

Potentialermittlung für den Ausbau der Wasserkraftnutzung in Deutschland als Grundlage für die Entwicklung einer geeigneten Ausbaustrategie

Schlussbericht

Auftraggeber:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz
und Reaktorsicherheit

Bearbeitung:

Ingenieurbüro Floecksmühle
wasser umwelt energie



Universität Stuttgart
Institut für Strömungsmechanik und
Hydraulische Strömungsmaschinen



FICHTNER GmbH & Co. KG

Aachen, im September 2010

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

Inhalt

1 Einleitung	7
2 Bestehende Untersuchungen zum Wasserkraftpotential in Deutschland	10
3 Untersuchung der aktuellen Wasserkraftnutzung in Deutschland.....	16
3.1 Daten der Bundesnetzagentur.....	17
3.2 Wasserkraftanlagen der Leistung $P \geq 1$ MW	21
3.2.1 Kraftwerke an Hochrhein und Oberrhein mit deutschen und nicht-deutschen Anteilen	26
3.2.2 WKA in Grenzgewässern, die keine deutschen Anteile besitzen.....	26
3.3 Pumpspeicherkraft in Deutschland.....	28
3.3.1 Grundlagen.....	28
3.3.2 Anlagenbestand.....	29
3.4 Vergleichbarkeit der Jahresdaten aus 2007 mit langjährigen Mittelwerten	32
3.5 Zusammenfassung.....	33
3.5.1 Anzahl der Wasserkraftanlagen	33
3.5.2 Installierte Leistung	35
3.5.3 Jahresarbeit.....	37
4 Grundlage der Potentialermittlung.....	39
4.1 Potentialbegriffe	39
4.1.1 Abflussflächenpotential	39
4.1.2 Linienpotential.....	40
4.1.3 Linienleistung.....	40
4.1.4 Fallhöhenutzungsgrad	41
4.1.5 Effektives Linienpotential	46
4.1.6 Technisches Wasserkraftrohpotential	46
4.1.7 Technisches Potential.....	46
4.2 Ermittlung des Linienpotentials für Gebiete oder Gewässerstrecken	48
4.2.1 Datengrundlage für die Bearbeitung im GIS.....	48

Einleitung

4.2.2	Flächendeckende Ermittlung des Linienpotentials	51
4.2.3	Fehlerdiskussion.....	53
4.3	Potentialermittlung an Einzelstandorten	58
4.3.1	Abflussdaten.....	58
4.3.2	Erforderliche Daten zu Wasserkraftanlagen.....	60
4.3.3	Methode zur Ermittlung des zusätzlichen Ausbaupotentials an Standorten großer Wasserkraftanlagen	61
4.3.4	Potential durch Erhöhung des Anlagenwirkungsgrades	62
4.3.5	Potential durch Erhöhung des Ausbaugrades	65
4.3.6	Beispiel anhand eines fiktiven Kraftwerkes	66
5	Ermittlung des technischen Wasserkraftpotentials in Deutschland ..	70
5.1	Das Linienpotential in Deutschland	70
5.1.1	Das Linienpotential großer Grenzgewässer	74
5.1.2	Das für Deutschland verfügbare Linienpotential.....	77
5.1.3	Das Linienpotential großer deutscher Flüsse	77
5.2	Das effektive Linienpotential in Deutschland	80
5.3	Technisches Rohpotential für Deutschland	82
5.4	Technisches Wasserkraftpotential für Deutschland	84
6	Das zusätzliche technische Wasserkraftpotential in Deutschland.....	91
6.1	Das zusätzliche technische Potential für WKA mit $P \geq 1$ MW	91
6.1.1	Das Zubaupotential der großen Flüsse gemäß Standort-Methode	92
6.1.2	Potential durch Erhöhung des Anlagenwirkungsgrades	92
6.1.3	Potential durch Erhöhung des Ausbaugrades	93
6.1.4	Gesamtpotential für große Gewässer	94
6.1.5	Verlust durch Abgabe ökologischer Abflüsse	96
6.1.6	Leistungserhöhung durch Stauerhöhung	97
6.1.7	Umsetzung des Potentials aus technisch-ökonomischer Sicht.....	97
6.1.8	Derzeit nicht genutzte Standorte	99
6.1.9	Das aus dem Linienpotential ermittelte Zubaupotential der großen Flüsse.....	100
6.2	Das zusätzliche technische Potential für WKA mit $P < 1$ MW	101

6.3 Das gesamte technische Zubaupotential.....	102
7 Das realisierbare zusätzliche Wasserkraftpotential in Deutschland	104
7.1 Restriktionen für die Wasserkraftnutzung	105
7.1.1 EG-Wasserrahmenrichtlinie und Gewässerstruktur.....	105
7.1.2 NATURA-2000-Gebiete	107
7.1.3 Der Anteil von Stau- und Ausleitungsstrecken an Gewässern mit Wasserkraftnutzung.....	108
7.2 Technische Zubaupotentiale für große Gewässer und große WKA.....	110
7.2.1 Ausgewählte frei fließende Strecken.....	111
7.2.2 Restpotential der großen Gewässer.....	112
7.3 Technische Zubaupotentiale für mittelgroße und kleine Gewässer.....	115
7.4 Zeitliche Entwicklung und Kosten des Zu- und Ausbaus	118
7.4.1 Wasserkraftanlagen an großen Gewässern	119
7.4.2 Wasserkraftanlagen an mittelgroßen und kleinen Gewässern.....	120
8 Neue technische Konzepte für die Wasserkraft	122
8.1 Neue Techniken für die konventionelle Wasserkraft.....	122
8.1.1 Verbesserte Auslegungsmethoden und Einsatz neuer Turbinen.....	122
8.1.2 Optimierte Betriebsführung	123
8.1.3 Variable Drehzahl	124
8.1.4 Hochtemperatur-Supraleitende Generatoren	125
8.1.5 „Very-Low-Head“-Turbinen	127
8.1.6 Überströmtes Schachtkraftwerk	128
8.1.7 Wasserräder	129
8.2 Neue Technologien zur Nutzung der kinetischen Energie	130
8.2.1 Frei umströmte Turbinen.....	132
8.2.2 Ummantelte Turbinen	135
8.3 Weitere Technologien und oft verbreitete Irrtümer.....	136
8.4 Potentiale frei umströmter Turbinen und Wasserräder	137
9 Der Einfluss der Klimaveränderung auf die Wasserkraftnutzung	139
9.1 Zielsetzung und Aufgabenstellung	139
9.2 Klimaprojekte in Deutschland.....	139

Einleitung

9.2.1 GLOWA Danube.....	140
9.2.2 KLIWA	140
9.2.3 KLIWAS.....	140
9.2.4 WASKlim	141
9.3 Auswirkungen des Klimas auf die Wasserkraft.....	141
9.3.1 Temperatur und Niederschlag.....	141
9.3.2 Abflussverhalten	143
9.3.3 Änderung des Abflussverhaltens durch die Klimaveränderung	144
9.3.4 Auswirkungen der Abflussveränderungen auf die Wasserkraft	146
9.4 Beispielrechnung.....	147
9.4.1 Die Beispielanlage	147
9.4.2 Methodik.....	147
9.4.3 Berücksichtigung der Klimamodelle	148
9.4.4 Genutzte Abflussszenarien	151
9.4.5 Kenndaten der Wasserkraftanlage.....	152
9.4.6 Ergebnisse.....	153
9.4.7 Weitere Untersuchungsgebiete	155
9.5 Anpassung der Wasserkraftnutzung an den Klimawandel.....	157
10 Zusammenfassung	160
11 Begriffserläuterungen	166
11.1 Physikalisch-technische Größen und Einheiten.....	166
11.2 Definitionen in Zusammenhang mit der Wasserkraft	168
11.3 Abkürzungen.....	176
12 Literatur	180

1 Einleitung

Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt, 2030 einen Deckungsanteil der erneuerbaren Energien am gesamten Stromverbrauch von 45 % zu erreichen. Derzeit stellen sie insgesamt einen Anteil von etwa 14 % bereit, auf die Wasserkraft entfallen etwa 3,5 %. Da die Wasserkraft im Vergleich zu anderen regenerativen Energiequellen geringen kurzzeitigen Schwankungen unterliegt, kann sie Grundlaststrom bereitstellen. Pumpspeicher- und Speicherkraftwerke können sowohl bei Überkapazitäten Strom speichern als auch Spitzenlaststrom erzeugen. Sie liefern so einen wichtigen Beitrag zur Verstetigung der Stromeinspeisung aus erneuerbaren Energien.

Zahlreiche Untersuchungen zur Nutzung der Wasserkraft und zum zusätzlich ausbaubaren Potential sind in den letzten Jahrzehnten veröffentlicht worden. Sie wurden mit unterschiedlichen Methoden durchgeführt, beziehen sich auf einzelne Bundesländer oder Teilgebiete und bestimmte Größenklassen von Wasserkraftanlagen, sodass sie keine einheitliche Ausgangsbasis für eine Ausbaustrategie der Wasserkraft darstellen. Die vorliegende Studie zielt darauf ab, das Wasserkraftpotential mit Hilfe einer für ganz Deutschland einheitlichen Methode zu ermitteln. Diese geht vom vorhandenen Linienpotential aus.

In Deutschland produzieren 406 große Wasserkraftanlagen ($P_{\text{inst}} \geq 1 \text{ MW}$) eine mittlere Jahresarbeit von etwa 17,5 TWh/a (Regelarbeitsvermögen, bei Grenzkraftwerken nur deutscher Anteil). Sie stellen etwa 85 % der Stromerzeugung aus Wasserkraft bereit. Die Standorte sind bekannt und die Daten zu den Anlagen sind veröffentlicht bzw. konnten teilweise durch Recherche bei den Betreibern ermittelt werden. Für diese Standorte war es daher möglich, mit Hilfe einer Standortbetrachtung das Zubaupotential zu ermitteln. Die wenigen, derzeit noch nicht genutzten Standorte für größere Wasserkraftanlagen sind im Wesentlichen bekannt und konnten daher direkt beim Zubaupotenzial berücksichtigt werden.

In 11 Pumpspeicherkraftwerken wird derzeit nur durch den natürlichen Zufluss eine Jahresarbeit von 0,64 TWh erzeugt.

Einleitung

Kleinere Wasserkraftanlagen ($P_{\text{inst}} < 1 \text{ MW}$) erwirtschafteten in 2007 mit etwa 2,8 TWh einem Anteil von etwa 15 % an der Stromerzeugung aus Wasserkraft. Hier sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Die Zahl der kleinen Wasserkraftanlagen ist hoch.
- Angaben zu den Anlagen liegen nicht in einem gemeinsamen Register vor und wären nur mit erheblichem Rechercheaufwand zu ermitteln.
- Die Anlagen haben i.d.R. eine wichtige ökonomische Bedeutung für die Betreiber und verfügen zum großen Teil über *Altrechte* bzw. *Bewilligungen mit langen Gestattungszeiträumen*, die die historische Entwicklung der Standorte widerspiegeln.

Die Nutzung der Wasserkraft stellt immer einen Eingriff in die Gewässer dar. Die typischen ökologischen Auswirkungen sind:

- Aufstau des Gewässers mit Veränderung der Fließbedingungen im Staubereich,
- bei Ausleitungskraftwerken: Reduzierung der Wasserführung im Mutterbett,
- Unterbrechung der Durchgängigkeit für aquatische Organismen, Sedimente und organisches Material,
- Schädigungen von flussabwärts wandernden Fischen.

Diese Auswirkungen haben Einfluss auf den ökologischen Zustand der Gewässer und sind daher im Sinn der EG-Wasserrahmenrichtlinien (WRRL) relevant.

Die Erfassung des Ausbaupotentials ist daher sowohl für energiepolitische Fragestellungen als auch für die Umsetzung der EG-WRRL von hoher Bedeutung.

Bisherige Untersuchungen zum Wasserkraftpotential basierten im wesentlichen auf der Standortmethode, bei der die Ausbaumöglichkeiten an vorhandenen, teilweise auch neu zu errichtenden Stauanlagen betrachtet wurden (Kap. 2). Darüber hinaus gab es regionale Studien, die das gesamte natürlich vorhandene Potential untersucht haben wie z.B. für Hessen SIMON et al. (1983), Baden Württemberg HILDEBRAND & KERN (1989). Insbesondere in Preußen (KELLER, 1914) wurde bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts systematisch für das damalige preußische Staatsgebiet das natürliche und zusätzlich nutzbare Wasserkraftpotential aller dortigen Gewässer detailliert untersucht.

Der aktuell genutzte Bestand an Wasserkraftanlagen wurde innerhalb des Vorhabens aus unterschiedlichen Datenquellen ermittelt und in Kap. 3 zusammen gestellt.

Einleitung

Die Grundlage der Potentialermittlung stellt für alle deutschen Gewässer das Linienpotential dar. Die Bearbeitung wurde auf der Basis der heute digital vorliegenden Daten zur Geländemorphologie und zu den Abflusshöhen in einem Geografischen Informationssystem durchgeführt. Das Linienpotential ist ein theoretischer Wert, der u.a. durch Auswertung von Vergleichsgewässern auf das nutzbare Potential heruntergebrochen werden muss. Die entsprechende Vorgehensweise wird in Kap. 4 erläutert. Zusätzlich wird dort dargestellt, wie das Zubaupotential für bekannte Wasserkraftanlagen mit $P \geq 1$ MW durch eine detaillierte Standortbetrachtung ermittelt wurde.

Die Ergebnisse der Potentialermittlung (Kap. 5) führen im Vergleich mit der durch Wasserkraft aktuell erzeugten Energie zur Abschätzung des zusätzlich nutzbaren Potentials (Kap. 6). Dieses wird für große und kleine Wasserkraftanlagen differenziert dargestellt.

Nicht jedes technisch verfügbare Potential kann auch genutzt werden. Wichtige andere Nutzungsansprüche müssen berücksichtigt werden. Darüber hinaus spielt die ökonomische Realisierbarkeit eine entscheidende Rolle. Das realisierbare Zubaupotential wird in Kap. 7 abgeleitet.

Es werden immer wieder neue Ideen und Techniken für die Nutzung der Wasserkraft vorgestellt, die bei verringerten negativen Eingriffen in die Gewässerökologie einen nennenswerten Beitrag zur Energieerzeugung liefern und wirtschaftlich attraktiv sein sollen. Derartige Konzepte werden in Kap. 8 grundsätzlich diskutiert.

Schließlich werden mögliche Auswirkungen der Klimaveränderung auf die Erzeugung von Wasserkraftanlagen anhand einer Beispielanlage durch Berechnung mehrjähriger Ganglinien betrachtet und Anpassungsmaßnahmen bei Abflussveränderungen vorgestellt (Kap. 9).

Im Anschluss an die Zusammenfassung (Kap. 10) werden in Kap. 11 physikalische Größen und Einheiten definiert sowie Begriffe und Abkürzungen erläutert.

Ein zweiter Berichtsteil *Materialien* beinhaltet die Darstellung der methodischen Grundlagen und erarbeitete Detailergebnisse sowie einen Überblick über die vorhandene Literatur zur Wasserkraft und zum Wasserkraftpotential.

2

Bestehende Untersuchungen zum Wasserkraftpotential in Deutschland

Seit Beginn des 20. Jahrhunderts erschienen zahlreiche Veröffentlichungen zum Thema Wasserkraft und Wasserkraftpotential. Eine aktuelle Sammlung dieser Schriften wurde mit Hilfe von Recherchen innerhalb verschiedener (digitaler) Bibliotheken und Literaturdatenbanken erstellt. Das Ergebnis ist als Zitatensammlung im Berichtsteil *Materialien* tabellarisch aufgeführt.

Neben ca. 70 Veröffentlichungen mit allgemeinem Bezug zur Wasserkraft gibt es etwa 30 Literaturstellen, die sich auf die bundesweite Situation beziehen, und 117 Artikel und Studien, die die Wasserkraftnutzung in den deutschen Bundesländern behandeln.

Nachfolgend werden die Ergebnisse einiger repräsentativer Veröffentlichungen zum Bestand der Wasserkraftnutzung und zum Ausbaupotential zusammen gefasst. In den darauf folgenden Kapiteln werden Methoden und Ergebnisse des vorliegenden Vorhabens dargestellt.

Forschungsvorhaben IKARUS, Teilprojekt 4 „Umwandlungssektor“, Unterbereich d: Wasserkraftwerke (GIESECKE et al., 1992/1993)

Der Bericht beinhaltet das Ergebnis der Bestandsaufnahme für das Gebiet der alten Bundesländer für Wasserkraftanlagen (WKA) der Leistung $P \geq 1$ MW. Die WKA wurden mit ihren wichtigsten Eckdaten in einer Datenbank zusammen geführt und für die Bundesländer getrennt in Tabellen dargestellt.

Darüber hinaus wurde das Linienpotential der wichtigsten Flussläufe in den fünf ostdeutschen Bundesländern ermittelt. Die Ergebnisse der Untersuchung werden im Berichtsteil *Materialien* detailliert erläutert und mit den Ergebnissen der eigenen Ermittlung sowie der Preußenstudie (KELLER, 1914) verglichen.

Innerhalb des IKARUS-Projektes wurden verschiedene Potentialstudien gesichtet, die für die alten Bundesländer ein technisch realisierbares Gesamtpotential von 20,75 TWh (BMFT Programmstudie, 1976) bis zu 30,73 TWh (DIW/ISI, 1984) angeben. Die Vorhersagen mit dem geringeren Werten wurden innerhalb des Projektes unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und ökologischer Zielsetzungen als realistischer eingestuft.

EEG Erfahrungsbericht 2007 (BMU, 2007; STAIB et al., 2007)

Im Erfahrungsbericht 2007 zum Erneuerbaren-Energien-Gesetz (EEG) (BMU 2007) wurden Daten zum Stand der Nutzung der Wasserkraft veröffentlicht, die auf bestehenden Datensammlungen, die den Autoren zur Verfügung standen, und auf Statistiken sowie Gesprächen mit Verbänden und Branchenkennern basieren. Zu den Daten der Wasserkraftanlagen mit $P < 1$ MW erfolgte der Hinweis, dass es Unsicherheiten in der Datenlage gibt, da die gesichteten Unterlagen sehr heterogen und teilweise unvollständig gewesen seien.

Insgesamt wurde ein Bestand von 7.679 Anlagen ermittelt, von denen 7.325 Anlagen (ca. 95 %) eine installierte Leistung < 1 MW und 354 Anlagen (ca. 5 %) eine installierte Leistung ≥ 1 MW aufwiesen (Tab. 2-1).

Die daraus ermittelte Summe der installierten Leistung betrug 4.293 MW, wobei etwa 440 MW, also 10 %, auf 7.325 Anlagen der Leistung < 1 MW entfielen, 3.420 MW auf 155 Anlagen der Leistung > 5 MW.

Im Unterschied zum vorliegenden Vorhaben wurde in Tab. 2-1 die Leistung von Grenzkraftwerken, die nur anteilig in der Hand deutscher Betreiber liegen, zu 100 % berücksichtigt.

Tab. 2-1: Gesamtzahl der WKA für Deutschland, WKA an Grenzgewässern wurden zu 100 % berücksichtigt (BMU 2007)

Leistungsbereich der Wasserkraftanlagen	Anzahl der WKA	Installierte Leistung [MW]
$P \geq 1$ MW	354	3.853
$P < 1$ MW	7.325	440
Summe	7.679	4.293

Stromgewinnung aus regenerativer Wasserkraft in Deutschland - Überblick (WAGNER & RINDELHARDT, 2007)

In diesem Artikel wurden für die Jahre 1976 bis 2005 Daten zur Stromerzeugung aus Wasserkraftanlagen der EVU für einzelne Anlagenarten wie z.B. Laufwasserkraftwerke, Pumpspeicherwerke, Industrieanlagen etc. zusammen gestellt. Dabei wurde der KEW-Faktor angegeben, mit dessen Hilfe aus dem jeweiligen Jahresertrag (z.B. für ein trockenes Jahr) der Bezug zum Regelarbeitsvermögen hergestellt werden kann.

Bei der Aufteilung der Stromerzeugung auf die einzelnen Bundesländer ergeben sich im Vergleich zu STAIB et al. (2007) geringere Leistungen (auch für Bayern und Baden-Württemberg), da WAGNER & RINDELHARDT in ihren Ergebnissen nur die deutschen Anteile von Grenzkraftwerken berücksichtigt haben.

In Tab. 2-2 sind die Ergebnisse als Summe über die Bundesländer zusammen gefasst.

Tab. 2-2: Wasserkraftnutzung in Deutschland, Stand Anfang 2007 (Quelle: WAGNER & RINDELHARDT, 2007)

Leistungsbereich der Wasserkraftanlagen	Anzahl der WKA	Installierte Leis- tung [MW]	Regelarbeitsvermögen [GWh/a]
P ≥ 1 MW	405	3.428	17.297
P < 1 MW	6.884	531	2.285
Summe	7.289	3.959	19.582

Die Wasserkraftnutzung in den fünf neuen Bundesländern (RINDELHARDT, 2007)

Seit der deutschen Wiedervereinigung hat nach RINDELHARDT (2007) die Wasserkraftnutzung in den fünf ostdeutschen Bundesländern durch die Reaktivierung alter Standorte einen starken Aufschwung erfahren.

Insgesamt betrug die installierte Leistung in den fünf Bundesländern in 2005 126 MW, die Jahresarbeit 572 GWh. Gesamtzahl und installierte Leistung aller betriebenen WKA werden seit 2002 von den Landesämtern erfasst.

Bestehende Untersuchungen zum Wasserkraftpotential in Deutschland

Im Untersuchungsgebiet befindet sich nach RINDELHARDT (2007) das größte Zu-
baupotential von etwa 200 MW mit einer Jahresarbeit von 1 TWh an der Elbe. Da
zur Nutzung erhebliche Eingriffe erforderlich wären, die Elbe heute aber der einzige
„naturnahe“ Fluss unter den großen deutschen Gewässern darstelle, schätzt Rin-
delhardt die Nutzung des Elbe Potentials als nicht absehbar ein.

Weitere Potentiale konzentrieren sich an den Zuflüssen der Elbe. Dabei werden nur
wenige Anlagen die 1 MW-Grenze überschreiten.

RINDELHARDT (2007) hat die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen zum
Potential in Ostdeutschland zusammengestellt. In Abb. 2-1 sind die genannten mi-
nimalen und maximalen Potentialangaben dargestellt. Sie zeigen Abweichungen
von bis zu 400 %.

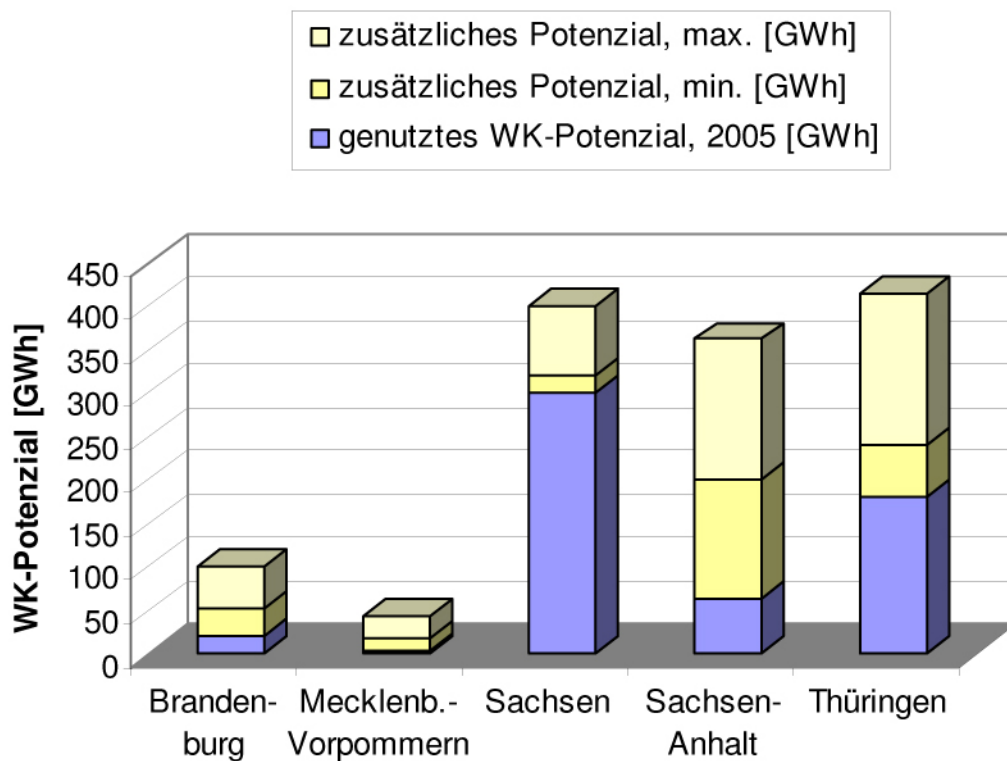


Abb. 2-1: Bestehendes und zukünftig nutzbares Wasserkraftpotential (Angabe der Jahresarbeit) in den fünf ostdeutschen Bundesländer, zusammengestellt aus unterschiedlichen Veröffentlichungen (nach RINDELHARDT, 2007)