

# **Ermittlung von Wasserkraftpotenzialen – ein flussgebietsbezogenes analytisches Verfahren**

## **Calculation of Water Power Potential – an Analytical Method for River Systems**

Karl Broich

### **Vorspann**

Wasserkraft zählt zu den erneuerbaren Energien und ist nach Jahren sinkender Bedeutung wieder gefragt. Hierfür ist weniger die mediale Aufmerksamkeit nach den neueren geopolitischen Entwicklungen als vielmehr der finanzielle Rahmen des Energieeinspeisungsgesetzes EEG verantwortlich, welches allmählich breite Wirkung entfaltet. Die Wasserkraft in Deutschland ist weitestgehend ausgeschöpft. So lautet die landläufige Meinung. Selbst für Wasserkraftanlagen >1 MW Leistung gilt dies aber nur bedingt. Allein durch technische Erneuerung der Anlagen lassen sich hier erhebliche Potenziale erschließen. Für Kleinwasserkraftanlagen trifft die Behauptung gänzlich nicht zu. Lange Zeit waren sie unwirtschaftlich. Mittlerweile erlebt die Kleinwasserkraft jedoch eine Renaissance. Bestehende Kraftwerke werden in Stand gesetzt. Der Neubau von Wasserkraftanlagen wird besonders gefördert. Behördlicherseits ist die Feststellung der verfügbaren Wasserkraftpotenziale und deren Verteilung in der Fläche von Interesse. Die hier beschriebene Methode soll helfen die vorhandenen und nutzbaren Wasserkraftpotenziale einfach und flächendeckend zu berechnen. Die Potenziale werden hierbei ordnungsweise akkumuliert, so dass eine Aufteilung nach Lage- und Leistungsklassen möglich wird.

### **Abstract**

Water power

## Einleitung

Deutschland ist ein Wasserland. Wasserkraft wird in ganz Deutschland genutzt. Das Wasserkraftpotenzial wird durch das natürliche Wasserdargebot und das Höhenrelief der Landschaft vollständig bestimmt und begrenzt. Je größer der Abfluss und je größer das Gefälle ist, um so größer sind die Wasserkraftpotenziale. In Deutschland konzentriert sich daher die Wasserkrafterzeugung in den südlich gelegenen Bundesländern. In den übrigen Bundesländern wird sie in einem geringeren Umfang, aber dennoch flächendeckend genutzt. Von Horlacher [1] und Heimerl [2] wurden detaillierte Angaben zur Verteilung nutzbarer und genutzter Wasserkraft innerhalb Deutschlands gemacht. Demnach stehen in Deutschland etwa 18,7 TWh/a aus Wasserkraft jährlich zur Verfügung das entspricht bei einem Prokopfverbrauch von 1800 kWh/a 10,4 Millionen Einwohnerequivalenten oder 13 Prozent der deutschen Bevölkerung. Das nutzbare Arbeitsvermögen wird von Heimerl mit 25,48 Twh/a angegeben. Das Arbeitsvermögen wird nachfolgend auch als Jahresleistung oder Stromerzeugung bezeichnet. Deutschlandweit beträgt der Nutzungsgrad= installierte Wasserkraft / nutzbares Wasserkraftpotenzial 73 %. Wenn die Wasserkraft vollständig genutzt würde ließen sich etwa 14,2 Millionen Einwohner mit Strom aus Wasserkraft versorgen. Die länderbezogene Verteilung der Nutzung ist sehr unterschiedlich, wie der Tabelle 1 entnommen werden kann. Insbesondere in den Bundesländern Berlin/Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen-Anhalt und Thüringen ist der Nutzungsgrad gering.

<b>Bundesland</b>	<b>Installierte Jahresleistung [GWh/a]</b>	<b>Nutzbare Jahresleistung [GWh/a]</b>	<b>Nutzungsgrad [%]</b>
Baden- Württemberg	4227	6294	67,2
Bayern	12315	14400	85,6
Berlin/Brandenburg	4	101	4
Hessen	206	815	25,3
Mecklenburg-Vorpommern	2	45	4,4
Niedersachsen	269	350	76,9
Nordrhein-Westfalen	377	700	53,9
Rheinland-Pfalz	975	1500	65
Saarland	166	169	98,2
Sachsen	75	320	23,4
Sachsen-Anhalt	24	362	6,6
Schleswig-Holstein	5	10	50
Thüringen	35	414	8,5
<b>Summe BRD</b>	<b>18680</b>	<b>25483</b>	<b>73,3</b>

Tab. 1 : Länderbezogene Übersicht der installierten und der nutzbaren Jahresleistung aus Wasserkraft sowie des Nutzungsgrads gemäß und Heimerl [2]

Wasserkraft ist letztendlich eine andere Form derjenigen Energie, die durch Turbulenz im Fluss vernichtet wird. Turbulenz wandelt die Energie des Flusses entlang der freien Fließstrecke primär in Wärme und Sedimenttransport. Wasserkraft wandelt die Energie des aufgestauten Flusses im Kraftwerk in Wärme und elektrischen Strom. Die erzielbare Leistung berechnet sich nach der Formel:

$$P = \eta \gamma h_N Q$$

wobei :	P	Leistung [kW]
	$\eta$	Wirkungsgrad [-]
	$\gamma$	Wichte = 9,81 [kN/m <sup>3</sup> ]
	$h_N$	Nettofallhöhe [m]
	Q	Abfluss [m <sup>3</sup> /s]

Die Fallhöhe richtet sich nach den lokalen Gefälleverhältnissen am Fluss und nach den Möglichkeiten Aufstau zu erzielen. Der Wirkungsgrad ist abhängig von der verwendeten Turbine. Wasserkraftanlagen haben einen Wirkungsgrad >0.8. Der maßgebliche Abfluss folgt in erster Linie aus den hydrologischen Gegebenheiten. Er schwankt i.d.R. stark. Folglich kann die Turbine nicht immer ihre Nennleistung erzielen. Für die Berechnung des Jahresarbeitsvermögens der Anlage ist daher eine Leistungsberechnung erforderlich. Hierbei wird die lokale Abflussdauerlinie und die Turbinenkennlinie einbezogen.

Gleichen Wirkungsgrad vorausgesetzt existiert theoretisch Nutzungsäquivalenz zwischen einer Kraftwerkskette mit sehr vielen Staustufen und einer einzigen großen Staustufe. In der Praxis erlaubt diese Eigenschaft eine optimale Anpassung der Planung an die örtlichen Gegebenheiten und führt so zu variierenden Fallhöhen innerhalb einer Kraftwerkskette.

Die Ausbaudichte  $n_D = l_S / l_A$  einer Kraftwerkskette richtet sich nach den örtlichen Gegebenheiten. Optimal für die Stromerzeugung ist ein durchgehender Ausbau mit  $n_D = 1$  entsprechend Abbildung 1. Wenn im Fluss starker Sedimenttransport stattfindet, ist eine Ausbaudichte  $n_D < 1$  ratsam. Durch Erhaltung von Flussabschnitten mit freier Fließstrecke kann einer Reduzierung der wirksamen Fallhöhe in Folge Verlandung entgegengewirkt werden.

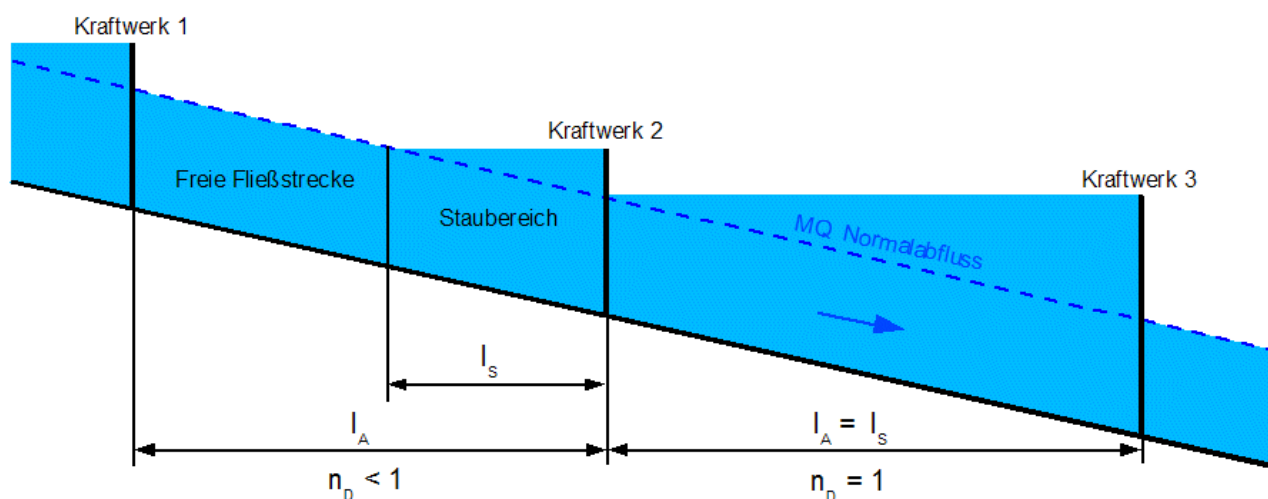


Abb. 1 : Kraftwerkskette

Aus dem bisher gesagten wird deutlich, dass eine genaue Berechnung eine anlagenbezogene Analyse erfordert. Eine Erfassung aller Wasserkraftanlagen liegt aber in Deutschland bisher nur teilweise vor. Insbesondere die Feststellung der Leistung kleiner Wasserkraftanlagen gestaltet sich durch ihre Vielzahl und dem weitgehenden Fehlen amtlicher Kataster (Ausnahme Bayern) als schwierig.

Daher wird hier ein vereinfachtes Verfahren zur flussgebietsbezogenen Berechnung der Wasserkraftpotenziale vorgeschlagen. Hierdurch können ohne aufwändige Empirie nützliche Kennzahlen mit ausreichender Genauigkeit für Groß- und Kleinwasserkraftanlagen berechnet werden.

## Beschreibung

Der Rechengang ist bewusst einfach gestaltet. Die Topologie des betrachteten Flussgebiets wird idealisiert. Ausgehend vom Hauptgewässer mit der Ordnung 0 verzweigen symmetrisch weitere Flussarme, welche wiederum von kleineren Nebengewässern gespeist werden können. In Abbildung 2 ist beispielhaft eine Flusstopologie mit den Ordnungszahlen 0, 1 und 2 und den jeweiligen Teilungen  $n^{(0)}=2$ ,  $n^{(1)}=2$  und  $n^{(2)}=1$  dargestellt. Eine Verzweigung über die Ordnungszahl 3 hinaus ist i.d.R. nicht sinnvoll, weil die Abflüsse auf der untersten Ebene (Ordnungszahl $>3$ ), dann zu gering werden um eine wirtschaftliche Wasserkraftnutzung zu erlauben ( $Q < \text{ca. } 0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

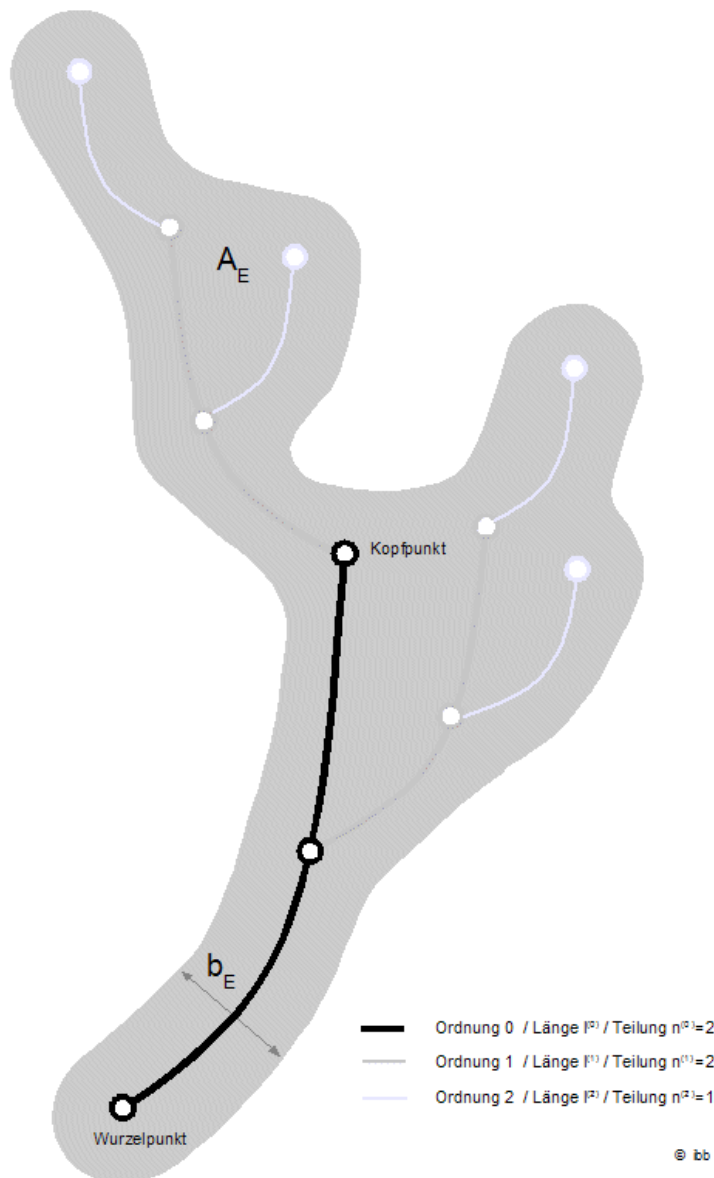


Abb. 2 : Idealisierte Flusstopologie

Die Flusstopologie wird über die Ordnungszahlen  $i$ , die zugeordneten Teilungszahlen  $n^{(i)}$  und die zugeordneten Flusssegmentlängen  $l^{(i)}$  definiert. Am Wurzelpunkt ist der mittlere Jahresabfluss  $MQ$  vorzugeben. Wenn ein Flussabschnitt betrachtet wird ist auch am Kopfpunkt des Hauptgewässers der mittlere Abfluss vorzugeben. Das Flussniveau an Wurzelpunkt und Kopfpunkt legt über

wählbare Ansatzfunktionen die Sohlenhöhen im gesamten Gebiet fest. Derzeit ist eine exponentiell ansteigende und eine lineare Ansatzfunktion wählbar. Sprunghafte Anstiege sind nicht vorgesehen. Die Anwendbarkeit des Verfahrens beschränkt sich daher auf den Talraum. Die Abflussverteilung geschieht durch segmentweise Rückrechnung unter Verwendung der Einflussbreite  $b_E$ . Die Einflussbreite ergibt sich aus dem Zusammenhang  $b_E = l_{\text{tot}} / A_E$ . Wobei  $A_E$  die Fläche des Einzugsgebiets und  $l_{\text{tot}}$  die Summe aller Flussegmentlängen ist. Zur Kontrolle kann der mittlere Jahresniederschlag eingegeben werden. Der Abflussbeiwert kann in diesem Fall unter Berücksichtigung der Einzugsgebietsfläche und dem mittleren Abfluss MQ berechnet werden. Die Berechnungsnahmen sind richtig gewählt, wenn der Abflussbeiwert übliche Werte annimmt. Die potentielle Leistung kann nun mit Hilfe der vorliegenden Abfluss- und Sohlenhöhenverteilung berechnet werden. Die Werte werden ordnungsweise akkumuliert und ausgegeben. Die potentielle Leistung kann wegen Verlusten und anderer allgemeiner Einschränkungen nie vollständig erzielt werden. Die tatsächlich nutzbare Leistung lässt sich näherungsweise ermitteln, wenn die Verluste aus Reibung, die mögliche Ausbaudichte und der Dauernutzungsgrad in die Berechnung einbezogen werden. Der Dauernutzungsgrad wird aus einem Leistungsplan für das jeweilige Kraftwerk ermittelt. Es empfiehlt sich einheitliche Werte zu verwenden, die sich an Angaben zu vorhandenen Anlagen orientieren.

Für die Berechnung werden die folgenden vereinfachenden Annahmen getroffen :

- Betrachtung für ein Jahr
- Flussgebietsweiser konstanter Niederschlag (Blockregen)
- Symmetrie der Flusstopologie
- Gleichartige Sohlenentwicklung
- Ordnungsweise gleich große Flussegmente
- Ordnungsweise gleich große Stauhöhen
- Ordnungsweise gleich große Ausbaudichte
- Ordnungsweise gleich großer Wirkungsgrad
- Ordnungsweise gleich großer Dauernutzungsgrad
- Vereinfachte Berechnung der Verlusthöhen

Es werden ausschließlich leicht verfügbare Daten verwendet. Diese sind im Wesentlichen:

- Flusslängen, ordnungsbezogen
- Anzahl der Verzweigungen, ordnungsbezogen
- Wirkungsgrad, ordnungsbezogen
- Ausbaudichte, ordnungsbezogen
- Dauerausnutzungsgrad, ordnungsbezogen
- Einzugsgebietsgröße
- Mittlerer Abfluss MQ am Wurzelpunkt und ggf. am Kopfpunkt
- Jahresniederschlag
- Flussniveau am Wurzel- und Kopfpunkt
- Strickler-Rauheit

Die Berechnung erfolgt in drei Verfahrensschritte:

- Ermittlung hydrologischer und geometrischer Vorwerte
- Ermittlung der Flusstopologie und deren Belegung mit zugeordneten Werten (Sohlenhöhen, Abflüsse, Verlusthöhen)
- Ordnungsweise Akkumulation von potentieller und nutzbarer Leistung/Arbeitsvermögen

## Beispiele

Um die Allgemeingültigkeit des Ansatzes zu prüfen, werden nachfolgend Beispiele aus dem alpinen Vorland, der Mittelgebirgsregion und der Küstenregion behandelt.

Ausgewählt wurden,

- das Einzugsgebiet der Salzach
- das Saarland und
- Mecklenburg-Vorpommern

### Salzach

Die Salzach ist der größte Zufluss des Inns. Sie entspringt in den Kitzbühler Alpen und mündet nach 225 Kilometern bei Braunau in den Inn. Hierbei durchläuft sie einen Höhenunterschied von nahezu 2000 m. Wegen des großen Gefälles und dem hohen mittleren Abfluss von  $MQ=251 \text{ m}^3/\text{s}$  wird die Salzach intensiv zur Stromerzeugung genutzt. Der derzeitige Ausbau der Wasserkraft an der Salzach ist in Tabelle 2 zusammengestellt. Abbildung 3 enthält eine Übersichtskarte des Einzugsgebiets der Salzach. Der Oberlauf der Salzach liegt im hochalpinen Bereich. Einige Bäche, die der Salzach zufließen, können zur Speisung von Hochdruckwasserkraftwerken genutzt werden. Das bekannteste Kraftwerk dieses Typs ist das Kraftwerk Kaprun. Die Leistung von Hochdruckanlagen ( $>100\text{m}$  Nettofallhöhe) kann wegen der eingangs erwähnten Beschränkung auf den Talraum nicht berücksichtigt werden. In Tabelle 2 sind die Flusskraftwerke im Einzugsgebiet der Salzach inklusive ihrer installierten Leistung genannt. Die durchschnittliche Leistung der Kraftwerke beträgt etwa 13.500 MW. Das Kraftwerk Schwarzach kann hiervon abweichend mit 120.000 MW die neunfache Leistung produzieren, weil es sich hier nicht um ein klassisches Flusskraftwerk, sondern um ein Ausleitungskraftwerk handelt (Ausleitung nahe Högmoos).



Abb. 3 : Übersichtskarte, Einzugsgebiet Salzach

KW	Fluss	Ordnung	Leistung [kW]	Jahresleistung [MWh/a]	$h_N$ [m]	$Q_A$ [m <sup>3</sup> /s]
Urstein	Salzach	0	22700	120000	11,15	250
Hallein	Salzach	0	11700	61000	6,7	220
Gamp	Salzach	0	8580	53380	6,5	175
Werfen (projektiert)	Salzach	0	15500	76500	9	200
Kreuzbergmaut	Salzach	0	17700	80000	10,9	194
Bischofshofen	Salzach	0	16000	70200	9	202
Urreiting	Salzach	0	16500	76200	10,2	187
St. Johann	Salzach	0	16500	71200	10	190
St. Veit	Salzach	0	16500	67000	k.A.	k.A.

KW	Fluss	Ordnung	Leistung	Jahresleistung	$h_N$	$Q_A$
Wallenerau	Salzach	0	10000	38300	k.A.	k.A.
Wallenerau UW	Salzach	0	5100	20700	k.A.	k.A.
Schwarzach	Salzach	0	120000	482000	k.A.	k.A.
Zwischensumme			<b>276780</b>	<b>1216480</b>		
Rott	Saalach	1	5100	20700	k.A.	k.A.
Zwischensumme			5100	20700		
Wiestal 1	Wiestal	2	216	1190	5	5,5
Wiestal 2	Wiestal	2	28000	53200	80,5	39
Zwischensumme			28216	54390		
Eichetmühle	Almkanal	3	135	950	k.A.	6,2
Hammer	Mühlbach	3	105	650	3,5	4,4
Zwischensumme			240	1600		
Summe			<b>310336</b>	<b>1293170</b>		

Tab. 2 : Wasserkraftnutzung im Einzugsgebiet der Salzach (Quelle : Salzburg AG und Verbund AG, ohne Hochdruckanlagen > 100 m Fallhöhe  $\Delta h$ )

Die Genauigkeit der Berechnung wird maßgeblich durch die folgenden Vorgaben bestimmt:

- Einteilung der Flusstopologie mit Angabe der Flussegmentlängen
- Mittlerer Abfluss
- Höhenunterschied Wurzel-/Kopfpunkt
- Ausbaudichte
- Dauerausnutzungsgrad

Insbesondere die Einteilung der Flusstopologie erfordert eine eingehendere Studie der Gegebenheiten. Sie sollte so gewählt werden, dass die gemessenen und berechneten Abflüsse entlang des Hauptgewässers (Ordnungszahl 0) möglichst gut übereinstimmt. Dies gelingt, wenn die Anzahl der Nebengewässer mit Ordnungszahl 1 gut gewählt ist. Es ist meist sinnvoll den Oberlauf des Hauptgewässers als Nebengewässer zu behandeln. Hier wurden 4 Nebengewässer der Salzach angesetzt:

- Saalach
- Lammer
- Gasteiner Ache (summarisch für die angrenzenden Bergbäche)
- Obere Salzach

Da in der Salzach erheblicher Geschiebetransport stattfindet, muss die Ausbaudichte  $n_D < 1$  sein. Hier wurde der konservative Wert  $n_D = 0,5$  gewählt. Die gewählten ordnungsweisen Parametersetzungen des Berechnungsbeispiels Salzach sind in Tabelle 3 enthalten.



Ordnung	0	1	2	3
Teilung des Flussegmentes	4	3	2	1
Flussarmlänge [km]	165	60	40	20
Staustufenhöhe [m]	10	7	6	3
Wirkungsgrad [-]	0,88	0,86	0,84	0,8
Dauerausnutzungsgrad [-]	0,55	0,5	0,45	0,4

Tab. 3 : Anzahl der Salzach Nebenflüsse, Flussarmlänge, Staustufenhöhe, Wirkungsgrad und Dauerausnutzungsgrad gemäß ordnungsweiser Klassifizierung

Ordnung	0	1	2	3
Potentielle Leistung [kW]	666006	334501	186573	35460
Potentielles Arbeitsvermögen [MWh/a]	5754295	2890091	1611991	306378
Nutzbare Leistung [kW]	284992	141720	77837	14147
Nutzbare Arbeitsvermögen [MWh/a]	<b>1354282</b>	612233	302630	48895
Anzahl der Kraftwerke [-]	21	58	151	189
Mittlere nutzbare Kraftwerksleistung [kW/Anlage]	13571	2422	515	74
Anteil am nutzbaren Gesamtarbeitsvermögen [%]	58,4	26,4	13,1	2,1

Tab. 4 : Rechnerische Wasserkraftpotenziale, Anzahl und Leistung möglicher Kraftwerke sowie prozentuale Anteile gemäß ordnungsweiser Akkumulation, EG Salzach

Die Berechnungsergebnisse können verschiedentlich mit dem vorliegenden Bestand (Tabelle 2) verglichen werden. Zunächst kann das nutzbare Arbeitsvermögen in der Salzach geprüft werden. Gemäß Tabelle 2 wird im Bestand in der Salzach eine Strommenge von 1.216.480 MWh/a erzeugt. Rechnerisch ergibt sich eine etwas höhere Stromerzeugung von 1.354.282 MWh/a. D.h. rechnerisch ist in der Salzach noch ein Restpotenzial von ein bis zwei Kraftwerkseinheiten vorhanden. Tatsächlich sollen im Unterlauf der Salzach bei Flusskilometer 33,8 und 39,4 zwei neue Kraftwerke mit 100.000 MWh/a gebaut werden. Weiterhin lassen sich Anzahl der Kraftwerke und deren mittlere Leistung prüfen. Gemäß Tabelle 2 existieren 12 Kraftwerke oder sind fest projektiert.

Das Kraftwerk Schwarzach muss auf Grund seiner Besonderheit 9-fach gewertet werden. Wenn man dies berücksichtigt ist die rechnerisch ermittelte Anzahl von 21 Kraftwerkseinheiten nur geringfügig und zudem noch wohl begründet abweichend vom Bestand. Die mittlere Leistung der Kraftwerke in der Salzach ist im Bestand und rechnerisch in etwa 13.500 kW.

Der rechnerische Anteil an Kleinwasserkraftanlagen < 1 MW Leistung beträgt im Einzugsgebiet der Salzach 26 %.

Die Salzach ist nach Ausführung der geplanten neuen Kraftwerke in etwa vollausgebaut – vorausgesetzt die Ausbaudichte von 0,5 muss eingehalten werden. Wenn auch Ausbaudichten > 0,5 möglich sind, dann stehen in der Salzach noch weitere Wasserkraftpotenziale zur Verfügung. Der Nutzungsgrad in den Zuflüssen zur Salzach lässt sich mangels ausreichender Kenntnis über Anzahl und Leistung der Kleinwasserkraft nicht prüfen.

### Saarland

Das Saarland ist -abgesehen von den Stadtstaaten- flächenmäßig das kleinste Bundesland. Abbildung 4 zeigt eine Übersichtskarte des Saarlands. Es liegt in der Mittelgebirgsregion und hat von allen Bundesländern den höchsten Nutzungsgrad der Wasserkraft. Es ist daher hier zur Überprüfung der Berechnung besonders geeignet.

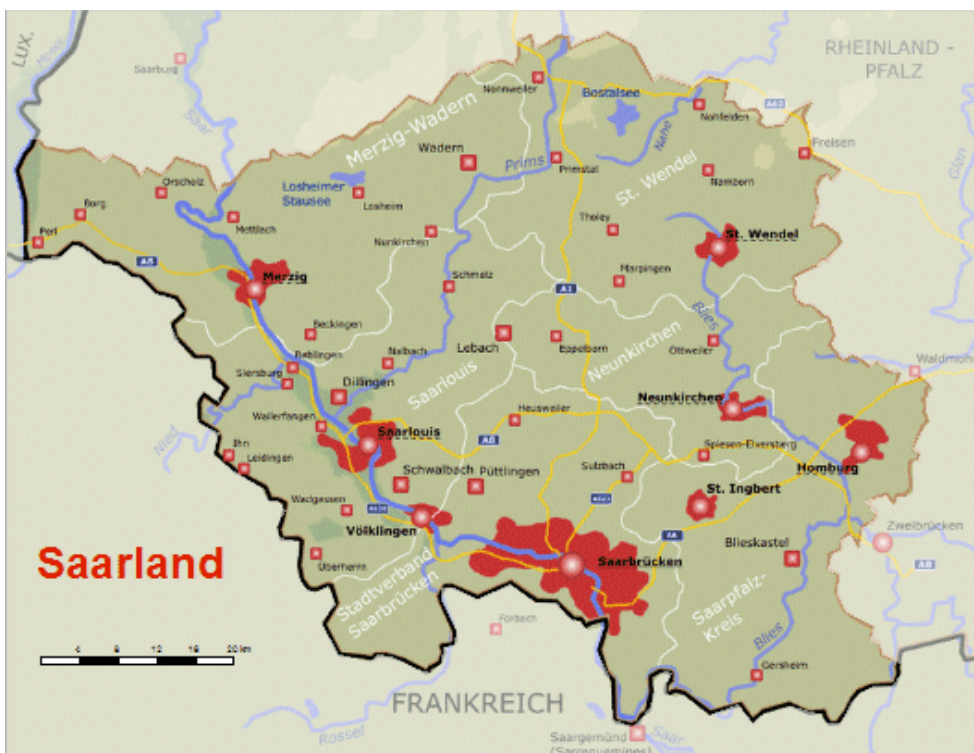


Abb. 4 : Übersichtskarte, Einzugsgebiete Saarland (Quelle Wikipedia, erstellt von Roger Zenner)

Die rechnerischen Vorgaben werden nachfolgend nicht mehr detailliert notiert. Berücksichtigt werden neben dem Hauptgewässer Saar noch deren Zuflüsse

- Nied
- Prims
- Blies

Die rechnerische Ausbaudichte beträgt  $n_D = 1$ .

Tabelle 5 zeigt die wesentlichen Ergebnisse.

Ordnung	0	1	2	3
Vorhandenes Arbeitsvermögen [MWh/a]	302191	127320	57857	10310
Nutzbares Arbeitsvermögen [MWh/a]	133439	34985	14135	2177
Anteil am nutzbaren Gesamtarbeitsvermögen [%]	72,2	18,9	7,7	1,2

Tab. 5 : Rechnerische Wasserkraftpotenziale sowie prozentuale Anteile gemäß ordnungsweiser Akkumulation, Saarland

Der Vergleich des nutzbaren Arbeitsvermögens mit den Angaben von Heimerl [2] zeigt eine gute Übereinstimmung. Während Heimerl 0,171 TWh/a nennt, ergeben sich rechnerisch 0,185 TWh/a .

### Mecklenburg-Vorpommern

Wegen der geringen Gradienten sind die Wasserkraftpotenziale in Mecklenburg-Vorpommern gering. Dennoch ist eine Betrachtung lohnend, da der Nutzungsgrad der Wasserkraft mit 4,4 % sehr gering ist. Die hydrologischen Gegebenheiten in Mecklenburg-Vorpommern sind komplex und in viele Einzugsgebiete gestückelt. Abbildung 5 enthält eine Übersichtskarte. Die folgenden 6 Einzugsgebiete wurden untersucht:

- Warnow
- Recknitz
- Peene
- Elde
- Sude
- Stepenitz

Wegen der geringen Größe wurde das EG Stepenitz nachfolgend vernachlässigt.



Abb. 5 : Übersichtskarte, Einzugsgebiete Mecklenburg-Vorpommern (Quelle Wikipedia)

Die rechnerische Ausbaudichte beträgt  $n_D = 1$ . Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 enthalten. Der Einfachheit halber wird nicht ordnungsweise ausgegeben, sondern nur summarisch das Gesamtarbeitsvermögen für das jeweilige Flusssystem angegeben.

Flussgebiet	Warnow	Recknitz	Peene	Elde	Sude	Gesamt
Gesamtes nutzbares Arbeitsvermögen [MWh/a]	9921	854	12181	17019	12424	52399

Tab. 6 : Rechnerische Wasserkraftpotenziale, Mecklenburg-Vorpommern

Auch hier kann wieder eine gute Übereinstimmung mit den Angaben von Heimerl festgestellt werden. Während Heimerl 0,05 TWh/a nennt, ergeben sich rechnerisch 0,052 TWh/a .

### Variation

Durch Variation der Eingabeparameter können Bandbreiten für die prozentualen Anteile an der ordnungsbezogenen Leistung berechnet werden. Diese sind in Tabelle 7 enthalten. Die Werte gelten für die exponentielle Entwicklung der Sohlenhöhen. Der Erwartungswert entspricht dem Mittelwert der ausgeführten Beispiele. Die oberen und unteren Grenzwerte folgen aus sinnvoller Variation der Eingangswerte. Form, Feinteiligkeit und Streckung des Einzugsgebiets beeinflussen die Verteilung der Potenziale maßgeblich. Bei langgestreckten Flüssen mit wenigen, relativ kurzen Zuflüssen wird Wasserkraft vorwiegend im Hauptgewässer erzeugt. Bei kompakten, feinteiligen Einzugsgebiets mit annähernd gleichen Flussegmentlängen verlagern sich die Potenziale vermehrt in die Nebengewässer.

Flussordnung	0	1	2	3
<b>Anteil am nutzbaren Gesamtarbeitsvermögen [%]</b>				
Untere Grenze	20	25	0	0
Erwartungswert	60	35	4	1
Obere Grenze	75	40	25	15

Tab. 7 : Bandbreiten und Mittelwerte für die prozentualen Anteile an der ordnungsbezogenen Leistung

### Zusammenfassung

Es sind deutschlandweit etwa 27 Prozent der vorhanden Wasserkraft ungenutzt. Länderbezogen kann dieser Wert auf 96 Prozent ansteigen. Die Erschließung der Wasserkraftpotenziale ist folglich wirtschaftlich sinnvoll. Insbesondere da die Wasserkraft im Unterschied zu Windkraft und Photovoltaik, kontinuierlich genutzt werden kann und daher die qualitativ hochwertigste erneuerbare Energie ist. Zur genaueren Erfassung des Nutzungsgrads wäre ein flächendeckendes umfassendes Kataster aller Wasserkraftanlagen sinnvoll.

Das vorgestellte Verfahren dient der Quantifizierung und Lokalisierung von Wasserkraftpotenzialen.

Es ist einfach in der Benutzung sowie für verschiedene Regionen und für verschiedene Stufen der Skalierung anwendbar. In drei Anwendungsbeispielen konnte eine gute Übereinstimmung mit Bestandsdaten und Angaben aus der Literatur erzielt werden. Es lassen sich zahlreiche Größen ermitteln wie zum Beispiel potentielle Leistung, potentielle Stromerzeugung, nutzbare Leistung, nutzbare Stromerzeugung, Anzahl der Kraftwerkseinheiten, mittlere Leistung pro Kraftwerkseinheit sowie der Anteil der Kleinwasserkraft < 1MW. Viele der Ergebnisse sind ordnungsbezogen, d.h. sie lassen sich einer Gewässerordnung zuweisen. Hierdurch ist eine grobe Lokalisierung möglich.

Erweiterungen für Wirtschaftlichkeitsberechnungen sind geplant. In Kombination mit einem geografischen Informationssystem kann die vorgestellte Methodik zur Identifizierung von Kraftwerksstandorten dienen.

## **Anschrift**

Dr.-Ing. Karl Broich  
Torriweg 45  
81247 München  
karl.broich@hydrosim.de

## **Literatur**

- [1] Horlacher, H.-B. (2003)  
„Globale Potenziale der Wasserkraft“,  
Externe Expertise für das WBGU-Hauptgutachten 2003  
"Welt im Wandel: Energiewende zur Nachhaltigkeit"  
Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag  
ISBN 3-540-40160-1
- [2] Heimerl, S. (2005)  
‘Wasserkraft in Deutschland – wie geht's weiter’  
2. Konferenz der Elektrizitätswirtschaft „Regenerative Energien - Mut zum Wandel“ des VDEW,  
Stuttgart, 6./7. April 2005
- [3] Haselbauer, M. ; Göhl C. (2010)  
‘Evaluation of feasible additional hydro potential in Bavaria/ Germany’,  
Hydro 2010 - Meeting Demands for a Changing World, International Conference and Exhibition  
Lisbon, Portugal ~ 27-29 September 2010.

## **Verzeichnis der Bildunterschriften**

- Abb. 1 : Kraftwerkskette  
Abb. 2 : Idealisierte Flusstopologie  
Abb. 3 : Übersichtskarte, Einzugsgebiet Salzach  
Abb. 4 : Übersichtskarte, Einzugsgebiete Saarland  
(Quelle Wikipedia, erstellt von Roger Zenner)  
Abb. 5 : Übersichtskarte, Einzugsgebiete Mecklenburg-Vorpommern  
(Quelle Wikipedia)