order) des relevanten Kraftwerksparcs bestimmt.

- Ebenfalls kritisch zu sehen ist der geplante massive Ausbau der erneuerbaren Kapazitäten in Deutschland, insbesondere der Photovoltaik. Da dieser Zubau im Wesentlichen in der laufenden Dekade und damit – trotz jährlicher Degression – noch bei relativ hohen EEG-Vergütungssätzen vorgesehen ist, wird die EEG-Umlage zwangsläufig weiter steigen. Zum einen ist die Differenz zwischen der EEG-Vergütung und den Großhandelspreisen für Strom insbesondere bei Biomasse und Photovoltaik auch in den nächsten Jahren noch signifikant. Zum anderen wird der Kannibalisierungseffekt zunehmen, d. h. besteht ein hohes Windaufkommen oder hohe Sonneneinstrahlung, so wird der Großhandelsstrompreis gedrückt und das EEG-Fördervolumen steigt entsprechend. Ein kontinuierlicher Ausbau der Erneuerbaren könnte kosteneffizienter erreicht werden, indem man in geringerem Tempo vornehmlich Wind-Onshore- und Wind-Offshore-Kapazitäten auf-

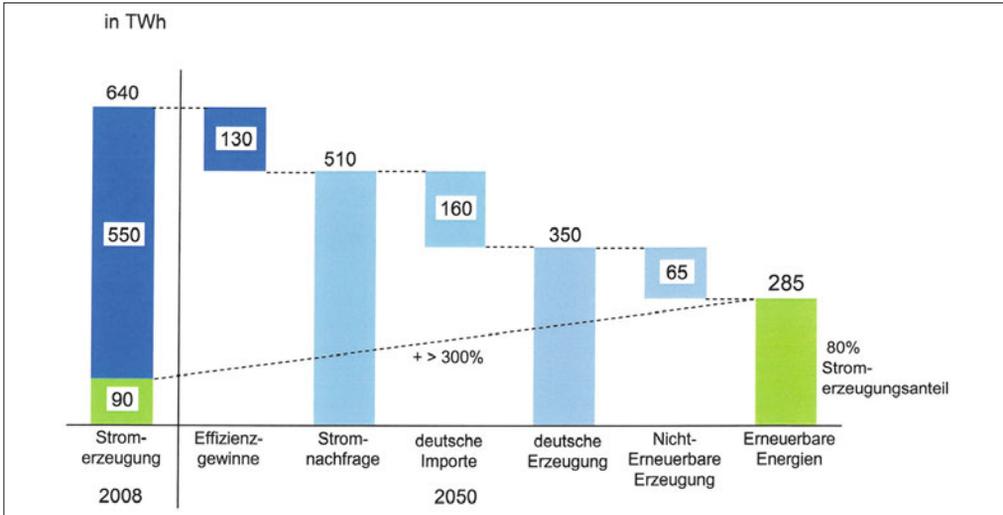


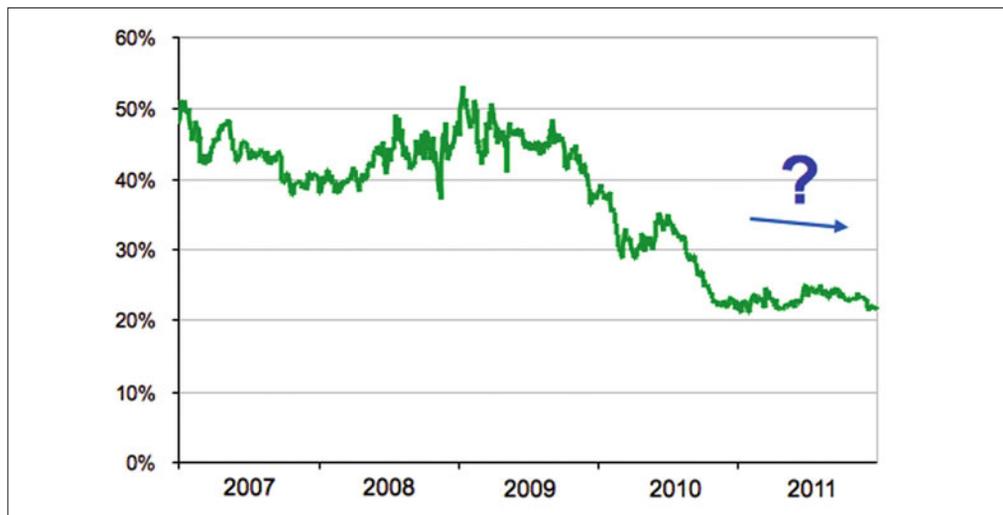
Bild 1: Energieszenario der Bundesregierung 2050 [1]

bauen würde bei gleichzeitiger optimierter Nutzung der bestehenden konventionellen Kraftwerkskapazitäten in Deutschland.

Es stellt sich die Frage, in welchem Umfang der Ausbau der Wasserkraft zur Energiewende beitragen kann. Im Konzept der Bundesregierung wird der Wasserkraft nur eine geringe Rolle zugeschrieben, was vor dem Hintergrund der weitgehend erschöpften Potenziale für Lauf- und Speicherwasserkraftwerke gesehen werden muss. Daher sollten wir auch einen Blick über die Grenzen werfen. Prägend für die weitere Entwicklung der deutschen Energielandschaft ist die stufenweise Abschaltung der Kernkraftwerke bis 2022, die in der laufenden Dekade im Wesentlichen im süddeutschen Raum stattfinden wird. Des Weiteren werden die deutschen Netze durch den massiven Zubau der Windenergiekapazitäten im Norden (On- und Offshore) sowie – allerdings auf der Verteilnetzebene – durch Photovoltaik stärker beansprucht. Hieraus ergeben sich Herausforderungen für den weiteren Netzausbau, wie im Netzentwicklungsplan der Übertragungsnetzbetreiber skizziert. Dieser geht davon aus, dass wir allein auf höchster Spannungsebene bis 2022 in Deutschland 4 400 km Stromleitungen verstärken oder neu errichten müssen. Bisher sind davon rund 220 km realisiert worden.

Durch die Beschlüsse zur Energiewende und die stufenweise Abschaltung deutscher Kernkraftka-

pazität profitieren günstige Kraftwerke, die in der energiewirtschaftlichen Angebotskurve (Merit Order) weit vorne liegen, überproportional. Dies gilt insbesondere für Laufwasserkraftwerke, die bei gleichbleibenden Stromgestehungskosten von deutlich höheren Strompreisen profitieren. Da sich die gesamte Merit Order kurzfristig nach links verschoben hat, können sich folglich in Knappheitssituationen kurzzeitig extrem hohe Strompreise einstellen. Von dieser Differenz (Spread) zwischen Preisausschlägen und Base-Strompreis profitieren wiederum Pumpspeicherkraftwerke. Beide Effekte werden jedoch durch die Inbetriebnahme neuer Braunkohle-, Steinkohle- und Gaskraftwerkskapazitäten aufgehoben bzw. gemindert. Die Marktengpass, die kurzfristig durch die Abschaltung der Kernkraftwerke entstanden ist, wird durch Inbetriebnahmen und Importe in eine Überkapazitätssituation umgekehrt. Diese Entwicklung wird auch durch die Außerbetriebnahme alter, ineffizienter Kohleblöcke nicht aufgehoben. Mit weiterem Zubau, im Wesentlichen durch Gaskraftwerke, ist erst wieder nach 2020 zu rechnen. Neben Überkapazitäten wirkt der Zubau von Erneuerbaren Energien im Großhandelsmarkt strompreisdämpfend, denn die Übertragungsnetzbetreiber müssen den günstigen, nur auf kurzfristigen, variablen Grenzkosten basierenden Strom an der Börse vermarkten. Daran werden auch alternative Vermarktungskonzepte, wie das aktuell im EEG



**Bild 2:** Differenz zwischen Preisen in Schwach- und Starklastperioden seit 2007

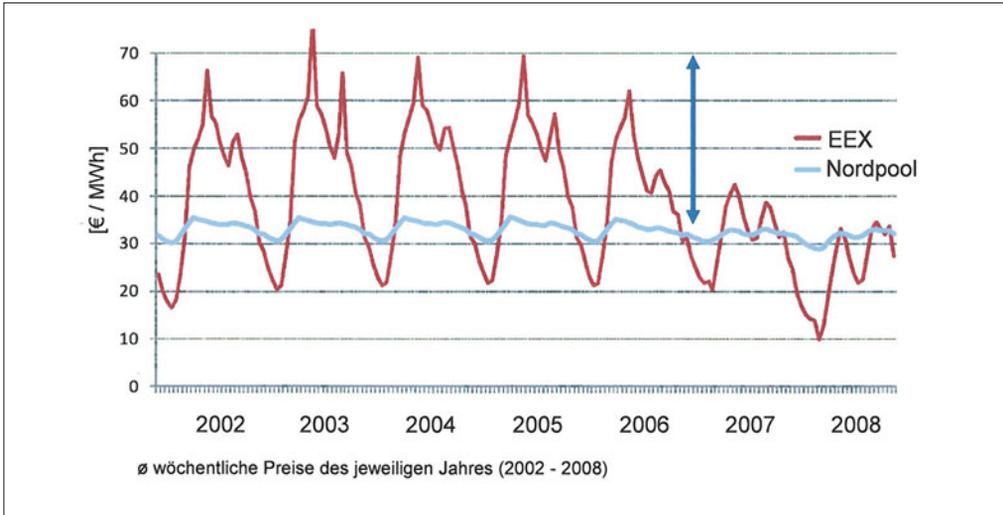
2012 enthaltene „Marktpremienmodell“, das eine Direktvermarktung von EEG-Strom an der Börse vorsieht, nichts ändern. Letztlich führt der niedrigere Strompreis zu höheren Förderkosten, da die Stromgestehungskosten und damit der Förderbedarf der Erneuerbaren unverändert bleibt. In Zukunft wird der extreme Zubau erneuerbarer Energien dazu führen, dass in Zeiten starken Windaufkommens der größte Teil der deutschen Last – zumindest zeitweise – von erneuerbaren Energien gedeckt werden wird. In windschwachen, bewölkten Zeiträumen müssten umgekehrt konventionelle Reserve- und Importkapazitäten zur Verfügung stehen, um Stromangebot und -nachfrage stets auszugleichen. Da jedoch auch in den Nachbarstaaten der Ausbau erneuerbarer Energien Vorrang hat, wird bedingt durch die hohe Gleichzeitigkeit des Stromaufkommens ein aktives Demand-Side-Management, das auch zur temporären, erzwungenen Abschaltung einzelner Verbraucher führen wird, unabdingbar sein.

## 2 Bedeutung von Pumpspeicherkraftwerken

Durch diese Entwicklungen stellt sich der Einsatz konventioneller Kraftwerke völlig anders dar. Aufgrund ihrer geringeren Flexibilität werden ältere Braun- und Steinkohlekapazitäten vom Markt ge-

nommen bzw. nur noch als Kaltreserve zur Verfügung stehen. Für den notwendigen zusätzlichen Bedarf an Spitzen- und Reservelast bieten sich langfristig zwei konkurrierende Kraftwerkstypen an: flexible, auch dezentral einsetzbare offene Gasturbinen (OGT) sowie Pumpspeicherkraftwerke (PSW). Letztere werden auch über den steigenden Importanteil österreichischer und schweizerischer PSW die Importquote des deutschen Stromaufkommens erhöhen.

Der weitere Zubau von PSW in Deutschland sowie den alpenländischen Anrainerstaaten hängt maßgeblich von der Entwicklung der Struktur der Strommärkte ab. Kurzfristig helfen steigende Preise und eine im relevanten Bereich (dort wo die Nachfragekurve schneidet) steilere Merit-Orderkurve der Wirtschaftlichkeit von PSW, da sich der Peak-Offpeak-Spread tendenziell weitet. Dabei ist das Niveau des Strompreises für PSW unerheblich. Lediglich die Differenz zwischen Zeiten niedriger Preise, in denen gepumpt wird, und den Perioden hoher Preise, in denen turbinert wird, ist relevant (**Bild 2**). Mittelfristig wird dieser Spread jedoch sinken, da zunehmend Erneuerbare Kapazitäten in den Markt drängen, sowie alte, teure konventionelle Kraftwerke zugunsten flexibler, deutlich günstigerer Steinkohle- und Gastkraftwerke außer Betrieb genommen werden. Zudem führt das glockenförmige Einspeiseprofil der Photovoltaik dazu, dass die – aufgrund der



**Bild 3:** Historische Strompreisdifferenz zwischen Südnorwegen und Deutschland [3]

Starklast – historisch hohen Strompreise um die Mittagszeit gedämpft werden. Diese Effekte sollten weitere Pumpspeicherprojekte, die über die aktuellen Vorhaben in der Schweiz (Linth-Limmern, 1 000 MW; Nant De Drance, 900 MW), Österreich (Reißeck II, 430 MW), Luxemburg (Vianden II, 200 MW) und Deutschland (Atdorf, 1 400 MW) hinausgehen, erschweren. Es wird entscheidend für die Wirtschaftlichkeit weiterer Projekte sein, inwieweit Einkommen durch die Bereitstellung von Regelenergie generiert werden können. Diese Kapazitätsdienstleistung wird durch den zunehmenden Einfluss der erneuerbaren Energien auf das Energiesystem in der Tendenz wertvoller. Die Diskussionen um Kapazitätsmärkte, die den bisher bekannten Stunden- und Terminhandel an der deutschen Strombörse EEX ablösen könnten, werden ja bereits allgegenwärtig geführt.

In Konkurrenz zu den PSW als schnell verfügbare Reservekapazität mit steilen Lastgradienten werden im Wesentlichen OGT stehen. Diese lassen sich – da die typische Leistung mit 50 bis 100 MW gering ist – relativ problemlos in einem zunehmend dezentralen System der Erzeugung und Verteilung elektrischer Energie sowie zur gezielten Stützung von Netzen an dafür besonders geeigneten Punkten einsetzen. Sie weisen zudem geringe Investitionen auf und sind gesellschaftlich einfacher durchzusetzen als z. B. ein großes PSW

im Schwarzwald. So zeigt eine Studie des Beratungsunternehmens Pöyry Consulting, dass im Jahr 2030 in der Spitzenlast erhebliche Kapazitäten von OGT auch über längere Einsatzzeiten produziert werden, während PSW meist in den Schulterstunden eingesetzt werden [2].

Verstärkt wird auch die potenzielle Rolle nord-europäischer PSW für die kontinentaleuropäische Stromerzeugung betrachtet. Dies ist vor dem Hintergrund des weiteren Ausbaus der Windenergie in Nordwest-Europa sowohl On- als auch Offshore in der Nord- und Ostsee zu sehen. Die Grundvoraussetzung für die Effektivität eines skandinavischen Stromspeichers für Kontinentaleuropa ist dabei der Ausbau der Kuppelleitungskapazitäten. Durch die Ausnahmeregelung der Bundesnetzagentur von 2010, die Kabel zwischen den skandinavischen Ländern sowie Deutschland als offene Verbindungskabel im Sinne der Europäischen Union zu bewerten, spielen die durch den Händler an den Betreiber des Kabels zu entrichtenden Netznutzungsgebühren eine wesentliche Rolle. Die Kosten für den Bau und den operativen Betrieb dieser Kabel sind nicht über Netzgebühren umlagefähig und müssen kommerziell durch Arbitrage zwischen unterschiedlichen Strompreisniveaus in Skandinavien und Kontinentaleuropa finanziert werden. In einem weiteren Schritt müssen auch die skandinavischen Pumpspeicher- und Speicherkraftwerksbetreiber einen geogra-

fischen Spread realisieren. Die Strompreisdifferenzen zwischen der skandinavischen Strombörse Nordpool und der EEX sind seit dem Verfall der kontinentaleuropäischen Strompreise gering und erschweren eine Realisierung dieser Vorhaben (**Bild 3**) [3].

Die skandinavischen Wasserkraftpotenziale – Norwegen mit rund 84 TWh/a, Schweden mit weiteren rund 30 TWh/a – übertreffen die im Alpenraum vorhandenen technischen Kapazitäten von rund 30 TWh/a um ein vielfaches, so dass ein solches Ausbauszenario in Bezug auf das technische Potenzial durchaus als realistisch bewertet werden kann. Offen bleibt jedoch die Frage nach der Wirtschaftlichkeit.

### 3 Fazit

Als Fazit lässt sich feststellen, dass

- der Neubau von PSW aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften – Bereitstellung positiver und negativer Regelernergie, Schwarzstartfähigkeit, Blindleistungskompensation – erwünscht ist,
- PSW als „Regelernergiekraftwerke“ tendenziell das volatile Stromaufkommen aus Wind- und Solarenergie ausgleichen können,
- jedoch in starker Konkurrenz zu offenen Gasturbinen (OGT) stehen werden.

### Hinweis

Dieser Beitrag entstand in Kooperation mit der Arbeitsgemeinschaft Alpine Wasserkraft (AGAW), deren Organ die Fachzeitschrift WasserWirtschaft ist, im Nachgang zum AGAW-Symposium 2011 in Trier.

### Autor

#### Dr. Hans Bünting

RWE Innogy GmbH  
Gildehofstr. 1  
45127 Essen  
hans.buenting@rwe.com

### Literatur

- [1] Prognos AG; EWI; GWS (Hrsg.): Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, 2010.
- [2] Pöyry Energy Consulting (Hrsg.): Northern European Wind and Solar Intermittency Study, 2011.
- [3] Bysveen, S.: Norway – Europe’s renewable battery? Statkraft, 2011.

Hans Bünting

### Developments in Energy Policy – Impact on Hydro Power

In the summer 2011 the German Government launched the so-called “Energiewende”, which determines for the first time a long-term roadmap for the conversion of the German energy landscape until 2050. The shape of the German electricity market will change drastically due to an increasing focus on energy efficiency, ongoing support for renewable generation capacity and increasing electricity imports. Hydro power generation plays a minor role in these scenarios and is restricted mainly to additional capacity of pump storage power plants in Germany and adjacent countries. The role of these pump storages is to provide balancing energy to manage the increasing volatile generation from wind and solar power.

Ханс Бютинг

### **Развитие энергетической политики: воздействие на гидроэнергетику**

Летом 2011 года федеральным правительством Германии инициирован так называемый «перелом» в сфере энергетической политики. Впервые был опубликован долгосрочный план по основным параметрам структуры энергетики вплоть до 2050. Все большее внимание уделяется сегодня вопросам энергетической эффективности, повышения производственной мощности установок, работающих на возобновляемых видах энергии, увеличения импорта энергии. В соответствии с этим структура рынка электроэнергии, несомненно, будет меняться. Согласно энергетическим сценариям федерального правительства гидроэнергия играет при этом лишь подчиненную роль. При этом основное внимание будет уделено строительству насосно-аккумулирующих электростанций как в стране, так и за рубежом с целью сбалансирования неустойчивости производства и поступления электроэнергии от ветровых и солнечных энергетических установок.

Pia Anderer, Ulrich Dumont, Bettina Stark und Ulrich Wolf-Schumann  
(WasserWirtschaft 9/2010)

## Vom Linienpotenzial zum technischen Wasserkraftpotenzial – Methode

Die durch das Bundesumweltministerium beauftragte Ermittlung des Wasserkraftpotenzials erfolgte auf der Grundlage des theoretischen Linienpotenzials. Dabei wurden digital vorliegende Daten zur Geländemorphologie und zu den Abflüssen in einem Geografischen Informationssystem (GIS) verarbeitet. Aus dem Linienpotenzial der deutschen Gewässer wurde mit Hilfe von Fallhöhenutzungsgrad und Anlagenwirkungsgrad das technische Wasserkraftpotenzial ermittelt. Die Studie zeigt, dass für große Gewässer maximal etwa 60 %, für mittelgroße und kleine Gewässer dagegen nur etwa 20 % des Linienpotenzials technisch genutzt werden können. Nach Abzug des bereits genutzten Potenzials ergibt sich das unter bestimmten Rahmenbedingungen zusätzlich ausbaubare Potenzial.

### 1 Einführung

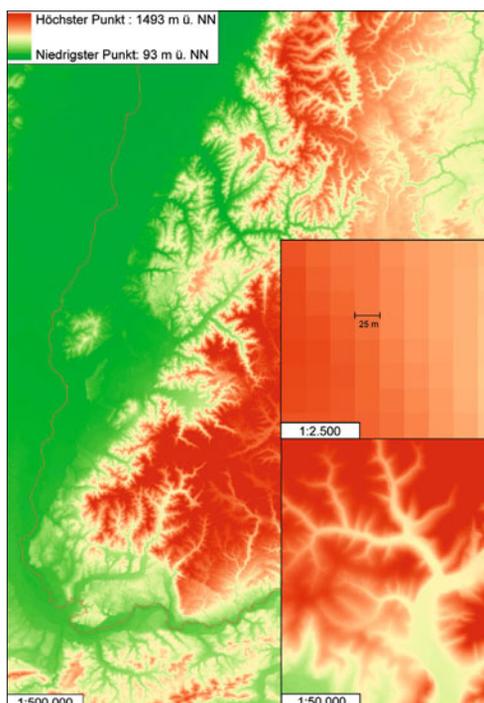
Die Studie zum Wasserkraftpotenzial [1] im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) hatte zum Ziel, für ganz Deutschland mit Hilfe einer einheitlichen Methode das noch zusätzlich ausbaubare Wasserkraftpotenzial zu ermitteln.

Vorhandene Untersuchungen zum Wasserkraftpotenzial basieren im Wesentlichen auf zwei Methoden:

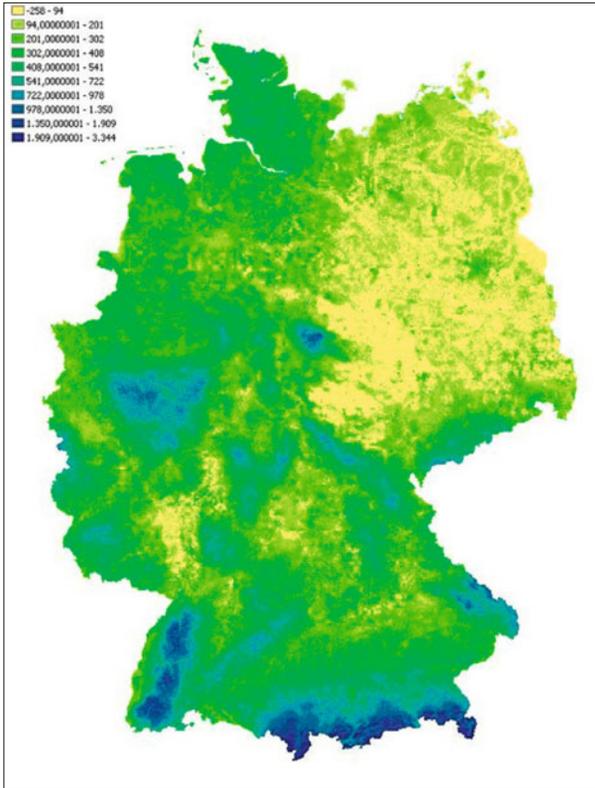
- der Standort-Methode, bei der die Ausbaumöglichkeiten in der Regel an vorhandenen, ggf. auch neu zu errichtenden Stauanlagen betrachtet werden, und
- der Linienpotenzial-Methode, bei der das natürlich vorhandene, aber nur theoretisch verfügbare Wasserkraftpotenzial aus Abflüssen und Höhendifferenzen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

Für die Wasserkraftanlagen (WKA) mit  $P \geq 1$  MW konnte mit Hilfe der Standort-Methode ein Ausbaupotenzial von etwa 15 % ermittelt werden. Die Ergebnisse werden von Anderer et al. [1] in dieser Ausgabe der WasserWirtschaft vorgestellt.

Da trotz umfangreicher Recherchen die Datenglage nicht zur Anwendung dieser Methode auf alle WKA ausreichte, wurde für ganz Deutschland das Linienpotenzial bestimmt.



**Bild 1:** Digitales Höhenraster (DGM) in verschiedenen Maßstäben: Die Höhenlagen einzelner Zellen zeigen in größerem Maßstab Tiefenlinien auf, die die Lage von Tälern repräsentieren (Datengrundlage [5])



**Bild 2:** Karte der mittleren Abflüsse [mm/Jahr], die sich aus den Niederschlagshöhen ohne die nicht abfließende Anteile ergeben, wie z. B. die Verdunstung (Datengrundlage [7])

Es liegen für mehrere Gebiete Untersuchungen vor, in denen anhand topografischer Karten das Linienpotenzial bzw. die Linienleistung ermittelt wurde. Umfangreiche Arbeiten wurden z. B. für Baden-Württemberg [2] vorgenommen. Darüber hinaus wurde das Linienpotenzial in der Preußenstudie für das Preußische Staatsgebiet [3] und im IKARUS-Projekt für die ostdeutschen Bundesländer [4] detailliert untersucht. Die in diesem Beitrag vorgestellten Arbeiten wurden stichprobenartig mit den vorgenannten Untersuchungen verglichen und zeigten eine gute Übereinstimmung.

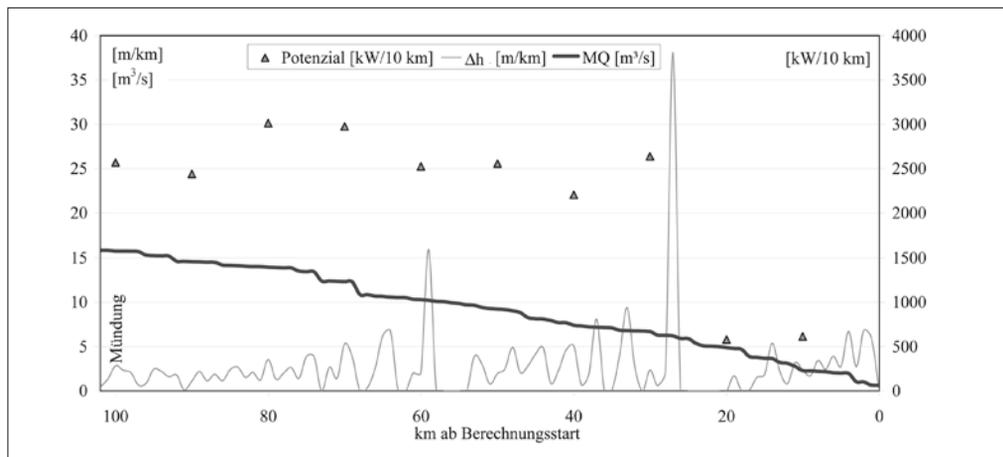
## 2 Das Linienpotenzial – Grundlagen

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

Das maximale Energieerzeugungsvermögen der Gewässer unter Nutzung der gesamten Abflüsse wird als Abflusslinienpotenzial oder (theoretisches) Linienpotenzial bezeichnet. Das Linienpotenzial wird ermittelt aus den durchschnittlichen jährlichen Abflüssen der Fließgewässer und den vorhandenen Gefällen (an jedem Punkt  $i$ ) ohne Berücksichtigung von Verlusten jedweder Art. In der vorliegenden Untersuchung wurden für die GIS-gestützten Auswertungen folgende Grundlagen herangezogen:

- Gewässernetz für Deutschland (DLM 1000W), Shape-Datei [5]
- Digitales Geländemodell für Deutschland (DGM-D, Rasterweite 25 m · 25 m) [6]
- Raster der mittleren jährlichen Abflusshöhe für Deutschland (Rasterweite 1 km · 1 km) [7].

**Bild 1** verdeutlicht die Auflösung bzw. die Rasterweite des verwendeten digitalen Geländemodells. Für die Erstellung von Tiefenlinien, die die Gewässerverläufe repräsentieren, wurde für jede Rasterzelle eine Hauptabflussrichtung aus den Höhenla-



**Bild 3:** Im GIS ermittelte Gelände-Höhendifferenz, Abfluss und spezifische Linienleistung (pro 10 km Fließlänge) der Wupper

gen der benachbarten tiefer liegenden Zellen ermittelt.

Die Abflüsse in den Gewässern ergeben sich aus den Niederschlägen, von denen ein großer Teil verdunstet und ein meist kleiner Teil auf dem Grundwasserpfad abfließt. Der im Hydrologischen Atlas von Deutschland (HAD) [7] angegebene und hier verwendete Abfluss ergibt sich jeweils aus der Differenz von Niederschlag und Verdunstung je Rasterzelle, also pro Quadratkilometer.

Der Abfluss einer Zelle kann somit durch Multiplikation der Abflusshöhe (vorliegend im digitalen Abflusshöhenraster, **Bild 2**) mit der Fläche der Rasterzelle bestimmt werden.

Mit Hilfe einer Abflussakkumulationsauswertung (flow accumulation) wurde ermittelt, aus welchen Nachbarzellen ein Abfluss in die jeweils betrachtete Zelle mündet. Die Summe dieser einmündenden Abflüsse ergeben den Abfluss der betrachteten Zellen, die entlang einer Tiefenlinie einen Gewässerlauf repräsentieren.

Die Gewässerabflüsse für das Wasserkraftpotenzial ergeben sich durch die Integration aller Zellenwerte im zugehörigen Einzugsgebiet.

### 3 Flächendeckende Ermittlung des Linienpotenzials

Innerhalb des Vorhabens wurde das Linienpotenzial flächendeckend für Deutschland ermittelt. Dabei wurde es entlang der Geländetiefenlinien im Abstand von 1 km anhand der Rasterdaten der Abflusskarte (MQ) und des Digitalen Geländemodells (DGM, Höhendifferenz Δh) berechnet. Es konnte zunächst nur die potenzielle Leistung an diskreten Punkten entlang der Tiefenlinie bestimmt werden:

$$P_{L,MQ,i} = \rho_w \cdot g \cdot MQ_i \cdot \Delta h_i \tag{1}$$

- $\rho_w$  Dichte von Wasser
- $g$  Erdbeschleunigung:  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$
- $MQ_i$  mittlerer Abfluss im Streckenabschnitt  $i$
- $\Delta h_i$  Geländehöhendifferenz über den Streckenabschnitt  $i$

Die Linienleistung ist die Addition aller diskreten Leistungen der Teilstrecken  $i$  entlang der untersuchten Gewässerstrecke. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass in der Literatur missverständlicher Weise das Linienpotenzial häufig auch als Leistung angegeben wird, obwohl das Potenzial definitionsgemäß eine Energie ist.

Das Linienpotenzial eines Gewässers ist die Summe der potenziellen Leistungen an den dis-