



Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW

Teil 5 - Wasserkraft

LANUV-Fachbericht 40

Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW

Teil 5 - Wasserkraft

LANUV-Fachbericht 40

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Recklinghausen 2017

IMPRESSUM

Herausgeber	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) Leibnizstraße 10, 45659 Recklinghausen Telefon 02361 305-0 Telefax 02361 305-3215 E-Mail: poststelle@lanuv.nrw.de Der Teil 5 des Fachberichtes 40 entspricht im Wesentlichen dem Abschlussbericht einer Studie, die im Auftrag des LANUV erstellt wurde.
Bearbeitung	Ingenieurbüro Floecksmühle GmbH, Bachstraße 62-64, 52066 Aachen, Fichtner Water & Transportation GmbH, Sarweystraße 3, 70191 Stuttgart und Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH, Bachstraße 62-64, 52066 Aachen.
Autoren	Pia Anderer, Edith Massmann (Ingenieurbüro Floecksmühle GmbH), Dr. Stephan Heimerl, Dr. Beate Kohler (Fichtner Water & Transportation GmbH), Ulrich Wolf-Schumann, Birgit Schumann (Hydrotec Ingenieurgesellschaft für Wasser und Umwelt mbH)
Projektbetreuung/Redaktion	Niklas Raffalski, Christina Seidenstücker (LANUV)
Topografische Karten	Geobasisdaten der Kommunen und des Landes NRW © Geobasis NRW 2017
Fotos	Windenergie, Solarenergie, Bioenergie, Geothermie, Wasserkraft von links: ©Panthermedia (T. Knauer, J. Schmalenberger, D. Grasse), L. Thien (EnergieAgentur.NRW), B. Mehlig (LANUV)
ISSN	1864-3930 (Print), 2197-7690 (Internet), LANUV-Fachberichte
Informationsdienste	Informationen und Daten aus NRW zu Natur, Umwelt und Verbraucherschutz unter • www.lanuv.nrw.de Aktuelle Luftqualitätswerte zusätzlich im • WDR-Videotext
Bereitschaftsdienst	Nachrichtenbereitschaftszentrale des LANUV (24-Std.-Dienst) Telefon 0201 714488

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur unter Quellenangaben und Überlassung von Belegexemplaren nach vorheriger Zustimmung des Herausgebers gestattet. Die Verwendung für Werbezwecke ist grundsätzlich untersagt.

Vorwort

Sehr geehrte Leserin, sehr geehrter Leser,

die Energiewende schreitet voran, eine Energieversorgung auf Basis Erneuerbarer Energien erfordert jedoch weiterhin große Anstrengungen. Eine der Herausforderungen besteht zu Beispiel darin, den notwendigen Ausbau der Erneuerbaren Energien mit den Ansprüchen des Natur- und Umweltschutzes in Einklang zu bringen.

Die „Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW“ unterstützt die Energiewende in Nordrhein-Westfalen, indem die Potenziale der einzelnen Erneuerbaren Energien im Land dargestellt werden. Die Studien zu Wind- und Solarenergie, Biomasse und Geo-thermie haben bereits wichtige Erkenntnisse für den weiteren Ausbau Erneuerbarer Energien im Land geliefert. Mit der vorliegenden Studie zur Wasserkraft wurde nun der fünfte Teil der Fachberichtsserie abgeschlossen.

Die Wasserkraft besitzt gegenüber der Wind- oder Solarenergie den Vorteil, dass sie relativ konstant und unabhängig von Witterungsverhältnissen genutzt werden kann. Somit leistet sie als grundlastfähiger und regelbarer Erneuerbarer Energieträger einen wichtigen Beitrag im Transformationsprozess hin zu einer überwiegend regenerativen Stromproduktion.

Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass ein großer Teil des vorhandenen Gesamtpotenzials zur Wasserkraftnutzung in Nordrhein-Westfalen bereits genutzt wird. Dennoch existieren noch ungenutzte Potenziale, die insbesondere durch das Repowering älterer Anlagen und die Errichtung moderner Wasserkraftanlagen an neuen Standorten gehoben werden können. Dabei müssen jedoch auch stets die Belange der Gewässerökologie und des Fischschutzes beachtet werden, die beispielsweise aus der EU-Wasserrahmenrichtlinie und dem Landesfischereigesetz abgeleitet werden.

Zusammen mit den bereits veröffentlichten Potenzialstudien liefert der nun vorliegende Fachbericht wichtige Erkenntnisse für den weiteren Ausbau der Erneuerbaren Energien in Nordrhein-Westfalen. Mit dem fünften Baustein der „Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW“ wird damit der Überblick über Möglichkeiten und Grenzen regenerativer Energieerzeugung in unserem Land weiter komplettiert. Der Öffentlichkeit werden die Ergebnisse sowie weitere wichtige Datengrundlagen und Karten auch im Fachinformationssystem Energieatlas NRW (www.energieatlasnrw.de) zur Verfügung gestellt.

Ich bedanke mich bei allen Beteiligten, die an der Erstellung dieser Studie mit ihrem Fachwissen mitgearbeitet haben, und wünsche eine aufschlussreiche Lektüre.

Ihr



Dr. Thomas Delschen

Präsident des Landesamtes für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen

Inhalt

Vorwort.....	3
Abbildungsverzeichnis.....	7
Tabellenverzeichnis.....	9
Abkürzungsverzeichnis und Einheiten	10
Glossar.....	11
Zusammenfassung.....	17
1 Einleitung	21
2 Rechtliche Rahmenbedingungen.....	23
2.1 EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL)	24
2.2 Wasserhaushaltsgesetz (WHG).....	25
2.3 Gesetze und Regelungen auf Landesebene	25
2.3.1 Landeswassergesetz NRW	25
2.3.2 Landesfischereigesetz NRW	26
2.3.3 Erlasse	26
2.3.4 Landesnaturschutzgesetz und Biodiversitätsstrategie des Landes NRW.....	26
3 Methodik.....	28
3.1 Potenzialstudie Arnsberg	28
3.2 Daten- und Bearbeitungsgrundlagen	28
3.2.1 Datengrundlagen.....	28
3.2.2 Bearbeitungsgrundlagen	29
3.3 Potenzialermittlung für Querbauwerke und Wasserkraftanlagen.....	30
3.3.1 Ermittlung des technisch-theoretischen Potenzials.....	30
3.3.2 Ermittlung der Abflussdaten	33
3.3.3 Ökologische Abflüsse – Aufteilung der Abflüsse am Standort	34
3.3.4 Jahresvolllaststunden.....	38
3.3.5 Datengrundlagen Querbauwerke und Wasserkraftanlagen	39
3.3.6 Differenziertes Potenzial	40
3.4 Potenzialermittlung für Talsperren	44
4 Anlagenbestand in NRW	46
5 Ausbaupotenzial in NRW	51
5.1 Potenziale an Talsperren.....	53
5.2 Technisch-theoretisches Potenzial	54
5.3 Differenziertes Potenzial	56
5.3.1 Maximales Szenario	60
5.3.2 Minimales Szenario	61
5.4 Regionale Verteilung der Potenziale	62
5.5 CO ₂ -Einsparpotenzial	64
6 Sonstige Formen der Wasserkraftnutzung.....	65
6.1 Kinetische Strömungsmaschinen.....	65
6.1.1 Grundlagen	65
6.1.2 Typen kinetischer Strömungsmaschinen.....	67
6.1.3 Potenzialermittlung kinetischer Strömungsmaschinen.....	68
6.2 Kinetische Strömungsmaschinen: Potenziale in NRW	74
6.3 Wasserkraftnutzung an Infrastruktureinrichtungen.....	75
6.4 Wasserkraftnutzung an Infrastruktureinrichtungen: Potenziale in NRW	76

7	Wasserkraftnutzung und Klimawandel.....	77
7.1	Methodisches Vorgehen	77
7.1.1	Vorliegende Untersuchungen	77
7.1.2	Berechnungen der Jahresarbeit für verschiedene Klimaszenarien	79
7.1.3	Klimamodelle, Hydrologie und Abflussmodellierung	80
7.1.4	NRW-Beispielstandorte entsprechend der KLIWAS Szenarien	81
7.1.5	Modell-Wasserkraftanlagen.....	81
7.1.6	Vergleichsberechnungen der Jahresarbeit für verschiedene Standorte	82
7.2	Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserkraftpotenzial in NRW	84
7.2.1	KLIWAS-Szenarien Sieg und Wupper	84
7.2.2	KLAWE-Szenarien für kleinere Standorte in NRW	87
7.2.3	Ergebnisse der Klimabetrachtungen.....	89
8	Fazit	90
	Literaturverzeichnis	92
	Anhang.....	96
I	Datengrundlagen	96
I.i	Abflussdaten MQ, MNQ	97
I.ii	Selektion der Daten aus der Gewässerstrukturkartierung	98
II	Ermittlung des theoretisch verfügbaren, technischen Potenzials	100
II.i	Kontrollgruppe von Standorten aus der Potenzialstudie Arnsberg	103
II.ii	Jahresvolllaststunden gemäß verschiedener Quellen	104
II.iii	Dotation von Fischaufstiegsanlagen	109
II.iv	Szenarien für ökologische Abflüsse Q_{FAA} und Q_{min}	114
II.v	Mindestabfluss.....	118
III	Bestand an Wasserkraftanlagen in den Kreisen in NRW	119
IV	Ungenutzte differenzierte Potenziale in den Kreisen, Regierungsbezirken und Planungsregionen in NRW	121
V	Bestand an Wasserkraftanlagen und ungenutzte differenzierte Potenziale in den Gemeinden in NRW.....	124

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zielartengewässer für Aal und Lachs (Stand 9/2015).....	24
Abbildung 2: BoxPlots für monatliches mittleres MQ; Pegel Betzdorf / Sieg Quelle: LARSIM-ME (HYDROTEC 2013).....	33
Abbildung 3: Abflussaufteilung der ökologischen Abflüsse Q_{FAA} und Q_{Byp} sowie dem Ausbaudurchfluss Q_A bei einem Flusskraftwerk.....	34
Abbildung 4: Abflussaufteilung mit den ökologischen Abflüssen Q_{FAA} und Q_{Byp} sowie den Ausbaudurchflüssen $Q_{A,G}$, $Q_{A,K}$ bei der Ausleitung zu einer Wasserkraftanlage über einen Kanal	35
Abbildung 5: Zielartengewässer Lachs (Stand 9/2015).....	36
Abbildung 6: Wasserkraftanlagen in Nordrhein-Westfalen.....	47
Abbildung 7: Wasserkraftanlagen im Bestand: Installierte Leistung und Jahresarbeit an Talsperren und anderen Standorten	48
Abbildung 8: Wasserkraftanlagen im Bestand: Installierte Leistung und Jahresarbeit für verschiedene Leistungsklassen	48
Abbildung 9: Lage Wasserkraftanlagen im Bestand in NRW - Darstellung nach Leistungsklassen	49
Abbildung 10: Anzahl der Wasserkraftanlagen im Bestand nach Regierungsbezirken	50
Abbildung 11: Installierte Leistung und Jahresarbeit der Wasserkraftanlagen im Bestand nach Regierungsbezirken	50
Abbildung 12: Standorte von Querbauwerken in NRW mit $H \geq 0,8$ m und $MQ \geq 1$ m ³ /s.....	51
Abbildung 13: Talsperren in NRW (gemäß Definition ICOLD)	52
Abbildung 14: Standorte potenzieller Wasserkraftanlagen nach Leistungsklassen.....	54
Abbildung 15: Anzahl potenzieller Wasserkraftanlagen nach Leistungsklassen und Repoweringpotenzial (ohne Neubau in Schutzgebieten).....	55
Abbildung 16: Ungenutztes technisch-theoretisches Leistungspotenzial nach Leistungsklassen und Repoweringpotenzial (ohne Neubau in Schutzgebieten).....	55
Abbildung 17: Ungenutztes technisch-theoretisches Erzeugungspotenzial nach Leistungsklassen und Repoweringpotenzial (ohne Neubau in Schutzgebieten).....	56

Abbildung 18: Ungenutzte technisch-theoretische Leistungspotenziale nach Lage in Schutzgebieten.	57
Abbildung 19: Standorte potenzieller Wasserkraftanlagen nach Leistungsklassen (maximales Szenario)	60
Abbildung 20: Differenziertes Wasserkraftpotenzial nach Regierungsbezirken („maximales Szenario“)	62
Abbildung 21: Potenziell installierbare Leistung nach Gemeinden (differenziertes Potenzial, „maximales Szenario“)	63
Abbildung 22: Potenzieller Ertrag nach Gemeinden (differenziertes Potenzial, „maximales Szenario“)	63
Abbildung 23: Gewässerabschnitte mit $MNQ > 10 \text{ m}^3/\text{s}$	70
Abbildung 24: Gewässerabschnitte mit $MQ > 10 \text{ m}^3/\text{s}$	71
Abbildung 25: Gewässerstrecken mit Mindestwassertiefe und Mindestgeschwindigkeiten außerhalb von Ausleitungs- bzw. Rückstaubereichen	72
Abbildung 26: Ausgewählte Standorte für Berechnung mit KLAVE-Abflussreihen	83
Abbildung 27: WKA Wupper: Mittlere Volllaststunden	85
Abbildung 28: WKA Wupper: Änderung der Energieerzeugung	85
Abbildung 29: WKA Sieg: Mittlere Volllaststunden	86
Abbildung 30: WKA Sieg: Änderung der Energieerzeugung	86
Abbildung 31: Leistungsplan fiktive WKA Werre	87
Abbildung 32: Volllaststunden von 5 exemplarischen WKA für das KLAVE-Klimaszenario ..	88

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Europäische und bundesweite Richtlinien und Gesetze, die den Neubau, Repowering (oder auch Änderung) und Betrieb von Wasserkraftanlagen betreffen	23
Tabelle 2:	Mindestkriterien für die Potenzialuntersuchung.....	29
Tabelle 3:	Dotation von Fischaufstiegsanlagen für Zielarten der Fischgewässertypisierung	37
Tabelle 4:	Orientierungswerte für den Mindestabfluss $Q_{\min}$ (MUNLV 2005, 2009)	38
Tabelle 5:	Volllaststunden für $\varepsilon_2 = Q_A / (MQ - Q_{\text{öko}})$ nach Trendlinien für Dauerlinientypen nach MUNLV (2005)	39
Tabelle 6:	Einzelmaßnahmen und Einschätzung der Relevanz für die Potenzialermittlung	43
Tabelle 7:	Wasserkraftanlagen im Bestand: Kennzahlen	47
Tabelle 8:	Zahl der untersuchten Standorte mit $H \geq 0,8 \text{ m}$ und $MQ \geq 1 \text{ m}^3/\text{s}$	52
Tabelle 9:	Ungenutztes technisch-theoretisches und differenziertes Wasserkraftpotenzial in NRW	59
Tabelle 10:	Anforderungen zum Einsatz ausgewählter kinetischer Strömungsmaschinen	67
Tabelle 11:	Gewässerlängen mit Möglichkeiten der energetischen Nutzung durch Strömungskraftwerke.....	73
Tabelle 12:	Hydrologische Daten an den betrachteten Pegeln	81
Tabelle 13:	Anlagendaten der verwendeten Beispielanlagen	82
Tabelle 14:	Anlagendaten Beispielanlagen Berechnung „KLAVE“	84
Tabelle 15:	Änderung der Erzeugung von 5 WKA für KLAVE-Klimaszenario	88

Abkürzungsverzeichnis und Einheiten

BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur.
DB	Datenbank
EG	Europäische Gemeinschaft
EU-WRRL	Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. Kurz: Wasserrahmenrichtlinie
EU	Europäischen Union
FAA	Fischaufstiegsanlage
FFH	Fauna-Flora-Habitat
GIS	Geographisches Informationssystem
GW	Gigawatt, 1 GW = 1.000.000 kW
ICOLD	"International Commission On Large Dams", Internationale Kommission für große Talsperren
kW	Kilowatt, 1 kW = 1.000 W (Watt)
MQ	Mittelwasserabfluss
MW	Megawatt, 1 MW = 1.000 kW
NSG	Naturschutzgebiet
NRW	Nordrhein-Westfalen
PSW	Pumpspeicherkraftwerk
QBW	Querbauwerk
QUIS NRW	Querbauinformationssystem des Landes Nordrhein-Westfalen
TW	Terawatt, 1 TW = 1.000.000.000 kW
UFP	Umsetzungsfahrpläne
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
WKA	Wasserkraftanlage
WKSB	Wasserkörpersteckbriefe

Glossar

Begriff	Bedeutung
Arbeitsvermögen, Jahresarbeit [MWh/a], [GWh/a]	Das Arbeitsvermögen eines Laufwasser-Kraftwerks ist die in einer Zeitspanne erzeugbare elektrische Arbeit. Die Ermittlung des Arbeitsvermögens erfolgt üblicherweise für eine Berichtszeitspanne (zum Beispiel Monate, Halbjahre, Jahre). Das über die Zeitspanne von einem Jahr erzeugte Arbeitsvermögen ist die Jahresarbeit.
Ausbaufallhöhe [m]	Fallhöhe am Kraftwerk bei Ausbaudurchfluss
Ausbaugrad	Der Ausbaugrad charakterisiert die Ausbaugröße einer Wasserkraftanlage im Vergleich zum Gewässer: Verhältnis von Ausbaudurchfluss Q_A und Mittelwasserabfluss MQ (Q_A / MQ).
Ausbauleistung [kW], [MW]	Die Ausbauleistung eines Laufwasser-Kraftwerks ist die mit dem Ausbaudurchfluss bei der Kraftwerks-Ausbaufallhöhe erzielbare Leistung. Sie ist damit die höchste von der Gesamtanlage dauerhaft ausfahrbare elektrische Leistung unter optimalen wasserwirtschaftlichen Bedingungen.
Ausbauwassermenge, Ausbaudurchfluss [m³/s]	Die Ausbauwassermenge (auch Ausbaudurchfluss) bezeichnet die Menge an Wasser, die ein Kraftwerk maximal pro Sekunde durch seine Turbinen abführen und zur Stromerzeugung nutzen kann.
Ausleitungskraftwerk	Ein Ausleitungskraftwerk ist ein Wasserkraftwerk, das nicht im ursprünglichen Gewässerbett, sondern in einer Umleitungsstrecke bzw. einem Kanal liegt.
Ausleitungsstrecke	Ursprüngliches Gewässerbett (Mutterbett) eines Fließgewässers, aus dem Wasser für die Wasserkraftnutzung in einen Kanal / Umleitungsstrecke (auch Triebwerkskanal) ausgeleitet wird. Daher verfügt diese Strecke über einen verringerten Abfluss.
Ausleitungswehr	Ein Ausleitungswehr ist ein Querbauwerk, an dem Wasser in einen Kanal ausgeleitet wird. Dieser Kanal kann z. B. zu einer Wasserkraftanlage führen (Ausleitungskraftwerk), in der die Energie des Wassers genutzt wird.

Begriff	Bedeutung
Bypass	Als Bypass wird eine Maßnahme zur Umgehung einer Hauptströmung bezeichnet. Auch geschlossene oder offene Gewässer, Rohre oder Rinnen, über die Fische vom Oberwasser zum Unterwasser gelangen, und so ein Bauwerk umgehen können, werden Bypass genannt.
Dotation [l/s], [m³/s]	Die Dotation ist die Abflussmenge z. B. in einer Fischaufstiegsanlage, oder in einer Abstiegseinrichtung für Fische (Bypass), die für deren Betrieb zur Verfügung stehen muss.
Einzugsgebiet	Das Einzugsgebiet ist die Fläche eines Gebietes, aus dem das Wasser einem bestimmten Ort (Staustufe, Speicher) zufließt. Die Grenzen zwischen Einzugsgebieten sind Wasserscheiden.
Energie [kWh, MWh]	Der Begriff Energie kann physikalisch als die Menge von Arbeit definiert werden, die ein System verrichten kann. Auch wenn diese Formulierungen gebräuchlich sind, kann Energie weder erzeugt noch verbraucht, sondern nur in verschiedene Formen umgewandelt werden. Die Energie wird über eine bestimmte Zeitspanne gemessen (zum Beispiel eine Stunde, ein Jahr) Man unterscheidet bei der Wasserkraftnutzung zwischen • der potenziellen oder Lageenergie, die ein Wasserkörper aufgrund seiner Lage relativ zu einem Bezugsniveau aufweist, und die üblicherweise bei Wasserkraftanlagen an Wehrüberfällen genutzt wird, und • der kinetischen Energie, die dem fließenden Wasser aufgrund seiner Bewegung innewohnt und die durch Strömungskraftmaschinen genutzt werden kann.
Erzeugungspotenzial [MWh/a], [GWh/a]	siehe Potenzial
Fallhöhe [m]	Die Fallhöhe ist der Höhenunterschied zwischen dem Oberwasserspiegel und dem Unterwasserspiegel, gemessen als Pegeldifferenz.
Fischaufstiegsanlage (FAA)	Wird die flussaufwärts gerichtete Durchgängigkeit eines Gewässers für aquatische Organismen z. B. durch einen Absturz behindert, kann sie durch den Bau einer Fischaufstiegsanlage verbessert bzw. weitgehend wiederhergestellt werden. Zu den am meisten gewählten Bauformen gehören der Schlitzpass (Vertical Slot Pass) und das Raugerinne mit Beckenstrukturen.

Begriff	Bedeutung
Flusskraftwerk	Ein Flusskraftwerk ist ein Wasserkraftwerk, das mit seinen wesentlichen Anlageteilen im Flusslauf liegt. Bauweisen sind z. B. Pfeilerkraftwerk oder Buchtenkraftwerk.
Gesamtwirkungsgrad	Der Gesamtwirkungsgrad ist das Produkt der betrachteten Einzelwirkungsgrade (siehe technischer Gesamtwirkungsgrad).
Gewässerbewirtschaftung	Grundsätzliche Bestimmungen zur Bewirtschaftung der Gewässer sind im Wasserhaushaltsgesetz enthalten, durch das u. a. die EU-Wasserrahmenrichtlinie in nationales Recht umgesetzt wurde.
(Installierte) Leistung [kW], [MW]...	Leistung ist definiert als Arbeit pro Zeiteinheit. Die installierte Leistung beschreibt bei einem Kraftwerk die maximale Leistung (Nennleistung) der installierten Generatoren.
Laufwasserkraftwerk	Ein Laufwasserkraftwerk ist im Gegensatz zum Speicherkraftwerk ein Wasserkraftwerk, das den jeweilig anfallenden nutzbaren Zufluss unverzüglich und ohne Speicherung verwertet.
Leistungspotenzial [kW]	siehe Potenzial
Mindestabfluss [m³/s]	Der Mindestabfluss ($Q_{\min}$) ist die unterhalb eines Ausleitungswehres im natürlichen Flussbett (Mutterbett) verbleibende bzw. erforderliche Wassermenge.
Mittelwasserabfluss	Der Mittelwasserabfluss (MQ) ist der arithmetische Mittelwert der Abflüsse in einer bestimmten anzugebenden Zeitspanne.
Mutterbett	siehe Ausleitungsstrecke
Ökologische Abflüsse	Hiermit wird die Summe der Abflüsse an einem Standort bezeichnet, die für die Funktionsfähigkeit von Fischaufstiegsanlagen und Bypässen erforderlich sind. Dazu gehört auch der Mindestabfluss in der Ausleitungsstrecke.
Qualitätskomponente	Die in der WRRL definierten biologischen Qualitätskomponenten dienen der Beurteilung des ökologischen Zustands bzw. des ökologischen Potenzials der Gewässer. Zu den biologischen Qualitätskomponenten gehören u. a. die Fische.

Begriff	Bedeutung
Querbauwerk	Querbauwerke sind künstliche, quer in das Gewässerbett eingebrachte bauliche Strukturen, die die natürlichen Strömungsverhältnisse beeinflussen, zum Beispiel durch Rückstau. Typen von Querbauwerken sind z. B. Sohlenschwellen, Abstürze oder Talsperren. Neben diesen festen Querbauwerken werden auch bewegliche Bauwerke wie Schlauchwehre, Klappen- und Walzenwehre eingesetzt.
Potenzial	Der Begriff Potenzial bezeichnet vorhandene Möglichkeiten, im Sinne dieser Studie die Möglichkeit zur Nutzung der Wasserkraft. Es gibt verschiedene Potenzialbegriffe (zum Beispiel theoretisches Potenzial, machbares Potenzial), die unterschiedliche Faktoren berücksichtigen und daher auf unterschiedliche Realisierbarkeiten verweisen. Die Bezeichnung Potenzial wird dabei für eine Energie (Einheit z. B. Gigawattstunde GWh) verwendet, häufig wird aber auch eine Leistung (Einheit z. B. Kilowatt kW) mit diesem Begriff verbunden. In den Fällen, in denen eine genauere Spezifizierung erforderlich ist, wird für die Stromerzeugung der Begriff „Erzeugungspotenzial“ und für die Leistung die Bezeichnung „Leistungspotenzial“ verwendet.
Pumpspeicherkraftwerk	Ein Pumpspeicherkraftwerk ist ein Speicherkraftwerk, dessen Speicher ganz oder teilweise durch gepumptes Wasser gefüllt wird. Pumpspeicherkraftwerke dienen vor allem dazu, Stromverbrauchsschwankungen im Tagesablauf auszugleichen. In Zeiten, in denen ausreichend Strom im Netz verfügbar ist, wird Wasser vom Unterbecken mit Energieaufwand in das höher gelegene Oberbecken gepumpt. Wird hingegen Strom im Netz benötigt, strömt das Wasser aus dem Oberbecken wieder hinab und treibt dabei eine Turbine an, die wiederum Strom erzeugt. Eine wesentliche Anforderung für den Bau eines Pumpspeicherkraftwerks sind daher zwei große Wasserreservoirs auf unterschiedlich hohem Geländeniveau.
Repowering	Ersatz einzelner, bestehender Anlagenteile einer Wasserkraftanlage, sodass z. B. durch Erhöhung des Wirkungsgrades eine Erhöhung der Leistung erfolgt.
Standort	Als Standort einer Wasserkraftanlage wird in dieser Studie die Lage der räumlich und funktional zusammenhängenden baulichen Teile in oder direkt an einem Gewässer zur Nutzung der kinetischen Energie oder der Lageenergie des Wassers verstanden.

Begriff	Bedeutung
Speicherwasserkraftwerk	In einem Speicherwasserkraftwerk wird Wasser aus einem natürlichem Zufluss genutzt, das vorher für eine bestimmte Zeit in einem Wasserspeicher gelagert wurde.
Technisches Potenzial [kWh], [MWh], [GWh] Hier auch: Technisch-theoretisches Potenzial	siehe auch „Potenzial“ Das technische Wasserkraftpotenzial ergibt sich aus dem Wasserdargebot, der Fallhöhe und den technischen Wirkungsgraden der Maschinen, die das theoretisch vorhandene Wasserkraftpotenzial in nutzbare Energie (zum Beispiel Strom) umwandeln. Dieses Potenzial kann auch als „Technisch-theoretisches“ Potenzial bezeichnet werden, da seinem vollständigen Ausbau Restriktionen wie Verfügbarkeit von Fläche, naturschutzrechtliche Restriktionen oder wirtschaftliche Gegebenheiten entgegenstehen können.
Unterwasserspiegel	Als Unterwasserspiegel bezeichnet man den Wasserspiegel des Gewässers unterhalb einer baulichen Anlage im Gewässer, z. B. unterhalb eines Wehres oder einer Wasserkraftanlage.
Volllaststunden [h/a]	Jahresenergieerzeugung (kWh/a) geteilt durch die Ausbauleistung (kW).
Wasserdargebot [m³/s]	Wasserzufluss, der einer Wasserkraftanlage von Natur aus (seltener künstlich) zur Verfügung steht.
Wasserkraft	Die Wasserkraft ist eine regenerative Energieform, die die Energie des Wassers nutzt.
Wasserkraftwerk, Wasserkraftanlage	In einem Wasserkraftwerk wird die Energie des zuströmenden Wassers in elektrische Energie (Stromproduktion) umgewandelt, oder direkt als Antriebsenergie für Maschinen genutzt.

Zusammenfassung

Das Land Nordrhein-Westfalen verfolgt das Ziel, bis zum Jahr 2025 mindestens 30 % des Bruttostromverbrauchs aus Erneuerbaren Energien zu decken. Um dieses Ziel zu unterstützen, hat das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV) im Auftrag des Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes NRW (MKULNV) die Potenzialstudie Erneuerbare Energien durchgeführt. Der vorliegende Bericht beschreibt nach der Veröffentlichung der Teile Windkraft, Solarenergie, Biomasse-Energie und Geothermie die Ergebnisse für den Bereich Wasserkraft als fünften Baustein der Gesamtstudie.

Wasserkraftanlagen in Betrieb

Aktuell sind in NRW 427 Wasserkraftanlagen mit einer installierten Leistung von 189 MW in Betrieb. 93 MW bzw. etwa 50 % der gesamten Leistung ist an Talsperren installiert. Der gesamte Jahresertrag aller Anlagen betrug im Jahr 2015 533 GWh, was etwa 3 % der gesamten Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen in NRW entspricht (LANUV 2016a). Knapp 40 % der Stromerzeugung aus Wasserkraft wurde an Talsperren erzeugt (208 GWh).

Potenziale an Querbauwerken und Talsperren

An den 81 Talsperren des Landes wurden in den letzten Jahren fast alle wirtschaftlich erschließbaren Potenziale ausgebaut. Einzig für die Wuppertalsperre konnte ein noch nicht genutztes, jedoch als realisierbar eingestuftes Potenzial von ca. 1 MW bei einer potenziellen Jahresarbeit von 800 MWh/a ermittelt werden.

Schwerpunktmäßig wurden jedoch in dieser Studie das Potenzial zur Wasserkraftnutzung an bestehenden Querbauwerken in NRW sowie das Repoweringpotenzial an bereits in Betrieb befindlichen Wasserkraftanlagen untersucht. Potenzielle neue Standorte hatten dabei folgende Mindestkriterien zu erfüllen:

- Lage an einem bereits bestehendem Querbauwerk
- Mindestabsturzhöhe von 0,8 m
- Gewässerabschnitt mit einem Mittelabfluss $\geq 1 \text{ m}^3/\text{s}$.

Außerdem wurden für die Ermittlung des Potenzials die erforderlichen ökologischen Abflüsse für Fischaufstiegsanlagen und für Bypässe zum Fischabstieg berücksichtigt sowie an Ausleitungsstandorten für die Mindestwassermenge.

Im ersten Schritt wurden bisher ungenutzte technisch-theoretische Potenziale für Wasserkraftanlagen mit einer Mindestleistung von 10 kW ermittelt. Dieses Potenzial berücksichtigt keine weiteren ökologischen oder wirtschaftlichen Kriterien und wurde nicht näher hinsichtlich der Realisierbarkeit untersucht. Das ungenutzte technisch-theoretische Leistungspotenzial beträgt in NRW an 532 potenziellen Standorten für Wasserkraftanlagen 42,3 MW, was einer Jahresarbeit (Erzeugungspotenzial) von ca. 141,4 GWh/a entspricht. Etwa 23 % dieses Potenzials befinden sich an Standorten mit bereits bestehenden Wasserkraftanlagen und stellen somit das technisch-theoretische Repoweringpotenzial dar.

Um sich den tatsächlich machbaren Potenzialen anzunähern, wurden die Potenziale weiter differenziert und in Bezug auf folgende Rahmenbedingungen ausgewertet:

- Gemäß der Biodiversitätsstrategie des Landes sind neue Wasserkraftanlagen in Naturschutzgebieten, Nationalparks sowie in FFH- und Vogelschutzgebieten des Schutzgebietsnetzes NATURA 2000 nicht genehmigungsfähig. Neue Standorte innerhalb dieser Schutzgebiete wurden daher ausgeschlossen. Das Ausbaupotenzial von in Betrieb befindlichen Wasserkraftanlagen wurde jedoch erfasst.
- Es wurde davon ausgegangen, dass aus wirtschaftlichen und ökologischen Gründen, im Hinblick auf das Verhältnis von Nutzen (Gewinnung von Erneuerbarer Energie) und Aufwand zur Herstellung der Durchgängigkeit und Betrieb der Wasserkraftanlage, der Bau neuer Wasserkraftanlagen mit relativ geringen Leistungen eher unwahrscheinlich ist. Daher wurde eine untere Leistungsgrenze von 50 kW angesetzt.
- Potenzielle Standorte an Querbauwerken, für die in den Umsetzungsfahrplänen zur Erreichung der Ziele der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie explizit ein Rückbau zur Herstellung eines guten ökologischen Zustands vorgesehen ist, wurden nicht weiter betrachtet.

Das unter diesen Voraussetzungen ermittelte Potenzial wird im Rahmen dieser Studie als ungenutztes „**differenziertes Wasserkraftpotenzial**“ bezeichnet und für zwei Szenarien ausgewertet. Insgesamt konnten 128 Querbauwerke (davon 35 Repoweringstandorte) identifiziert werden, die diesen Vorgaben entsprechen. Das gesamte Leistungspotenzial dieser Standorte summiert sich in einem „**maximalem Szenario**“ auf 24,4 MW bei einem Erzeugungspotenzial von 107,9 GWh/a. Ausgehend von diesem Erzeugungspotenzial könnten etwa 34.700 Haushalte in NRW mit regenerativem Strom versorgt werden (der statistische Musterhaushalt verbraucht 3.107 kWh pro Jahr).

Um weitere nicht abschließend zu klärende Faktoren bei der Potenzialermittlung zu berücksichtigen, wurde auch ein „minimales Szenario“ ermittelt.

- In den Zielartengewässern für Aal und Lachs gelten besondere Schutzbestimmungen. Im minimalen Szenario wurde davon ausgegangen, dass der Erlass, der zurzeit keine neuen Wasserkraftanlagen in Zielartengewässern ermöglicht, weiterhin gilt. Die fachlichen Aussagen, die dem Erlass zugrunde liegen, werden derzeit in einem breit angelegten Monitoring untersucht.
- Potenzielle Standorte an Querbauwerken, für die in den Umsetzungsfahrplänen zur Europäischen Wasserrahmenrichtlinie Einzelmaßnahmen zur Durchgängigkeit festgelegt wurden, die die Durchgängigkeit der Gewässer betreffen, aber nicht eindeutig einen Rückbau fordern, wurden im minimalen Szenario ebenfalls ausgeschlossen.

Im „**minimalen Szenario**“ beträgt das Leistungspotenzial für Ausbau und Neubau von insgesamt 54 Wasserkraftanlagen 14,4 MW, das landesweite Erzeugungspotenzial liegt demnach bei 59,8 GWh/a. Damit könnten etwa 19.200 Haushalte in NRW mit regenerativem Strom versorgt werden.

Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserkraftnutzung

Eine Literaturlauswertung und exemplarische Simulationen für Beispielanlagen an verschiedenen Standorten in NRW führen für die nahe Zukunft (Zeitraum 2020 bis 2050) zu der Prognose, dass sich zu erwartende Klimaveränderungen in NRW auf die durchschnittliche Wasserkraftnutzung nur moderat auswirken werden. Für größere Wasserkraftanlagen sind in naher Zukunft im Mittel geringe Steigerungen der Energieerzeugung wahrscheinlich, während bei kleinen Anlagen mit leichten Erzeugungseinbußen gerechnet werden muss. In der fernen Zukunft 2070 bis 2100 sind bei allen untersuchten Anlagen überwiegend Erzeugungseinbußen wahrscheinlich. Im Einzelfall konnten hiervon allerdings auch Abweichungen ermittelt werden, da von einzelnen Modellen sowohl ein Zuwachs als auch eine Reduktion der Energieerzeugung berechnet wurde.

Nach den Beispielanalysen bewegen sich die Zu- und Abnahmen in einem Korridor, der zwar auch normalen hydrologischen Schwankungen entspricht, aber trotzdem die Rentabilität spürbar verschlechtern dürfte.

Potenziale an Infrastruktureinrichtungen

Für die grundsätzlich möglichen Einsatzbereiche der Wasserkraft an Infrastruktureinrichtungen ergab die Datenerhebung und –recherche, dass einige wenige Anlagen am Ablauf von Kläranlagen existieren, jedoch die Nutzung der Wasserkraft in Kanalnetzen aufgrund der besonderen Randbedingungen bis auf weiteres nicht möglich ist. Mögliche Potenziale in Brauchwasser- und Trinkwasserversorgungssystemen werden zum Teil seit Jahren genutzt, wie z. B. an den Kläranlagen Emschermündung und Bottrop. Zusätzliche Potenziale konnten nicht identifiziert werden.

Strömungskraftwerke

Auf der Basis der Einsatzgrenzen der derzeit verfügbaren kinetischen Strömungsmaschinen wurden für typische Einsatzkonfigurationen die Gewässerabschnitte ermittelt, in denen theoretisch eine Nutzung durch diese Maschinen möglich ist. Im Ergebnis wurde eine theoretisch installierbare Leistung von 3,9 MW abgeschätzt, mit der unter der optimistischen Annahme von 6.000 Vollaststunden eine Jahresenergieerzeugung von 23,4 GWh/a erzielt werden kann. Bei dieser Betrachtung konnten mögliche weitergehende Restriktionen (zum Beispiel Schifffahrt, ökologische Aspekte oder Freizeitnutzung) nicht vollständig berücksichtigen werden, es ist also davon auszugehen, dass das ermittelte Potenzial nicht komplett gehoben werden kann.

Fazit

Für Nordrhein-Westfalen ist das Gesamtpotenzial der Wasserkraft selbst bei Zugrundelegung des maximalen Szenarios mit rund 0,6 TWh/a deutlich geringer als die Potenziale der Windenergie mit 71 TWh/a (LANUV, 2012) und der Photovoltaik mit 72 TWh/a (LANUV, 2013a).

Dennoch gibt es Gründe, den Ausbau der bisher noch ungenutzten Wasserkraftpotenziale in Nordrhein-Westfalen zu unterstützen, insbesondere an potenziellen Standorten für besonders große Anlagen oder bei dem Repowering bestehender Anlagen. Die Technik der Wasserkraftnutzung ist ausgereift, besitzt relativ hohe Wirkungsgrade und kann je nach Standort eine gute Wirtschaftlichkeit erzielen. Zudem ermöglicht die meist relativ gleichmäßige Stromerzeugung von Wasserkraftanlagen im Gegensatz zur Wind- oder Solarenergie den Einsatz als Grundlastkraftwerke.

Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Nutzung der Wasserkraft in Gewässern Einfluss auf den Lebensraum der aquatischen Fauna hat. Im Spannungsverhältnis von Klimaschutz und Energiewende einerseits und den Ansprüchen des Gewässer- und Naturschutzes andererseits, gilt es daher stets, die unterschiedlichen Ziele und Interessen so weit wie möglich in Einklang zu bringen.

1 Einleitung

Im Bereich Klimaschutz hat sich die Landesregierung in Nordrhein-Westfalen ehrgeizige Ziele gesetzt: Die Treibhausgasemissionen im Land sollen bis zum Jahr 2020 um mindestens 25 % im Vergleich zum Jahr 1990 reduziert werden, bis 2050 sollen mindestens 80 % weniger Treibhausgase ausgestoßen werden. Diese Ziele wurden auch im Klimaschutzgesetz verankert, das 2013 vom nordrhein-westfälischen Landtag verabschiedet wurde.

Um den Ausbau der Erneuerbaren Energien zu unterstützen und zur Erreichung der Klimaschutzziele des Landes beizutragen, hat das Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz (MKULNV) das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) beauftragt, die „Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW“ durchzuführen. Im Rahmen dieser Studie (LANUV-Fachberichtsreihe 40) wurden seit 2012 Potenzialuntersuchungen zur Windenergie (Teil 1), zur Solarenergie (Teil 2), zur Biomasse (Teil 3) und zur Geothermie (Teil 4) veröffentlicht. Mit der Potenzialstudie Wasserkraft NRW wird nun der fünfte Baustein der Studie vorgelegt.

Die Wasserkraftnutzung, also die Umwandlung potenzieller oder kinetischer Energie des Wassers in mechanische Arbeit, spielt in der Geschichte des Menschen schon seit mehr als drei Jahrtausenden eine bedeutende Rolle. Schon frühe Zivilisationen in verschiedenen Regionen der Erde nutzen die Wasserkraft, zum Beispiel zur Bewässerung der Felder oder als Antriebsmittel für Arbeitsmaschinen. Im Mittelalter wurden Wasserräder zum Beispiel zum Mahlen von Getreide oder zum Betreiben großer Hämmer in Schmieden eingesetzt. Im 18. Jahrhundert liefen allein in Europa Schätzungen zufolge mehr als eine halbe Millionen Wasserräder (WEBSITE LEIFIPHYSIK). Ab 1825 wurden erstmals Wasserturbinen eingesetzt, die einen höheren Wirkungsgrad als Wasserräder aufweisen und die zum Betrieb der kurz darauf aufkommenden elektrischen Generatoren geeignet waren.

Auch heute noch ist die Wasserkraftnutzung eine wichtige Form der Energieerzeugung. So lag im Jahr 2013 der Anteil der Wasserkraft an der weltweiten Stromerzeugung bei 16 %, womit die Wasserkraftnutzung bei den bedeutendsten Formen der Stromproduktion hinter den fossilen Brennstoffen Kohle und Gas und noch vor der Kernenergie auf Rang drei liegt (WEBSITE WELTBANK). In Deutschland betrug der Anteil der Wasserkraft an der Bruttostromerzeugung im Jahr 2015 knapp 3 %.

Dabei kommt der Wasserkraft als regenerative Energieform auch vor dem Hintergrund des globalen Klimawandels und der sich daraus ergebenden Aufgabe des Klimaschutzes eine große Bedeutung zu. Im Vergleich zu anderen erneuerbaren Energieformen wie der Wind- oder Solarenergie steht die Wasserkraft dabei abgesehen von möglichen saisonalen Schwankungen relativ konstant und unabhängig vom Wetter zur Verfügung. Daher können Wasserkraftanlagen gleichmäßig Strom erzeugen und für die Grundlast genutzt werden. Durch die Regelbarkeit können sie außerdem eine wichtige Ausgleichsfunktion gegenüber den fluktuierenden Erneuerbaren Energien wie Wind- und Sonnenenergie übernehmen und damit zu einer sicheren Energieversorgung beitragen.

Die Nutzung der erneuerbaren Energieressource Wasserkraft erfordert jedoch auch die Berücksichtigung der Ansprüche der Gewässerökologie. Ziel der Umweltverwaltung des Landes Nordrhein-Westfalen ist es dabei, die Anforderungen des Klimaschutzes (Ausbau der Erneuerbaren Energien, Klimaschutzgesetz) mit den Anforderungen der Gewässerökologie und

des Naturschutzes (z. B. Fischschutz, Wasserrahmenrichtlinie) möglichst in Einklang zu bringen. Bis spätestens 2027 sollen alle Fließgewässer in Nordrhein-Westfalen den guten ökologischen Zustand bzw. das gute ökologische Potenzial erreichen (Zielerreichung 2015: 8 %)

Dabei war NRW das erste Bundesland, in dem zwischen 2000 und 2005 systematisch umfangreiche technische und ökologische Daten zu Querbauwerken und Wasserkraftanlagen erhoben und in einem Informationssystem (QUIS NRW) dargestellt wurden. Im Zeitraum von 2011 bis 2013 wurden im Zuge der Gewässerstrukturkartierung NRW Bauwerke an und in Gewässern auf Basis des QUIS-Datenbestandes nochmalig landesweit erfasst und die Ergebnisse auch als Datenbasis für die vorliegende Potenzialstudie genutzt. Seit Oktober 2016 liegt ein zusammengeführter Datensatz aus alten und neuen Bauwerksdaten vor, welcher von nun an durch die zuständigen Behörden laufend aktualisiert und in der Kartenanwendung des Fachinformationssystems ELWAS eingesehen werden kann. Dieses System stellt mit dem Auswertewerkzeug ELWAS-WEB ein elektronisches wasserwirtschaftliches Verbundsystem für die Wasserwirtschaftsverwaltung in NRW dar (<http://www.elwasweb.nrw.de>).

Im Jahr 2006 wurde bereits im Auftrag des Umweltministeriums eine Potenzialermittlung für die Wasserkraft in Nordrhein-Westfalen durchgeführt (ANDERER et al. 2007). Eine Überarbeitung im Rahmen der Potenzialstudie Erneuerbare Energien des LANUV wurde jedoch mittlerweile als erforderlich angesehen, da sich die rechtlichen Rahmenbedingungen geändert haben (z. B. Vergütungsregelungen im Erneuerbaren-Energien-Gesetz - EEG 2014) und darüber hinaus mögliche Veränderungen an den Standorten innerhalb der vorliegenden Studie berücksichtigt werden sollten.

In der vorliegenden Untersuchung „Potenzialstudie Wasserkraft NRW“ werden neben der Analyse des derzeitigen Bestandes an Wasserkraftanlagen die ungenutzten Potenziale an bestehenden Querbauwerken und Talsperren im Land sowie das Repoweringpotenzial an bereits bestehenden Wasserkraftanlagen untersucht und quantifiziert. Die Ergebnisse werden für Behörden sowie für Bürgerinnen und Bürger zusätzlich in digitaler Form im Energieatlas NRW (<http://www.energieatlas.nrw.de>) bereitgestellt.

In der Studie werden dabei zunächst die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Nutzung der Wasserkraft in NRW (Kapitel 2) und das methodische Vorgehen bei der Potenzialermittlung erläutert (Kapitel 3). In Kapitel 4 wird der Anlagenbestand im Land dargestellt, bevor in Kapitel 5 die Ergebnisse der zentralen Potenzialuntersuchung vorgestellt werden. Im Anschluss wird noch auf das Potenzial von weiteren Formern der Wasserkraftnutzung wie zum Beispiel kinetischen Strömungsmaschinen oder Wasserkraftanlagen an Infrastruktureinrichtung eingegangen (Kapitel 6). Abschließend werden die Auswirkungen des Klimawandels auf die Nutzung der Wasserkraft in Nordrhein-Westfalen untersucht (Kapitel 7).

2 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die Genehmigung von Wasserkraftanlagen ist durch gesetzliche Bestimmungen auf Bundes- und Landesebene geregelt. Europäische Richtlinien geben dabei Rahmenbedingungen vor, die bei der Gesetzgebung auf Bundes- und Landesebene eine konkrete Ausgestaltung erfahren. Die Gesetzgebung im Bereich Wasserhaushalt wurde in den letzten Jahren insbesondere durch die EU-Wasserrahmenrichtlinie geprägt. In Tabelle 1 sind wesentliche Richtlinien und Gesetze aufgeführt, die beim Bau von Wasserkraftanlagen zu berücksichtigen sind.

Tabelle 1: Europäische und bundesweite Richtlinien und Gesetze, die den Neubau, Repowering (oder auch Änderung) und Betrieb von Wasserkraftanlagen betreffen

Europäische Richtlinien	Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL)
	Fauna- Flora-Habitat Richtlinie (FFH-RL)
	Umweltverträglichkeitsprüfung Richtlinie (UVP-RL)
	EU-Aalverordnung (EU-Aal VO)
Bundesgesetze	Wasserhaushaltsgesetz (WHG)
	Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG)
	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung (UVPG)
	Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)
	Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)
	Umweltschadensgesetz (USchadG)
Landesgesetze und -regelungen	Landeswassergesetz (LWG)
	Landesfischereigesetz (LFischG) und Landesfischereiverordnung (LFischVO)
	Erlasse (MUNLV 2009, MKULNV 2014, MKULNV 2015)
	Richtlinie zur Förderung Erneuerbarer Energien (MKULNV 2014a)
	Landesnaturschutzgesetz (LNatSchG)
	Biodiversitätsstrategie NRW

2.1 EU-Wasserrahmenrichtlinie (EU-WRRL)

Die EU-Wasserrahmenrichtlinie trat am 22. Dezember 2000 in Kraft und wurde in den folgenden Jahren in nationales Recht umgesetzt. Die Umsetzung der WRRL in nationales Recht erfolgte durch die Neufassung des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) vom 19.08.2002.

Mit dieser Novelle wurde der Einstieg in eine grenzüberschreitende nachhaltige Gewässerbewirtschaftung rechtlich verankert, mit dem Ziel, dass die Gewässer innerhalb der Europäischen Union (EU) bis 2015 einen "guten Zustand" bzw. das „gute Potenzial“ erreichen. Dies gilt sowohl im Hinblick auf die Gewässerchemie als auch auf die Gewässerökologie, wozu auch die ungestörte longitudinale Durchgängigkeit (in Längsrichtung der Gewässer) für Gewässerorganismen und Sedimente zählt. Innerhalb der einzelnen Bundesländer oder auch Flussgebietsgemeinschaften wurden bis Ende 2009 zur Erreichung dieser Ziele Bewirtschaftungspläne und Maßnahmenprogramme erarbeitet. Inzwischen wurden der Bewirtschaftungsplan 2015 und das Maßnahmenprogramm für den Zeitraum bis 2021 verabschiedet.

In NRW wurde das Maßnahmenprogramm durch das Programm "Lebendige Gewässer" im Hinblick auf die Hydromorphologie und der Durchgängigkeit weiter ausgeführt und durch Umsetzungsfahrpläne (UFP) konkretisiert. So wurden im Bewirtschaftungsplan u. a. Zielartengewässer für Aal und Lachs ausgewiesen (Abbildung 1). Hier werden weitergehende Anforderungen an den Fischschutz und den Fischabstieg für die Zielarten Aal und Lachs gestellt (Kapitel 2.3), was bei der Ermittlung des Wasserkraftpotenzials in dieser Studie berücksichtigt wurde.

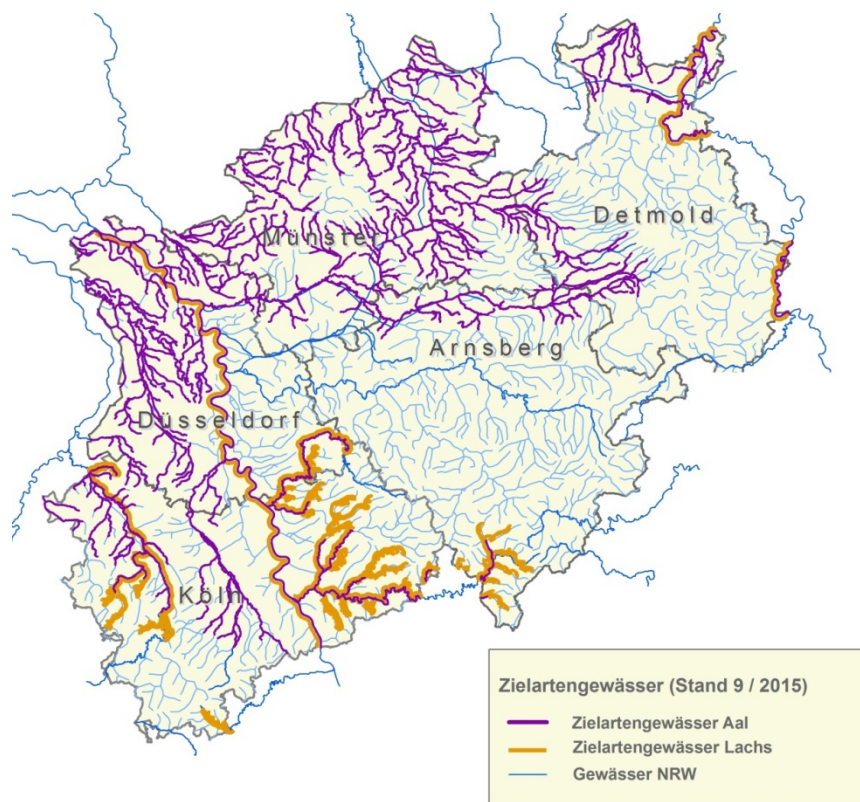


Abbildung 1: Zielartengewässer für Aal und Lachs (Stand 9/2015)

2.2 Wasserhaushaltsgesetz (WHG)

Das Wasserhaushaltsgesetz regelt die Bewirtschaftung der Gewässer. Relevant für die Wasserkraftnutzung sind hier die Bestimmungen, die den Schutz und die Nutzung von Oberflächengewässern betreffen. Der Ausbau und die Nutzung der Wasserkraft werden insbesondere in folgenden Paragraphen referenziert:

- § 27 WHG Verschlechterungsverbot
- § 33 WHG Mindestwasserführung
- § 34 WHG Durchgängigkeit oberirdischer Gewässer
- § 35 WHG Schutz der Fischpopulationen und Prüfung der Wasserkraftnutzung an bestehenden Querbauwerken

Dabei ist nach § 35 Absatz 3 WHG zu prüfen, ob an den Staustufen oder sonstigen Querverbauungen, die am 1. März 2010 bestanden und deren Rückbau zur Erreichung der Bewirtschaftungsziele nach Maßgabe der §§ 27 bis 31 auch langfristig nicht vorgesehen ist, eine Wasserkraftnutzung möglich ist.

Durch die konkurrierende Gesetzgebung im Wasserrecht haben die Bundesländer auch weiterhin die Befugnis zur Gesetzgebung. Das bedeutet, dass die Länder hier über eine Abweichungskompetenz verfügen.

2.3 Gesetze und Regelungen auf Landesebene

Für das Land NRW finden sich Regelungen, die die Genehmigung von Wasserkraftanlagen betreffen, in folgenden Gesetzen:

- Landeswassergesetz-NRW: Landeswassergesetz für das Land Nordrhein-Westfalen (LWG) in der Fassung vom 08.07.2016
- Landesfischereigesetz NRW: Landesfischereigesetz für das Land Nordrhein-Westfalen (LFischG) in der Fassung der Bekanntmachung vom 22.06.1994, zuletzt geändert durch Gesetz vom 9.2.2010 (GV. NRW. S. 137)
- Landesfischereiverordnung NRW: Landesfischereiverordnung für das Land Nordrhein-Westfalen (LFischVO) vom 09.03.2010, zuletzt geändert durch Verordnung vom 13.11.2014 (GV. NRW. S. 764)
- Landesnaturschutzgesetz NRW: Gesetz zum Schutz der Natur in Nordrhein-Westfalen (LNatSchG NRW) in der Neufassung vom 15.11.2016 (GV. NRW. S. 934)

2.3.1 Landeswassergesetz NRW

Das Landeswassergesetz trifft in § 28 ergänzende Regelungen zur Zulassung von Wasserkraftanlagen. Danach haben sich die Zulassung von Benutzungen und der Gewässer Ausbau zum Zwecke der Energieerzeugung durch Wasserkraft an den Bewirtschaftungszielen nach den Vorgaben des Maßnahmenprogramms auszurichten.

2.3.2 Landesfischereigesetz NRW

Für den Bereich der Wasserkraftnutzung schreibt das Landesfischereigesetz NRW Regelungen zum Fischschutz an Wasserkraftanlagen fest. Danach ist das Eindringen von Fischen in Triebwerke zu verhindern und ein sicherer Fischwechsel zu gewährleisten. Die Anforderungen des Landesfischereigesetzes bezüglich des Fischschutzes werden in der Landesfischereiverordnung spezifiziert. Diese enthalten unter anderem folgende Anforderungen an den Fischschutz an Wasserkraftanlagen:

- Stababstand Rechen maximal 20 mm
- Stababstand Rechen in Gewässern mit Zielart Lachs 10 mm
- Stababstand Rechen in Gewässern mit Zielart Aal 15 mm
- Anströmgeschwindigkeit in allen Fällen < 0,5 m/s

Falls dieser Fischschutz nicht möglich ist, sollen andere geeignete Maßnahmen wie z. B. ein Turbinenmanagement erfolgen. Darüber hinaus wird mit Erlass vom 29.6.2015 festgeschrieben (MKULNV 2015), dass für den Fischschutz für Lachssmolts bei horizontal angeordneten Rechenstäben Stababstände von 12 mm ausreichend sind. Lachssmolts besitzen, wie die meisten Fischarten, einen seitlich abgeflachten Körper, der höher ist als breit. Da die meisten Fischarten (Ausnahme: Aal) ihre natürliche Schwimmlage nur bedingt verändern, ist für horizontal ausgerichtete Rechen eine höhere Schutzwirkung zu erwarten als für Vertikalrechen mit gleicher lichter Weite (EBEL 2013).

2.3.3 Erlasse

In Ergänzung zu den Landesgesetzen wird der wasserrechtliche Vollzug in Erlassen, Verordnungen und Verwaltungsvorschriften geregelt. In Bezug auf die Wasserkraft sind insbesondere folgende Erlasse zu beachten:

- Erlass „Durchgängigkeit der Gewässer an Querbauwerken und Wasserkraftanlagen“ (MUNLV 2009), der u. a. die rechtlichen Bedingungen beim Ausbau der Wasserkraft konkretisiert
- Erlass zur „Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen und Fischschutzeinrichtungen an Wasserkraftanlagen“ (MKULNV 2014)
- Erlass „Fischschutz mit Horizontalrechen“ (MKULNV 2015)

In den Erlassen werden der Mindestabfluss in Ausleitungsstrecken und die Dimensionierung von Fischaufstiegs- und Fischabstiegsanlagen geregelt. Die aus diesen Vorgaben abgeleiteten Grundlagen für die Berechnung des Potenzials werden in Kapitel 3.3.3 erläutert.

2.3.4 Landesnaturschutzgesetz und Biodiversitätsstrategie des Landes NRW

Das Land NRW hat sich zum Ziel gesetzt, dem Artenrückgang, der durch die Arten auf der „Roten Liste“ dokumentiert wird, entgegenzusteuern. Daher hat die Landesregierung auf der Basis der „Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt (NBS)“ des Bundes die Biodiversitätsstrategie Nordrhein-Westfalen entwickelt, die am 20. Januar 2015 vom Kabinett verabschiedet wurde. Darin werden konkrete Ziele und Maßnahmen formuliert, die in dem neuen Landesnaturschutzgesetz konkretisiert worden sind.

Zu den rund 150 Maßnahmen, die in der Biodiversitätsstrategie NRW beschrieben werden, gehören u. a.

- die Novellierung des Landschaftsgesetzes hin zu einem Landesnaturschutzgesetz, das der Umsetzung des Bundesnaturschutzgesetzes vom 1. März 2010 in Landesrecht dient,
- die ökologische Entwicklung von Gewässern und Auen mit dem NRW-Programm „Lebendige Gewässer“ zur Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie,
- das Wanderfischprogramm NRW zur Wiederansiedlung und Stützung der Langdistanzwanderfische wie zum Beispiel Aal, Lachs, Maifisch und Nordseeschnäpel,
- Schutzprogramme für besonders gefährdete Arten wie Äschen, Wiesenvögel und Wildkatze

Unter Beachtung der europäischen Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-RL) und der Vogelschutzrichtlinie (V-RL) sieht die Biodiversitätsstrategie NRW vor, dass neue Wasserkraftanlagen an bestehenden Querbauwerken in folgenden Schutzgebieten nicht genehmigungsfähig sind:

- FFH und Vogelschutzgebiete im Schutzgebietsnetz NATURA 2000
- Naturschutzgebiete
- Nationalpark Eifel

Beim Umbau bestehender Wasserkraftanlagen ist darauf zu achten, dass die EU-rechtlichen Anforderungen des Habitatschutzes beachtet werden. Dies gilt auch für Maßnahmen mit einer Fernwirkung auf oberhalb oder unterhalb gelegene Schutzgebiete.

3 Methodik

In diesem Kapitel wird das für die Potenzialuntersuchung gewählte methodische Vorgehen dargestellt. Dieses orientiert sich in großen Teilen an der Vorgehensweise der Studie „Aktionsprogramm Erneuerbare Energien – Ermittlung des erschließbaren Restpotenzials der Wasserkraft im Regierungsbezirk Arnsberg“, kurz auch Potenzialstudie Arnsberg genannt (BZR-ARN 2013).

3.1 Potenzialstudie Arnsberg

In der Potenzialstudie Arnsberg wurde bereits das Wasserkraftpotenzial für einen Teilbereich Nordrhein-Westfalens (Regierungsbezirk Arnsberg) unter Einbeziehung aller verfügbaren Daten untersucht. Basierend auf einer umfassenden Datenaufnahme konnten die unterschiedlichen Bedingungen an den Standorten berücksichtigt werden.

Das methodische Vorgehen der Potenzialstudie Arnsberg wurde innerhalb des vorliegenden Projektes reflektiert und als Grundlage für die im Folgenden dargestellte Potenzialermittlung genutzt, womit eine grundsätzliche Vergleichbarkeit der Studien gewährleistet ist. Als Unterschiede bei der Erstellung dieser landesweiten Potenzialanalyse sind unter anderem die inzwischen durchgeführte Aktualisierung von Landesdaten wie z. B. der Zielartengewässer für Aal und Lachs und der Fischgewässertypen zu nennen.

3.2 Daten- und Bearbeitungsgrundlagen

3.2.1 Datengrundlagen

Im Rahmen der Studie wurden umfangreiche Daten zu Querbauwerken, Wasserkraftanlagen und Fischaufstiegsanlagen ausgewertet. Zunächst erfolgte dabei die Integration aller Daten in einen zentralen Datenbestand. Darüber hinaus wurde eine Geodatenbank erstellt, so dass die Lokalisierung der Standorte innerhalb der Gewässersysteme und die Betrachtung mit Hilfe topographischer Karten möglich wurden.

Die Daten aus der Gewässerstrukturkartierung in NRW aus den Jahren 2011 bis 2013 stellen die Datenbasis für die Potenzialuntersuchung dar. Dabei wurden alle berichtspflichtigen Gewässer mit einem Einzugsgebiet von mindestens 10 km² kartiert. Dort wurden neben der Lokalisierung von Bauwerken auch Daten zur Geometrie erhoben.

Da bei der Gewässerstrukturkartierung nicht alle Talsperren aufgenommen wurden, wurde zur Vervollständigung auf das Stauanlagenverzeichnis NRW und auf die Informationen aus der Potenzialuntersuchung zu Pumpspeicherkraftwerken zurückgegriffen. Darüber hinaus wurden fehlende Informationen bei den Anlagenbetreibern angefragt.

Weitere Datenbestände wie z. B. das Querbauwerke Informationssystem QUIS dienen der Ergänzung der Daten zu Querbauwerken, Wasserkraftanlagen und Talsperren. Zusätzlich wurden aktualisierte Daten zu Wasserkraftanlagen auf Basis der EEG-Förderung herangezogen.

Ergänzt durch die Daten aus der Potenzialstudie Arnsberg bildeten die genannten Datenquellen eine umfangreiche Basis für die vorliegende Untersuchung.

3.2.2 Bearbeitungsgrundlagen

Die Potenzialstudie Wasserkraft NRW verfolgt das Ziel, auf der Grundlage der Bauwerksdaten der Gewässerstrukturkartierung und weiterer landesweit verfügbarer Daten den aktuellen Bestand und das Wasserkraftpotenzial mit Hilfe eines einheitlichen Verfahrens zu ermitteln. Die Ergebnisse werden hierfür auf Ebene der nordrhein-westfälischen Verwaltungseinheiten aggregiert dargestellt.

Dabei konnten jedoch im Rahmen der landesweiten Betrachtung und dem damit verbundenen Maßstab keine konkreten Standortgutachten erstellt oder durch Ortsbegehungen neue Daten erhoben werden. Innerhalb der Studie wurde vielmehr umfangreiches Datenmaterial gesichtet und zusammengeführt, so dass es für nachfolgende Planungs- und Genehmigungsprozesse verfügbar wird. Somit wird die Entscheidungsfindung am einzelnen Standort zwar unterstützt, kann jedoch nie ersetzt werden. Auch kann somit nicht das Ergebnis des im Einzelfall erforderlichen wasserrechtlichen Zulassungsverfahrens vorweggenommen werden. Die Ergebnisse und Planungsgrundlagen werden im Fachinformationssystem Energieatlas NRW zur Verfügung gestellt.

Für alle Standorte wurde die Potenzialermittlung in mehreren Schritten durchgeführt

- Zusammenstellung aller verfügbaren Daten
- Ermittlung der gesamten technisch verfügbaren Potenziale am Standort bzw. Bauwerk
- Bestimmung des noch ungenutzten Potenzials.

Bei bestehenden Querbauwerken wurden aus Gründen der technischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit Mindestkriterien definiert, die ein potenzieller Standort an einem bestehenden Querbauwerk zu erfüllen hat: So wurden nur Standorte mit einer Mindestabsturzhöhe von 0,8 m untersucht, die zudem an einem Gewässerabschnitt mit einem minimalen Mittelabfluss von mindestens 1 m³/s liegen (analog der Potenzialstudie Arnsberg, siehe Tabelle 2). Es wurden weder die Möglichkeit eines Neubaus von Wehren berücksichtigt noch neue Ausleitungsstrecken zugelassen, aus denen Wasser aus dem ursprünglichen Gewässerbett ausgeleitet und über einen Kanal zu einer Wasserkraftanlage geleitet wird.

Tabelle 2: Mindestkriterien für die Potenzialuntersuchung

Querbauwerke und Wasserkraftanlagen		Talsperren nach ICOLD	
Absturzhöhe, Fallhöhe	≥ 0,8 m	Höhe	≥ 15 m
Mittlerer Abfluss am Standort MQ	≥ 1 m ³ /s	Stauvolumen	≥ 1 Mio. m ³

Talsperren unterliegen in der Regel Nutzungen, die eine bestimmte Betriebsweise erforderlich machen. Daher folgte die Potenzialermittlung bei Querbauwerken und Talsperren unterschiedlichen Vorgehensweisen. Bei der abschließenden Gesamtbetrachtung werden die Ergebnisse der Untersuchungen zusammengeführt.

Die Definition der Talsperren richtete sich nach den Kriterien der internationalen Kommission für große Talsperren (ICOLD). Danach werden Bauwerke dann als „Talsperre“ bezeichnet, wenn sie über eine Mindestkronenhöhe von 15 m und ein Mindestspeichervolumen von 1 Mio. m³ verfügen (Tabelle 2).

Für alle anderen Bauwerke aus dem Stauanlagenverzeichnis NRW erfolgte die Potenzialermittlung wie bei den Bauwerken aus der Gewässerstrukturkartierung gemäß der in Kapitel 3.3 beschriebenen Vorgehensweise.

Einige der Talsperren wurden in der für NRW durchgeführten Potenzialstudie Pumpspeicherkraftwerke (LANUV 2016) als potenzielle Standorte für Pumpspeicherkraftwerken identifiziert. Diese Standorte wurden jedoch in dieser Studie auch hinsichtlich der Möglichkeit zur Wasserkraftnutzung untersucht.

3.3 Potenzialermittlung für Querbauwerke und Wasserkraftanlagen

Die Bezeichnung „Potenzial“ wird in der Regel für eine Energie (Einheit z. B. Gigawattstunde, GWh) verwendet. Häufig wird aber auch eine Leistung (Einheit z. B. Kilowatt, kW) mit diesem Begriff verbunden. In den Fällen, in denen eine genauere Spezifizierung erforderlich ist, wird für die Stromerzeugung der Begriff „Erzeugungspotenzial“ und für die installierte Leistung die Bezeichnung „Leistungspotenzial“ verwendet.

Bauwerks- und Standortdaten sowie die Abflusswerte im jeweiligen Gewässerabschnitt bilden die Grundlage der Potenzialermittlung und werden daher im Folgenden näher betrachtet.

3.3.1 Ermittlung des technisch-theoretischen Potenzials

Das technische Potenzial ist eine theoretische Größe, die anhand von gemittelten Daten, wie z. B. des Wirkungsgrades, eine Abschätzung eines vorhandenen Potenzials ermöglicht. Nicht betrachtet werden dabei beispielsweise detaillierte räumliche Gegebenheiten, Auflagen des Naturschutzes oder wirtschaftliche Einschränkungen am jeweiligen Standort, so dass vom technischen Potenzial im Weiteren als einem theoretisch vorhandenen Potenzial, dem technisch-theoretischen Potenzial gesprochen wird. Beide Begriffe werden hier synonym verwendet.

In der vorliegenden Studie wurden allerdings bei der Potenzialberechnung die ökologischen Abflüsse, die für Mindestwassermengen bzw. die Auffindbarkeit und Passierbarkeit von Fischaufstiegs- und Bypassanlagen erforderlich sind und somit der Wasserkraftnutzung nicht zur Verfügung stehen, bereits berücksichtigt. Somit fließen auch ökologische Aspekte bereits in das technisch-theoretische Potenzial mit ein.

Das technisch-theoretische Leistungspotenzial P_{tech} wurde dabei folgendermaßen berechnet:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{tech}} &= \eta * \rho * g * H_A * Q_A && [\text{kW}] \\
 &= 0,75 * 1 * 9,81 * H_A * Q_A && [\text{kW}] \\
 \text{mit } \eta &\text{ Gesamtwirkungsgrad} && (0,75) \\
 \rho &\text{ Dichte des Wassers} && (1.000 \text{ kg/m}^3) \\
 g &\text{ Erdbeschleunigung} && (9,81 \text{ m/s}^2) \\
 H_A &\text{ mittlere Absturzhöhe am Wehr bzw. Fallhöhe der Wasserkraftanlage [m]} \\
 Q_A &\text{ Ausbaudurchfluss der Wasserkraftanlage [m}^3\text{/s]}.
 \end{aligned}$$

Der für den Gesamtwirkungsgrad η eingesetzte Wert von 0,75 ist als mittlerer Wert zu verstehen. Er setzt sich zusammen aus den Wirkungsgraden für die Turbinen, Getriebe und Generatoren.

Der Ausbaudurchfluss Q_A gibt den maximal von einer Wasserkraftanlage zu verarbeitenden Wasserdurchfluss an. Liegen keine Angaben dazu vor, kann er bei Kenntnis des technischen Leistungspotenzials nach obiger Formel mit Hilfe von Fallhöhe und mittlerem Wirkungsgrad abgeschätzt werden, oder er wird als Produkt aus einem bekannten bzw. geschätzten Ausbaugrad ε und dem Mittelabfluss MQ des Gewässers ermittelt:

$$Q_A = \varepsilon * MQ.$$

Dabei weisen bestehende Wasserkraftanlagen für ε sowohl Werte kleiner als auch größer eins auf. Für bestehende Wasserkraftstandorte wurden in der aktuellen Untersuchung die bekannten Daten zu Q_A aus dem QUIS verwendet.

Für bisher ungenutzte, potenzielle Wasserkraftstandorte, für die keine Angaben zum Ausbaudurchfluss vorlagen, wurde gemäß der Definition der Potenzialstudie Arnsberg der Ausbaudurchfluss nicht auf MQ bezogen, sondern vom mittleren Abfluss ein ökologischer Abfluss ($MQ - Q_{\text{öko}}$) abgezogen. Hier wird berücksichtigt, dass nach aktueller Gesetzeslage bei Neuanlagen immer ein ökologischer Abfluss abzugeben ist, der für die Wasserkraftnutzung nicht zur Verfügung steht.

Es wurde ein Ausbaugrad ε_2 definiert gemäß

$$\begin{aligned}
 Q_A &= \varepsilon_2 * (MQ - Q_{\text{öko}}) \text{ mit} \\
 \varepsilon_2 &= 1,3.
 \end{aligned}$$

Als ökologischer Abfluss $Q_{\text{öko}}$ wird der Abfluss bezeichnet, der für die Funktion von Fischaufstiegsanlage (Q_{FAA}), Bypass (Q_{Byp}) und für den Mindestabfluss (Q_{min}) bei Ausleitungskraftwerken erforderlich ist:

$$Q_{\text{öko}} = Q_{\text{FAA}} + Q_{\text{Byp}} + Q_{\text{min}}.$$

Bei der Berechnung des ökologischen Abflusses, der für den Betrieb der Wasserkraftanlage nicht zur Verfügung steht, können einzelne Komponenten miteinander verrechnet werden (siehe Kapitel 3.3.3). So können der Durchfluss der Fischaufstiegsanlage Q_{FAA} (auch „Dotation“ genannt) und der Bypassdurchfluss Q_{Byp} (siehe Abbildung 3) einen Beitrag zum Mindestabfluss Q_{min} leisten oder diesen komplett bereitstellen, wenn sie direkt unterhalb des Ausleitungswehres in die Ausleitungsstrecke abgegeben werden. Dies wurde bei der Potenzialberechnung berücksichtigt. Nicht berücksichtigt wurde, dass der Bypassdurchfluss unter Umständen die Dotation der Fischaufstiegsanlage ergänzen bzw. ersetzen kann, da diese Variante insbesondere in Gewässerabschnitten zum Tragen kommt, in denen der Betrieb einer Wasserkraftanlage mit den zugehörigen fischökologischen Maßnahmen aufgrund des geringen Wasserdargebots kaum realisierbar wäre.

Weitere Details zur Berechnung des Potenzials für Fluss- und Ausleitungskraftwerke werden im Anhang in Kapitel II erläutert.

Theoretisches Erzeugungspotenzial

Das Erzeugungspotenzial E_{tech} , d. h. die von einer potenziellen Wasserkraftanlage zu erzeugende Jahresarbeit, wird durch Multiplikation des Leistungspotenzials (P_{tech}) mit den Volllaststunden (t_{voll}) ermittelt:

$$E_{\text{tech}} = t_{\text{voll}} * P_{\text{tech}} \quad [\text{MWh/a}]$$

An Standorten mit bestehender Wasserkraftnutzung wurden dabei die Jahresvolllaststunden der in Betrieb befindlichen Anlage auch für den Ausbau übernommen. Für neue Standorte wurden die Volllaststunden aus dem Mittelwert der Jahreserzeugung zahlreicher Wasserkraftanlagen bestimmt. Diese wurde unter bestimmten mittleren Annahmen mit Hilfe eines Berechnungstools berechnet. Die Höhe der Volllaststunden wird im Anhang in Kapitel II. ii dargestellt.

Berechnung der Potenziale mit den Daten der Studie Arnsberg

Die in der Potenzialstudie Arnsberg angegebenen technischen Potenziale konnten mit den zur Verfügung gestellten Daten für den Großteil der Standorte exakt nachgerechnet werden. In einigen Fällen wichen jedoch die Angaben in der Potenzialstudie Arnsberg von der dort beschriebenen pauschalen Berechnung ab, so dass sich Unterschiede zwischen den beiden Studien ergaben. Da zur Ermittlung der Daten innerhalb der Potenzialstudie Arnsberg eine intensive Recherche durchgeführt wurde, die besondere Standortgegebenheiten z. B. bei der Ermittlung der ökologischen Abflüsse berücksichtigen konnte, gehen auch im Rahmen der hier vorliegenden landesweiten Potenzialstudie diese entsprechenden Daten in die Potenzialberechnung für den Regierungsbezirk Arnsberg ein.

Ungenutztes technisch-theoretisches und differenziertes Potenzial

Für alle zu untersuchenden Standorte in NRW wurde gemäß der beschriebenen Vorgehensweise das technisch-theoretische Potenzial ermittelt. Dieses Potenzial steht theoretisch einer Nutzung zur Verfügung, wird aber an Standorten mit bestehender Wasserkraftnutzung

zum Teil bereits in Anspruch genommen. Für diese ergibt sich das ungenutzte Potenzial durch Abzug der bereits installierten Leistung bzw. der erzeugten Jahresarbeit. Für bestehende Wasserkraftanlagen kann so ein Repoweringpotenzial ausgewiesen werden. Zudem wurden weitere ökologische und wirtschaftliche Aspekte bei der Ermittlung des „differenzierten Potenzials“ berücksichtigt, das eine bessere Einschätzung der Potenziale und ihrer Realisierungswahrscheinlichkeiten ermöglicht.

3.3.2 Ermittlung der Abflussdaten

Die Energieerzeugung einer Wasserkraftanlage hängt linear von Fallhöhe und Wassermenge ab. Beide Größen variieren in der Zeit. Die Fallhöhe bewegt sich dabei in einem geringen Schwankungsbereich, denn der Unterwasserwasserspiegel steigt bei größeren Abflüssen mehr als die Stauhöhe. Die Abflüsse variieren erheblich. Abbildung 2 zeigt exemplarisch für den Pegel Betzdorf die Schwankungen der Monatsmittelwerte für den mittleren Monatsabfluss MoMMQ. Die Abbildung veranschaulicht große Abflussvariationen im Winterhalbjahr und geringe Schwankungen im Sommer.

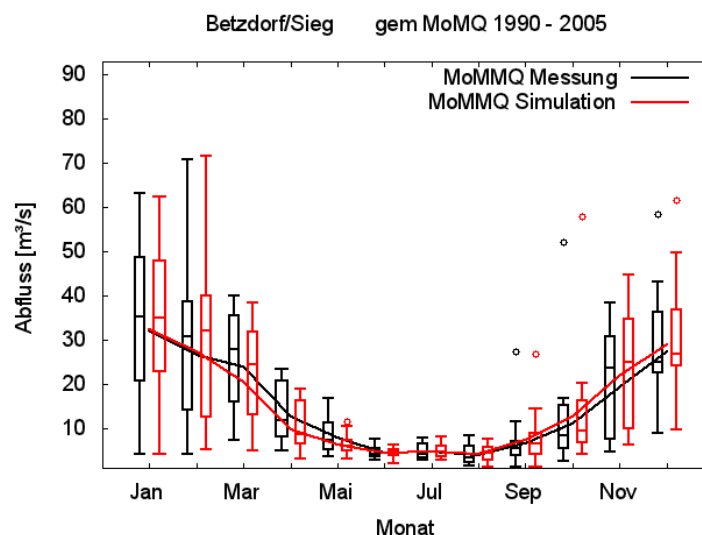


Abbildung 2: BoxPlots für monatliches mittleres MQ; Pegel Betzdorf / Sieg
Quelle: LARSIM-ME (HYDROTEC 2013)

Beide Größen, Fallhöhe und Wassermenge, sind weiterhin örtlich sehr unterschiedlich. Während sich nutzbare Fallhöhen aus der Landschaftsform, in NRW meist Mittelgebirge, und den baulichen Ausprägungen des Standortes ergeben, folgt die verfügbare Wassermenge in erster Linie der Einzugsgebietsgröße und nimmt in etwa gleichem Maße entlang eines Fließgewässers und Flusslaufs zu.

Die Abschätzungen zum Potenzial erfordern daher ortsspezifische Parameter zum Abfluss. Hierzu kann auf eine aktuelle Studie des LANUV zurückgegriffen werden (LANUV, 2014). Die Daten umfassen für die betrachteten Gewässerabschnitte Werte für die Einzugsgebietsgröße, sowie für den mittleren Abfluss MQ und den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ..

3.3.3 Ökologische Abflüsse – Aufteilung der Abflüsse am Standort

Der Abfluss im Gewässer wird insbesondere an einem Wasserkraftstandort nicht nur zur Energieerzeugung genutzt, sondern es sind auch Abflüsse für ökologische Maßnahmen wie den Betrieb einer Fischaufstiegs- oder Fischabstiegsanlage erforderlich. Teilweise können diese Abflüsse kombiniert und somit in der Gesamtbilanz verringert werden. So kann z. B. der Bypassabfluss als Dotation der Fischaufstiegsanlage dienen, oder der Mindestabfluss durch die Dotation von Fischaufstiegsanlage und Bypass gespeist werden.

Bei einem Flusskraftwerk ergibt sich folgende Aufteilung des Gewässerabflusses (Abbildung 3):

- Dotation der Fischaufstiegsanlage Q_{FAA}
- Betriebsabfluss Bypass Q_{Byp}
- Ausbaudurchfluss der Wasserkraftanlage Q_A .

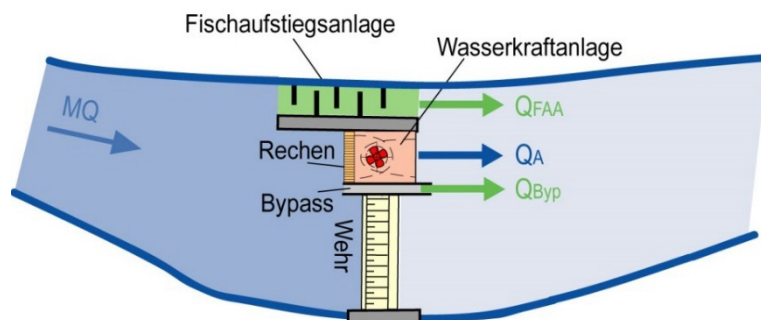


Abbildung 3: Abflussaufteilung der ökologischen Abflüsse Q_{FAA} und Q_{Byp} sowie dem Ausbaudurchfluss Q_A bei einem Flusskraftwerk

Bei einem Ausleitungskraftwerk wird bei der Potenzialermittlung im Rahmen dieser Studie davon ausgegangen, dass sowohl im Kanal als auch am Ausleitungswehr jeweils eine Fischaufstiegsanlage installiert wird (Abbildung 4). Zusätzlich wird an allen vorhandenen oder potenziell zu installierenden Wasserkraftanlagen jeweils ein Bypass vorgesehen, so dass im zukünftigen Ausbauzustand die gesetzlichen Anforderungen bezüglich der Durchgängigkeit sowohl für den Kanal als auch für die Ausleitungsstrecke (Mutterbett) erfüllt werden. Damit ergibt sich für ein Ausleitungskraftwerk eine Abflussaufteilung auf folgende Abflusspfade (Abbildung 4):

- Dotation der Fischaufstiegsanlagen Q_{FAA} an Wehr und WKA,
- Abgabe des Mindestabfluss Q_{min} ,
- Betriebsabfluss Bypass Q_{Byp} an jeder Wasserkraftanlage,
- Ausbaudurchfluss Q_A der Wasserkraftanlagen ($Q_{A,G}$ im Gewässer und $Q_{A,K}$ im Kanal)

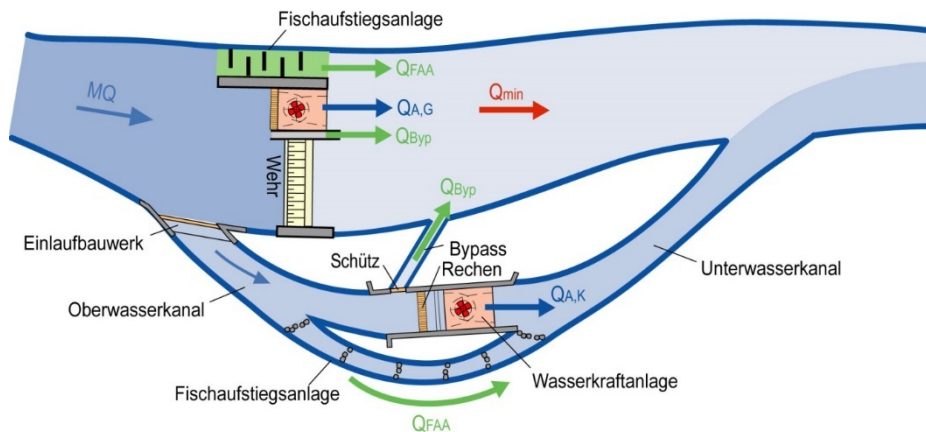


Abbildung 4: Abflussaufteilung mit den ökologischen Abflüssen Q_{FAA} und Q_{Byp} sowie den Ausbaudurchflüssen $Q_{A,G}$, $Q_{A,K}$ bei der Ausleitung zu einer Wasserkraftanlage über einen Kanal

Da für die einzelnen Standorte keine Einzelfallbetrachtung vorgesehen ist, werden die unterschiedlichen Abflüsse nach der im Folgenden beschriebenen Vorgehensweise ermittelt. Zur Prüfung des Einflusses der ökologischen Abflüsse auf das Ergebnis der Potenzialermittlung wurden verschiedene Varianten berechnet, bei denen die Dotation der Fischaufstiegsanlagen und der Mindestabfluss variiert wurden (Anlage, Kapitel II. iv). Die Berechnung der Szenarien hat gezeigt, dass der Einfluss des Mindestabflusses auf das Erzeugungs- und Leistungspotenzial relativ gering ist. Bei der Potenzialermittlung wurden daher im Rahmen dieser Studie die Werte der Variante V0 verwendet (Anlage, Kapitel II. iv, Tabelle A 9), die denen der Potenzialstudie Arnsberg entsprechen.

Dotation von Fischaufstiegsanlagen

Die Dotation der Fischaufstiegsanlage Q_{FAA} richtet sich nach dem jeweiligen Fischgewässertyp, in dem sich der zu untersuchende Standort befindet. Dabei wird jeweils die Fischleitart mit den höchsten Ansprüchen berücksichtigt. Die Fischgewässertypen, die den Gewässern in NRW mit einem $MQ \geq 1 \text{ m}^3/\text{s}$ zugewiesen sind, und die zugehörigen Zielarten, die für die Dotation der Fischaufstiegsanlage ausschlaggebend sind, sind in der Anlage, Kapitel II. iii dargestellt. Darüber hinaus wurde der Lachs als Leitart für die Zielartengewässer Lachs berücksichtigt (Abbildung 5).



Abbildung 5: Zielartengewässer Lachs (Stand 9/2015)

Nach aktueller Erlasslage (MKULNV 2014) sind bei der Wahl der Dotation „die Werte aus dem DWA-Merkblatt M 509 mit den Angaben des Handbuchs Querbauwerke und der Erlasse abzugleichen und die für die Fische besseren Werte zur Dimensionierung heranzuziehen“. Das DWA-Merkblatt DWA-M 509 lag bei der Bearbeitung der Potenzialstudie Arnsberg noch nicht vor, so dass dort die Dotationen nach Handbuch Querbauwerke NRW gewählt wurden (MUNLV 2005).

Als Dotationen für Fischaufstiegsanlagen wurden in Anlehnung an die Studie Arnsberg und in Abstimmung mit Fischereiexperten des LANUV und des MKULNV die in Tabelle 3 aufgeführten Werte gewählt.

Tabelle 3: Dotation von Fischaufstiegsanlagen für Zielarten der Fischgewässertypisierung

Zielart	Dotation FAA [l/s]
Brasse	700*
Lachs / Barbe	700
Äsche	250
Bachforelle	150

* Brasse als anspruchsgleiche Art wie Barbe / Lachs

Berechnungen von Dotationen für exemplarische Fischaufstiegsanlagen nach DWA-M 509 führen zu vergleichbaren Werten für Äsche und Bachforelle wie die in MUNLV (2005) angegebenen. Für Lachs, Barbe und Brasse wurden jedoch niedrigere Dotationen festgelegt (Anlage II. iii).

In Szenarien wurde der Einfluss der Dotation der Fischaufstiegsanlagen nach DWA-M 509 im Vergleich zu den in Tabelle 3 genannten Werten untersucht (Anlage, Kapitel II. iv). Es zeigte sich, dass die nach DWA-M 509 berechneten geringeren Dotationen für Lachs, Barbe und Brasse zu einem Anstieg des technisch-theoretischen Leistungspotenzials um etwa 5 % führen würden. Dieser Unterschied wird bei Betrachtung realisierbarer Potenziale voraussichtlich vernachlässigbar sein, sodass für eine bessere Vergleichbarkeit der Arnsberger Potenzialstudie und der landesweiten Studie auch hier die Werte des Handbuchs Querbauwerke zugrunde gelegt werden.

Dotation Bypass

Fische, die durch eine Rechenanlage vor dem Durchgang durch die Turbine einer Wasserkraftanlage gehindert werden, benötigen einen Bypass, in dem ein ausreichender Abfluss für einen unbeschadeten Abstieg vorhanden ist. Gemäß der Potenzialstudie Arnsberg wurde ein Bypassabfluss von 3,5 % des Ausbaudurchflusses für alle Wasserkraftanlagen gewählt. Bei größeren Wasserkraftanlagen (wie z. B. an der Weser) und wenn sich bei individueller Betrachtung geringere Bypassdotationen als ausreichend erwiesen, wurden nach EBEL (2013) 2 % des Ausbaudurchflusses als ausreichend angesehen.

Mindestabfluss

An einem Ausleitungskraftwerk wird in der Regel der Hauptabfluss aus dem Gewässerbett zur Wasserkraftanlage hin ausgeleitet (Abbildung 4). Die Durchgängigkeit und die Veränderung des Lebensraums im ursprünglichen Gewässerbett, das Ausleitungsstrecke oder Mutterbett genannt wird, hängen vom dort verfügbaren Abfluss ab. Daher wird nach WHG § 33 in der Regel ein Mindestabfluss $Q_{\min}$ festgelegt, der immer im Mutterbett verbleiben muss.

Nach MUNLV (2009) werden für $Q_{\min}$ die Orientierungswerte aus Tabelle 4 vorgegeben, die auch in der Potenzialstudie Arnsberg verwendet wurden. Da kleinere Gewässer in der Regel einen niedrigeren und ungleichmäßigeren Abfluss aufweisen, sind dort die Orientierungswerte größer als bei größeren Einzugsgebieten bzw. Gewässern. Erhöhte Orientierungswerte und Zuschläge wurden in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt, da eine detaillierte Betrachtung der Gewässer und Einzelfalluntersuchungen an den Standorten nicht durchgeführt werden konnten.

Tabelle 4: Orientierungswerte für den Mindestabfluss $Q_{\min}$ (MUNLV 2005, 2009)

Einzugsgebietsgröße	Mindestabfluss $Q_{\min}$ Standard Orientierungswert
20 – 50 km ²	0,5 MNQ
≥ 50 km ²	0,33 MNQ

Der Einfluss der Größe des Mindestabflusses auf das Wasserkraftpotenzial wurde in verschiedenen Szenarien untersucht. Es zeigte sich, dass die Variation von $Q_{\min}$ kaum einen Einfluss auf das Leistungspotenzial hat (Anlage, Kapitel II. iv).

3.3.4 Jahresvolllaststunden

Innerhalb der Potenzialstudie Arnsberg erfolgte für zahlreiche vorhandene und potenzielle Wasserkraftanlagen eine detaillierte Berechnung der mittleren jährlichen Volllaststunden. Die Ergebnisse für verschiedene Abflusstypen von Gewässern sind in Tabelle 5 dargestellt.

Die Sichtung verschiedener Quellen und eigene Berechnungen (Anlage, Kapitel II. ii) führten zu dem Ergebnis, dass die mit Hilfe von Modellen berechneten Volllaststunden von in Betrieb befindlichen Wasserkraftanlagen in der Realität nicht immer erreicht, in Einzelfällen aber auch überschritten werden. Dabei spielen neben dem tatsächlichen Ausbaugrad die Wartungs- und Ausfallzeiten der Anlagen sowie der Wartungszustand der Maschinen und anderen Anlagenteile, Verlegung von Rechenanlagen, aber auch Hochwasser eine entscheidende Rolle. Nur durch eine genauere Untersuchung der Einzelanlagen sind Rückschlüsse auf Gründe für die Abweichungen möglich. Da dies im Rahmen der vorliegenden Studie nicht möglich war, wurden im Weiteren die Erzeugungspotenziale mit den in Tabelle 5 angegebenen Volllaststunden berechnet, die für neue Anlagen stehen, die sich in einem guten Wartungszustand befinden.

Tabelle 5: Volllaststunden für $\epsilon_2 = Q_A / (MQ - Q_{\text{öko}})$ nach Trendlinien für Dauerlinientypen nach MUNLV (2005)

			Volllaststunden t_{voll} gemäß Trendlinien* [h/a]
Abflussverhalten	MNQ/MQ	Dauerlinientyp	$\epsilon_2 = 1,3$
sehr gleichmäßig	$\geq 0,27$	I a	4.650
gleichmäßig	0,18 – 0,27	I b	4.100
ungleichmäßig	0,09 – 0,18	II a	3.800
sehr ungleichmäßig	$< 0,09$	II b	3.650

* BZR-ARN (2013)

Für Wasserkraftanlagen an Ausleitungswehren wurde der Anteil des Abflusses, der dem Mindestabfluss entspricht, im Erzeugungspotenzial mit einer Volllaststundenzahl von 8.000 h/a berücksichtigt, da der Mindestabfluss ganzjährig abgegeben werden muss.

3.3.5 Datengrundlagen Querbauwerke und Wasserkraftanlagen

Die Bauwerksdaten aus der Gewässerstrukturkartierung bilden die wesentliche Grundlage für die Untersuchung des Wasserkraftpotenzials. Dabei ist zu beachten, dass mehrere der erhobenen Bauwerke wie z. B. Wehre, Schütze, Wasserkraftanlagen oder Fischaufstiegsanlagen zu einem Standort gehören können. Ein Standort umfasst dabei die gesamte Anlage zum Aufstau des Wassers, alle Einrichtungen für den Fischwechsel und falls vorhanden die Wasserkraftanlage/n (Abbildung 3, Abbildung 4). Standorte und / oder Daten zu bestehenden Wasserkraftanlagen, die in der Gewässerstrukturkartierung nur unvollständig erhoben wurden, wurden aus den WKA-Daten des LANUV (Anlage, Tabelle A 1), aus den Angaben der Potenzialstudie Arnsberg (BZR-ARN 2013) und aus den QUIS-Daten (Anlage, Tabelle A 1) ergänzt.

Bestand Querbauwerke

Aus den ca. 38.000 Bauwerken der Gewässerstrukturkartierung wurden 4.994 Bauwerke mit einer Höhe $\geq 0,8$ m selektiert (Anlage, Kapitel I). Durch eine Verortung im GIS konnten den Standorten der Bauwerke die Abflusswerte der zugehörigen Gewässerabschnitte zugeordnet werden. Nach Anwendung des Auswahlkriteriums $MQ \geq 1 \text{ m}^3/\text{s}$ verblieben für ganz NRW etwa 1.300 Bauwerke, die auf die aktuelle Wasserkraftnutzung und ihr Potenzial hin untersucht wurden.

Bauwerke, die zum gleichen Standort gehörten, wurden diesem zugeordnet. Bei fehlenden oder widersprüchlichen Angaben, wurden die Daten aus dem Querbauwerke-Informationssystem (QUIS 2015) und die aus der Gewässerstrukturkartierung verfügbaren Fotos zur Qualitätsprüfung hinzugezogen. Ein Teil der Standorte erfüllte nach dieser Prüfung

nicht die genannten Anforderungen. So war z. B. die Gesamthöhe ausreichend, die Absturzhöhe war aber zu gering. Bauwerke stellten sich nach Sichtung von Fotos als ungeeignet dar (z. B. rückgebaute Wehre), oder lagen an einem Gewässer, dessen Abflussmenge nachträglich korrigiert wurde. Dadurch reduzierte sich die Anzahl der Standorte, die hinsichtlich ihres Wasserkraftpotenzials untersucht wurden.

Für den Regierungsbezirk Arnsberg dienten die Daten und Ergebnisse der Potenzialstudie Arnsberg als Bearbeitungsgrundlage, da die Datenrecherche innerhalb der Studie Arnsberg weiterführende Angaben von Betreibern von Wasserkraftanlagen, Informationen der Bezirksregierung Arnsberg sowie der Unteren Wasserbehörden umfasste, und somit über die Angaben der Gewässerstrukturkartierung hinausging. Es wurden die relevanten Standorte gemäß Tabelle 2 nach Höhe und Abfluss selektiert und die Berechnung des Potenzials folgte für die resultierenden Standorte den gleichen Regeln wie in Kapitel 3.3 beschrieben.

Bestand Wasserkraftanlagen

Ausgewertet wurden die von Daten von 618 Wasserkraftanlagen in NRW. Hierbei sind neben den Wasserkraftanlagen, die in der Potenzialstudie Arnsberg erfasst wurden, solche Anlagen enthalten, die in 2014 eine Vergütung nach EEG erhielten. In 2014 waren demnach 427 dieser Anlagen in Betrieb. Darüber hinaus gibt es in NRW neben Fluss- und Ausleitungskraftwerken im Gewässer auch zwei Pumpspeicherkraftwerke.

Lagen bei in Betrieb befindlichen Wasserkraftanlagen keine Angaben zur Jahresarbeit E_a vor, wurden diese den EEG Daten des Jahres 2013 und den Daten der Potenzialstudie Arnsberg entnommen oder im Internet recherchiert bzw. über die angegebene Leistung P und die Volllaststunden t_{voll} abgeschätzt gemäß:

$$E_a = P * t_{voll}$$

Dabei wurden wie in der Potenzialstudie Arnsberg die Volllaststunden für einen mittleren Ausbaugrad $\varepsilon_2 = 1,3$ abgeschätzt (Anlage, Kapitel II. ii).

3.3.6 Differenziertes Potenzial

Um zu einer realistischeren Einschätzung der ungenutzten Potenziale zur Wasserkraftnutzung in NRW zu gelangen, wird in dieser Studie neben dem technisch-theoretischen Potenzial ein weiterer Potenzialbegriff verwendet, das „differenzierte Potenzial“. Hierbei werden auch weitere ökologische und wirtschaftliche Kriterien bei der Bewertung der potenziellen Standorte mit berücksichtigt, sofern die Datenlage und der Maßstab einer landesweiten Untersuchung dies zulassen. Da vor dem Hintergrund des damit angesprochenen Abstraktionsgrades keine Gutachten für einzelne Standorte erstellt wurden und eine Berücksichtigung sämtlicher für die Genehmigung von Wasserkraftanlagen relevanter Aspekte ohne Berücksichtigung der konkreten Verhältnisse vor Ort nicht möglich ist, kann hierfür nicht die Bezeichnung „machbares Potenzial“ verwendet werden.

Dennoch stellt das differenzierte Potenzial eine deutliche Qualifizierung des theoretisch-technischen Potenzials dar. Hierfür wurden diejenigen Standorte ausgeschlossen, bei denen eine Wasserkraftnutzung bzw. ein Repowering aufgrund von erkennbaren ökologischen oder

wirtschaftlichen Einschränkungen nicht möglich ist. Um dabei auch solche Kriterien erfassen und bewerten zu können, aus denen derzeit keine eindeutigen Rückschlüsse über die Zulässigkeit von Wasserkraftanlagen möglich sind, wurde für das differenzierte Potenzial ein „maximales Szenario“ und ein „minimales Szenario“ betrachtet.

Zur Ermittlung des differenzierten Potenzials wurden folgende Kriterien herangezogen:

1. Lage in Schutzgebieten (Naturschutz- und Natura 2000-Gebiete, Nationalparke)
2. Anlagenleistung
3. Lage in Zielartengewässern für Lachs und Aal
4. Maßnahmen zur Durchgängigkeit (EU-WRRL, UFP)

Schutzgebiete

Der Neubau von Wasserkraftanlagen an Querbauwerken ist in Naturschutzgebieten, FFH- und Vogelschutzgebieten sowie dem Nationalpark Eifel gemäß der Biodiversitätsstrategie des Landes nicht zulässig (Kapitel 2). Der Ausbau bestehender Wasserkraftanlagen ist jedoch grundsätzlich bei einer Einzelfallbetrachtung im Rahmen von wasserrechtlichen Zulassungen weiterhin möglich. Durch Verschneidung der potenziellen Standorte im GIS mit den entsprechenden Schutzgebieten wurden die entsprechenden Standorte für die Ermittlung des differenzierten Potenzials ausgeschlossen.

Anlagenleistung

Das ungenutzte technisch-theoretische Potenzial wurde für Auswertungen und Berechnungen landesweit bereits ab einer Anlagenleistung ≥ 10 kW identifiziert. Diese Grenze trägt der Tatsache Rechnung, dass bei einem Repowering von Anlagen kleiner Leistung, möglicherweise relativ geringe Leistungssteigerungen auch ohne großen Aufwand wirtschaftlich realisierbar sind. Zusätzlich wurden folgende Größenklassen der Leistung getrennt ausgewertet:

- 10 bis 50 kW,
- 50 bis 100 kW und
- ≥ 100 kW.

Die Ermittlung des ungenutzten differenzierten Potenzials erfolgte darüber hinaus für Standorte mit einem ungenutzten technisch-theoretischen Potenzial größer 50 kW. Dieser Grenzwert berücksichtigt, dass eine ausführlichere Untersuchung nur für die Standorte erfolgen soll, die auch einen wesentlichen Teil am Zubaupotenzial ausmachen und deren Neubau unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten möglich erscheint.

Zielartengewässer für Lachs und Aal

In den Zielartengewässern Aal und Lachs ist der Schutz der Zielarten von vorrangiger Bedeutung. Es ist jedoch noch nicht abschließend geklärt, ob ein Zubau von Wasserkraftanlagen in diesen Gewässern grundsätzlich zulässig ist. Daher wurde untersucht, welcher Anteil des technisch-theoretischen Gesamtpotenzials sich in den entsprechenden Gewässerabschnitten befindet, und dieses Potenzial differenziert ausgewiesen.

Im maximalen Szenario des differenzierten Potenzials wurden potenzielle Standorte in Zielartengewässern mit aufgenommen, im minimalen Szenario wurden sämtliche potenziellen Standorte innerhalb der Zielartengewässer Lachs und Aal ausgeschlossen. Die potenziellen Standorte in den Zielartengewässern wurden anhand einer Zuordnung im GIS ermittelt, als Grundlage diente die Zielartengewässerkulisse, wie sie im Bewirtschaftungsplan der Wasserrahmenrichtlinie Ende 2015 veröffentlicht wurde (Abbildung 1).

Bewirtschaftungsziele, Maßnahmenpläne und Umsetzungsfahrpläne (UFP)

Gesetzlich ist vorgegeben, dass alle Gewässer in NRW durchgängig zu gestalten sind (Kapitel 2.1), und die ihnen im Bewirtschaftungsplan vorgegebenen Ziele, in der Regel den guten ökologischen Zustand bzw. das gute ökologische Potenzial, erreichen sollen. Das heißt unter anderem, dass an allen Querbauwerken und Wasserkraftanlagen Maßnahmen für den Fischeufstieg, den Fischschutz und Fischabstieg vorzusehen sind. Dabei kann auch ein Rückbau vorhandener Querbauwerke und nicht betriebener Wasserkraftanlagen Vorrang vor einer Nutzung haben. Bei der Einschätzung der Realisierbarkeit des ungenutzten Potenzials wurden die im Zuge der Berichterstattung zur EU-WRRL erarbeiteten Bewirtschaftungsziele und Maßnahmen zur Durchgängigkeit der Gewässer aus dem Maßnahmenprogramm 2015 berücksichtigt.

Alle Maßnahmen werden in der landesweiten Wasserkörpersteckbriefe-Datenbank verwaltet und gepflegt. Die in der Datenbank enthaltenen hydromorphologischen Maßnahmen sind das Ergebnis eines Abstimmungsprozesses mit den lokal beteiligten Stakeholdern. Die im ersten Zyklus (MKULNV, 2009) berichteten Programmmaßnahmen sind im Rahmen der Umsetzungsfahrpläne präzisiert und ergänzt und als konkret umzusetzende „Einzelmaßnahmen“ (EM) in die Datenbank eingepflegt worden.

Die Maßnahmenvorschläge stehen dabei auf der Ebene der Wasserkörper zur Verfügung. Das hat zur Folge, dass mehrere Querbauwerke in einem Wasserkörper nicht spezifisch durch Einzelmaßnahmen adressiert werden. Die in der WKSB-Datenbank ebenfalls vorgesehenen Erläuterungen zu den Einzelmaßnahmen können hier Klärung bringen, stehen aber nicht für jede Maßnahme zur Verfügung.

Für diese Studie wurden alle Maßnahmentypen, die die Durchgängigkeit betreffen, ausgewählt und im GIS mit den zu betrachtenden Gewässerabschnitten verschnitten. Insgesamt sind für alle Gewässer in NRW 62.028 Einzelmaßnahmen im Maßnahmenprogramm vorhanden (Stand 13.08.2015). Den Aspekt der Durchgängigkeit betreffen rund 12.000 Maßnahmen. Den zu untersuchenden Gewässerabschnitten mit Mittelwasserabfluss von mindestens 1 m³/s konnten 2.732 Maßnahmen zugeordnet werden, wobei an einem Standort mehrere Einzelmaßnahmen definiert sein können. Die in den Umsetzungsfahrplänen genannten Zeithorizonte wurden bei der Kategorisierung nicht berücksichtigt.

Die Standorte mit einem ungenutzten technisch-theoretischen Leistungspotenzial von mindestens 50 kW wurden genauer hinsichtlich der Einzelmaßnahmen analysiert. In Tabelle 6 sind Einzelmaßnahmen mit Bezug zur Durchgängigkeit aufgeführt, die diesen Standorten zugewiesen sind. Zusätzlich ist eine Bewertung angegeben, ob die jeweilige Maßnahme einen Einfluss auf die Ausschöpfung des Wasserkraftpotenzials besitzt, indem z. B. der Rückbau eines Bauwerkes vorgesehen ist. Dabei werden Maßnahmen wie Optimierung bzw. Bau

von Fischaufstiegs- oder Fischabstiegsanlagen nicht als relevant bezeichnet, da bei der Potenzialberechnung die erforderlichen Dotationen bereits berücksichtigt werden und davon ausgegangen wird, dass das Querbauwerk bestehen und damit für die Wasserkraft grundsätzlich nutzbar bleibt. Bei Maßnahmen, die z. B. „Rückbau / Umbau“ heißen, ist darüber hinaus unklar, ob es sich um den Umbau des Standortes im Sinne des Baus einer Fischaufstiegsanlage handelt, um eine Wehrabsenkung oder tatsächlich um einen Rückbau.

Tabelle 6: Einzelmaßnahmen und Einschätzung der Relevanz für die Potenzialermittlung

M-Typ	Bezeichnung Einzelmaßnahme	steht dem Ausbau der Wasserkraft entgegen
D-01	Anlage eines Umgehungsgerinnes / Fischpasses	nein
D-02	Optimierung eines Umgehungsgerinnes / Fischpasses	nein
D-03	Optimierung / Sicherung des Fischabstieges	nein
D-04	Rückbau / Umbau eines Querbauwerkes (QBW)	unklar
D-04-09	Durchgängigkeit herstellen	unklar
D-05	Rückstau beseitigen / minimieren	unklar
HA-01	Neutrassierung des Gewässerlaufes	ja
HA-01-02	Anlage eines Initialgerinnes zur Neutrassierung	ja
HG-12	Naturnahe / durchgängige Anbindung des Nebengewässers	unklar
S-03	Schaffung naturnaher Fließverhältnisse in / bzw. Aufhebung einer Stauhaltung	ja
S-09	(Wieder-)Herstellung naturnaher / optimierter Abflussverhältnisse	ja

Für das maximale Szenario des differenzierten Potenzials wurden im Ergebnis lediglich die potenziellen Standorte ausgeschlossen, für die in den Einzelmaßnahmen explizit und ausschließlich ein Rückbau vorgesehen ist (zum Beispiel (Wieder-)Herstellung naturnaher / optimierter Abflussverhältnisse, Schaffung naturnaher Fließverhältnisse in / bzw. Aufhebung einer Stauhaltung, Neutrassierung des Gewässerlaufes).

Im minimalen Szenario des differenzierten Potenzials wurden darüber hinaus die Standorte ausgeschlossen, für die Einzelmaßnahmen vorliegen, deren Auswirkungen auf die Realisierungschancen von Wasserkraftanlagen nicht eindeutig sind (zum Beispiel Rückbau / Umbau eines Querbauwerkes, Durchgängigkeit herstellen).

Sonstige Restriktionen

Folgende Parameter gingen aufgrund der Bearbeitungstiefe der landesweiten Potenzialstudie nicht in die Differenzierung der ungenutzten Potenziale ein:

- **Nutzungskonflikte**
Konkurrierenden Wassernutzungen wie z. B. Wasserentnahmen, Hochwasserschutz, Freizeitnutzung, Schifffahrt etc. können die für die Wasserkraftnutzung zur Verfügung stehende Wassermenge reduzieren. Bei der Berechnung des zusätzlich nutzbaren Potenzials wurde dieser Aspekt nur bei der Ermittlung des Potenzials an Talsperren berücksichtigt.
- **Technische Machbarkeit**
Die technische Machbarkeit ist u. a. abhängig von den konkreten standörtlichen Gegebenheiten und räumlichen Verhältnissen und konnte daher nicht berücksichtigt werden.
- **Detaillierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen**
In dieser Studie wurde lediglich die Anlagengröße (potenzielle Leistung) als Hinweis auf die Wirtschaftlichkeit eines Standortes berücksichtigt. Konkrete Standortuntersuchungen konnten analog zur technischen Machbarkeit in dieser Studie nicht geleistet werden. Hinzu kommt, dass häufig auch ein Teil des vorhandenen Potenzials aufgrund wirtschaftlicher Rahmenbedingungen nicht ausgenutzt werden kann.
- **Weitergehende Naturschutzziele**
Neben den oben aufgeführten Schutzgebieten können auch in weiteren Schutzgebieten (z. B. Landschaftsschutzgebieten) und gesetzlich geschützten Landschaftsteilen oder gesetzlich geschützten Biotopen wassergebundene Schutzziele vorliegen, die zu Konflikten beim Ausbau der Wasserkraftnutzung führen können.
- **Wasserrechte**
Die Angaben zu Wasserrechten werden in einer landeseigenen Datenbank verwaltet. Mit Hilfe dieser Datenbank wurden alte Wasserrechte recherchiert und den Wasserkraftanlagen in NRW zugeordnet. Eine Analyse bezüglich des Potenzials dieser Anlagen erfolgte jedoch nicht.

3.4 Potenzialermittlung für Talsperren

Innerhalb der Studie werden entsprechend der Kriterien der internationalen Kommission für große Talsperren (ICOLD) folgende Bauwerke als Talsperre betrachtet:

- Höhe über Gründungssohle ≥ 15 m und / oder
- Speichervolumen ≥ 1 Mio. m³.

Talsperren konnten bei der Gewässerstrukturkartierung nicht gleich den Querbauwerken und Wasserkraftanlagen erfasst werden. Die notwendigen Angaben wurden daher dem Stauanlagenverzeichnis NRW, internen Dokumenten oder auch dem Buch „Talsperren in Deutschland“ (DTK 2013) entnommen. Diese Daten waren jedoch teilweise nicht vollständig ermittelbar.

Die Recherche der Daten wurde daher mittels Betreiberumfrage vervollständigt und aktualisiert bzw. validiert. Des Weiteren wurden die Daten zum ausbaubaren Potenzial mittels einer Betreiberumfrage erhoben.

Bestehende Talsperren erfüllen in der Regel eine Vielfalt von Aufgaben. Für Externe ist der Zusammenhang zwischen den Aufgaben und deren Priorisierung schwer oder gar nicht abschätzbar. Aus diesem Grund musste die Auswertung basierend auf Betreiberaussagen erfolgen.

4 Anlagenbestand in NRW

Der Bestand an Wasserkraftanlagen in NRW wurde im Rahmen dieser Studie durch die Zusammenstellung und Auswertung verschiedener Datengrundlagen ermittelt. Hierzu zählten das Anlagenregister der Bundesnetzagentur im Rahmen der EEG-Vergütung, die Daten des Energieatlas NRW und des Fachinformationssystem QUIS, die Gewässerstrukturkartierung, die Potenzialstudie Arnsberg, das Stauanlagenverzeichnis NRW und Angaben von Betreibern und Unteren Wasserbehörden (Stand: Ende 2015).

In Nordrhein-Westfalen sind demnach derzeit insgesamt 427 Wasserkraftanlagen in Betrieb (Abbildung 6). 351 Wasserkraftanlagen davon werden im Anlagenverzeichnis der Bundesnetzagentur zum Erneuerbaren Energien Gesetz (EEG) geführt und speisen den erzeugten Strom demnach in das öffentliche Stromnetz ein. Insgesamt wurde in 2015 durch die Wasserkraft eine Strommenge von 533 GWh erzeugt, bei einer installierten Gesamtleistung von 189 MW (Tabelle 7). An Talsperren (nach Definition ICOLD, siehe Kapitel 3.4) fand eine Wasserkraftnutzung an 38 Standorten statt.

Die gesamte Bruttostromerzeugung in NRW betrug im Jahr 2014 175 Terawattstunden (TWh) (WEBSITE ENERGIESTATISTIK-NRW), der Anteil der Wasserkraft an der gesamten Bruttostromproduktion lag demnach bei 0,3 %. Bezogen auf die Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen in NRW (2015: 18 TWh) liegt der Anteil der Wasserkraft bei 3 % (LANUV 2016a).

In NRW sind darüber hinaus derzeit zusätzlich zwei Pumpspeicherkraftwerke mit einer installierten Leistung von 293 MW und einer Speicherkapazität von etwa 1,3 GWh in Betrieb (Herdecke, Rönkhausen). Hinzu kommt die Sorpetalsperre, wo allerdings momentan kein Pumpbetrieb stattfindet. In dieser Potenzialstudie werden Pumpspeicherkraftwerke auf Grund der besonderen Funktionen, Betriebsform und Standortanforderungen dieser Technologie allerdings nicht zu den Wasserkraftanlagen gezählt. Die Potenziale von Pumpspeicherkraftwerken im Land wurden im LANUV-Fachberichts 62: Potenzialstudie Pumpspeicherkraftwerke Nordrhein-Westfalen gesondert untersucht (LANUV 2016).



Abbildung 6: Wasserkraftanlagen in Nordrhein-Westfalen

Tabelle 7: Wasserkraftanlagen im Bestand: Kennzahlen

	Anzahl WKA	Leistung [MW]	Jahresarbeit [GWh/a]
WKA an Talsperren	38	93,2	208,0
WKA an anderen Standorten	389	95,9	325,0
Summe	427	189,0	533,0

Etwa 9 % aller Wasserkraftanlagen in NRW liegen an Talsperren, diese Anlagen verfügen über einen überproportionalen Anteil an der installierten Leistung von etwa 93 MW oder knapp 50 % aller Wasserkraftanlagen. Außerdem werden ca. 40 % der Jahresarbeit aller Wasserkraftanlagen in NRW an Talsperren erzeugt (Abbildung 7).

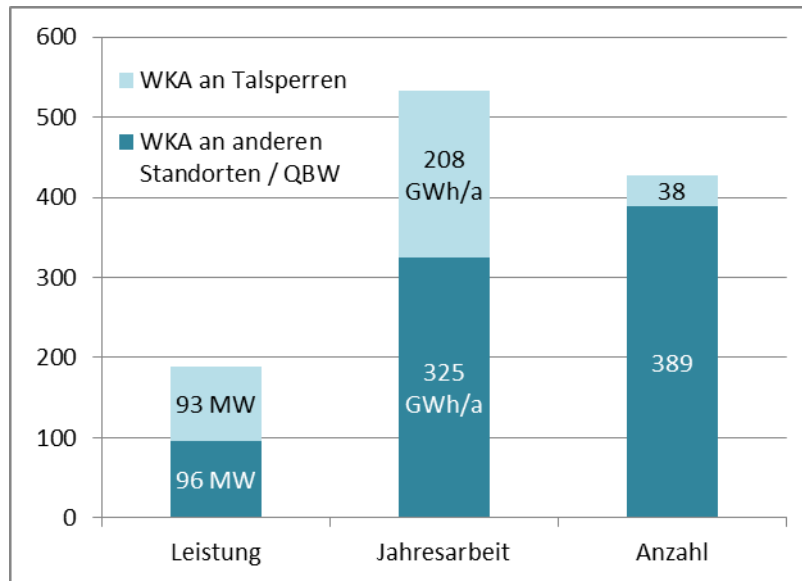


Abbildung 7: Wasserkraftanlagen im Bestand: Installierte Leistung und Jahresarbeit an Talsperren und anderen Standorten

Betrachtet man die Wasserkraftanlagen differenziert nach verschiedenen Leistungsklassen, zeigt sich, dass relativ wenige Anlagen mit großer Leistung den Großteil der Jahresarbeit an Wasserkraftstrom erzeugen (Abbildung 8).

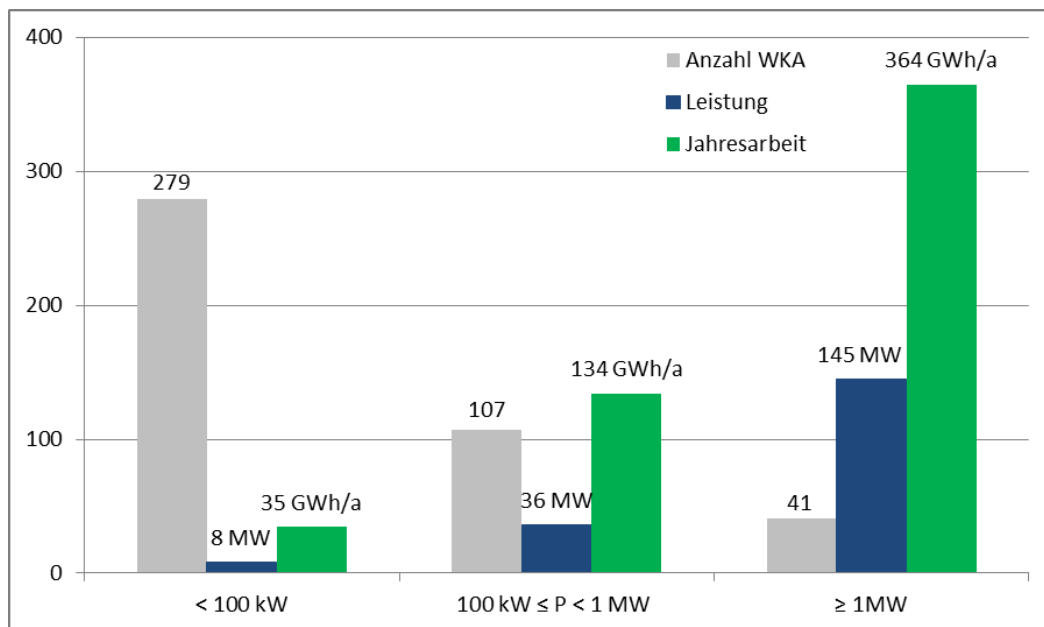


Abbildung 8: Wasserkraftanlagen im Bestand: Installierte Leistung und Jahresarbeit für verschiedene Leistungsklassen

Abbildung 9 zeigt die Lage der Wasserkraftanlagen an den Gewässern in Nordrhein-Westfalen nach Leistungsklassen. Es zeigt sich, dass zahlreiche Anlagen im Regierungsbezirk Arnsberg verortet sind (Abbildung 10). Dort sind auch in Summe die größte Leistung und Jahresarbeit zu verzeichnen (Abbildung 11). Die detaillierte Aufteilung des Anlagenbestandes nach Kreisen und Gemeinden ist im Anhang in den Kapitel III und IV dargestellt.



Abbildung 9: Lage Wasserkraftanlagen im Bestand in NRW - Darstellung nach Leistungsklassen

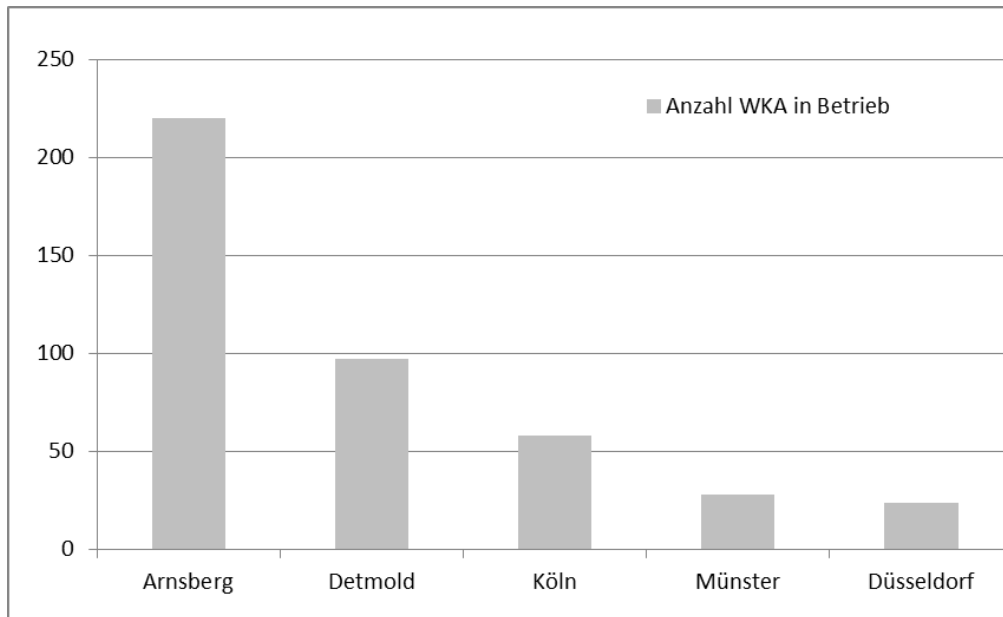


Abbildung 10: Anzahl der Wasserkraftanlagen im Bestand nach Regierungsbezirken

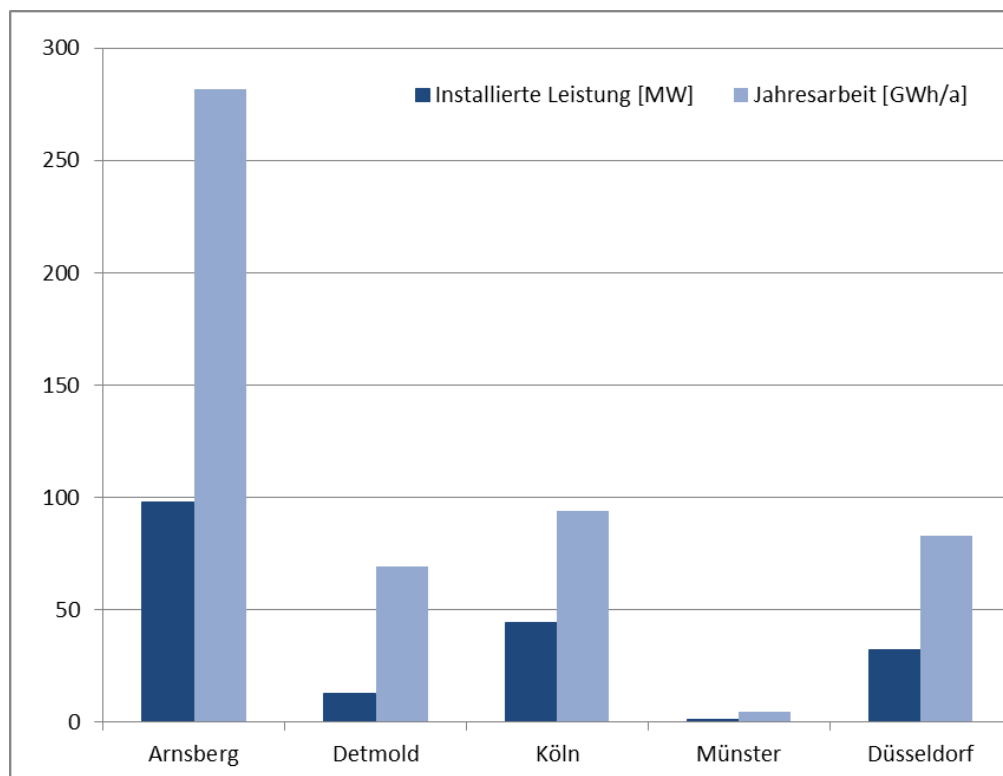


Abbildung 11: Installierte Leistung und Jahresarbeit der Wasserkraftanlagen im Bestand nach Regierungsbezirken

5 Ausbaupotenzial in NRW

Die Bestimmung des Wasserkraftpotenzials setzt voraus, dass die zu untersuchenden Standorte mit den benötigten technischen Daten bekannt sind. Durch eine detaillierte Analyse der vorhandenen Daten zu Querbauwerken und Wasserkraftanlagen wurde die Grundlage geschaffen für die Ermittlung des derzeit nicht genutzten Potenzials.

Für ganz NRW wurden 815 Standorte an bestehenden Querbauwerken bezüglich ihres Potenzials untersucht. Von diesen Standorten liegen 379 (ohne Talsperren) im Regierungsbezirk Arnsberg (Abbildung 12).

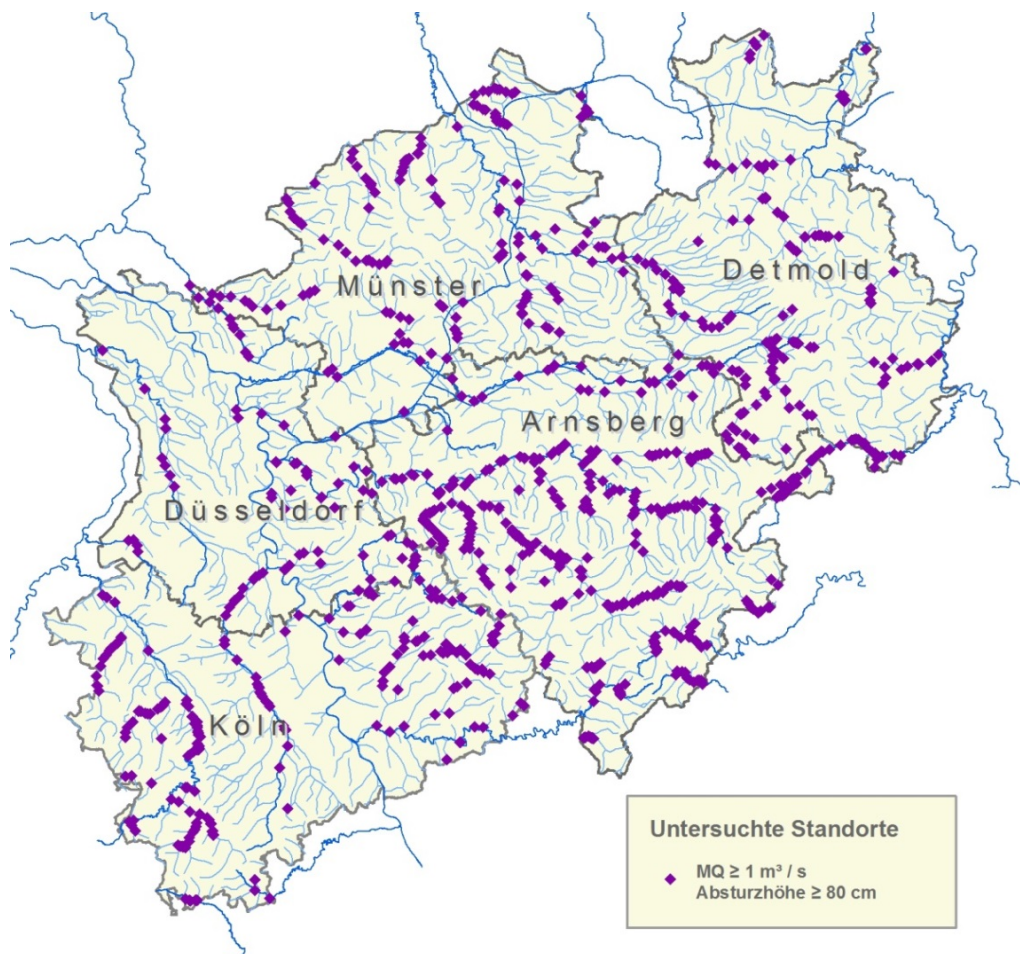


Abbildung 12: Standorte von Querbauwerken in NRW mit $H \geq 0,8$ m und $MQ \geq 1$ m³/s

Rund 35 % der Standorte verfügen über eine Ausleitung zu einer ehemaligen oder aktuell in Betrieb befindlichen Wasserkraftanlage (Tabelle 8), 81 Standorte befinden sich an Talsperren (Abbildung 13).

Tabelle 8: Zahl der untersuchten Standorte mit $H \geq 0,8$ m und $MQ \geq 1$ m³/s

	alle Standorte mit Potenzialuntersuchung	Standorte mit Ausleitung	Standorte potenzieller Flusskraftwerke
Standorte	734*	257	477
Talsperren NRW	81		
gesamt	815	257	477

*ohne Talsperren



Abbildung 13: Talsperren in NRW (gemäß Definition ICOLD)

Die ungenutzten Potenziale wurden in Bezug auf bestimmte Rahmenbedingungen untersucht. Da das ungenutzte technisch-theoretische Potenzial nicht detaillierter bezüglich der wirtschaftlichen, technischen oder ökologischen Realisierungsmöglichkeiten untersucht wurde, wird es im Rahmen der Studie als „technisch-theoretisches“ Potenzial bezeichnet.

Bei der Analyse der potenziellen Standorte für die Ermittlung des technisch-theoretischen Potenzials wurde neben den erforderlichen Mindestkriterien in Bezug auf Fallhöhe und Mindestabfluss lediglich eine potenzielle Mindestanlagenleistung von 10 kW vorgegeben. Vor dem Hintergrund der fraglichen Wirtschaftlichkeit des Ausbaus sowie der bestehenden Gefahr für Fische bei einem nur geringen Beitrag zum Gesamtpotenzial wurden Kleinststandorte unter 10 kW bereits bei der Ermittlung des technisch-theoretischen Potenzials nicht mehr berücksichtigt.

Für die Ermittlung des differenzierten Potenzials wurden im Gegensatz zum technisch-theoretischen Potenzial nur mögliche Anlagenstandorte mit einer Mindestleistung von 50 kW betrachtet. Diese wurden außerdem in Bezug auf ihre Lage in Schutzgebieten und Zielartengewässern für Lachs und Aal untersucht. Außerdem wurde ein möglicher Einfluss der Umsetzungsfahrpläne der Wasserrahmenrichtlinie auf die Ausbaumöglichkeiten an den Standorten analysiert. Das differenzierte Potenzial wird zusammenfassend in einem minimalen und einem maximalen Szenario eingestuft, was eine erste Einschätzung (Spannbreite) der Realisierbarkeit ermöglichen soll.

5.1 Potenziale an Talsperren

Die Potenziale an den Talsperren wurden auf Basis einer Betreiberabfrage ermittelt. Die Umfrage ergab, dass an den Talsperren das nutzbare und wirtschaftliche Potenzial bereits weitestgehend ausgenutzt ist. Technisch wäre sicherlich ein größeres Potenzial möglich, aber aufgrund anderer wichtiger Aufgaben der Talsperren können diese nicht für die Wasserkraftnutzung herangezogen werden.

Des Weiteren kamen etliche Rückmeldungen von Betreibern, die eine wirtschaftliche Nutzung der Wasserkraft ausschlossen. Teilweise wurden sogar vorhandene Wasserkraftanlagen wie z. B. an der Herbringhamer Talsperre wieder rückgebaut, oder es fand wie an der Sorpetalsperre eine Umnutzung vom Pumpspeicherbetrieb in einen Speicherbetrieb statt.

Einzig für die Wupper-Talsperre wurde ein ungenutztes Leistungspotenzial von 1 MW bzw. ein Erzeugungspotenzial von 0,8 GWh/a von den Betreibern gemeldet, zu dem es auch konkrete Planungen gibt. Dieses Potenzial ist in der Auswertung in das technisch-theoretische Potenzial eingeflossen.

5.2 Technisch-theoretisches Potenzial

Im Rahmen dieser Studie wurden insgesamt 532 Standorte an bestehenden Querbauwerken in NRW ermittelt, die die formulierten Mindestkriterien für die Quantifizierung des ungenutzten technisch-theoretischen Potenzials erfüllen (Mindestabsturzhöhe von 0,8 m, mittlerer Abfluss $MQ \geq 1 \text{ m}^3/\text{s}$) und für die darüber hinaus eine potenzielle Anlagenleistung von mindestens 10 kW ermittelt wurde (Abbildung 14).

Das Leistungs- und Erzeugungspotenzial an den jeweiligen potenziellen Standorten wurde wie in Kapitel 3.3 beschrieben berechnet. Die ökologischen Abflüsse wurden dabei an Hand der Werte der Variante V0 (siehe Anhang, Kapitel II. iv, Tabelle A 9) berücksichtigt.

Das ungenutzte technisch-theoretische Leistungspotenzial an diesen 532 Standorten beträgt demnach 42,3 MW. Etwa 22,5 % des technisch-theoretischen Leistungspotenzials (9,5 MW) entfallen dabei auf ungenutzte Potenziale an bestehenden Wasserkraftanlagen und stellen somit das Repowering-Potenzial dar. Das ungenutzte technisch-theoretische Erzeugungspotenzial beträgt in NRW insgesamt 141,4 GWh.



Abbildung 14: Standorte potenzieller Wasserkraftanlagen nach Leistungsklassen

Der Vergleich von Abbildung 15 mit Abbildung 16 und Abbildung 17 verdeutlicht, dass relativ wenige potenzielle Anlagen der Leistungsklasse $P \geq 100$ kW (Anzahl ca. 15 %) einen vergleichsweise großen Teil des ungenutzten Leistungs- (65 %) und Erzeugungspotenzials (74 %) bereitstellen könnten. Bei diesen Betrachtungen wurde bereits berücksichtigt, dass nach der Biodiversitätsstrategie des Landes NRW in bestimmten Schutzgebieten keine neuen Wasserkraftanlagen errichtet werden dürfen (Kapitel 2.3.4), so dass die Zahl potenzieller Anlagen hier geringer ausfällt als bei der Darstellung des gesamten technisch-theoretischen Potenzials.

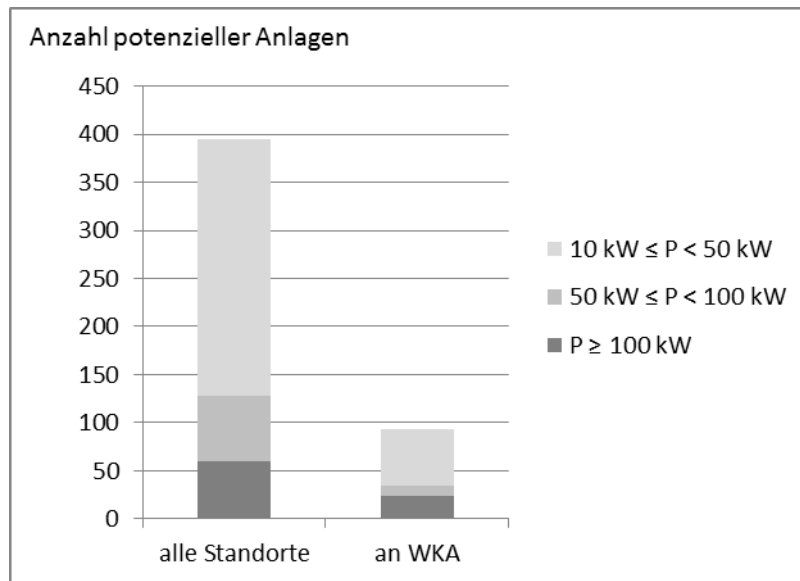


Abbildung 15: Anzahl potenzieller Wasserkraftanlagen nach Leistungsklassen und Repoweringpotenzial (ohne Neubau in Schutzgebieten)

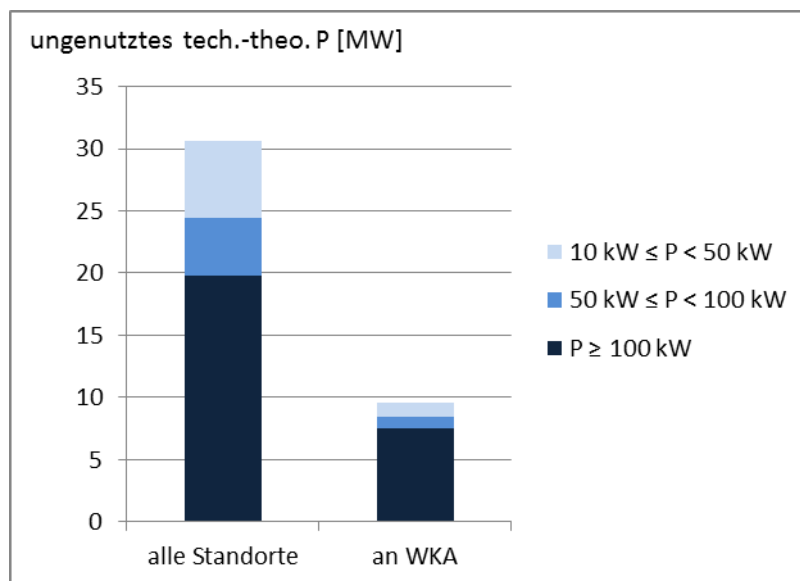


Abbildung 16: Ungenutztes technisch-theoretisches Leistungspotenzial nach Leistungsklassen und Repoweringpotenzial (ohne Neubau in Schutzgebieten)

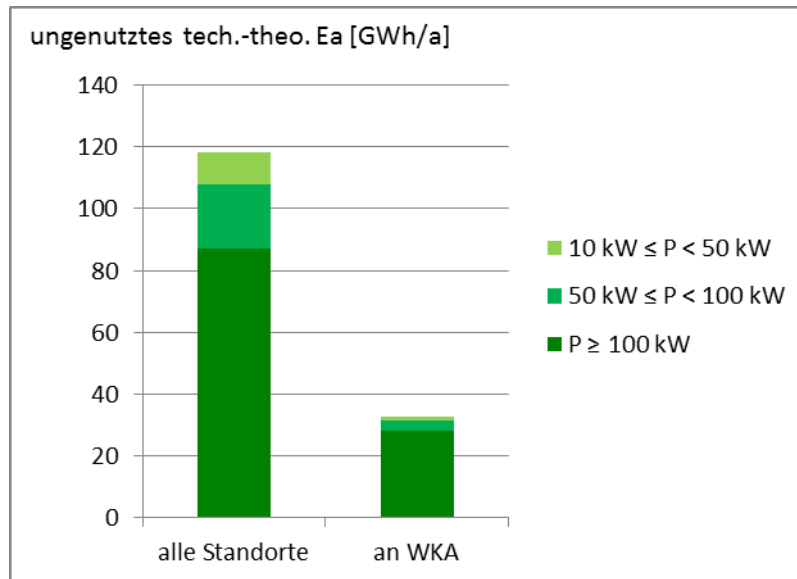


Abbildung 17: Ungenutztes technisch-theoretisches Erzeugungspotenzial nach Leistungsklassen und Repoweringpotenzial (ohne Neubau in Schutzgebieten)

5.3 Differenziertes Potenzial

Für die Untersuchung des landesweiten Wasserkraftpotenzials in NRW wurden aufbauend auf dem technisch-theoretischen Potenzial weitere Kriterien berücksichtigt und zum Teil gegliedert in Szenarien bewertet, um eine realistischere Einschätzung der Potenziale und der damit verbundenen Realisierungswahrscheinlichkeiten zu ermöglichen. Das so im Rahmen dieser Studie identifizierte Wasserkraftpotenzial wird im Weiteren als differenziertes Potenzial bezeichnet.

So ist beispielsweise der Neubau von Wasserkraftanlagen gemäß der Biodiversitätsstrategie des Landes in bestimmten Schutzgebieten (Nationalparke, FFH-, Vogelschutz- und Naturschutzgebiete) nicht zulässig (Kapitel 2.3.4). Etwa 28 % (11,8 MW) des bei dieser Untersuchung identifizierten ungenutzten technisch-theoretischen Leistungspotenzials befindet sich an Querbauwerken ohne bisherige Wasserkraftnutzung innerhalb dieser Schutzgebiete. Diese Potenziale können nicht genutzt werden und werden daher vor der weiteren Differenzierung der Potenziale ausgeschlossen und nicht weiter betrachtet. An potenziellen Standorten mit einer Mindestanlagengröße $P \geq 10 \text{ kW}$ können demnach unter Berücksichtigung dieser Schutzgebiete maximal 72 % oder 30,5 MW des ungenutzten technisch-theoretischen Leistungspotenzials genutzt werden (Abbildung 18).

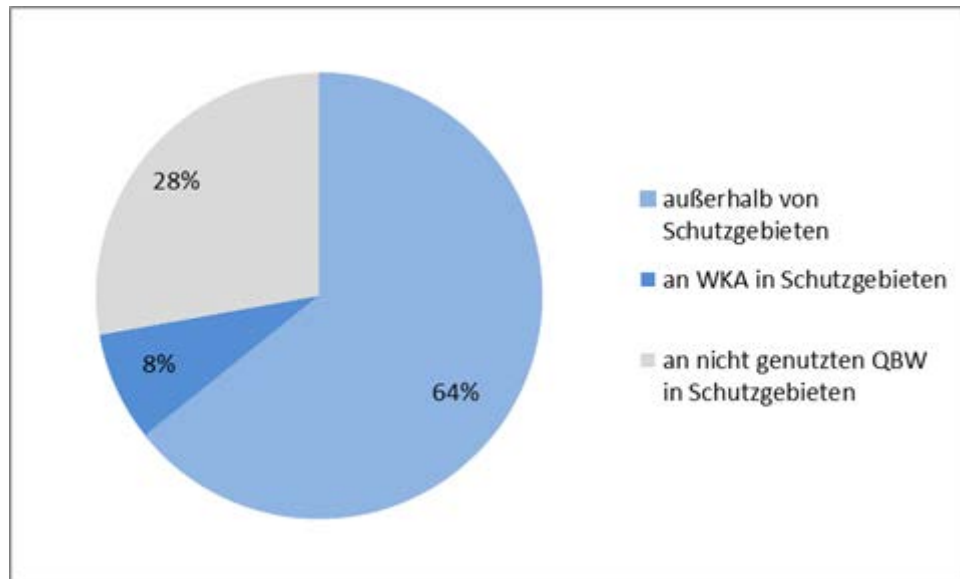


Abbildung 18: Ungenutzte technisch-theoretische Leistungspotenziale nach Lage in Schutzgebieten.

Auch ausgeschlossen wurden im differenzierten Potenzial alle Standorte mit einem Leistungspotenzial unter 50 kW. Dies trägt zum einen der Realisierungswahrscheinlichkeit kleinerer Potenziale vor dem Hintergrund der notwendigen Wirtschaftlichkeit Rechnung, und berücksichtigt zum anderen das bei kleineren Anlagen möglicherweise ungünstige Verhältnis zwischen dem Nutzen (Energieertrag) und den damit verbundenen ökologischen Kosten (Fischschutz, Durchgängigkeit).

Ebenfalls nicht mit in das differenzierte Potenzial eingeflossen sind solche Standorte, bei denen die Umsetzungsfahrpläne zur Wasserrahmenrichtlinie in den jeweiligen Einzelmaßnahmen aus dem Maßnahmenprogramm 2015 explizit fordern, dass Querbauwerke zurückzubauen sind und eine Wasserkraftnutzung demnach nicht möglich sein wird. Hierzu zählen beispielsweise Einzelmaßnahmen mit den Bezeichnungen „Neutrassierung des Gewässerlaufes“, „Schaffung naturnaher Fließverhältnisse in / bzw. Aufhebung einer Stauhaltung“ oder „(Wieder-)Herstellung naturnaher / optimierter Abflussverhältnisse“.

Über diese Kriterien hinaus, die grundsätzlich einen Ausschluss der betroffenen potenziellen Standorte aus dem differenzierten Potenzial zur Folge haben, wurden auch noch zwei weitere Aspekte in Szenarien berücksichtigt, bei denen keine abschließenden Aussagen zur grundsätzlichen Möglichkeit der Wasserkraftnutzung und zur Bewertung des Potenzials möglich war.

Hierzu zählt zum einen die Frage, ob der Neubau oder Ausbau einer Wasserkraftanlage innerhalb der Zielartengewässer Lachs und Aal grundsätzlich unzulässig ist oder ob die Erfüllung entsprechender verschärfter Auflagen ausreicht und Potenziale somit auch in solchen Bereichen gehoben werden können. Zur Klärung dieser Frage hat die nordrhein-westfälische Landesregierung eine eigenständige Langzeituntersuchung gestartet, die Informationen für eine hier zukünftig zu treffende Entscheidung liefern sollen. Die Ergebnisse dieser Studie lagen bei Abschluss der Potenzialstudie Wasserkraft jedoch noch nicht vor, werden jedoch für Mitte 2017 erwartet.

Zum anderen wurden die bei der Aufstellung der Umsetzungsfahrpläne formulierten Einzelmaßnahmen differenziert betrachtet, für die auf Grund der Datenlage und der Bezeichnung der Einzelmaßnahmen keine eindeutige Aussage zu den Auswirkungen auf die grundsätzliche Möglichkeit einer Wasserkraftnutzung abgeleitet werden konnte. Bei diesen Maßnahmen, die z. B. „Rückbau / Umbau“ heißen, ist unklar, ob es sich um den Umbau des Standortes im Sinne des Baus einer Fischaufstiegsanlage handelt, um eine Wehrabsenkung oder tatsächlich um einen Rückbau. Zudem stehen die Programmmaßnahmenvorschläge zur Durchgängigkeit nur auf Ebene der Wasserkörper zur Verfügung, so dass sich die Einzelmaßnahmen bei mehreren Querbauwerken in einem Wasserkörper nicht explizit auf einzelne Anlagen beziehen, wenn keine weitere Detaillierung im Umsetzungsfahrplan erfolgt ist (s.o.).

Um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass für diese beiden zuletzt genannten Aspekte keine eindeutige Aussage über die Möglichkeit einer Wasserkraftnutzung getroffen werden konnte, wurden das differenzierte Potenzial für ein minimales Szenario und ein maximales Szenario berechnet. Im maximalen Szenario werden die nicht abschließend zu klärenden Kriterien Zielartengewässer Lachs und Aal sowie nicht eindeutige Einzelmaßnahmen aus den Umsetzungsfahrplänen zu Gunsten der Wasserkraft ausgelegt und eine zukünftige Nutzung in diesen Bereichen als möglich angesehen. Daher weist das maximale Szenario das deutlich größere Wasserkraftpotenzial für Nordrhein-Westfalen aus. Im minimalen Szenario werden Standorte in Zielartengewässern Lachs und Aal sowie bei Einzelmaßnahmen mit der Bezeichnung „Rückbau / Umbau“ von der Potenzialbetrachtung ausgeschlossen.

Die zentralen Ergebnisse der Potenzialanalyse sind in Tabelle 9 zusammengefasst:

Tabelle 9: Ungenutztes technisch-theoretisches und differenziertes Wasserkraftpotenzial in NRW

Ungenutztes technisch-theoretisches Wasserkraftpotenzial (Lage an bestehendem QBW, Fallhöhe $\geq 0,8$ m, mittlerer Abfluss MQ ≥ 1 m ³ /s, installierbare Leistung $P_{\text{pot}} \geq 10$ kW)			
$P_{\text{pot}} \geq 10$ kW	Anzahl Standorte	Leistungspotenzial [MW]	Erzeugungspotenzial [GWh/a]
gesamt (1)	532	42,3	141,4
davon Repowering (2)	81	9,5	35,9
Ungenutztes differenziertes Wasserkraftpotenzial (Ohne neue Standorte von Wasserkraftanlagen in Schutzgebieten, ohne neue Standorte mit Maßnahmen, die explizit und ausschließlich den „Rückbau“ in den Umsetzungsfahrplänen fordern, installierbare Leistung $P_{\text{pot}} \geq 50$ kW)			
$P_{\text{pot}} \geq 50$ kW	Anzahl Standorte	Leistungspotenzial [MW]	Erzeugungspotenzial [GWh/a]
maximales Szenario			
gesamt (3)	128	24,4	107,9
davon Repowering (4)	35	8,4	31,4
Potenzial an Standorten mit installierbarer Leistung ≥ 100 kW (5)	60	19,8	87,2
ohne neue Standorte in Zielartengewässern Lachs und Aal (6)	89	20,8	91,0
ohne neue Standorte mit Maßnahmenkombination „Rückbau / Umbau / Herstellung der Durchgängigkeit“ entsprechend Umsetzungsfahrplänen (7)	66	15,4	63,7
minimales Szenario			
ohne a) neue Standorte in Zielartengewässern Lachs und Aal und ohne b) neue Standorte mit Maßnahmen „Rückbau / Umbau / Herstellung der Durchgängigkeit“ (8)	54	14,4	59,8

5.3.1 Maximales Szenario

Im maximalen Szenario des differenzierten Potenzials verbleiben letztlich insgesamt 128 potenzielle Standorte mit einem Leistungspotenzial von 24,4 MW und einem Erzeugungspotenzial von 107,9 GWh/a.

Von diesen insgesamt 128 potenziellen Standorten im maximalen Szenario des differenzierten Potenzials befinden sich 35 Standorte an Querbauwerken mit bereits bestehender Wasserkraftnutzung, an denen jedoch nicht das gesamte vorhandene Potenzial genutzt wird. An diesen Standorten könnte also durch Repowering die Erzeugungskapazität der Wasserkraftanlagen ausgebaut werden. Das Leistungspotenzial dieser 35 Anlagen ließe sich um 8,4 MW steigern, das Erzeugungspotenzial um 31,4 GWh/a. Der Anteil des Repowerings am gesamten differenzierten Potenzial liegt im maximalen Szenario demnach bei 34,4 % des Leistungspotenzials und bei 29,1 % des Erzeugungspotenzials.

Ein Großteil des differenzierten Potenzials im maximalen Szenario liegt an Standorten, an denen sich Wasserkraftanlagen mit einer installierbaren Leistung von mindestens 100 kW realisieren ließen. Hierbei handelt es sich mit 60 Standorten zwar nur um weniger als die Hälfte aller potenziellen Standorte des differenzierten Potenzials, diese sind jedoch für 81,1 % des Leistungspotenzials (19,8 MW) und 80,8 % des gesamten Erzeugungspotenzials (87,2 GWh/a) verantwortlich.



Abbildung 19: Standorte potenzieller Wasserkraftanlagen nach Leistungsklassen (maximales Szenario)

5.3.2 Minimales Szenario

Im Vergleich zum maximalen Szenario des differenzierten Potenzials werden im „minimalen Szenario“ weitere Faktoren, die im Rahmen der vorliegenden Studie noch nicht abschließend beurteilt werden konnten, von der Potenzialermittlung ausgenommen. Daher ergibt sich hier eine eher zurückhaltende Bewertung von Standorten für die Wasserkraftnutzung zu Gunsten einzelner Aspekte des Arten- und Gewässerschutzes und somit ein deutlich geringeres differenziertes Wasserkraftpotenzial in NRW.

So wurden im 1. Schritt für das minimale Szenario des differenzierten Potenzials sämtliche Standorte innerhalb der Zielartengewässer für Lachs und Aal (Abbildung 1) ausgeschlossen. Dadurch sinkt die Anzahl potenzieller Standorte von 128 im maximalen Szenario auf 89, was einer Reduzierung des Leistungspotenzials von 3,6 MW oder 14,8 % entspricht. Das Erzeugungspotenzial vermindert sich dabei um 16,9 GWh/a (-15,7 %).

Im 2. Schritt wurden für die Potenzialermittlung im minimalen Szenario außerdem weitere Einzelmaßnahmen (EM) der Umsetzungsfahrpläne zur Implementierung der Wasserrahmenrichtlinie berücksichtigt, die die Herstellung der Durchgängigkeit betreffen. Die entsprechenden Maßnahmen werden dabei mit Rückbau / Umbau oder Herstellung der Durchgängigkeit betitelt. Ein tatsächlicher Rückbau allein wird dabei nicht explizit als Maßnahme aufgeführt, kann aber auch nicht ausgeschlossen werden. Daher werden im minimalen Szenario des differenzierten Potenzials sämtliche dieser Standorte nicht mit in das Potenzial einbezogen, auch wenn sich der Umfang der Beeinträchtigung auf der Ebene der vorliegenden Maßnahmenvorschläge nicht quantifizieren lässt. Hierdurch vermindert sich die Anzahl der potenziellen Standorte von 128 im maximalen Szenario auf nur noch 66, was eine Reduzierung des Leistungspotenzials um 9 MW oder 37 % bedeutet. Das landesweite Erzeugungspotenzial vermindert sich dabei um 44,2 GWh/a (-41 % im Vergleich zum maximalen Szenario).

Abschließend wurden für die Bestimmung des differenzierten Potenzials im minimalen Szenario beide Schritte kombiniert, und sowohl alle potenziellen Standorte in Zielartengewässern Lachs und Aal als auch diejenigen mit Einzelmaßnahmen Rückbau / Umbau oder Herstellung der Durchgängigkeit ausgeschlossen. Dadurch ergibt sich letztlich im minimalen Szenario für 54 potenzielle Standorte ein differenziertes Leistungspotenzial von 14,4 MW und ein Erzeugungspotenzial von 59,8 GWh/a.

Im Vergleich zum maximalen Szenario reduziert sich dabei im minimalen Szenario die Anzahl potenzieller Standorte um 74 (-58 %), das Leistungspotenzial um 10 MW (-41 %) und das Erzeugungspotenzial um 48,1 GWh/a (-44,6 %). Allerdings erhöht sich das durchschnittliche Potenzial je Einzelstandort im minimalen Szenario auf 267 kW im Vergleich zu 190 kW im maximalen Szenario. Dies bedeutet, dass im minimalen Szenario Einzelstandorte mit höherem durchschnittlichem Potenzial je Standort verbleiben, was von Bedeutung für die wirtschaftliche Umsetzbarkeit sein kann.

5.4 Regionale Verteilung der Potenziale

Bei der Betrachtung der regionalen Verteilung des differenzierten Wasserkraftpotenzials im maximalen Szenario wird deutlich, dass die größten Potenziale im Regierungsbezirk Arnsberg liegen, und zwar sowohl was die Zahl potenzieller Anlagen (inkl. Repowering) angeht (59), als auch in Bezug auf das Leistungspotenzial (9,5 MW) und den Jahresertrag (42,3 GWh/a). Die Regierungsbezirke Düsseldorf, Detmold und Köln liegen mit einer potenziell installierbaren Leistung zwischen 4,5 und 5 MW etwa gleich auf, wobei dieser Wert in Düsseldorf von deutlich weniger potenziellen Anlagen (12) erreicht wird, als in Detmold (21) oder Köln (28). Beim potenziellen Jahresertrag liegt der Regierungsbezirk Düsseldorf (24,5 GWh/a) sogar deutlich vor Detmold (21,8 GWh/a) und Köln (16,9 GWh/a). Im Regierungsbezirk Münster sind die differenzierten Potenziale zur Wasserkraftnutzung am geringsten, hier konnten 8 potenzielle Anlagenstandorte mit einem Leistungspotenzial von 0,6 MW und einem potenziellen Ertrag von 2,4 GWh/a identifiziert werden (siehe Abbildung 20)

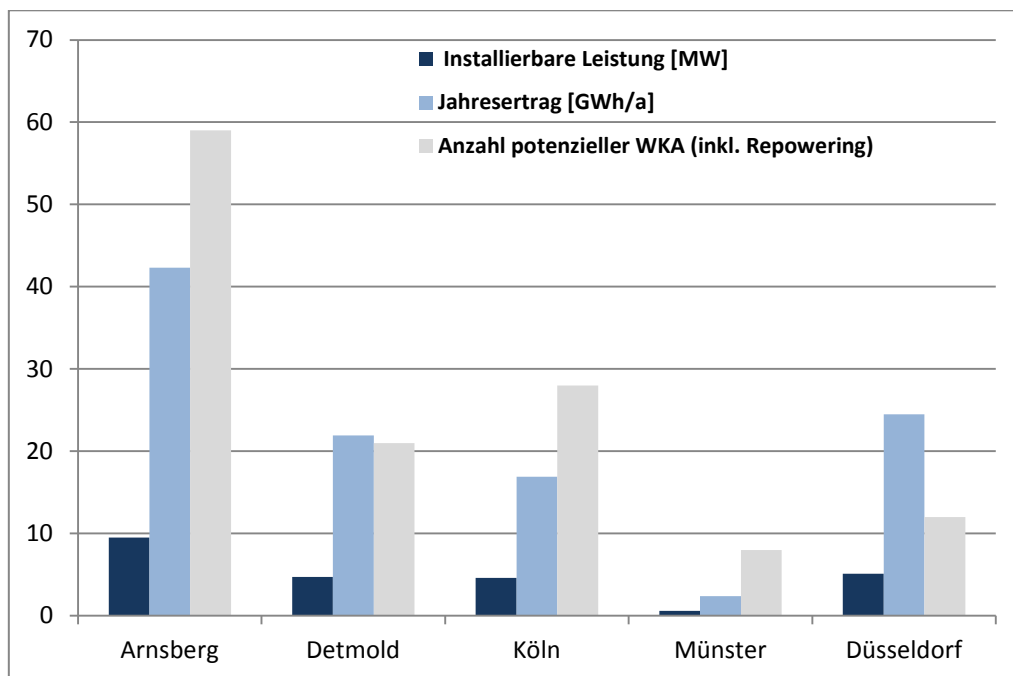


Abbildung 20: Differenziertes Wasserkraftpotenzial nach Regierungsbezirken („maximales Szenario“)

Betrachtet man die Verteilung der differenzierten Potenziale im maximalen Szenario auf Gemeindeebene, wird deutlich, dass in den meisten Gemeinden Nordrhein-Westfalens kein Wasserkraftpotenzial vorhanden ist, dennoch konnten Potenziale in allen Landesteilen identifiziert werden (Abbildung 21 und Abbildung 22). Auffällig ist dabei eine Konzentration der Potenziale in Gemeinden, die an den Flüssen Ruhr, Rur, Lenne, Wupper, Erft und Werre / Weser liegen. Die Gemeinden mit dem höchsten Leistungspotenzial sind Duisburg (2,7 MW), Petershagen (1,9 MW) und Witten (1,6 MW).

Die identifizierten Potenziale zur Wasserkraftnutzung in NRW auf Ebene der Regierungsbezirke, der Kreise und der Gemeinden sind im Anhang (Kapitel III und IV) detailliert dargestellt.

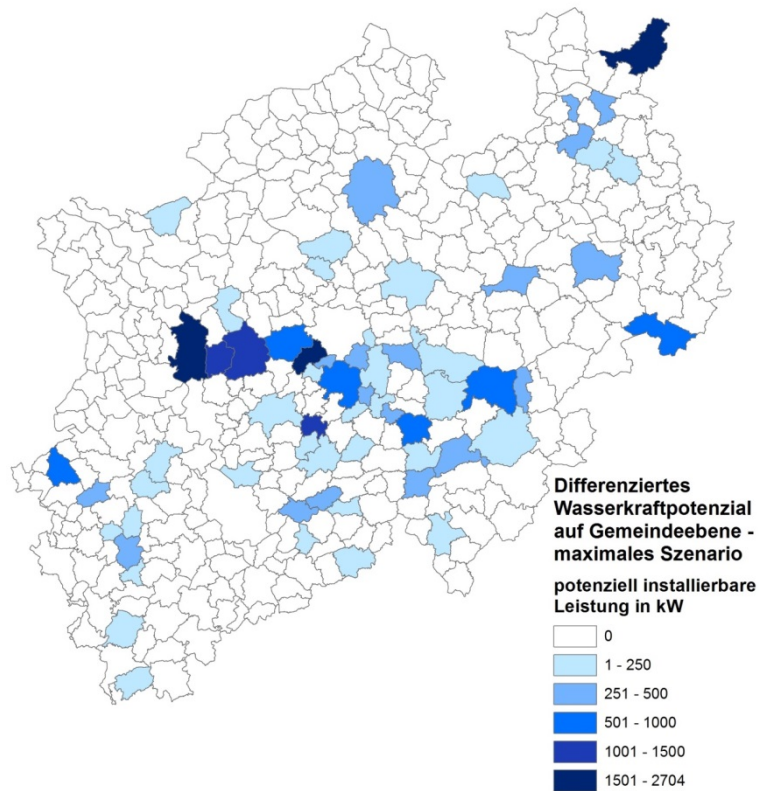


Abbildung 21: Potenziell installierbare Leistung nach Gemeinden (differenziertes Potenzial, „maximales Szenario“)

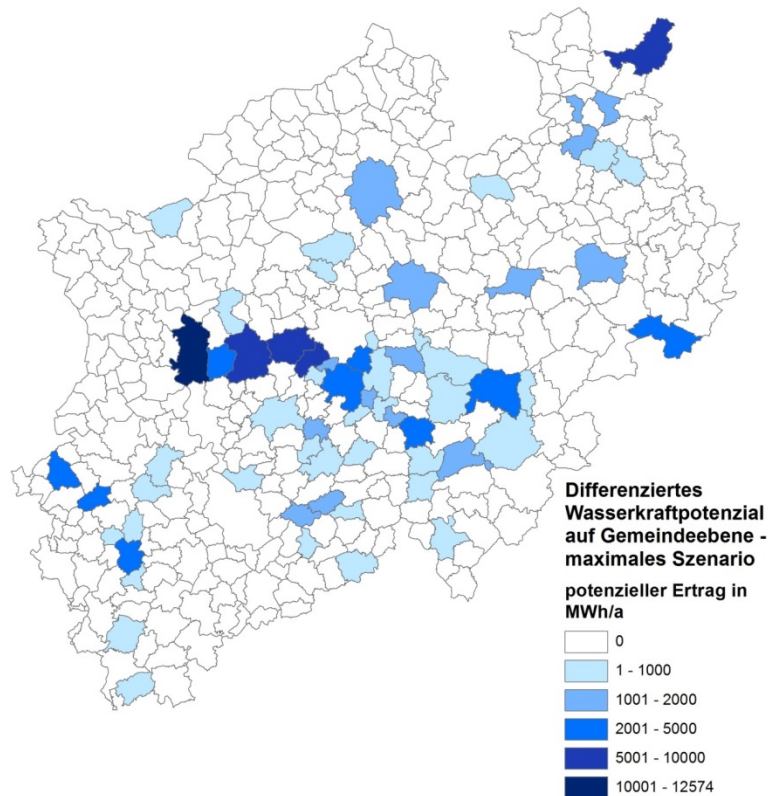


Abbildung 22: Potenzieller Ertrag nach Gemeinden (differenziertes Potenzial, „maximales Szenario“)

5.5 CO₂-Einsparpotenzial

Das CO₂-Einsparpotenzial wurde auf Basis des deutschen Strommixes für das Jahr 2013 berechnet. Das Umweltbundesamt UBA gibt die CO₂-Emission für die Erzeugung einer Kilowattstunde (kWh) Strom mit 559 Gramm CO₂ an (WEBSITE UBA). Die Wasserkraftnutzung verursacht der Lebenszeitanalyse zufolge nur etwa 40 Gramm CO₂ pro Kilowattstunde.

Könnte in Nordrhein-Westfalen das gesamte differenzierte Potenzial im maximalen Szenario von 107,9 GWh aktiviert werden, ergäbe sich demnach eine CO₂-Einsparung von rund 56.000 Tonnen CO₂ pro Jahr

Laut Angaben des Umweltbundesamtes verursacht im Mittel jeder Bundesbürger durch Energieverbrauch und Konsum jährlich eine äquivalente CO₂-Emission von etwa 12 Tonnen (UBA 2016). Eine CO₂-Einsparung von 56.000 Tonnen entspricht also den äquivalenten CO₂-Emissionen von 4.600 Bürgerinnen oder Bürgern.

6 Sonstige Formen der Wasserkraftnutzung

In diesem Kapitel werden die Potenziale beleuchtet, die sich durch „alternative“ Formen der Wasserkraftnutzung ergeben, wie kinetische Strömungsmaschinen oder die Wasserkraftnutzung an Infrastruktureinrichtungen.

6.1 Kinetische Strömungsmaschinen

Kinetische Strömungsmaschinen nutzen die Strömung in Meeren oder Binnengewässern zur Umwandlung in elektrische Energie. Im Folgenden werden die technischen Grundlagen erläutert und die Potenziale zur Nutzung kinetischer Strömungsmaschinen in NRW untersucht.

6.1.1 Grundlagen

Grundsätzlich kann man folgende wesentliche Strömungsquellen unterscheiden (GIESECKE et al. 2014):

- Strömung in Binnengewässern, resultierend aus dem natürlicherweise vorgegebenen Höhenunterschied.
- Meeresströmungen infolge der Gezeiten, d. h. Ebbe und Flut.
- großräumige Massenströmungen, verursacht beispielsweise durch unterschiedliche Wassertemperaturen oder Salinitäten.

Da ein Teil der Strömung aufgrund des Aufstaus vor der Strömungsmaschine und des fehlenden seitlichen Verbaus an derselben vorbeifließt, kann mit kinetischen Strömungsmaschinen der Strömung nicht die gesamte kinetische Energie entzogen werden. Dieser Wirkmechanismus wurde 1919 von A. Betz für Windturbinen näher beschrieben und wird seitdem als Betz'sches Gesetz bezeichnet, das aber für alle frei umströmten Strömungsmaschinen gilt. Entsprechend diesem Gesetz kann in diesem Fall der maximal mögliche Energieentzug nur 16/27 (ca. 59 %) der gesamten kinetischen Energie betragen. Damit ergibt sich für eine frei umströmte Strömungsmaschine folgende theoretische Leistung (GIESECKE et al. 2014):

$$P = c_p \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^3 = c_p \cdot \frac{\rho}{2} \cdot Q \cdot v^2 \quad [\text{kW}]$$

mit

P Leistung [kW]

c_p Leistungsbeiwert oder Betz'scher Faktor:

für klassische Wasserkraftanlagen: $c_p = 1$

für frei umströmte Strömungsmaschinen: $c_p = 16/27$

ρ Dichte des Fluids [kg/m³]

A Rotorfläche [m²]

v Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

Q Durchfluss [m³/s]

Betrachtet man die mögliche Leistung eines „klassischen“ Wasserkraftwerks mit Aufstau und setzt diese mit der o. g. Gleichung gleich, so erhält man das Verhältnis der kinetischen Energie zur äquivalenten Fallhöhe $h_{f,\text{äq}}$ wie folgt (GIESECKE et al. 2014):

$$c_p \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^2 = \rho \cdot g \cdot h_{f,\text{äq}}$$

$$\Leftrightarrow h_{f,\text{äq}} = f(v^2) = c_p \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g}$$

$$\Leftrightarrow h_{f,\text{eff,max}} = \frac{16}{27 \cdot 2 \cdot g} \cdot v^2 \approx 0,030 \cdot v^2$$

mit

$h_{f,\text{äq}}$ äquivalente Fallhöhe [m]

g Erdbeschleunigung [m/s^2]

$h_{f,\text{eff,max}}$ maximale effektive Fallhöhe

Diese Umrechnung zeigt, dass die theoretisch nutzbare kinetische Energie deutlich geringer ist, als die potenzielle Energie bei einem Aufstau. Für einen Fluss wie den Rhein, mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 2 m/s, ergibt sich somit eine theoretisch nutzbare äquivalente Fallhöhe für klassische Wasserkraftanlagen von $h_{f,\text{äq,theo}} = 0,203 \text{ m}$ und für frei umströmte Strömungsmaschinen von $h_{f,\text{eff,max}} = 0,12 \text{ m}$. Darüber hinaus sind die Maschinengröße und der Gesamtwirkungsgrad für die Leistungsausbeute von Bedeutung (GIESECKE et al. 2014).

Aufgrund zweier Randbedingungen reduziert sich die Maschinengröße. Zum einen ist in Sohlennähe eine Grenzschicht mit niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten infolge von Rauheit vorhanden. Zum zweiten ist ein Sicherheitsabstand zur Wasseroberfläche zu berücksichtigen, um Interaktionen mit Bootsbetrieb, Wellen, Eisbildung etc. auszuschließen. Daraus ergibt sich, dass verhältnismäßig große Wassertiefen vorhanden sein müssen, um nennenswerte Leistungen erzielen zu können. Der Gesamtwirkungsgrad liegt dabei je nach Maschinentyp im Bereich von 72 bis 78 %.

Diese Randbedingungen machen deutlich, dass die meisten Binnengewässer, wie beispielsweise der Rhein, aufgrund der niedrigen Geschwindigkeiten und geringen Wassertiefen für frei umströmte kinetische Strömungsmaschinen ungeeignet und diese wirtschaftlich in der Regel nicht darstellbar sind. So ergibt sich für den Rhein bei einer optimistischen Betrachtung der Strömungsgeschwindigkeit von 2 m/s und einem möglichen Rotordurchmesser von 2 m eine elektrische Leistung von unter 10 kW. Diese Größe wird allgemein für einen gerade noch wirtschaftlichen Betrieb von Strömungsmaschinen angegeben.

6.1.2 Typen kinetischer Strömungsmaschinen

In der Vergangenheit wurden unterschiedliche Typen von Strömungsmaschinen entwickelt, wobei nachfolgend nur auf diejenigen eingegangen werden soll, die in Binnengewässern zum Einsatz kommen können (GIESECKE et al. 2014).

Tabelle 10: Anforderungen zum Einsatz ausgewählter kinetischer Strömungsmaschinen

Turbine	Mindestwassertiefe [m] (auch im Niedrigwasserfall)	Mindestgeschwindigkeit [m/s]
KSB Flussturbine	3,5	0,
Aqualibre Strom-Boje 3	3,0	ca. 2,0
SmartHydro Monofloat	2,2	1,0
SmartHydro kinetisches Kleinst-WKA	2,0	1,0
RER TREK-Turbine	4,0	ca. 3,0

Mantelturbinen

Mit Hilfe eines um die Turbine herum angeordneten Saugmantels kann durch den resultierenden Druckabfall hinter dem Laufrad in Verbindung mit einer sich am Mantelaustritt einstellenden Sogwirkung („Ejektoreffekt“) eine Druckdifferenz erreicht werden, die zu einer Leistungssteigerung führt. Bei einem einfachen symmetrischen Saugmantel beträgt die Steigerung bis zu ca. 10 %. Bei asymmetrischen, sich stärker aufweitenden Saugmantelformen kann diese durchaus 20-40 % betragen. Beispiele hierfür sind (siehe Tabelle 10):

- Die TREK-Turbine ist als großmaßstäblicher Prototyp mit einem Laufraddurchmesser von 2,8 m im St.-Lorenz-Strom, Kanada, seit August 2010 in Betrieb und erzeugt bei einer Fließgeschwindigkeit von etwa 3 m/s eine Leistung von ca. 100 kW.
- Die sogenannte KSB-Flussturbine wurde im September 2010 vom Pumpenhersteller KSB als Prototyp im Rhein bei St. Goar installiert und erzeugt dort bei einer Fließgeschwindigkeit von ca. 2 m/s eine Leistung von ca. 5 kW.
- Die Strom-Boje® stellt ein frei schwimmendes Strömungskraftwerk dar, das ohne feste Installationen auskommt und nur über eine Ankerkette an einem im Fluss eingebrachten Ankerstab gehalten wird. Dieses Strömungskraftwerk für Wassertiefen ab 2 m wird seit dem Jahr 2006 entwickelt. Derzeit ist der 3. Prototyp in der Donau bei Weißenkirchen in der Wachau, Österreich, mit 2,5 m Rotordurchmesser im Einsatz,

der bei 2 m/s eine Leistung von ca. 19 kW erzeugen soll. Weitere Überlegungen existieren für ein Vorhaben mit 340 Anlagen im Rhein bei Bingen.

- Ein ähnliches System stellt die Smart-Hydro-Power-Turbine dar, bei der eine dreiflügelige Mantelturbine an zwei Schwimmkörpern aufgehängt ist und die bei einer Bauhöhe von etwas mehr als 1 m zwischen 250 und 5000 Watt Leistung erbringen soll.

Schwimmende Mühlen

Schwimmende Mühlen, auch als Schiffsmühlen, Stromräder, Freistromwandler oder schwimmende Energiewandler bezeichnet, nutzen die freie Strömung durch Wasserräder, die auf oder an einen Schwimmkörper montiert sind. Auch aktuelle Untersuchungen und Forschungsprojekte zeigen, dass derartige Anlagen ausschließlich einen Gesamtwirkungsgrad von max. 30 % erreichen können. Bei Stromrädern mit einer seitlichen Führung aus Schwimmern, auch als Schussgerinne bezeichnet, womit das Gesamtsystem dem Prinzip eines unterschlächtigen Wasserrades mit Kropfgerinne ähnelt, ist mit einem Wirkungsgrad von bis zu 40 % zu rechnen.

6.1.3 Potenzialermittlung kinetischer Strömungsmaschinen

Basierend auf den Einsatzgrenzen kinetischer Strömungsmaschinen wurden die Gewässerabschnitte in NRW ermittelt, in denen ein Einsatz theoretisch möglich ist. Diese Strecken müssen über eine hinreichende Wassertiefe und eine hinreichende Fließgeschwindigkeit verfügen. Für die Nutzung mit kinetischen Strömungsmaschinen werden daher nur Gewässerstrecken mit einer Mindestwassertiefe von 2 m und Mindestfließgeschwindigkeiten von 1 m/s betrachtet.

Der Auswertung liegen die Daten der Gewässerstrukturkartierung 2012 des Landes NRW zugrunde (LANUV 2013). Folgende Daten wurden verwendet:

- Gewässertiefe T: Mittelwassertiefe (MWTIEF_COD)
- Gewässerbreite B: Sohlbreite (SOHLBT_COD)
- Profiltiefe: Verhältnis von Gewässerbreite und Einschnitttiefe: EP 4.2 (Querprofil)
- Information zum Rückstau: EP 2.7 (Längsprofil)
- Information zur Ausleitung: EP 2.3 (Längsprofil)

Die Parameter Tiefe T und Breite B differieren mit der hydrologischen Situation und sind bei Niedrigwasserverhältnissen deutlich geringer als bei einem mittleren Abfluss. Im Rahmen dieser Studie interessiert die dauerhafte Nutzung der Strömungsenergie. Insofern markiert der mittlere jährliche Niedrigwasserabfluss (MNQ) eine zwar pessimistische, aber über große Zeitabschnitte realistische Abflusssituation.

Der Mittelwasserabfluss MQ steht als statistischer Mittelwert der Abflüsse deutlich weniger als die Hälfte des Jahres zur Verfügung, als Anhaltswert können hier ca. 120 Tage pro Jahr genannt werden.

MNQ und MQ stehen flächendeckend für NRW aus der Studie „Bestimmung des kumulativen Abwasseranteils“ (LANUV 2014) zur Verfügung.

Mit der Kontinuitätsbedingung gilt $v = Q/A$, wobei v die mittlere Fließgeschwindigkeit im Profil in m/s, Q den Abfluss in m³/s und A den durchströmten Querschnitt in m² beschreibt. Setzt man vereinfacht an $A = \text{Breite} \cdot \text{Tiefe}$, können aus den Daten der Gewässerstrukturkartierung die Gewässerabschnitte mit Mindestwassertiefe und Mindestgeschwindigkeit ermittelt werden.

Aus den Gewässerabschnitten der GSGK wurden die relevanten Abschnitte nach folgenden Kriterien gefiltert:

- Sohlbreiten größer 5 m oder unbekannt
- für sehr flache Abschnitte (Verhältnis von Gewässerbreite und Einschnitttiefe < 1:10): Sohlbreiten > 20 m
- für flache Abschnitte (1:6 - 1:10): Sohlbreiten > 12 m
- Mittelwassertiefen größer 2 m oder unbekannt
- MNQ > 10 m³/s bzw. MQ > 10 m³/s
- Abschnitte mit und ohne Rückstau
- Abschnitte innerorts bzw. außerorts

Die nachfolgenden Abbildungen stellen die Gewässerabschnitte nach den oben genannten Kriterien dar. Abbildung 23 zeigt die Gewässerabschnitte mit MNQ > 10 m³/s mit und ohne Rückstau- bzw. Ausleitungsstrecken. Die Bereiche in Ortschaften sind orange hinterlegt. Die Bedingungen zur Breite und Tiefe werden von rd. 416 Gewässer-km (227 davon im Rhein) erfüllt. Von den 189 km außerhalb des Rheins sind 39 km Stau- bzw. Ausleitungsstrecken.

Abbildung 24 zeigt die Gewässerabschnitte mit MQ > 10 m³/s. Dies ist eine optimistische Vorgabe, denn die Strömungsanlagen werden bei Abflüssen dieser Größenordnung nur zeitweise eingesetzt werden können. Die Bedingungen zur Breite und Tiefe werden von rd. 502 Gewässer-km (227 davon im Rhein) erfüllt. Von den 275 km, die sich nicht im Rhein befinden, sind 59 km in Stau- bzw. Ausleitungsstrecken.

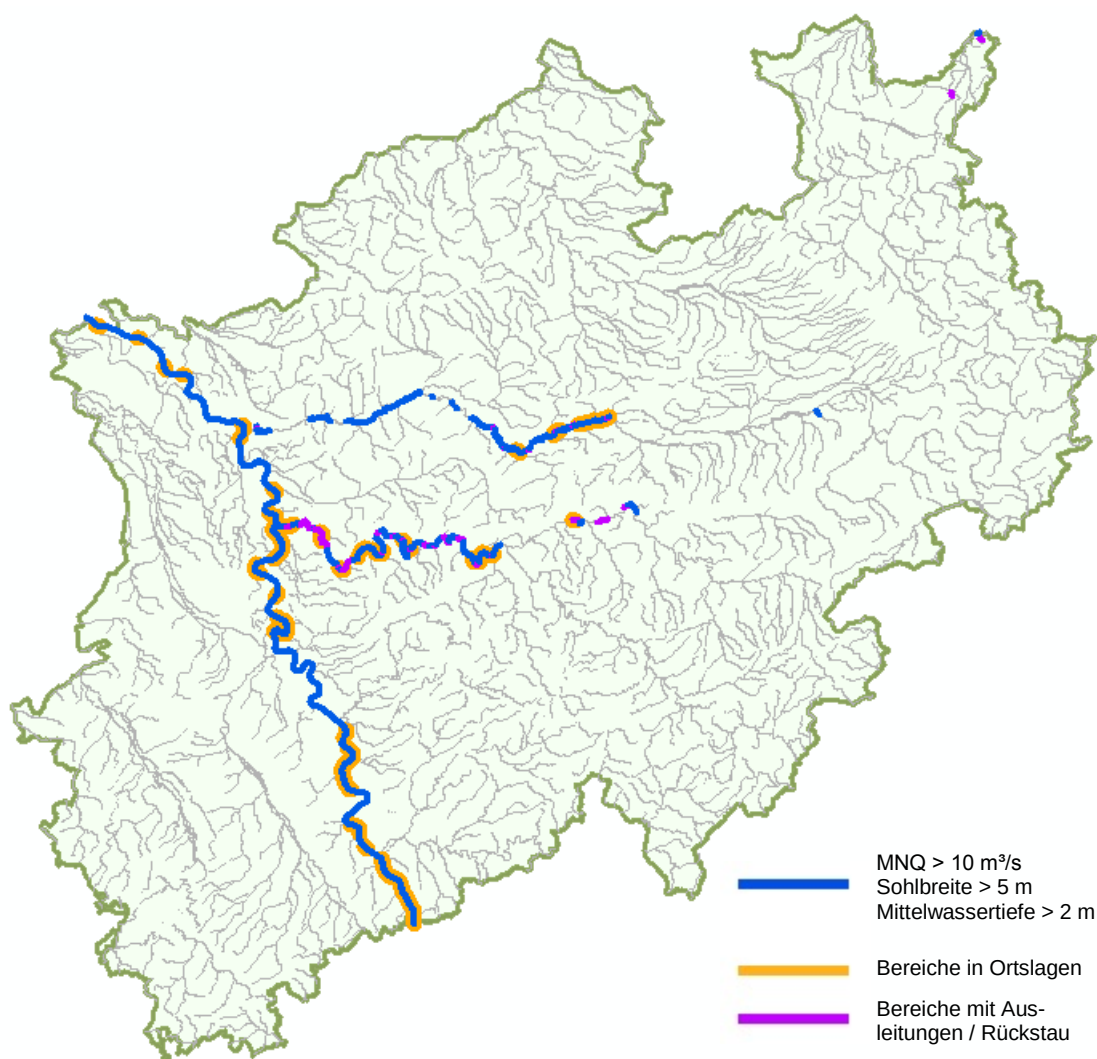


Abbildung 23: Gewässerabschnitte mit MNQ > 10 m³/s

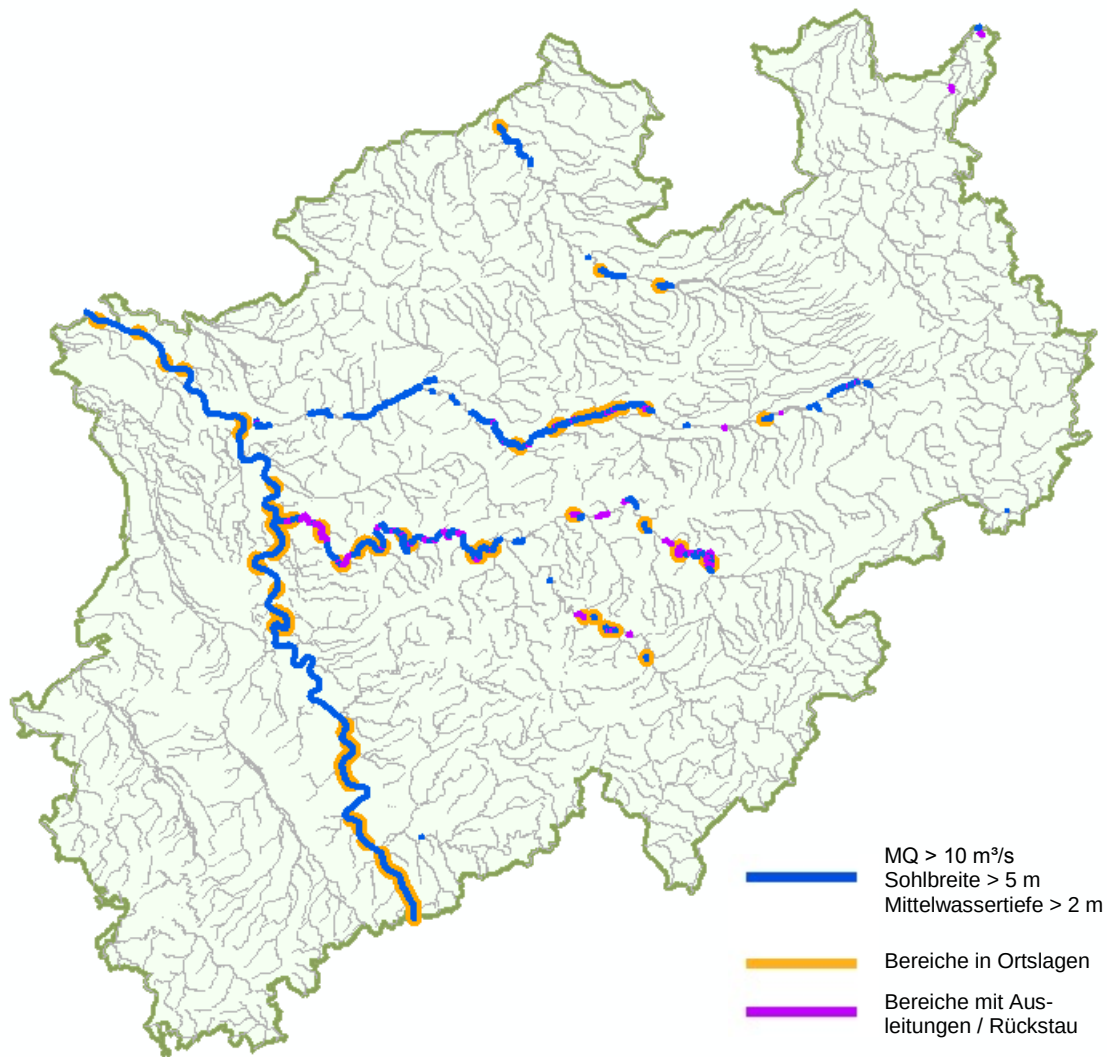


Abbildung 24: Gewässerabschnitte mit $MQ > 10 \text{ m}^3/\text{s}$

Hydraulischer Ansatz „durchströmte Fläche“

Betrachtet werden muss bei der Abschätzung der Potenziale kinetischer Strömungsmaschinen auch das Gefälle im Gewässer, welches für 100-m-Abschnitte auf der Grundlage des DGM10 zur untersucht wurde. Die Ermittlung der örtlichen Geschwindigkeit erfolgt mit der Strickler-Gleichung:

$$v = k_{\text{St}} * r^{2/3} * \text{Gefälle}^{1/2}$$

mit

k_{St}	Strickler-Beiwert $\text{m}^{1/3}/\text{s}$
r	hydraulischer Radius in m
Gefälle	Sohl- bzw. Energieliniengefälle

Der Strickler-Beiwert k_{st} wird gleich $35 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ gesetzt und der hydraulische Radius r gleich 2 m, denn bei größeren Gewässern kann die Querschnittsform vernachlässigt werden. Der hydraulische Radius entspricht dann in etwa der Wassertiefe, die wiederum für die hier betrachteten Strömungsmaschinen mindestens 2 m betragen muss.

Gewässerabschnitte mit Potenzial für Strömungsmaschinen

Der Rhein und der untere Abschnitt der Ruhr sind Bundeswasserstraßen. Potenzielle Standorte für Strömungsmaschinen sind allenfalls außerhalb der Fahrrinne zulässig. Für die ufernahen Bereiche können mit den vereinfachten Verfahren keine Aussagen geliefert werden. Hier ist eine detailliertere Prüfung erforderlich.

Abbildung 25 stellt die Gewässerabschnitte mit ausreichender Wassertiefe größer 2 m und Fließgeschwindigkeiten größer 1 m/s außerhalb von Stau- bzw. Ausleitungsstrecken dar. Abschnitte mit einem mittleren Niedrigwasser größer $10 \text{ m}^3/\text{s}$ sind blau und Abschnitte mit MQ größer $10 \text{ m}^3/\text{s}$ sind hellblau. Die Bundeswasserstraßen sind grau dargestellt.

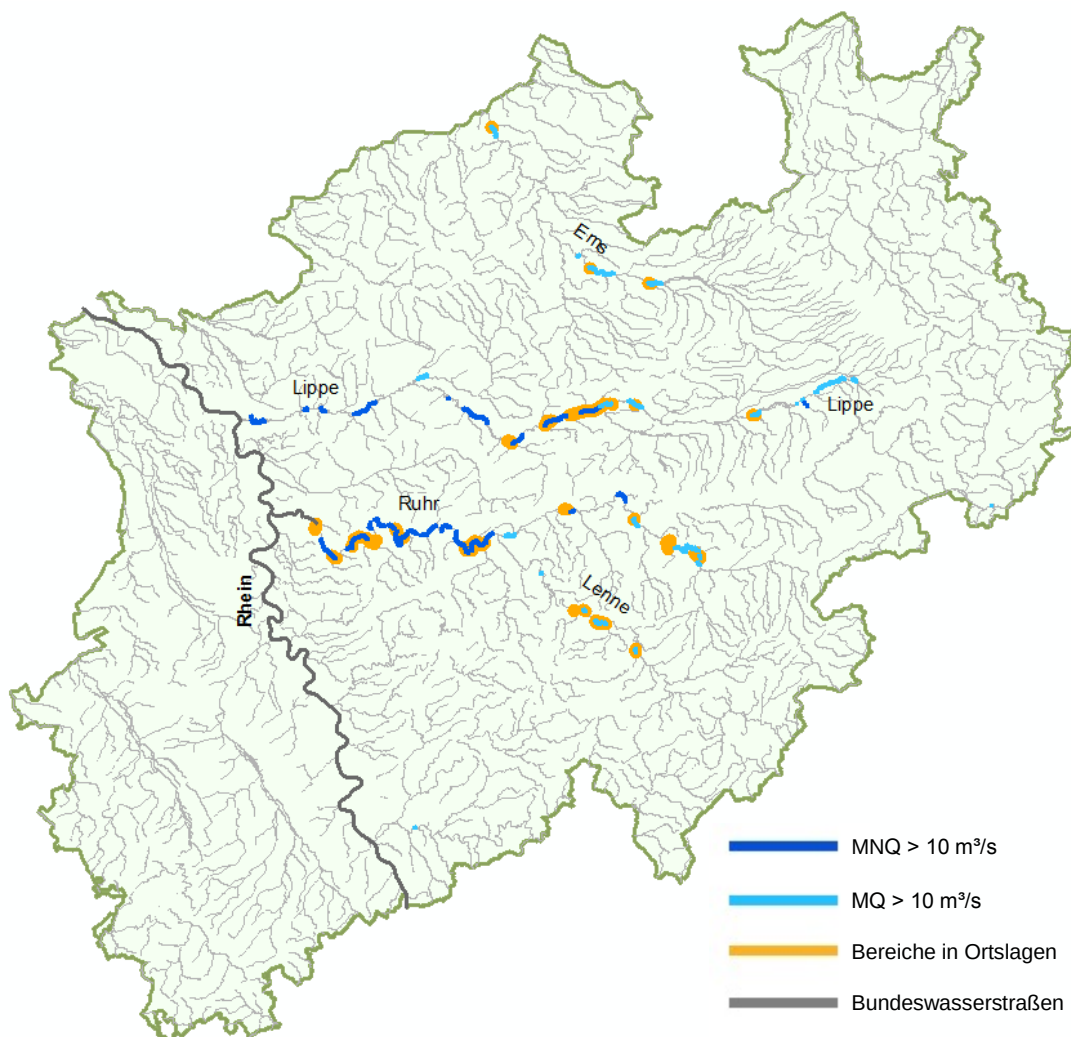


Abbildung 25: Gewässerstrecken mit Mindestwassertiefe und Mindestgeschwindigkeiten außerhalb von Ausleitungs- bzw. Rückstaubereichen

Insgesamt sind nach der Auswertung die Bedingungen für Strömungskraftwerke für rd. 93 km Flusslänge an der Lippe und der Ruhr möglich (für $MNQ > 10 \text{ m}^3/\text{s}$), ohne die Bereiche in Ortschaften verbleiben rd. 80 km Flusslänge.

Für die Bedingung MQ größer $10 \text{ m}^3/\text{s}$ kommen rd. 50 Fluss-km dazu von denen 42 km außerhalb von Ortschaften liegen. Mit dieser sehr optimistischen Bedingung wird die potenziell nutzbare Streckenlänge überschätzt. Nur in Teilabschnitten werden Strömungsmaschinen tatsächlich eingesetzt werden können.

Da Strecken mit unbekannten Wassertiefen (Gewässerstrukturgüte Eintrag „nicht erkennbar“ oder nicht vorhanden) einbezogen wurden, ist das Ergebnis eher zu hoch geschätzt. Die nachfolgende Tabelle stellt die Gewässerlängen mit den theoretischen Möglichkeiten der energetischen Nutzung durch Strömungskraftwerke zusammen.

Tabelle 11: Gewässerlängen mit Möglichkeiten der energetischen Nutzung durch Strömungskraftwerke

Gewässer	Länge (km) ($MNQ > 10 \text{ m}^3/\text{s}$) „blau“	Länge (km) ($MQ > 10 \text{ m}^3/\text{s}$) „hellblau+blau“	Bundeswasserstr. Rhein / Ruhr „grau“ (km)
Diemel		0,10	
Ems		13,39	
Heder	0,50	0,50	
Lenne		3,90	
Lippe	36,49	52,97	
Rhein			226,97
Ruhr	56,48	68,98	13,00
Sieg		0,50	
Steuer		2,90	
Summe	93,47	143,24	239,97

6.2 Kinetische Strömungsmaschinen: Potenziale in NRW

Nachdem auf der Basis der Einsatzanforderungen der derzeit verfügbaren kinetischen Strömungsmaschinen die Gewässerabschnitte ermittelt wurden, in denen theoretisch eine Nutzung durch diese Maschinen möglich ist (Kapitel 6.1), werden im nächsten Schritt typische Einsatzkonfigurationen betrachtet, wie diese Strömungsmaschinen an den hier relevanten großen Fließgewässern eingesetzt werden können.

Es ist jedoch davon auszugehen, dass der Einbau von Strömungsmaschinen nur in begrenztem Ausmaß erfolgen kann. Ein „Teppich aus Maschinen“ ist nicht realisierbar, da weitere Nutzungen im Gewässer wie z. B. Schifffahrt und Freizeitaktivitäten möglich sein müssen. Darüber hinaus müssen geeignete Plätze für die Verankerung der Anlagen vorhanden und die Zugänglichkeit zum Zwecke der Reinigung, Reparatur und Instandhaltung gegeben sein.

Die Abschätzung nimmt daher an:

- 2 Geräte nebeneinander
- Maximal 10 Maschinen pro km
- 50 % der Gewässerstrecke nutzbar
- 3 kWel pro Maschine

Die Gesamtstrecke umfasst 93 km mit ausreichender Mindestwasserführung, zzgl. ca. 25 km (50 % der eingeschränkt nutzbaren Strecke wegen Niedrigwasserunterschreitung), zzgl. ca. 12 km (5 % der Wasserstraßen bei denen nur Randbereiche genutzt werden können). Damit ergibt sich eine rechnerische Gesamtlänge von 130 km.

Auf der Basis dieser Annahmen lässt sich die installierbare Leistung wie folgt ermitteln:

$$130 \text{ km} \cdot 2 \cdot 10 \text{ Stück / km} \cdot 50 \% \cdot 3 \text{ kWel} = 3.900 \text{ kW}.$$

Unter der optimistischen Annahme von 6.000 Volllaststunden ergibt sich eine Jahresenergieerzeugung von 23,4 GWh/a.

Angemerkt werden muss, dass diese Betrachtung mögliche weitergehende Restriktionen (Schifffahrt etc.) nicht vollständig berücksichtigen konnte und daher davon auszugehen ist, dass das theoretisch nutzbare Potenzial nicht komplett gehoben werden kann.

6.3 Wasserkraftnutzung an Infrastruktureinrichtungen

Im Wesentlichen können bei der Wasserkraftnutzung an Infrastruktureinrichtungen folgende grundsätzliche Einsatzbereiche unterschieden werden:

Wasserkraftnutzung in Abwassersystemen

Wasserkraftnutzung an Kläranlagen: In der Regel erfolgt die Wasserkraftnutzung im Ablauf der Kläranlage mit gereinigtem Wasser, wie z. B. bei der Kläranlage Emschermündung. Der Leistungsbereich liegt typischerweise unter 100 kW installierter Leistung bei einem relativ hohen Nutzungsgrad, da der Abfluss aus der Kläranlage typischerweise während des gesamten Jahres sehr konstant ist. Hierbei kommen neben klassischen Strömungsmaschinen vielfach auch Wasserkraftschnecken oder Wasserräder zum Einsatz.

Wasserkraftnutzung in Kanalnetzen: Bei diesem Einsatzgebiet stellt das hoch aggressive Abwasser in Kanalnetzen eine besondere Herausforderung dar, was diese Nutzung daher in der Regel unwirtschaftlich macht. Die bisher errichteten Versuchsanlagen sind nach derzeitigem Kenntnisstand alle wieder außer Betrieb genommen bzw. rückgebaut worden, so dass heute in NRW und auch in Deutschland keine derartige Anlage in Betrieb ist.

Wasserkraftnutzung in Brauchwassersystemen

Hierbei werden Druck- und Höhenunterschiede genutzt. Typischer Einsatzort ist die Druckentspannung bei nicht-aggressiven Medien, wie z. B. in Chemiewerken. Hierbei werden v. a. rückwärtslaufende Pumpen als Turbinen (PAT) eingesetzt. Bei aggressiven Medien treten die gleichen Probleme wie bei Abwassersystemen auf.

Wasserkraftnutzung in Trinkwasserversorgungssystemen

In Trinkwasserversorgungssystemen erfolgt eine Wasserkraftnutzung üblicherweise in Verbindung mit der Entspannung des Förderdrucks vor Behältern. Die jeweiligen Netzbetreiber nutzen diese Technik bereits seit über 20 Jahren und setzen hierbei insbesondere Francis-Turbinen oder PAT ein.

Da die Einsatzmöglichkeiten für nicht mit den jeweiligen Anlagendetails befasste Personen nahezu nicht überschaubar sind, wurden diese Potenziale über eine Abfrage bei Betreibern und mittels einer zusätzlichen Recherche, soweit dies möglich war, ermittelt.

6.4 Wasserkraftnutzung an Infrastruktureinrichtungen: Potenziale in NRW

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Recherche für die Wasserkraftnutzung an Infrastruktureinrichtungen in NRW beschrieben.

Wasserkraftnutzung in Abwassersystemen in NRW

Derzeit sind zwei Anlagen an Kläranlagen in NRW in Betrieb. Am Ablauf der Kläranlage Em-schermündung ist eine Kaplan-turbine installiert mit einer Erzeugung von 2.500 MWh/a. An der Kläranlage Bottrop befindet sich am Ablauf eine Wasserkraftschnecke mit einer Erzeugung von 340 MWh/a. Weitere nennenswerte, wirtschaftlich nutzbare Potenziale konnten nicht ermittelt werden.

Aufgrund der besonderen Randbedingungen ist die Nutzung der Potenziale in Kanalnetzen bis auf weiteres nicht möglich (PINNEKAMP 2007, FREHMANN et al. 2012).

Wasserkraftnutzung in Brauchwassersystemen in NRW

Die möglichen Potenziale in Brauchwassersystemen werden durch die Betreiber zum Teil bereits seit vielen Jahren genutzt. Zusätzliche Potenziale und exakte Betriebsdaten konnten nicht ermittelt werden.

Wasserkraftnutzung in Trinkwasserversorgungssystemen in NRW

Nach derzeitigem Stand sind 5 Anlagen in Trinkwasserversorgungssystemen in NRW in Betrieb. Die Standorte sind Iserlohn (Inbetriebnahme 2004), Wuppertal (Inbetriebnahme 2006), Wipperfürth (Inbetriebnahme 2004), Aachen (Inbetriebnahme 1987) und Anröchte (Inbetriebnahme 1996). Bei einer installierten Gesamtleistung von 500 kW weisen diese Anlagen eine Jahresarbeit von ca. 1.910 MWh/a auf. Damit werden mögliche Potenziale durch die jeweiligen Betreiber teilweise bereits seit über 20 Jahren genutzt, zusätzliche Potenziale konnten nicht ermittelt werden.

7 Wasserkraftnutzung und Klimawandel

Wasserkraftanlagen erfordern Investitionen in lange Zukunftszeiträume. Bauliche Anlagen werden für Zeiträume von 50 Jahren und mehr ausgelegt. Auch für die Maschinentechnik können 25 bis 50 Nutzungsjahre angenommen werden.

Daher ist es angeraten, die zu erwartenden Änderungen des Klimas und konkret der Hydro-meteorologie und des Abflussgeschehens zu beachten und Konsequenzen abzuschätzen. Im Hinblick auf Ausfallzeiten und Erzeugungsminderungen spielen dabei das Hochwasserisiko und die Frosthäufigkeit eine wesentliche Rolle. Für den Ertrag ist vorrangig das Abflussdargebot relevant.

Allgemein wird erwartet, dass in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts die Gewinnung von Energie an Wasserkraftanlagen zurückgehen wird, da sich die Abflussregime und die jahreszeitliche Verteilung des Abflusses verändern (BUNDESREGIERUNG 2015, WOLF-SCHUMANN & DUMONT 2010).

In diesem Kapitel soll untersucht werden, welche Veränderungen infolge des Klimawandels absehbar sind, in welcher Größenordnung sie erwartet werden können und welche Auswirkungen diese auf die Wasserkraftnutzung in Nordrhein-Westfalen haben können.

7.1 Methodisches Vorgehen

Zur Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserkraftnutzung in Nordrhein-Westfalen wurden, unter Berücksichtigung bereits vorliegender Untersuchungen, Szenarien für die Hydrologie genutzt, die aus der Klimafolgenforschung vorliegen. Dabei wurde untersucht, welche Energieerzeugung sich bei prognostizierten Abflussganglinien in Zukunft einstellen würde.

7.1.1 Vorliegende Untersuchungen

Einen Überblick zu vorliegenden Untersuchungen und den Stand der Forschung zu den Folgen des Klimawandels in Bezug auf die Wasserkraftenergie geben WOLF-SCHUMANN & DUMONT (2010). Im Rahmen dieser Untersuchung sind die folgenden Projekte im Hinblick auf ihre Aussagen zum Thema Wasserkraftenergieerzeugung und Klimawandel relevant:

Kooperationsvorhaben KLIWA

Mehrere Bundesländer sowie der Deutsche Wetterdienst befassen sich seit 1998 in einem Kooperationsvorhaben mit der *„Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“*.

Bisher publizierte Ergebnisse und Empfehlungen betreffen insbesondere Hochwasserabflüsse, Niedrig- und Mittelwasserabflüsse und Niederschläge. Aussagen zur Wasserkraft und zum Wasserdargebot zeigen große Bandbreiten und definieren weiteren Untersuchungsbedarf.

Forschungsprogramm GLOWA

GLOWA, ein Programm finanziert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, befasste sich mit dem globalen Wandel des Wasserkreislaufs in mehreren großen Flussgebieten. Die regionalen Auswirkungen des Klimawandels im Einzugsgebiet der Oberen Donau wurden in GLOWA-Danube mit einem Instrumentarium gekoppelter Klimafolge-Modelle untersucht, deren Eignung zunächst erfolgreich an ihren Fähigkeiten, die Vergangenheit richtig wiederzugeben, getestet wurde. Mit einem Ensemble von Szenarien für die zukünftige Entwicklung von Klima und Gesellschaft wurden die vielfältigen Auswirkungen auf die Naturressource Wasser und ihre Nutzung betrachtet. Für die Untersuchungen wurde der Zeitraum von 2011 bis 2060 herangezogen.

Für die Wasserkraft im Donau Einzugsgebiet und die nahe Zukunft bis 2035 wurden moderate Rückgänge von knapp 2 % ermittelt, für den Folgezeitraum bis 2060 wird jedoch von Mindererzeugungen von ca. 10 % ausgegangen (MAUSER 2009).

Abflussprojektionen KLAVE

In NRW stehen Abflussprojektionen aus der *„Untersuchung zur Auswirkung des Klimawandels auf das Abflussverhalten in Gewässern in NRW“* des LANUV von 2009 zur Verfügung. Sie basieren auf dem Emissionsszenario A1B und der WETTREG-ECHAM5 Regionalisierung.

Ermittelt werden meist indifferente Entwicklungen des Mittelwasserabflusses verbunden mit einer Zunahme der Winterabflüsse und einer Verringerung der Sommerabflüsse sowie eine Zunahme der Niedrigwasser. Beide Effekte deuten sich in der nahen Zukunft an und verschärfen sich voraussichtlich in der fernen Zukunft 2070-2100. Untersucht wurden ca. 30 Pegeleinzugsgebiete. Die Ergebnisse sind qualitativ identisch und numerisch ähnlich (RICHTER et al. 2009).

Für die Wasserkraft lassen sich auf Grundlage der KLAVE-Ergebnisse Erzeugungsminderungen abschätzen. In Zeiten hoher Abflüsse ist mit einer Minderung der Erzeugung und der Rentabilität zu rechnen, da der Abfluss das Schluckvermögen der Turbine übersteigt. Eine weitere Abflusserhöhung vergrößert den Anteil ungenutzter Wassermengen. Hinzu kommt, dass sich bei großen Abflüssen die Fallhöhe verringert, da der Unterwasserspiegel ansteigt, während die Oberwasserstauhöhe sich nur unwesentlich ändert. Auch die Verlängerung der eher trockenen Zeiten und eine weitere Abnahme der niedrigen Abflüsse mindern die Erzeugung vor allem während der Sommer- und Herbstmonate (siehe auch Kapitel 7.1.6).

Forschungsprogramm KLIWAS

KLIWAS, ein Ressortforschungsprogramm des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), untersucht die *„Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt“* und entwickelt Anpassungsoptionen. Das Vorhaben stellt eine umfangreiche Daten- und Modellbasis bereit, mit der Schlussfolgerungen für die Verkehrswasserstraßen in Deutschland in Bezug auf Hydrologie, Morphologie, Ökologie und vor allem der Schifffahrt möglich sind. Ähnlich wie bei der Wasserkraftnutzung interessieren ganzjährige Abflussregime und Ausfallzeiten bei Niedrig- und Hochwasser. Für die Schifffahrt werden unter ande-

rem folgende Schlussfolgerungen gezogen, die auch für die Wasserkraft relevant sind (NILSON et al. 2014):

- Für die nächsten Jahrzehnte wird eine Zunahme der mittleren jährlichen Hochwasserabflüsse für das Rheineinzugsgebiet projiziert.
- Hinsichtlich einer Verminderung des mittleren jährlichen Wasserdargebotes lassen die Auswertungen bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts in keinem der untersuchten Einzugsgebiete zeitnahen Handlungsbedarf erkennen. Bei der jahreszeitlichen Wasserverteilung zeichnet sich Handlungsbedarf in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts ab.
- Vorhersagbare Effekte gibt es für das glaziale Abflussregime. Abschmelzende Gletscher und Verschiebungen des hydrologischen Regimes lassen in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts steigende Niedrigwasserabflüsse und positive Effekte für die Nutzung der Wasserkraft erwarten. In NRW ist hiervon aber nur der Rhein betroffen, an dem eine Wasserkraftnutzung weder vorhanden noch absehbar ist.
- Für die Mittelgebirgseinzugsgebiete von Rhein und Weser werden relativ einheitlich milde, niederschlagsreiche Winter mit einer Zunahme der Abflüsse erwartet. Die Erwartungen für den Sommer sind weniger sicher. Sie gehen oft von einer Zunahme der Trockenperioden aus. Aussagen für den Zeitraum eines ganzen Jahres und den Mittelwasserabfluss sind indifferent.

7.1.2 Berechnungen der Jahresarbeit für verschiedene Klimaszenarien

Aussagen zur zukünftigen Energieerzeugung aus Wasserkraft erfordern den Umgang mit vielen Unsicherheiten. Die im Projekt des BMVI „*Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt*“ (siehe Kapitel 7.1.1 oder www.kliwas.de) erprobte Vorgehensweise, ausgehend von verfügbaren regionalen Klimaprojektionen und hydrologischen Modellen eine Modellkette aufzubauen, ermöglicht die Komponenten separat zu thematisieren und die Unsicherheiten quantifiziert zu untersuchen.

Für die Wasserkraft stellen Abflüsse die wesentliche Eingangsgröße dar. Aus langjährigen Abflussganglinien mit Tageswertgenauigkeit wird dabei die Energieerzeugung für den betrachteten Zeitraum berechnet. Als finales Glied der Modellkette wird das Simulationsprogramm HydroPowerPlaningTool (HPPT 2016) verwendet. Berücksichtigt werden folgende Prozesse und Effekte:

- Tageswertreihen des Abflusses beschreiben die Variation des Abflusses im Jahresgang. Langjährige Zeitreihen, hier jeweils 30 Jahre, tragen den großen Unterschieden zwischen eher trockenen und eher feuchten Jahren, wie sie in der Hydrologie auftreten, Rechnung.
- Hydraulische Randbedingungen und abflussabhängige Fallhöhen ebenfalls auf Basis von Tageswerten liefern realistische Ansätze für den jeweiligen Turbinendurchfluss und die energetische Ausbeute.
- Lastabhängige Wirkungsgrade der Maschinentechnik mit tagesgenauer Betrachtung liefern realistische Gesamtwirkungsgrade.

7.1.3 Klimamodelle, Hydrologie und Abflussmodellierung

Um die Fragestellungen zum Klimaeinfluss auf die Wasserkraft zu beantworten, wurde auf die KLIWAS-Modellkette zurückgegriffen, die ausgehend von globalen Klimamodellen über regionalisierte meteorologische Modelle und Abflussprojektionen bis zum Input für die Auswertungen der ökonomisch oder ökologisch interessierenden Kenngrößen führt.

Die Abflusssimulationen wurden im Kontext des Forschungsprogrammes KLIWAS erstellt (NILSON et al. 2014). Sie setzen die Ergebnisse von Klimasimulationen des regionalen Wasserhaushalts im Rheineinzugsgebiet um. Die Klimasimulationen wurden durch die internationale Forschungsgemeinschaft generiert, in den Projekten CMIP3 (MEEHL et al. 2007) und EU-ENSEMBLES (VAN DER LINDEN & MITCHELL 2009) zusammengestellt und für die Klimafolgenforschung frei zugänglich gemacht.

Die meisten bereitgestellten Projektionsrechnungen basieren auf dem SRES-Szenario A1B (IPCC 2000). Dieses Emissionsszenario zeichnet sich durch einen raschen Anstieg des Wirtschaftswachstums mit der Einführung neuer Technologien sowie einer ab Mitte des 21. Jahrhunderts rückläufigen Weltbevölkerung aus. Innerhalb der SRES-Szenarien stellt das A1B-Szenario ein mittleres Szenario dar (PLAGEMANN et al. 2014). Auch die anderen, oben zitierten Vorhaben basieren auf dem Szenario A1B.

Die Datengrundlage der Berechnungen ist ein Klimaprojektionsensemble von 35 Projektionen (Stand 2013) verschiedener Kombinationen aus Emissionsszenarien, Global- und Regionalmodellen, die zum größten Teil aus dem EU-Forschungsprojekt ENSEMBLES (FP 6) stammen (PLAGEMANN et al. 2014). Die Unsicherheiten des globalen und regionalen Klimas werden durch das Klimaensemble und die daraus abgeleiteten Abflussreihen eingegrenzt.

Neuere Szenarien stehen grundsätzlich zur Verfügung. Der Weltklimarat IPCC veröffentlichte in den Jahren 2013 und 2014 den Fünften Sachstandsbericht und publizierte damit die aktuellen RCP-Szenarien. Noch ist die Modellkette aber nicht aktualisiert und Abflussreihen für die NRW Gewässer stehen noch nicht zur Verfügung.

Die Berechnung der Abflussreihen erfolgte durch die BfG mit dem skandinavischen Niederschlags-Abfluss-Modell HBV (NILSON et al. 2014, EBERLE et al. 2005). Für insgesamt 134 Teileinzugsgebiete wurden mit der zeitlichen Auflösung von einem Tag jeweils 30-jährige Abflussreihen für die „nahe Zukunft“ (2021-2050) und die „ferne Zukunft“ (2071-2100) berechnet. Berechnungsgrundlage sind Niederschlags-, Temperatur- und Verdunstungsreihen aus den regionalen Klimamodellen sowie Boden-, Landnutzungs- und hydromorphologische Daten der Einzugsgebiete und des Gewässernetzes. Talsperren und Überleitungen werden nicht berücksichtigt (GÖRGEN et al. 2010).

Das Modell wurde an Pegelmessungen im Rheineinzugsgebiet kalibriert. Es zeigen sich gute Übereinstimmungen für mittlere und niedrige Abflüsse in den Hauptgewässern im jahreszeitlichen Verlauf. In den Nebengewässern NRWs können die Werte abweichen (EBERLE et al. 2005).

Für die hier interessierenden Auswertungen zur Wasserkraft können die Mängel hingenommen werden, da vor allem die Unterschiede der verschiedenen Abflussprojektionen und weniger die absoluten Werte interessieren.

7.1.4 NRW-Beispielstandorte entsprechend der KLIWAS Szenarien

Für diese Untersuchung wurden zwei Rheinnebegewässer, die Wupper und die Sieg, ausgewählt. An beiden Flüssen gibt es einen großen Anlagenbestand und beide stehen im Fokus ökologischer Anforderungen.

Es wurden Abflusszeitreihen für verschiedene Klimaszenarien von der Bundesanstalt für Gewässerkunde für die Berechnungen zur Verfügung gestellt (NILSON 2015):

- Tageswerte für die Wupper am Pegel Opladen
- Tageswerte für die Sieg am Pegel Eitorf

Für die beiden zugehörigen Teileinzugsgebiete wurden für den Zeitraum 1950 bis 2100 die Abflusssimulationen im Kontext des Forschungsprogrammes KLIWAS erstellt (NILSON et al. 2014). Sie basieren auf Klimamodellketten, die die atmosphärischen Bedingungen des 20. Jahrhunderts unter Annahme des "mittleren" Emissionsszenarios A1B (NAKICENOVIC et al. 2000) bis in das Jahr 2100 prognostizieren.

Für die Berechnungen wurden 18 Klimaszenarien verwendet. Sie decken die folgenden Berechnungszeiträume ab:

- Gegenwart (1961 bis 1990)
- nahe Zukunft (2021 bis 2050)
- ferne Zukunft (2069 bis 2098)

7.1.5 Modell-Wasserkraftanlagen

Die Auslegung und Parametrisierung der Beispielanlagen erfolgte in Anlehnung an die Wasserkraftanlagen *Auer Kotten* an der Wupper unterhalb des Pegels Glüder und *Unkelmühle* an der Sieg bei Pegel Eitdorf.

Die Anlagen wurden in den vergangenen Jahren umgebaut. Sie berücksichtigen heutige Anforderungen an die Technik und die Fischökologie und stellen daher gute Beispiele für Wasserkraftanlagen (WKA) in NRW dar.

Die Tabelle zeigt die hydrologischen Größen der Einzugsgebiete. Die WKA Wupper wurde mit langjährigen Zeitreihen des Pegels Opladen berechnet.

Tabelle 12: Hydrologische Daten an den betrachteten Pegeln

WKA	Pegel	AE (km ²)	MQ (m ³ /s)	NQ (m ³ /s)
Wupper	Pegel Opladen / Wupper	606	14,9 (1951-2007)	4,99
	Pegel Glüder / Wupper	492,6	13,6 (1950-2007)	4,51
Sieg	Pegel Eitorf / Sieg	1468	28,5 (1968-2007)	3,25

Die Anlagendaten (Ausbaugrößen, Ober- und Unterwasserstände und Wirkungsgradkennlinien) wurden aus den Recherchen dieser Studie abgeleitet. Die Berechnungen setzen einen optimalen Betrieb ohne Störfälle und ohne Ausfallzeiten voraus.

Tabelle 13: Anlagendaten der verwendeten Beispielanlagen

Anlage	WKA Wupper	WKA Sieg
Gewässer	Wupper	Sieg
$Q_{\min}$, Berechnung	1,57 m³/s	2,75 m³/s
Ausbaudurchfluss Q_A	14 m³/s	27 m³/s
Ausbaufallhöhe	3 m	2,7m
Maximale Leistung	319 kW	555 kW
Zeitreihen	KLIWAS-Zeitreihen von Pegel Opladen	KLIWAS-Zeitreihen von Pegel Eitorf
MQ, Referenzzustand Zeitraum: 1961 – 1990 (Zeitreihen Klias: DIS_OPLA_CHR- OBS-Composite_EPW_HBV-134)	14,5 m³/s	24,2 m³/s
maximaler Abfluss (Zeitreihen Klias)	338 m³/s	620 m³/s

7.1.6 Vergleichsberechnungen der Jahresarbeit für verschiedene Standorte

Die oben beschriebene, sehr umfangreiche Berechnung mit 18 Abflussszenarien konnte nur für vergleichsweise große Gewässer erfolgen. Tatsächlich gibt es in NRW viele Standorte auch an kleineren Gewässern. Um zu untersuchen, ob kleine Wasserkraftanlagen in erhöhtem Maße von den Klimaänderungen betroffen sind, wurden daher ergänzend Vergleichsberechnungen für kleinere Einzugsgebiete durchgeführt.

Beispielstandorte

Die Betrachtung erfolgt für fünf Standorte. Ausgewählt wurden Gewässerpunkte mit möglichst kleinem Einzugsgebiet, zu denen die KLAVE-Studie (siehe 7.1.1) Aussagen liefert. Aus den verfügbaren Daten wurden die relativ kleinsten Pegel-einzugsgebiete an Ahse, Werre, Twiste, Volme und zusätzlich der Unterlauf der Wupper ausgewählt, um diese mit den ausführlichen Berechnungen in Kapitel 7.1.4 vergleichen zu können. Auch Standorte im Weser-Einzugsgebiet in den östlichen Landesteilen sind enthalten.

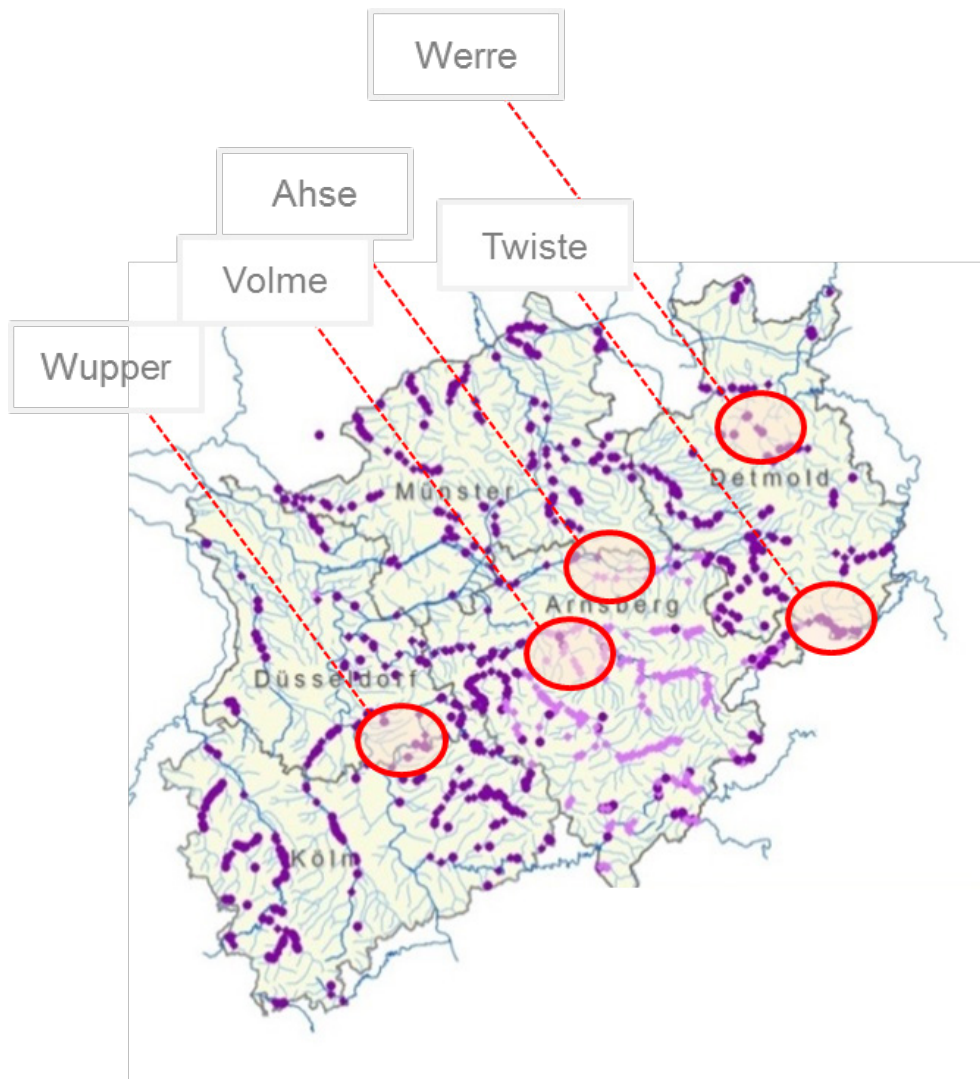


Abbildung 26: Ausgewählte Standorte für Berechnung mit KLAWE-Abflussreihen

Anlagendaten

Die exemplarischen Untersuchungen erfolgten für fiktive WKA mit folgenden Ausbaudaten. Sie sind für Anlagen in NRW typisch.

- $Q_{\text{Ausbau}} = \text{MQ aus KLAWE-Referenzreihe in m}^3/\text{s}$
- $Q_{\text{Öko}} = \text{MNQ}/3$ (aus HYDROTEC, 2014) in m^3/s
- Fallhöhe = 3,1 m
- Gesamtwirkungsgrad $\text{Eta}_{\text{gesamt}} = 80 \%$ (gute Ausstattung)

Tabelle 14: Anlagendaten Beispielanlagen Berechnung „KLAVE“

Anlage	1	2	3	4	5
Gewässer	Ahse	Werre	Twiste	Volme	Wupper
$Q_{\text{öko}}$ in m³/s	0,3	0,8	0,4	0,5	1,6
Ausbaudurchfluss Q_A in m³/s	3,43	6,53	2,31	7,8	13,61
Ausbaufallhöhe in m	3,1	3,1	3,1	3,1	3,1
Maximale Leistung in kW	83	159	56	190	331

Hydrologie

Die Abflussprojektionen aus der "Untersuchung zur Auswirkung des Klimawandels auf das Abflussverhalten in Gewässern in NRW" (RICHTER et al. 2009) basieren auf dem Emissions-szenario A1B und der WETTREG-ECHAM5 Regionalisierung. Sie stehen als Tageswertreihen für die „nahe“ Zukunft 2021-2050 und die „ferne“ Zukunft 2071-2100 sowie einen Kontrolllauf (1971-2000) zur Verfügung. Die Studie enthält umfangreiche Auswertungen auch im Hinblick auf jahreszeitliche Veränderungen infolge der Klimaänderung.

Für die Auswertung des Energieoutputs der WKA wurden langjährige Dauerlinien, die ebenfalls durch die KLAVE-Studie zur Verfügung stehen, verwendet.

7.2 Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserkraftpotenzial in NRW

Im Folgenden werden die Ergebnisse der in 7.1 beschriebenen Untersuchungen und Modellierungen beschrieben und zusammengefasst.

7.2.1 KLIWAS-Szenarien Sieg und Wupper

Die Berechnungen der Beispielauswertungen für zwei Standorte an Sieg und Wupper wurden mit dem Programm HydroPowerPlaningTool (HPPT 2016) durchgeführt, mit dem die Energieerzeugung von Wasserkraftanlagen modelliert werden kann.

Abbildung 27 und Abbildung 29 zeigen als Kenngröße für die mittlere Energieerzeugung die errechneten Volllaststunden. Der historische Referenzzeitraum 1961 – 1990 wird mit grauen Histogrammen dargestellt, die nahe Zukunft 2021 – 2050 mit orangefarbenen und die ferne Zukunft mit roten. Abbildung 28 und Abbildung 30 stellen die Abweichungen der nahen und der fernen Zukunft vom Referenzzustand dar.

Alle Szenarien liefern für die Referenzzeiträume ähnliche Resultate. Dies zeigt die grundsätzliche Verwendbarkeit der Modellketten.

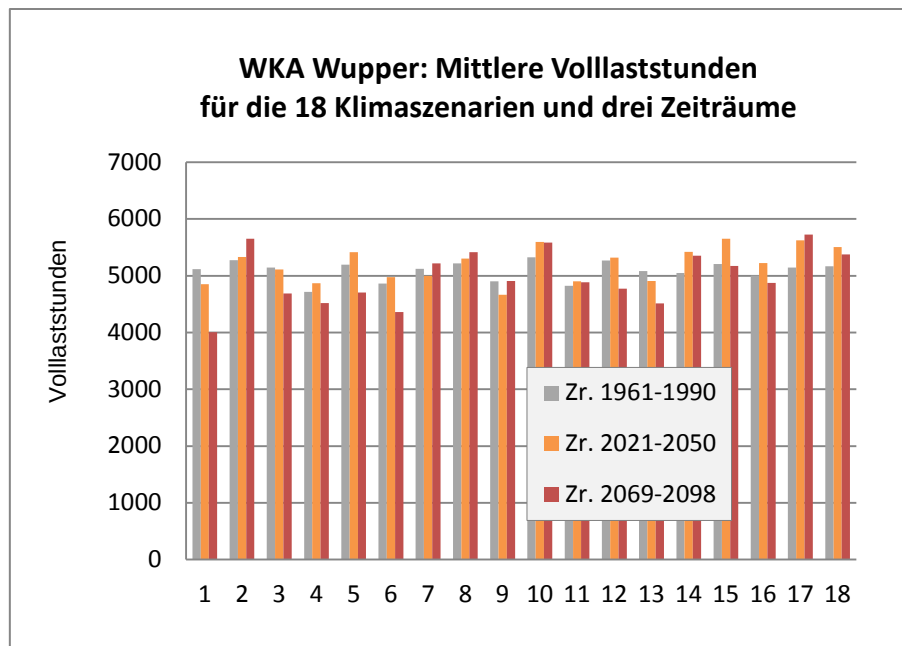


Abbildung 27: WKA Wupper: Mittlere Volllaststunden

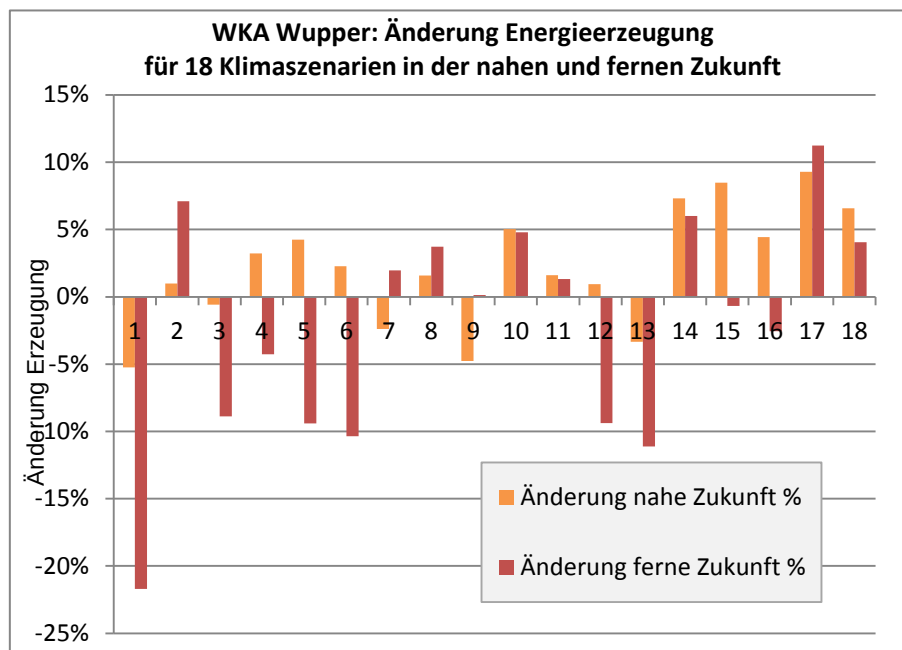


Abbildung 28: WKA Wupper: Änderung der Energieerzeugung

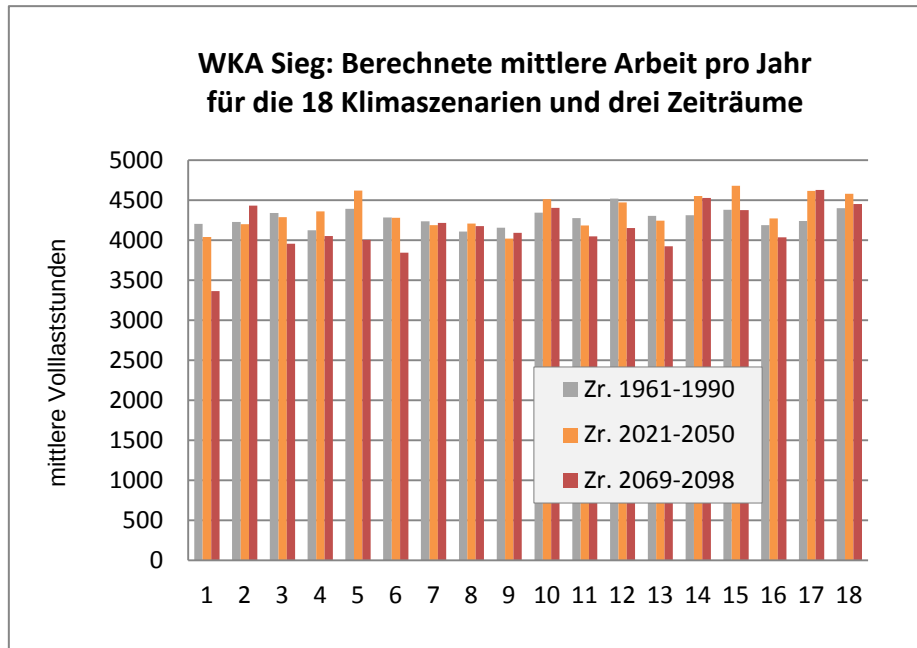


Abbildung 29: WKA Sieg: Mittlere Volllaststunden

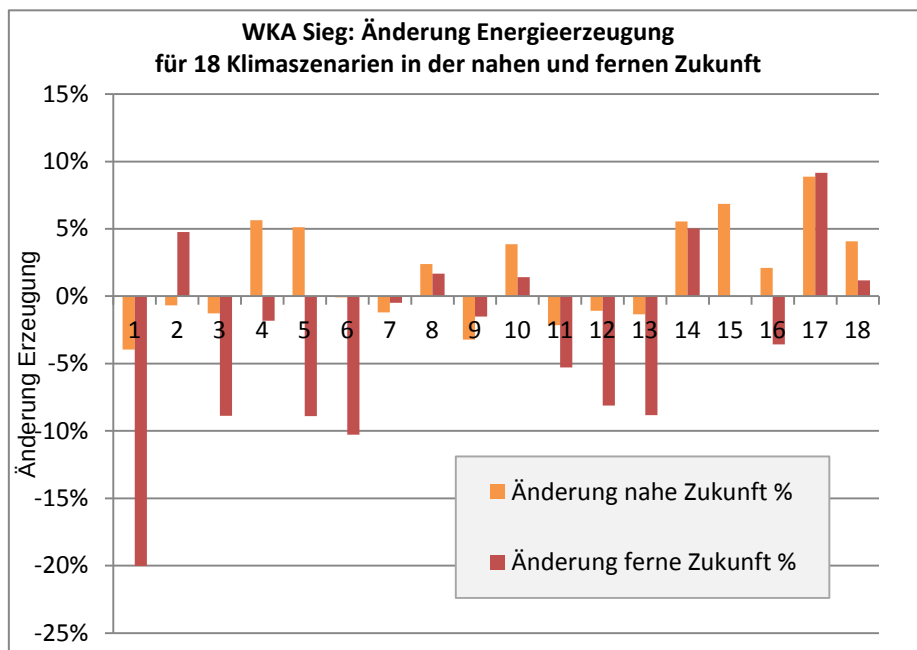


Abbildung 30: WKA Sieg: Änderung der Energieerzeugung

Die Änderung der Erzeugung in der nahen und fernen Zukunft (siehe Abbildung 28 und Abbildung 30) zeigt:

- Insgesamt sind die Änderungen für die betrachteten 30-jährigen Zeiträume moderat. Etwa 90 % der Ergebnisse bleiben im Korridor -10 % bis +10 % für die mittlere jährliche Energieerzeugung.
- In der nahen Zukunft ergeben sich an der Sieg für die Hälfte und an der Wupper für mehr als 2/3 der Szenarienergebnisse Steigerungen der Energieerzeugung. Für die ferne Zukunft gilt dies für 1/3 der Szenarienergebnisse an der Sieg bzw. die Hälfte an der Wupper.
- Die Mittelwerte der Energieerzeugungen steigen in der nahen Zukunft leicht (2 %), in der fernen Zukunft fallen sie etwas gegenüber dem heutigen Niveau (-2 %).
- Die gewählten Beispiele repräsentieren für die Wupper eine normal ausgebaute Anlage. Im historischen Zeitraum variieren die Volllaststunden (80 % aller Szenarienberechnungen für den historischen Zeitraum) zwischen 4.900 und 5.300 Stunden. In der fernen Zukunft spreizt sich die Bandbreite auf 4.300 bis 5.600 Stunden.
- Die Anlage an der Sieg ist etwas höher ausgebaut und das hydrologische Regime ist variationsreicher. Die historischen Werte liegen für 80 % der Szenarien zwischen 4.100 und 4.400 Volllaststunden, in der fernen Zukunft vergrößert sich die Spanne der Berechnungen und liegt zwischen 3.700 und 4.500 Volllaststunden.

7.2.2 KLAVE-Szenarien für kleinere Standorte in NRW

Ergänzend zu den Auswertungen der KLIWAS-Szenarien erfolgten für fünf kleinere Standorte Auswertungen auf Basis NRW-spezifischer Klimazeitreihen aus dem Projekt KLAVE, einer Untersuchung zur Auswirkung des Klimawandels auf das Abflussverhalten in Gewässern in NRW (RICHTER et al. 2009). Abbildung 31 zeigt den Leistungsplan für die Beispielanlage 2 an der Werre. Dargestellt sind die Abflussdauerlinie (blaue Linie), die jeweils turbinierbare Wassermenge (blaue Fläche) und die Energieerzeugung (rote Fläche).

Bei einem Ausbaudurchfluss von etwa 6,5 m³/s und einem ökologischen Abfluss von 6,5 m³/s ergeben sich eine maximale Generatorleistung von 156 kW und eine Jahresarbeit von 724 MWh. Dies entspricht 4.661 Volllaststunden.

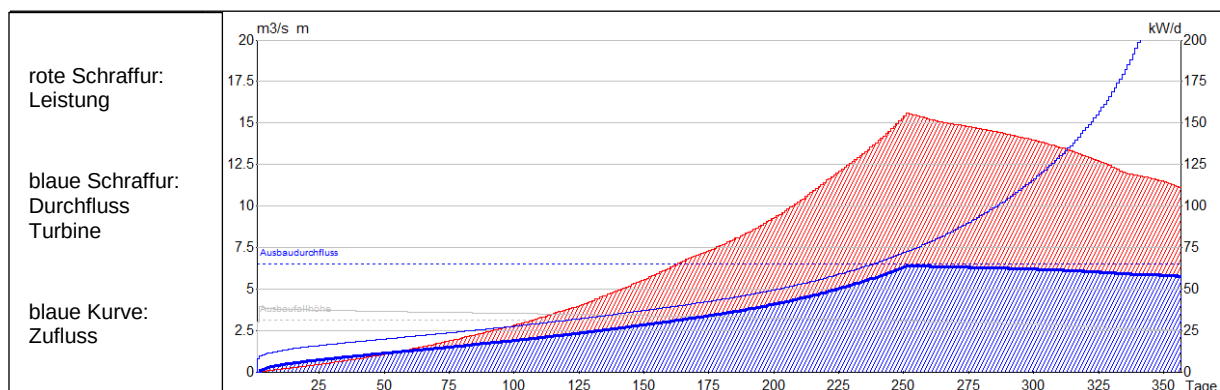


Abbildung 31: Leistungsplan fiktive WKA Werre

Mit den gewählten Anlagenparametern ergeben sich für den historischen Referenzzeitraum 1971 – 2000 zwischen 4.300 und 5.150 Volllaststunden. Für die Zukunft werden Erzeugungseinbußen berechnet. In der nahen Zukunft 2021 bis 2050 verschlechtern sich die Werte im Mittel um 4 % und in der fernen Zukunft um 7 %.

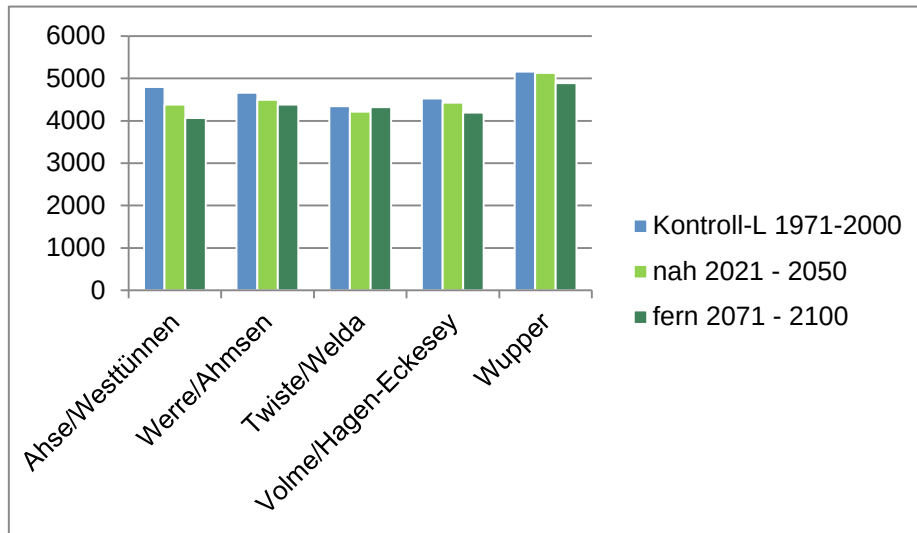


Abbildung 32: Volllaststunden von 5 exemplarischen WKA für das KLAVE-Klimaszenario

Für die kleinen Anlagen zeigen sich sehr unterschiedliche Ergebnisse. Die Anzahl der untersuchten Anlagen lässt aber weder den grundsätzlichen Schluss zu, dass die Abflussszenarien für kleine Einzugsgebiete durch größere Unsicherheiten gekennzeichnet sind, noch kann gefolgert werden, dass kleine Anlagen im Vergleich zu den großen Anlagen mit größeren Einbußen zu rechnen haben. Allerdings muss bei den kleinen Anlagen bereits in naher Zukunft mit leichten Erzeugungseinbußen gerechnet werden.

Tabelle 15: Änderung der Erzeugung von 5 WKA für KLAVE-Klimaszenario

Änderung Volllaststunden		
	nahe Zukunft	ferne Zukunft
Ahse / Westtünnen	-9 %	-15 %
Werre / Ahmsen	-4 %	-6 %
Twiste / Welda	-3 %	0 %
Volme / Hagen-Eckesey	-2 %	-7 %
Wupper	-1 %	-5 %

7.2.3 Ergebnisse der Klimabetrachtungen

Zu erwartende Klimaveränderungen in NRW werden sich auf die Wasserkraft in der nahen Zukunft voraussichtlich nur moderat auswirken. Die Literaturlauswertung und exemplarische Simulationen für Beispielanlagen an verschiedenen Standorten in NRW führen für den Zeitraum 2020 bis 2050 zu dieser Prognose.

Die Beispielrechnung erfolgte mit einer großen Anzahl verschiedener Klimaszenarien, um deren Unsicherheit zu kompensieren. Eine Zusatzbetrachtung galt den regionalen und anlagenspezifischen Abhängigkeiten.

Für größere Wasserkraftanlagen sind in naher Zukunft im Mittel geringe Steigerungen der Energieerzeugung wahrscheinlich, während bei kleinen Anlagen mit leichten Erzeugungseinbußen gerechnet werden kann. In der fernen Zukunft 2070 bis 2100 sind bei allen untersuchten Anlagen überwiegend Erzeugungseinbußen wahrscheinlich. Nach den Beispielanalysen bewegen diese sich in einem Korridor, der zwar auch normalen hydrologischen Schwankungen entspricht, aber trotzdem die Rentabilität spürbar verschlechtert.

Die zu erwartende Zunahme der Extrema betrifft die Wasserkraft ebenfalls nur in beschränktem Umfang. Zukünftig trockenere Sommer und ausgedehntere Niedrigwasserperioden führen zu Stillstandszeiten. Im Rahmen der Modellkette sind diese Zeiten jedoch in den Beispielrechnungen enthalten und entsprechend in den vorstehenden Ausführungen berücksichtigt.

Extreme Hochwasserereignisse können zusätzliche Probleme bedingen. Grundsätzlich sind auch heute bereits WKA Hochwassersicher auszubauen. Anzuraten bleibt, erhöhte Bemessungswassermengen und Hochwasserstände einzuplanen und baulich zu realisieren. Vorhersagesysteme helfen auch bei nicht automatisierten Anlagen rechtzeitig, vor dem Hochwasser geeignete operationelle Maßnahmen zu ergreifen.

8 Fazit

Die ehrgeizigen Klimaschutzziele Nordrhein-Westfalens erfordern einen deutlichen Ausbau der Erneuerbaren Energien. Hierzu kann auch der Ausbau der Wasserkraftnutzung einen Beitrag leisten

Vergleicht man jedoch den Anlagenbestand in Nordrhein-Westfalen mit dem identifizierten ungenutzten Ausbaupotenzial, so wird deutlich, dass derzeit bereits ein sehr großer Anteil des gesamten Potenzials genutzt wird. Addiert man zu der bereits in NRW installierten Leistung der bestehenden Anlagen (189 MW) das ungenutzte differenzierte Leistungspotenzial aus dem maximalen Szenario (24 MW), ergibt sich ein Gesamtpotenzial von 213 MW bzw. ein Erzeugungspotenzial von 0,6 TWh/a. Demnach wären durch die bestehenden Wasserkraftanlagen bereits 89 % des Gesamtpotenzials genutzt. Nimmt man für die Quantifizierung des Gesamtpotenzials in NRW neben dem Anlagenbestand das ungenutzte differenzierte Potenzial aus dem minimalen Szenario (14,4 MW) als Grundlage, ergibt sich ein Gesamtpotenzial von 203 MW, was demnach schon zu 93 % ausgenutzt wäre. Bei Betrachtung der potenziellen Energieerzeugung liegt der Ausnutzungsgrad auf einem vergleichbaren Level, für das maximale Szenario bei 83 % und für das minimale Szenario bei 90 %.

Das Wasserkraftpotenzial in NRW ist auch im Vergleich mit anderen erneuerbaren Energiequellen zur Stromerzeugung vergleichsweise gering. Im Vergleich zum möglichen Ausbaupotenzial der Windkraft mit 71 TWh/a (LANUV 2012) und zur Photovoltaik mit 72 TWh/a (LANUV 2013), ist das Gesamtpotenzial der Wasserkraft aus Anlagenbestand und noch ungenutztem Potenzial selbst bei Zugrundelegung des maximalen Szenarios mit rund 0,6 TWh deutlich geringer.

Dennoch gibt es Gründe, den Ausbau der bisher noch ungenutzten Wasserkraftpotenziale in Nordrhein-Westfalen zu unterstützen, insbesondere an potenziellen Standorten für besonders große Anlagen oder bei dem Repowering bestehender Anlagen. Die Technik der Wasserkraftnutzung ist ausgereift, besitzt relativ hohe Wirkungsgrade und kann je nach Standort eine gute Wirtschaftlichkeit erzielen. Zudem ermöglicht die meist relativ gleichmäßige Stromerzeugung von Wasserkraftanlagen im Gegensatz zur Wind- oder Solarenergie den Einsatz als Grundlastkraftwerke. Bei der vollständigen Hebung des maximalen ungenutzten Erzeugungspotenzials von 107,9 GWh/a könnten zudem etwa 34.7000 Haushalte (Verbrauch Musterhaushalt: 3.107 kWh/a) in NRW zusätzlich mit regenerativem Strom versorgt werden. Im Szenario des minimalen ungenutzten Erzeugungspotenzials ergibt sich ein Potenzial von 59,8 GWh/a, womit etwa 19.200 Haushalte in NRW zusätzlich mit regenerativem Strom versorgt werden könnten.

Bei der Umsetzung der Potenziale ist zu berücksichtigen, dass die Nutzung der Wasserkraft in Gewässern Einfluss auf den Lebensraum der aquatischen Fauna hat. Auch sind Wasserkraftanlagen zum Teil nur mit großem Aufwand mit den Anforderungen der regulatorischen Rahmenbedingungen wie Wasserrahmenrichtlinie, Wasserhaushaltsgesetz oder Landesfischereigesetz zu vereinbaren. Zwar werden neue Wasserkraftanlagen ausschließlich an bereits bestehenden Querbauwerken installiert, diese verursachen in der Regel aber auch ohne Wasserkraftnutzung bereits einen Aufstau und behindern so die Durchgängigkeit. Für die Erreichung der Ziele der Wasserrahmenrichtlinie ist daher zunächst zu prüfen, ob Querbauwerke ohne aktuelle Nutzung zurückgebaut werden müssen. Für die flussabwärts gerichtete Fischpassage besteht zudem an vielen Anlagen in NRW noch ein Verbesserungsbedarf.

Auch wenn eine vollständige Herstellung der Durchgängigkeit demnach nur durch den Rückbau eines Bauwerkes erzielt werden kann, wurden in den letzten Jahren an Querbauwerken und Wasserkraftanlagen zahlreiche Maßnahmen zur Verbesserung der Durchgängigkeit durchgeführt, was bei Neubau oder Erweiterung einer Wasserkraftanlage meist verpflichtend erforderlich ist. So besteht bei Neubau- und Repoweringvorhaben, in deren Rahmen eine intensive Auseinandersetzung mit den ökologischen Auswirkungen sowie innovativen Lösungsansätzen erfolgt, die Möglichkeit, dass durch entsprechende bauliche Ausführungen von Anlagenbetreibern auch Synergieeffekte in Bezug auf gewässerökologische Verbesserungen im Vergleich zum Status Quo erreicht werden können.

Darüber hinaus sind auch Anforderungen des Natur- und Artenschutzes zu beachten. Im Rahmen der Biodiversitätsstrategie des Landes wurden hier klare Ziele formuliert, damit ein naturverträglicher Ausbau der Wasserkraft erfolgen kann und die Ziele der Artenschutzprogramme des Landes, wie zum Beispiel des Wanderfischprogramms NRW, erreicht werden können.

Aus diesen Gründen sind weitere Abzüge im differenzierten Potenzial aufgrund gewässerökologischer oder naturschutzfachlicher Anforderungen zu erwarten, die aber im Rahmen dieser Studie nicht abschließend geklärt werden konnten.

Im Spannungsverhältnis von Klimaschutz und Energiewende einerseits, und den Ansprüchen des Gewässer- und Naturschutzes andererseits, gilt es daher stets, die unterschiedlichen Ziele und Interessen so weit wie möglich in Einklang zu bringen.

Literaturverzeichnis

- AEE (2013) AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEEN: „Studienvergleich: Entwicklung der Volllaststunden von Kraftwerken in Deutschland“; Juli 2013, www.energiestudien.de (Aufruf vom Mai 2016).
- ANDERER, P., DUMONT, U. & R. KOLF (2007): „Das Wasserkraftpotenzial in Nordrhein-Westfalen“, Wasser und Abfall 7-8, 2007, S. 16-20.
- ANDERER, P., DUMONT, U., RUPRECHT, A., WOLF-SCHUMANN, U. & S. HEIMERL (2010): „Potentialermittlung für den Ausbau der Wasserkraftnutzung in Deutschland als Grundlage für die Entwicklung einer geeigneten Ausbaustrategie“; Schlussbericht zur Studie im Auftrag des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- BUNDESREGIERUNG (2015): Fortschrittsbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, ENTWURF Stand: 26.05.2015, Vulnerabilitätsanalyse (Anhang 1 des Fortschrittsberichts);
http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimawandel_das_fortschrittsbericht_bf.pdf
- BWK (2016) BUND DER INGENIEURE FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABFALLWIRTSCHAFT UND KULTURBAU: Tagung des Landesverband NRW e.V., 28.4.2016, Aachen; Beiträge von M. Reinhardt (Universität Trier), S. Pawlowski (MKULNV), Ch. Elhaus (BZR Arnsberg).
- BMU (2014) BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (BMU) (Hrsg.): „Forschungsbericht – Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichtes 2014 gemäß § 65 EEG - Vorhaben IId Spartenspezifisches Vorhaben Wasserkraft“. Berlin.
- BZR-ARN (2013): „Aktionsprogramm erneuerbare Energien - Ermittlung des erschließbaren Restpotenzials der Wasserkraft im Regierungsbezirk Arnsberg“, Abschlussbericht im Auftrag der Bezirksregierung Arnsberg, 2013. Essen.
- DTK (2013) DEUTSCHES TALSPERREN KOMITEE e. V. (Hrsg.): Talsperren in Deutschland. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013.
- EBEL, G. (2013): „Fischschutz und Fischabstieg an Wasserkraftanlagen, Handbuch Rechen- und Bypasssysteme“, Mitteilungen aus dem Büro für Gewässerökologie und Fischereibiologie Dr. Ebel, BGF, (Band 4). Halle (Saale).
- EBERLE, M., BUIEFELD, H., WILKE, K. & P. KRAHE (2005): Hydrological Modelling in the RiverRhine Basin, Part III-Daily HBV Model for the Rhine Basin, BfG-Berichte, BfG-1451, Federal Institute of Hydrology, Koblenz.
- EEG (2014): Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das durch Artikel 1 des Gesetzes vom 22. Dezember 2014 (BGBl. I S. 2406) geändert worden ist.
- EEG (2017): Gesetz zur Einführung von Ausschreibungen für Strom aus erneuerbaren Energien und zu weiteren Änderungen des Rechts der erneuerbaren Energien vom 8. Juli 2016 (Bundesrat Drucksache 355/16).

- EU-WRRL (2000): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. – Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L 327 vom 22.12.2000, 1 – 72.
- ELWAS (2015): Daten aus dem Querbauwerke Informationssystem unter <http://www.elwasweb.nrw.de/elwas-web/index.jsf>
- EUGH (2015): Urteil vom 1.7.2015, Rechtssache C-461/13, Weservertiefung.
- FASSBENDER, K. (2016): Beitrag zu den Erfurter Gesprächen 26./27.1.2016 „Die rechtlichen Vorgaben der Wasserrahmenrichtlinie im Lichte der jüngsten Rechtsprechung – Konsequenzen für die Zukunft“; Organisation: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA).
- FREHMANN, T., BROCKMANN, H., BERGER, V. & A. NIEMANN (2012): Möglichkeiten der Wasserkraftnutzung in der Abwasserbeseitigung; Vortrag im Rahmen der DWA Energietage, 29.10.2012 – 30.10.2012 in Niederrhein.
- GIESECKE, J., HEIMERL, S. & E. MOSONYI (2014): Wasserkraftanlagen - Planung, Bau und Betrieb. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2014.
- GÖRGEN, K., BEERSMA, J., BRAHMER, G., BUIVEVELD, H., CARAMBIA, M., DE KEIZER, O., KRAHE, P., NILSON, E., LAMMERSEN, R., PERRIN, C. & D. VOLKEN (2010): Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick 2050 Project, CHR report, I-23, 228 pp. ISBN 978-90-70980-35-1.
- HPPT (2016): HydroPowerPotentialTool HPPT, Berechnungsprogramm für Wasserkraftanlagen, Hydrotec Ingenieurgesellschaft mbH.
- HYDROTEC (2013): Aufbau eines WHM LARSIM-Mitteuropamodells, im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG). Koblenz.
- IPCC (2000): IPCC Special Report Emissions Scenarios, Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- LANUV (2016): Potenzialstudie Pumpspeicherkraftwerke Nordrhein-Westfalen. LANUV-Fachbericht 62. Recklinghausen.
- LANUV (2016a): Strom aus Erneuerbaren Energien in Nordrhein-Westfalen. LANUV-Info 33. Recklinghausen.
- LANUV (2014): Bestimmung des kumulativen Abwasseranteils ausgehend von kommunalen Kläranlagen für die Fließgewässer in NRW. Projektbericht Hydrotec. Aachen.
- LANUV (2013): Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz © Land NRW, Recklinghausen; <http://www.lanuv.nrw.de>, LANUV-Datenbank Gewässerstrukturgütekartierung NRW_18.11.13.mdb.
- LANUV (2013a): Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW, Teil 2 - Solarenergie, LANUV Fachbericht 40; Herausgeber: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz. Recklinghausen.

- LANUV (2012): Potenzialstudie Erneuerbare Energien NRW, Teil 1 - Windenergie, LANUV Fachbericht 40; Herausgeber: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz. Recklinghausen.
- LAU, M. (2016): Die Wiederherstellung der Durchgängigkeit nach dem Urteil zur Weservertiefung. In: WasserWirtschaft 106 (2016), Heft 5, S. 43-47.
- MAUSER, W. (2010): Teilprojekt Hydrologie/Fernerkundung. In: GLOWA-Danube-Projekt, Universität München, LMU (Hrsg.). Global Change Atlas, Einzugsgebiet Obere Donau. München.
- MEEHL, G. A., COVEY, C., TAYLOR, K. E., DELWORTH, T., STOUFFER, R. J., LATIF, M., MCAVANEY, B. & J. F. B. MITCHELL (2007): The WCRP CMIP3 Multimodel Dataset: A - New Era in Climate Change Research, Bulletin of the American Meteorological Society, 88, 1383-1394.
- MUNK, H.-H. (2016): „Das Urteil des EuGH zum Verschlechterungsverbot – zwei Antworten und viele Fragen“, Wasser und Abfall 3, 2016, S. 59-63.
- MKULNV (2016): Broschüre Energiedaten NRW 2014, Herausgeber: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.
- MKULNV (2016a): <https://www.umwelt.nrw.de/klima-energie/energie/zukunftsenergien/> Aufruf vom 20.7.2016.
- MKULNV (2015): Erlass vom 29.6.2015: Fischschutz mit Horizontalrechen.
- MKULNV (2014): Erlass vom 17.6.2014: Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen und Fischschutzeinrichtungen an Wasserkraftanlagen.
- MKULNV (2014a): Richtlinie über die Gewährung von Zuwendungen aus dem Programm „Rationelle Energieverwendung Regenerative Energien und Energiesparen (progres.nrw)“.
- MKULNV (2009): Bewirtschaftungsplan für die nordrhein-westfälischen Anteile von Rhein, Weser, Ems und Maas 2010 - 2015, Herausgeber: Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.
- MUNLV (2005): Handbuch Querbauwerke NRW, Hrsg. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen. Düsseldorf.
- MUNLV (2009): Runderlass IV-2-50 32 67: Durchgängigkeit der Gewässer an Querbauwerken und Wasserkraftanlagen.
- NAKICENOVIC, N., DAVIDSON, O., DAVIS, G., GRÜBLER, A., KRAM, T., LEBRE LA ROVERE, E., METZ, B., MORITA, T., PEPPER, W., PITCHER, H., SANKOVSKI, A., SHUKLA, P., SWART, R., WATSON, R. & Z. DADI (2000): IPCC Special report on Emission Scenarios. Summary for Policymakers, 27 pp.
- NILSON, E. (2015): KLIWAS-Abflusssimulationen für die Nebengewässer des Rheins – Em-scher, Erft, Lippe, Sieg, Ruhr und Wupper, Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2015.

- NILSON, E., KRAHE, P., LINGEMANN, I., HORSTEN, T., KLEIN, B., CARAMBIA, M., LARINA, M. & T. MAURER (2014): Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. KLIWAS-Schriftenreihe 02/2014: DOI: 10.5675/Kliwas_43/2014_4.01.
- PINNEKAMP, J. (2007): Wissenschaftliche Begleitung des Einsatzes eines Wasserrades zur Stromerzeugung in der Abwasserableitung. Abschlussbericht (unveröffentlicht), Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH-Aachen.
- PLAGEMANN, S., IMBERY, F. & J. NAMYSLO (2014): Validierung und Bewertung von Klimaprojektionen – Bereitstellung von Klimaszenarien für den Binnenbereich. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 1.02. KLIWAS-29/2014. DWD / BfG, Koblenz. DOI: 10.5675/Kliwas_29/2014_1.02
URL: http://doi.bafg.de/KLIWAS/2014/Kliwas_29_2014_1.02.pdf (zuletzt aufgerufen am 13.7.2016)
- RICHTER, K.-G., SCHLAFFER, S., CHOMOEV, E. & M. HUNGER. (2009): Untersuchung zur Auswirkung des Klimawandels auf das Abflussverhalten in Gewässern in NRW, Auftraggeber: Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen. Karlsruhe.
- SÄCKER, F. J. (Hrsg.) (2015]: Berliner Kommentar EEG 2014, Energierecht; 3. Auflage, R&W Fachmedien Recht und Wirtschaft.
- STAUANLAGEN (2014): Daten aus dem Stauanlagenverzeichnis NRW; Herausgeber LANUV, Stauanlagen_NRW.xlsx
- UBA (2014): UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.), Serie Climate Change: „Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid Emissionen des Deutschen Strommix in den Jahren 1990 bis 2013“, UBA Texte (23/2014). Dessau-Roßlau.
- VAN DER LINDEN, P. & J.F.B. MITCHELL (2009): ENSEMBLES - Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160 S.
- WEBSITE ENERGIESTATISTIK-NRW: Stromerzeugung; <http://www.energiestatistik-nrw.de/energie/strom/stromerzeugung> (aufgerufen am 05.12.2016).
- WEBSITE LEIFIPHYSIK: Geschichte der Wasserkraft; <http://www.leifiphysik.de/uebergreifend/regenerative-energieversorgung/geschichte>; (aufgerufen am 05.10.2016).
- WEBSITE STROMSPARINITIATIVE: Stromspiegel für Deutschland; <http://www.die-stromsparinitiative.de/stromspiegel/stromverbrauch-vergleichen-stromspiegel/index.html>, (aufgerufen am 15.7.2016).
- WEBSITE UBA: CO₂ Rechner; http://uba.co2-rechner.de/de_DE/(aufgerufen vom 19.7.2016).
- WEBSITE WELTBANK: World Development Indicators: Electricity production, sources, and access; <http://wdi.worldbank.org/table/3.7> (aufgerufen am 05.10.2016).
- WOLF-SCHUMANN, U. & U. DUMONT (2010): Einfluss der Klimaveränderung auf die Wasserkraftnutzung in Deutschland. In: WasserWirtschaft 100 (2010), Heft 9, S. 28-33.

Anhang

I Datengrundlagen

Für die Bearbeitung der Potenzialstudie wurden umfangreiche Daten des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW genutzt:

- Daten zu Querbauwerken, Wasserkraftanlagen und Fischaufstiegsanlagen
- Daten zu Hydrologie einschließlich der Ergebnisse der LANUV Studie „Bestimmung des kumulativen Abwasseranteils für die Fließgewässer in NRW“
- Shapefiles der Fließgewässerzonierung, der fischfaunistischen Referenzen, der Schutzgebiete, Topographie, Verwaltungsgrenzen
- Informationen aus der Bewirtschaftungsplanung

Tabelle A 1: Daten des LANUV zu Standorten von Querbauwerken, die in der Studie genutzt wurden

Datenquelle	Daten zu Objekten	Anmerkungen Umfang
Datenbank aus der Gewässerstrukturkartierung 2011 bis 2013	Querbauwerken (QBW)	Ca. 38.000 Datensätze
	Fischaufstiegsanlagen (FAA)	312 Datensätze mit Angaben zu Auffindbarkeit und Durchgängigkeit auf- und abwärts
Zusammenstellung von EEG-Daten aus dem Anlagenregister der Bundesnetzagentur und Daten aus (BZR-ARN 2013)	Wasserkraftanlagen (WKA)	618 Datensätze, 379 in Studie BZR-ARN (2013) zugeordnet
QUIS-NRW	QBW, FAA, WKA	13.170 QBW, 317 FAA, 1.034 WKA
Daten aus Stauanlagenverzeichnis NRW	Talsperren	116 Stauanlagen inkl. Hochwasserrückhaltebecken und Vorsperren
Daten aus Potenzialstudie Pumpspeicherkraftwerke NRW (LANUV 2016)	Talsperren	83 Talsperren
Auswertungstabelle aus (BZR-ARN 2013)	QBW, WKA, FAA	3.363 Datensätze
Auszug aus DB des Landes zu Wasserrechten	Wasserrechte	NRW gesamt
Daten aus (LANUV 2014) mit Aktualisierung aus 2015	Abflüsse	NRW gesamt
Projektinterne Datenbank	QBW, FAA, WKA	

I.i Abflussdaten MQ, MNQ

Die Abschätzung zum Wasserkraftpotenzial basiert auf den Abflussdaten einer Studie des LANUV (LANUV 2014). Zielsetzung des Vorhabens war die Quantifizierung des Einflusses von Abwässern, um den Zustand der Gewässer beurteilen zu können. Dazu mussten für jeden Gewässerabschnitt in NRW die Abflusskennwerte MQ und MNQ ermittelt werden. Methodisch einheitlich wurden die Kennwerte flächendeckend für ca. 10.750 Fließgewässer mit einer Gesamtlänge von ca. 35.000 km abgeleitet.

Das sogenannte Regionalisierungsverfahren basiert auf Regressionsmodellen, die MQ- bzw. MNQ-Werte vorliegender Pegelzeitreihen und aggregierte Gebietseigenschaften, zum Beispiel die Landnutzung und das Gefälle, als erklärende Variablen verwenden. Abbildung A 1 zeigt für alle Gewässer in NRW die errechnete mittlere Abflussspende MQ in l/s/km²

Bei den Angaben zu MQ und MNQ und deren Spenden sowie den Abwasseranteilen handelt es sich um modellierte Werte. Diese können nicht unmittelbar bzw. im Sinne von gemessenen Daten für formale Verfahren, zum Beispiel für Wasserrechtsanträge o. ä. herangezogen werden. Hier ist vorab immer eine Rückkopplung mit der zuständigen Wasserbehörde notwendig. Für diese Studie zur Einschätzung des landesweiten Wasserkraftpotenzials sind die Abflussangaben aber hinreichend genau.

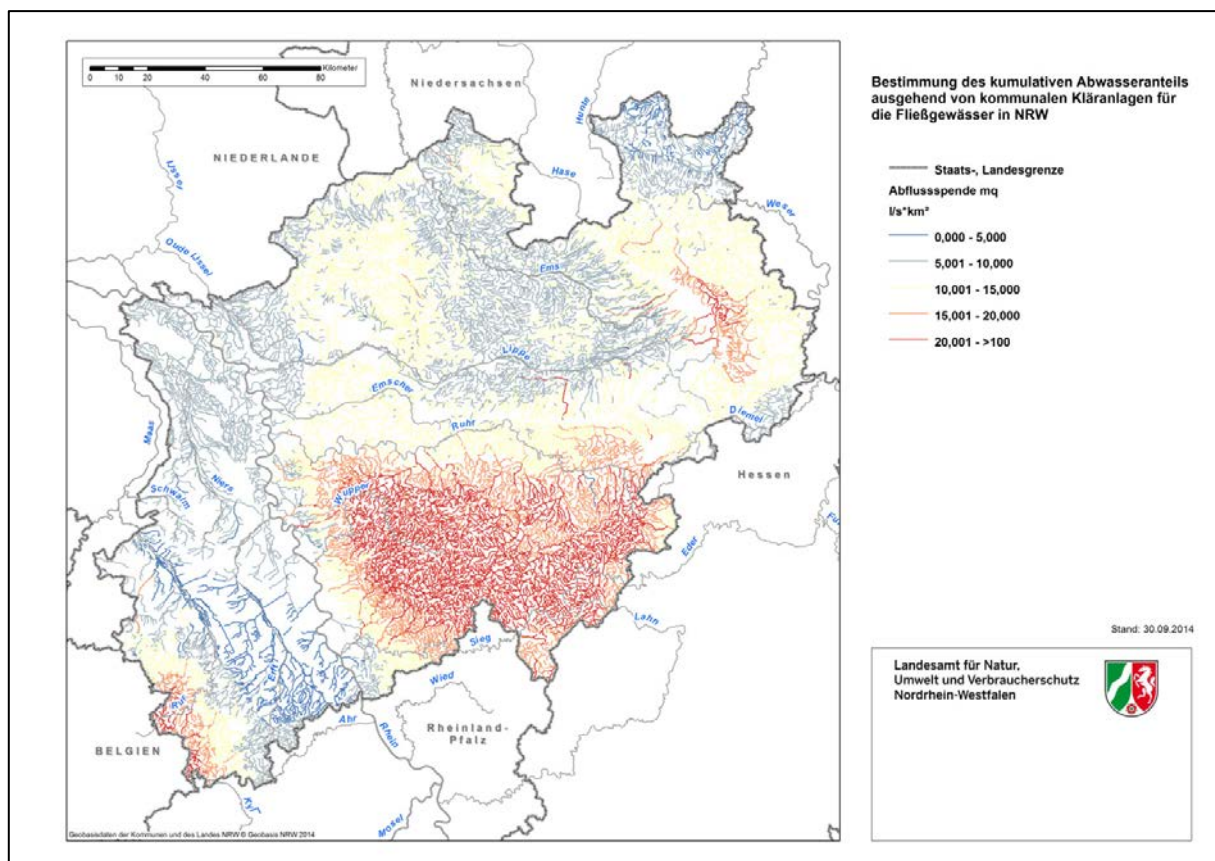


Abbildung A 1: Abflussspende MQ in l/s*km²

I.ii Selektion der Daten aus der Gewässerstrukturkartierung

Die für die Untersuchung zur Verfügung gestellte Datenbank mit Querbauwerken aus der Gewässerstrukturkartierung in NRW aus den Jahren 2011 bis 2013 enthielt 38.243 Datensätze, die zu jeweils einem kartierten Bauwerk gehören. Düker, Brücken und Pegel, deren Daten ebenfalls bei der Kartierung erhoben wurden, waren bereits aus dem Datenbestand entfernt. Neben Angaben zur Verortung enthielt die Datenbank u. a. Angaben zu Bauwerkstyp und Geometrie.

Tabelle A 2 zeigt die vorkommenden Typen von Querbauwerken. Die Selektion der Daten und Standorte, die auf ihre Eignung zur Wasserkraftnutzung untersucht werden sollten, erfolgte nach den im Folgenden dargestellten Vorgaben.

Von der Bearbeitung ausgeschlossen wurden Datensätze, die aufgrund des Bauwerkstyps, der Höhe oder des Status zur Wasserkraftnutzung ungeeignet erschienen:

- alle Durchlässe und Verrohrungen,
- alle Schöpfwerke, Pumpwerke und Sohlswellen,
- alle Bauwerke vom Status „nicht vorhanden“ („nicht vorhanden“ resultiert aus dem Vergleich mit Standorten aus der QUIS- Datenbank (QUIS, 2015), die bei der Gewässerstrukturkartierung nicht im Gewässerabschnitt aufgefunden wurden),
- alle rauen Rampen, Abstürze, Sohlgleiten, Streichwehre mit einer Angabe zur Bauwerkshöhe oder Absturzhöhe $< 0,8$ (Einheit normalerweise in m) oder auch 80 (dann in der Regel Angaben in cm).

Die verbliebenen Datensätze wurden in der weiteren Untersuchung berücksichtigt, wenn sie eine Bauwerkshöhe oder Absturzhöhe $\geq 0,8$ (m) oder 80 (cm) oder ohne Höhenangaben folgenden Bauwerkstyp aufwiesen:

- Talsperre
- Wasserkraftanlage
- Damm

Raue Rampen, Abstürze, Sohlgleiten (die jedoch auch das Ergebnis einer Maßnahme zur Herstellung der Durchgängigkeit darstellen können) und Streichwehre mit kleineren Bauwerkshöhen oder Absturzhöhen wurden dann zum Untersuchungsumfang gerechnet, wenn

- die Summe aus Bauwerkshöhe oder Absturzhöhe und der Höhenangabe zu Aufsatz oder Verschluss die 80 cm erreicht oder überschreitet, oder
- eine Ausleitung vorhanden ist, oder
- die sogenannten Strukturparameter EP21AGR1 oder EP21TRG1, die bei einem Absturz bzw. einer Teilrampe der Mindesthöhe 1 m mit „1“ gesetzt sind.

Unter den beschriebenen Bedingungen verblieben von den 38.243 Datensätzen aus der Gewässerstrukturkartierung für die weitere Auswertung 4.994 Datensätze von Bauwerken.

Tabelle A 2: Typen von Bauwerken aus der Gewässerstrukturkartierung und Berücksichtigung bei der Auswertung (TYP_ID und TYP_COD: Spaltenbezeichnung aus GS-QBW (2011-2013))

TYP_ID	TYP_COD	Anzahl gesamt	bei Potenzialermittlung berücksichtigt*
1	Sohlgleite	5.250	ja**
2	Streichwehr	132	ja**
3	Raue Rampe	4.587	ja**
4	Sohlschwelle	1.801	nein
5	Absturz	8.929	ja**
6	Bewegliches Wehr	1.368	ja**
7	Damm	190	ja
8	Talsperre	67	ja
10	Durchlass	8.670	nein
12	Verrohrung	6.887	nein
14	Schöpfwerk	11	nein
15	Pumpwerk	62	nein
16	Wasserkraftanlage	289	ja
	gesamt	38.243	

* nicht berücksichtigt wurden alle Bauwerke mit Status „nicht vorhanden“

** Einschränkungen bezüglich der Bauwerkshöhe oder Absturzhöhe wurden berücksichtigt (siehe Text)

Die Bauwerke wurden im GIS verortet, so dass ihnen die Abflusswerte der zugehörigen Gewässerabschnitte zugeordnet werden konnten. Nach Anwendung des Auswahlkriteriums $MQ \geq 1 \text{ m}^3/\text{s}$ verblieben für ganz NRW 1.251 Bauwerke, die auf die aktuelle Wasserkraftnutzung und das technisch-theoretische Potenzial hin untersucht wurden. Da teilweise mehrere Bauwerke (Schütze, Klappen, Wasserkraftanlagen...) zu einem Standort gehören, wurde für jeden Standort das relevante Staubauwerk zur weiteren Bearbeitung ausgewählt. So wurde, falls eine Wasserkraftanlage vorhanden ist, diese und das Staubauwerk weiter betrachtet.

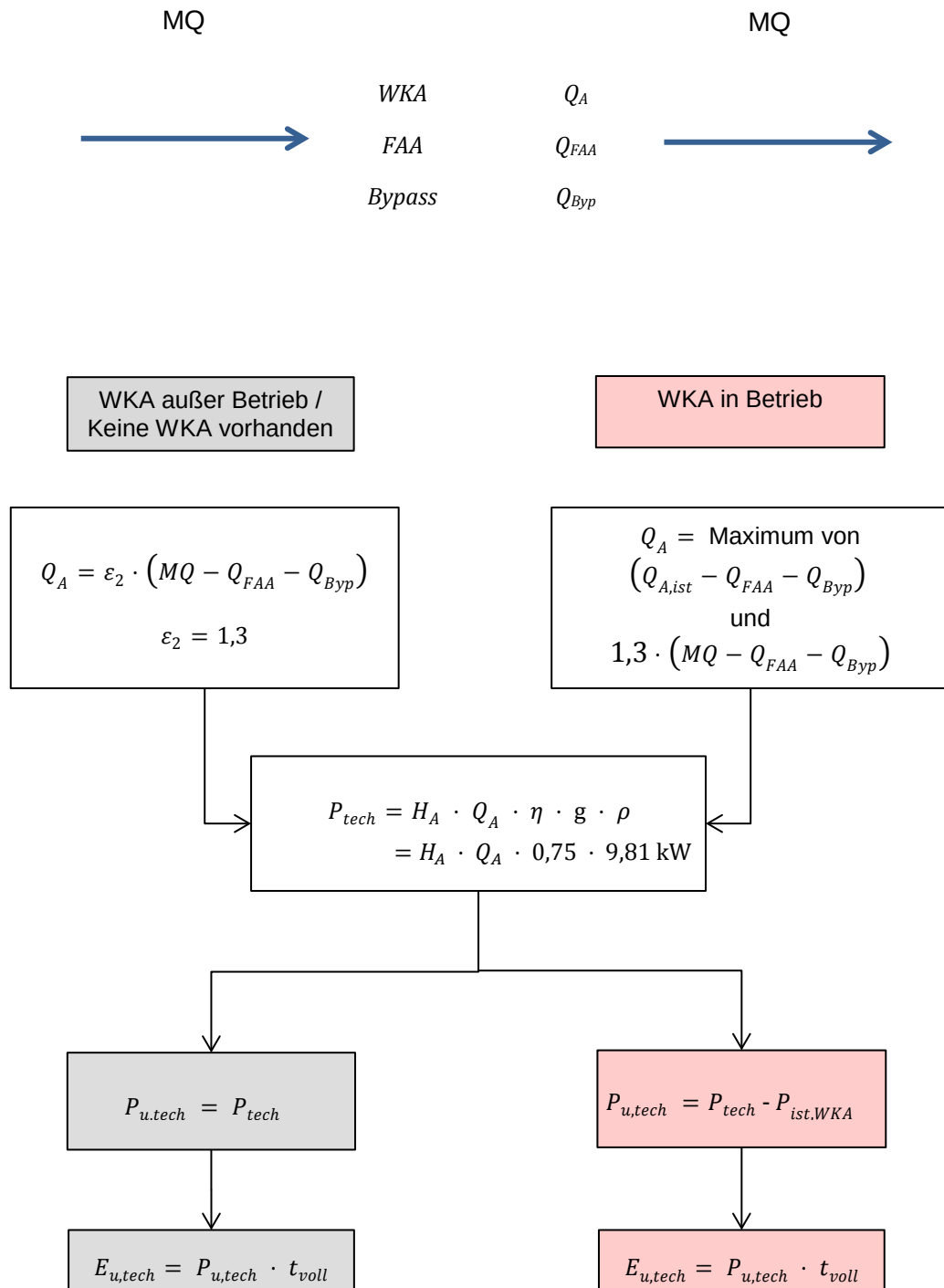
Die gleiche Auswertung erfolgte für eine Kontrollgruppe von etwa 50 Standorten im Regierungsbezirk Arnsberg. Dies diente dazu, die Methodik an den Daten aus der Studie Arnsberg zu validieren.

II Ermittlung des theoretisch verfügbaren, technischen Potenzials

Das technisch-theoretische Potenzial wurde für alle zu untersuchenden Standorte in NRW ermittelt, die die Mindestkriterien in Bezug auf Fallhöhe und Mindestabfluss erfüllen. Nach Abzug des genutzten Potenzials an Standorten mit bestehender Wasserkraftnutzung ergibt sich das ungenutzte Potenzial. Im Folgenden wird die unterschiedliche Vorgehensweise für Flusskraftwerke und Ausleitungskraftwerke, sowie die Berechnung des Ausbaupotenzials bei bestehenden Wasserkraftanlagen erläutert.

Flusskraftwerke

Abbildung A 2 zeigt das Ablaufschema, nach dem für Flusskraftwerke das technisch-theoretische Potenzial P_{tech} , das ungenutzte, bzw. das theoretische Zubaupotenzial $P_{\text{z,tech}}$ sowie die sich daraus ergebende zusätzliche Jahresarbeit $E_{\text{z,tech}}$ ermittelt wurden.



*ökologische Abflüsse werden bei der Potenzialermittlung auch bei bekanntem Q_A berücksichtigt.

Abbildung A 2: Ablaufschema für die Berechnung des technischen Potenzials und des ungenutzten technischen Potenzials bei Flusskraftwerken; Bezeichnungen und Einheiten gemäß Kapitel 3.3.1; $P_{u,tech}$: ungenutztes technisch-theoretisches Leistungspotenzial, $E_{u,tech}$: ungenutztes technisch-theoretisches Erzeugungspotenzial

Ausleitungskraftwerke

Bei Ausleitungskraftwerken erfolgte die Potenzialermittlung sowohl für den Kanal (Mühlengraben) als auch für das Ausleitungswehr. Dabei standen für den Ausbaudurchfluss $Q_{A,K}$ im Kanal folgende Quellen bzw. Daten zur Abschätzung zur Verfügung:

1. Potenzialstudie Arnsberg für Standorte im Regierungsbezirk Arnsberg,
2. Daten des Querbauwerke Informationssystems QUIS,
3. Abschätzung aus Leistungsangaben in WKA-LANUV (2014) und in QUIS.
4. In allen anderen Fällen wurde angenommen $Q_{A,K} = 0$.

Die Potenzialberechnung folgte im Prinzip jeweils für das Kanalbauwerk und das Ausleitungswehr dem Schema aus Abbildung A 2 mit folgenden Besonderheiten bzw. Abweichungen:

- Waren Daten zu $Q_{A,K}$ für den Kanal bekannt, oder konnten diese abgeschätzt werden, so wurde davon ausgegangen, dass der Kanal keine zusätzliche Wassermenge fasst.
- War eine Wasserkraftanlage im Kanal in Betrieb, wurde geprüft, ob nach Abzug der nach Gesetzeslage erforderlichen ökologischen Abflüsse im Kanal (Q_{FAA} , Q_{Byp}) ein zusätzliches Potenzial vorhanden war.
- War die Wasserkraftanlage im Kanal nicht in Betrieb, wurde angenommen, dass zunächst der Fischaufstieg und der Mindestabfluss in der Ausleitungsstrecke gewährleistet werden. Dabei wurde der Abfluss der Fischaufstiegsanlage als Teil des Mindestabflusses angerechnet. Ggf. wurde $Q_{A,K}$ um die erforderlichen Abflüsse verringert. Darüber hinaus wurden von $Q_{A,K}$ die ökologischen Abflüsse im Kanal $Q_{FAA,K}$ und $Q_{Byp,K}$ subtrahiert, und nur mit dem verbleibenden Abfluss das Potenzial berechnet.
- Der Abfluss am Ausleitungswehr wurde berechnet zu $MQ - Q_{A,K}$. Er dient vorrangig der Dotation der Fischaufstiegsanlage. Der Rest, u. a. auch die für den Mindestabfluss bereitzustellende Wassermenge, kann zur Wasserkraftnutzung eingesetzt werden.
- Das ungenutzte Potenzial am Ausleitungswehr wurde mit einem verringerten Gesamtwirkungsgrad $\eta = 0,7$ berechnet, da hier der Hauptabfluss in der Regel über den Kanal führt und für die Nutzung des restlichen Wasser kleine Turbinen wie z. B. Wasserkraftschnecken zur Anwendung kommen.

Ausbau bestehender Wasserkraftanlagen

Für bestehende Wasserkraftanlagen wird aus den Daten zu Fallhöhe und Abfluss im Gewässer bzw. im Mühlenkanal das technisch-theoretische Potenzial berechnet. Dabei geht die Abgabe ökologischer Abflüsse in die Bestimmung des technischen und des ungenutzten Potenzials ein, und zwar unabhängig davon, ob aktuell tatsächlich Abflüsse für Fischaufstiegsanlagen etc. bereitgestellt werden. So können bei einem zukünftigen Ausbau verpflichtende Auflagen, die das Ausbaupotenzial mindern würden, im verfügbaren Gesamtpotenzial für NRW berücksichtigt werden. Das (zusätzliche) Ausbaupotenzial bestehender Wasserkraftanlagen errechnet sich als Differenz zwischen dem gesamten verfügbaren technischen Potenzial an der WKA und der installierten Leistung.

Da einige Wasserkraftanlagen einen relativ großen Ausbaugrad besitzen, wurde verglichen, ob der bestehende Ausbaudurchfluss vermindert um die ökologischen Abflüsse größer ist, als der mit Hilfe von MQ und ε_2 berechnete Ausbaugrad (Abbildung A 2). Die Berechnung des technischen Leistungspotenzials erfolgte mit dem maximal ermittelten Wert $Q_{A,neu}$.

II.i Kontrollgruppe von Standorten aus der Potenzialstudie Arnsberg

Bei der Potenzialuntersuchung für ganz NRW wurden 51 Standorte des Regierungsbezirkes Arnsberg in gleicher Weise bearbeitet wie der Rest der Standorte in NRW. Dabei wurden die Fallhöhen aus der Gewässerstrukturkartierung verwendet und die Abflüsse nach dem für ganz NRW genutzten Verfahren berechnet. Tabelle A 3 zeigt, dass für die Kontrollgruppe von Standorten die summarischen Unterschiede innerhalb der ermittelten technischen Potenziale und der installierten Leistung 4 bis 5 % betragen.

Die Sichtung der Daten einzelner Standorte zeigte, dass Unterschiede im technischen Potenzial durch unterschiedliche Werte der Fallhöhen und Ausbaudurchflüsse erklärt werden können. Darüber hinaus verfügten die Verfasser der Potenzialstudie Arnsberg über weiterführende Informationen, die die Potenzialermittlung beeinflussten. So wurde z. B. für den Standort Kemnade an der Ruhr ein technisches Potenzial von etwa 1,26 MW ermittelt. Beim Bau der bestehenden Wasserkraftanlage in 2011 konnte dieses Potenzial aus Platzgründen nur etwa zur Hälfte ausgeschöpft werden. In der Potenzialstudie Arnsberg wurde daher für diesen Standort als ungenutztes Potenzial eine Null angegeben, während es bei der Landesstudie ca. 500 kW beträgt. Detailinformationen dieser Art lagen bei der landesweiten Potenzialermittlung nicht vor und konnten für andere Standorte somit nicht in die Potenzialermittlung einfließen.

Tabelle A 3: Potenziale an 51 Standorten, berechnet mit Daten nach Verfahren Potenzialstudie NRW und Potenzialstudie Arnsberg

Berechnungsverfahren und Datengrundlage	Anzahl	Technisches Potenzial [MW]	Installierte Leistung [MW]
Potenzialstudie NRW	51	29,7	24,5
Potenzialstudie Arnsberg		28,3	23,5

II.ii Jahresvolllaststunden gemäß verschiedener Quellen

Bei der Potenzialermittlung der Erneuerbaren Energien ist insbesondere die jährlich zu erzielende Strommenge bzw. der Ertrag der Anlagen von Bedeutung. Diese entspricht dem Erzeugungspotenzial, das mit Hilfe von mittleren Jahresvolllaststunden aus dem berechneten technisch-theoretischen Leistungspotenzial abgeschätzt werden kann. Zur Abschätzung der anzunehmenden Werte erfolgten verschiedene Recherchen und es wurden eigene Berechnungen durchgeführt.

Potenzialstudie Arnsberg

Innerhalb der Potenzialstudie Arnsberg erfolgte für ca. 250 Standorte potenzieller oder vorhandener Wasserkraftanlagen eine detaillierte Berechnung der mittleren jährlichen Volllaststunden. Diese ergeben sich als Quotient aus der Jahresarbeit und der Ausbauleistung. Dabei wurde die Jahresarbeit mit Hilfe eines Berechnungstools aus den berechneten Tagesarbeitswerten ermittelt. Abbildung A 3 zeigt das Ergebnis der Berechnungen. Die dargestellten Kurven wurden bei der Ermittlung des Erzeugungspotenzials der Studie Arnsberg verwendet.

Um die Vergleichbarkeit beider Potenzialstudien zu gewährleisten, wurden in der vorliegenden Studie für Nordrhein-Westfalen Volllaststunden verwendet, die aus Abbildung A 3 abgeleitet wurden (Tabelle A 4).

Tabelle A 4: Volllaststunden für verschiedene Ausbaugrade $\epsilon_2 = Q_A / (MQ - Q_{öko})$ nach Trendlinien für Dauerlinientypen nach MUNLV (2005)

Abflussverhalten	MNQ/MQ	Dauerlinientyp	Volllaststunden t_{voll} gemäß Trendlinien* [h/a]		
			$\epsilon_2 = 1,0$	$\epsilon_2 = 1,2$	$\epsilon_2 = 1,3$
sehr gleichmäßig	$\geq 0,27$	I a	5000	4800	4650
gleichmäßig	0,18 – 0,27	I b	4450	4230	4100
ungleichmäßig	0,09 – 0,18	II a	4350	4100	3800
sehr ungleichmäßig	$< 0,09$	II b	3950	3800	3650

* BZR-ARN (2013)

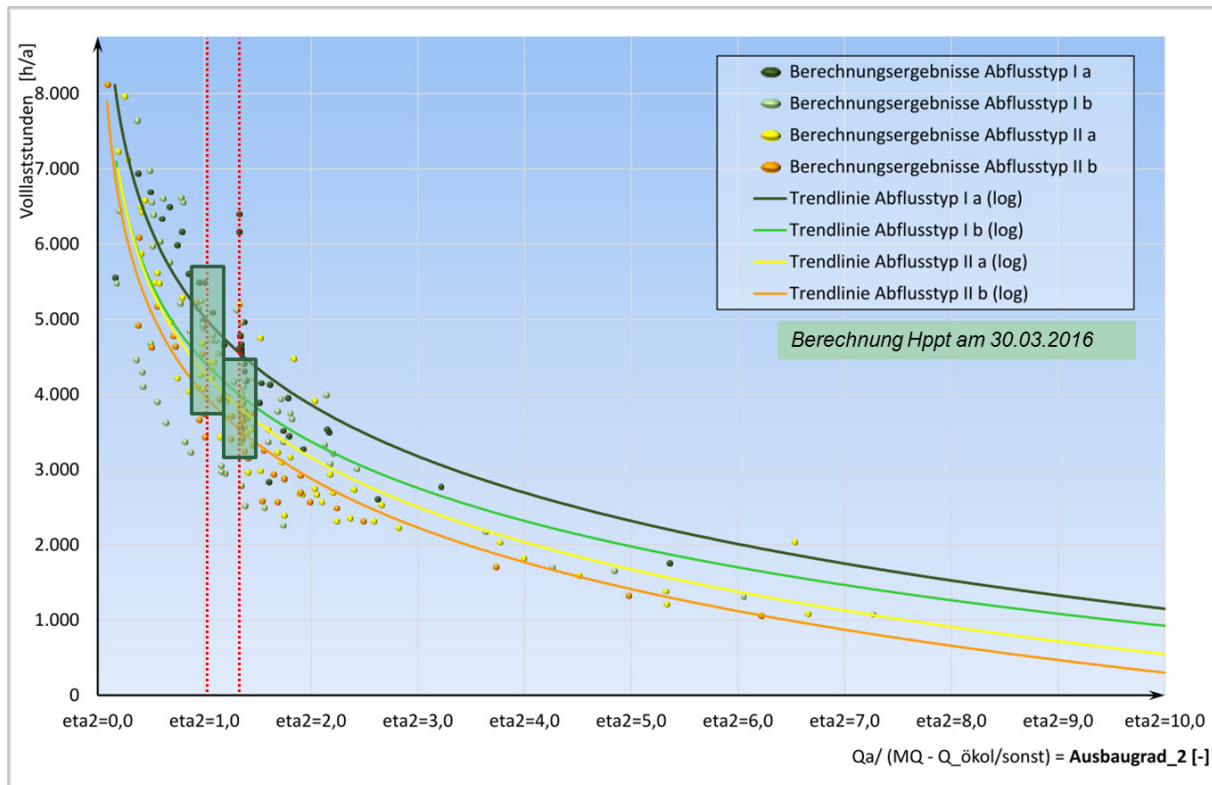


Abbildung A 3: Trendlinie der Volllaststunden aus BZR-ARN (2013) und Berechnung HPPT für Abflusstyp I a: grüne Rechtecke

Auswertung aus EEG-Daten

Jedes Jahr melden die Anlagenbetreiber, die für die Einspeisung von Strom aus Erneuerbaren Energien eine Vergütung nach dem Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) erhalten, die Erträge an die Bundesnetzagentur. Die Daten sind öffentlich zugänglich und wurden für die Jahre 2007 bis 2014 bezüglich der Volllaststunden t_{voll} ausgewertet.

Errechnet man t_{voll} als Quotient aus der über die Jahre gemittelten Jahresarbeit und der Leistung (die in der Regel gleichbleibend ist), so erhält man Werte, die bei gleicher Anlagenleistung einer großen Schwankungsbreite unterliegen (Abbildung A 4). Dies wird auch deutlich, wenn man den Median der Volllaststunden für verschiedene Leistungsklassen aufträgt (Abbildung A 5). Dieser steigt zwar erwartungsgemäß mit zunehmender Anlagenleistung an, reicht mit dem 75 % Quartil maximal aber nur bis zu ca. 4.000 h/a, wobei die Mediane und Quartile der oberen Leistungsklassen wie Abbildung A 4 zeigt, auf zunehmend weniger Daten basieren.

Eine wesentliche Ursache für diese Schwankungen kann in dem regional unterschiedlichen Abflussgeschehen zusammen mit jährlichen Abflussvariationen liegen, das sich direkt auf den Ertrag der Anlagen auswirkt. So weisen z. B. Wasserkraftanlagen im Unterlauf von Talsperren gleichmäßigere Abflüsse auf, die bei entsprechender Dimensionierung der Anlage zu vergleichsweise hohen Volllaststunden führen.

Weitere Gründe für jährliche Schwankungen der Stromerzeugung können sein

- Anlagenstillstände während Revision und Wartung von Anlagen,
- schlechter Wartungszustand und damit Ausfall oder Minderproduktion der Anlagen,
- Eigennutzung oder andere Vermarktungsformen des Stromes, so dass nicht die Gesamtmenge in den EEG-Daten erfasst wird.

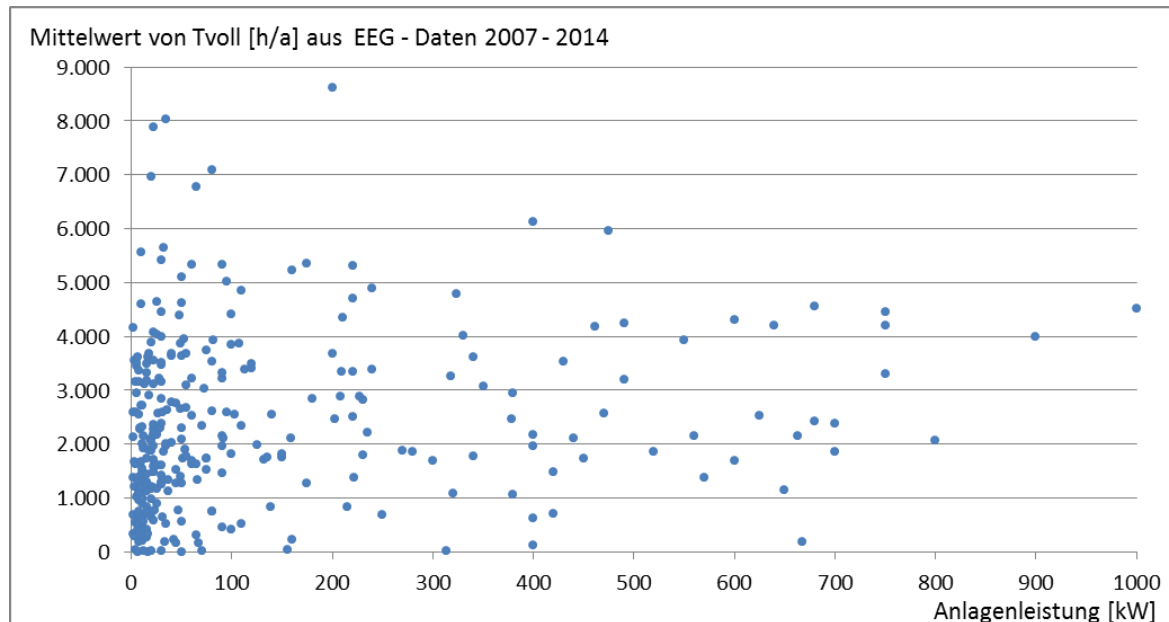


Abbildung A 4: Mittlere Volllaststunden für alle WKA, die zwischen 2007 und 2014 eine Vergütung nach EEG erhielten in Abhängigkeit der Leistung; jede Wasserkraftanlage entspricht einem Punkt

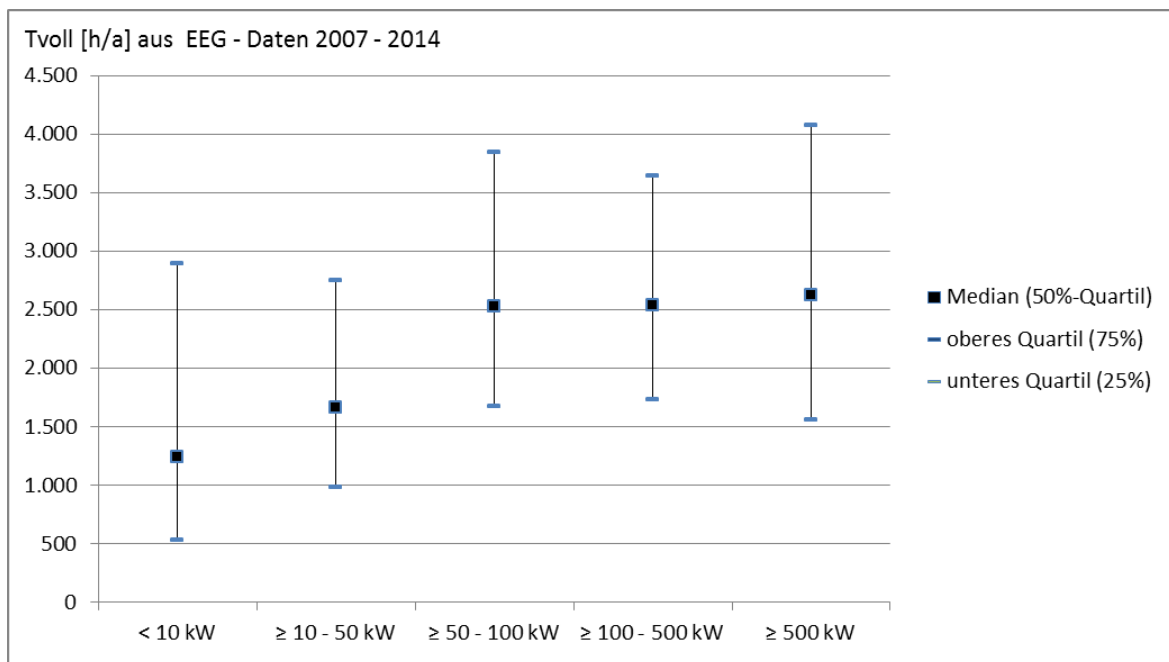


Abbildung A 5: Median und Quartile der Volllaststunden für WKA, die zwischen 2007 und 2014 eine Vergütung nach EEG erhielten für verschiedene Leistungsklassen

Berechnungen mit HPPT

Mit Hilfe eines durch die Hydrotec Ingenieurgesellschaft mbH entwickelten Programmes (HPPT 2016) erfolgte eine Abschätzung der Jahresarbeit und der daraus ermittelten Jahresvolllaststunden für eine repräsentative Beispielanlage.

Als Eingangsparameter wurden verwendet:

- Abflussdauerlinie unter Berücksichtigung nicht zur Verfügung stehender Teilströme
- Ausbaudurchfluss und -fallhöhe
- Ansätze für Verluste und Stillstandstage gemäß Erfahrungen aus anderen Projekten
- Ober- und Unterwasserstände
- Wirkungsgrade von Turbine, Getriebe und Generator.

In Abbildung A 3 ist der Bereich der Ergebnisse für die Volllaststunden als grüne Rechtecke eingetragen. Diese wurden für den Abflusstyp I a berechnet. Für $\eta_2 = 1$ streuen die Ergebnisse stärker als für $\eta_2 = 1,3$. Die berechneten Volllaststunden liegen dabei eher im unteren Bereich der Ergebnisse von BZR-ARN (2013).

Volllaststunden im EEG Erfahrungsbericht

Im EEG Erfahrungsbericht (BMU, 2014) wurden für Berechnungen der Jahresarbeit folgende Annahmen für die Volllaststunden in Abhängigkeit von der installierten Leistung der WKA getroffen:

- 100 und 200 kW 3.800 h/a,
- 500 kW 4.200 h/a,
- 1 MW 4.500 h/a,
- 2 MW 4.800 h/a und
- 5 MW 5.000 h/a.

Potenzialstudie für Deutschland

In der Wasserkraft Potenzialstudie für Deutschland (ANDERER et al. 2010) wurden Volllaststunden für 240 Wasserkraftanlagen in Deutschland ausgewertet, die über eine Leistung > 1 MW verfügten. Der mittlere Ausbaugrad entsprach dabei 1,25, die gemittelten Jahresvolllaststunden betrugen 5.000 h/a. Anlagen dieser Leistungsklasse vermarkten den erzeugten Strom eher direkt und werden nicht unbedingt durch die Anlagenstatistik des EEG erfasst. Die Auswertung der EEG-Daten für das Jahr 2007 ergab für Wasserkraftanlagen der Leistung < 1 MW einen Wert von 4.080 h/a.

Studienvergleich Entwicklung der Volllaststunden

Die Agentur für Erneuerbare Energien untersuchte für verschiedene Kraftwerkstypen die jährliche Auslastung indem diverse Studien hinsichtlich der mittleren Volllaststunden gesichtet wurden (AEE 2013). Die mittlere Volllaststundenzahl für Wasserkraftanlagen lag in der Regel bei etwa 4.800 h/a. Die Übertragungsnetzbetreiber halten aufgrund neuer Daten der Verteilnetzbetreiber niedrigere Werte von etwa 3.800 h/a für realistischer.

Schlussfolgerungen für die Auswahl der Jahresvolllaststunden in der vorliegenden Studie

Der Vergleich der mit Hilfe von Modellen berechneten Volllaststunden mit den realisierten Erträgen aus den EEG-Daten zeigt, dass die Modelle relativ hohe Werte berechnen, die von in Betrieb befindlichen Wasserkraftanlagen in der Realität nicht immer erreicht werden. Dabei spielen neben dem tatsächlichen Ausbaugrad die Wartungs- und Ausfallzeiten der Anlagen sowie der Wartungszustand der Maschinen und anderen Anlagenteile, Verlegung von Rechenanlagen etc. eine entscheidende Rolle. Nur durch eine genauere Untersuchung der Einzelanlagen sind Rückschlüsse auf Gründe für die Abweichungen möglich. Da dies im Rahmen der vorliegenden Studie nicht möglich war und eine Vergleichbarkeit mit der Potenzialstudie Arnsberg gewährleistet werden sollte, wurden die Erzeugungspotenziale mit den in Tabelle A 4 angegebenen Volllaststunden berechnet, die für neue Anlagen stehen, die sich in einem guten Wartungszustand befinden.

II.iii Dotation von Fischaufstiegsanlagen

Tabelle A 5 zeigt die Fischgewässertypen, die den Gewässern in NRW mit einem MQ $\geq 1 \text{ m}^3/\text{s}$ zugewiesen wurden. Zusätzlich sind die mit den Fischereiexperten des LANUV abgestimmten Zielarten angegeben, die für die Dotation der Fischaufstiegsanlage ausschlaggebend sind.

Tabelle A 5: Fischgewässertypen und Zielarten in Nordrhein-Westfalen für Gewässer mit MQ $\geq 1 \text{ m}^3/\text{s}$

Fischgewässertyp Kennung	Fischgewässertyp Bezeichnung	Zielart
FiGt_04	Äschentyp Karstbereiche	Äsche
FiGt_22	Äschentyp Lippe	Äsche
FiGt_09	Äschentyp Mittelgebirge	Äsche
FiGt_23	Barbentyp Lippe	Barbe
FiGt_29a	Barbentyp Weser	Barbe
FiGt_oR36	Bäche der Rheinebene (Anger, Düssel)	Barbe
FiGt_24	Brassentyp Lippe	Brasse
FiGt_29b	Brassentyp Weser	Brasse
FiGt_oR37	Emscher, Seseke	Barbe
FiGt_oR38	Kanal - nicht bearbeitet (hier ein Standort im Schifffahrtskanal der Ruhr bei Rafterberg)	Brasse
FiGt_oR33	Karstbäche (Berg. Land, Sauerland, Eifel, Paderbach)	Äsche
FiGt_10	oberer Barbentyp Mittelgebirge	Barbe
FiGt_20	oberer Brassentyp nördliches Tiefland	Brasse
FiGt_17	oberer Brassentyp Niers	Brasse
FiGt_26	oberer Brassentyp Tiefland	Brasse
FiGt_03	oberer Forellentyp Karstbereiche	Bachforelle
FiGt_01	oberer Forellentyp Mittelgebirge	Bachforelle
FiGt_05	oberer Forellentyp Tiefland	Bachforelle
FiGt_15	unterer Barbentyp Erft	Barbe
FiGt_11	unterer Barbentyp Mittelgebirge	Barbe
FiGt_25	unterer Barbentyp Tiefland	Barbe
FiGt_12	unterer Barbentyp Werre und Else	Barbe
FiGt_19	unterer Brassentyp nördliches Tiefland	Brasse
FiGt_18	unterer Brassentyp Niers	Brasse
FiGt_27	unterer Brassentyp Tiefland	Brasse
FiGt_13	unterer Forellentyp Erft	Bachforelle
FiGt_02	unterer Forellentyp Mittelgebirge	Bachforelle
FiGt_06	unterer Forellentyp Tiefland	Bachforelle

Ermittlung der Dotation von Fischaufstiegsanlagen nach DWA-M 509

Die Ingenieurbüro Floecksmühle GmbH hat auf der Grundlage des Merkblattes DWA-M 509 Berechnungstools für die geometrische und hydraulische Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen entwickelt. Mit diesen Tools wurden typische Beispielanlagen für folgende Hauptbautypen von Fischaufstiegsanlagen berechnet:

- Vertikalschlitzpass und
- Raugerinne mit Beckenstruktur

Die Berechnung der hydraulischen Parameter wie z. B. der Dotation von Fischaufstiegsanlagen, erfolgt auf der Grundlage der geometrischen Dimensionierung. Diese wird für die jeweilige Zielart (Tabelle A 5) ermittelt, da deren Körperform die Abmessungen der Fischaufstiegsanlage bestimmt. Im Merkblatt DWA-M 509 (dort Tabelle 16) sind die geometrischen Grenzwerte z. B. für die Wassertiefen in Engstellen und Wanderkorridoren für verschiedene Fischarten angegeben. Daraus werden mit Hilfe geometrischer Sicherheitsbeiwerte die geometrischen Bemessungswerte für die Schlitz- und Beckendimensionierung ermittelt. Die folgende Übersicht zeigt für das Beispiel Äsche Werte für die Dimensionierung eines Vertikalschlitzpasses.

Vertical-Slot-Pass - Geometrische und hydraulische Dimensionierung
 nach Merkblatt DWA-M 509

Angaben zum Projekt

Projektname:	WK Potenzial NRW		
Variante:	Äsche_VS		
Fließgewässerzone:	Äschenregion	Quelle:	
maßgebliche. Fischart /-größe:	Äsche	Quelle:	
Merkblatt M509 Stand:	Mai. 14		
Bearbeitungsdatum:	08.09.15		
Bezeichnung	Variable	Wert	Quelle / Anmerkungen

WASSERSPIEGELLAGEN

Höhendifferenz bei $Q_{\min}$	☐ $h_{\min}$ ges	3,00 m	
Höhendifferenz bei $Q_{\max}$	☐ $h_{\max}$ ges	2,50 m	
Maßgebende Wasserspiegeldifferenz f. Beckenanzahl	$D_{h\min}$ ges	3,00 m	
Maßgebender OW-Stand f. Auslegung Sohle	D_{hx} ges	0,00	

SICHERHEITSBEIWERTE

DWA-M 509 Kap.

Geometrie (Dimensionierung / Unregelmäßigkeiten)	S_g	1,00 -	bei Schlitzpässen in Standardbauweise; sonst: s. Kap. 8.2.2.4
Geschwindigkeit	S_v	0,95 -	bei Dimensionierung gemäß M509; sonst: <0,9
Leistungsdichte	S_p	0,90 -	
Betrieb	S_b	0,90 -	DWA-M 509 Kap. 8.2.2.4

BIOL., HYDRAUL. + GEOMETR. WERTE			
Abmessungen maßgebende Fischart			
Länge (absolut)	L_{Fisch}	0,50 m	<i>optional: ortsspezifische Angabe (ggf. DWA-M 509, Tab. 15)</i>
Höhe (absolut)	H_{Fisch}	0,10 m	<i>optional: s. Länge</i>
Dicke (absolut)	D_{Fisch}	0,05 m	<i>optional: s. Länge</i>
Grenzwert der Fließgeschwindigkeit	v_{grenz}	2,00 m/s	DWA-M 509 Tab. 17
Bemessungswert der Fließgeschwindigkeit	v_{bem}	1,71 m/s	
max. zulässige Wasserspiegeldifferenz zw. Becken / aus v_{bem}	h_{bem}	0,149 m	
Wasserspiegeldifferenz gewählt	h_{max}	0,15 m	
Grenzwert der Leistungsdichte	$p_{D, \text{grenz}}$	200,00 W/m ³	DWA-M 509 Tab. 21
Schlitzweite (Bemessungswert):			
min. Schlitzweite entspr. maßgebender Fischart	biol. min s	0,15 m	DWA-M 509, Tab. 16
min. Schlitzweite entspr. Tab. 43	min s	0,30 m	DWA-M 509, Tab. 43
Schlitzweite gewählt	s	0,30 m	
Beckenlänge (Bemessungswert):			
erf. min. Beckenlänge entspr. maßgebender Fischart	biol. min L_{LB}	1,50 m	DWA-M 509, Tab. 16
erf. min. Beckenlänge entspr. Tab. 43	min L_{LB}	2,45 m	DWA-M 509, Tab. 43
übliche min. Beckenlänge (licht): $8,10 \cdot s$	min L_{LB}	2,43 m	DWA-M 509, Tab. 44
übliche max. Beckenlänge (licht): $8,35 \cdot s$	max L_{LB}	2,51 m	aus $L_{LB, \text{Fisch}} / \text{hydr}$
Beckenlänge (licht) gewählt	L_{LB}	2,55 m	
Beckenbreite (Bemessungswert):			
erf. min. Beckenbreite entspr. maßgebender Fischart	biol. min b	0,45 m	DWA-M 509, Tab. 16
erf. min. Beckenbreite entspr. Tab. 43	min b	1,85 m	DWA-M 509, Tab. 43
Verhältnis Beckenbreite / Beckenlänge		0,75 -	DWA-M 509, Formel 8.9
erf. Beckenbreite aus gew. L_{LB}	Verh. ca. b	1,91 m	
Beckenbreite gewählt	b	1,91 m	
Wassertiefe:			
erf. min. effektive Wassertiefe entspr. maßgebender Fischart	biol. min h_{eff}	0,25 m	DWA-M 509, Tab. 16
Einfluss der Spitzen des Sohlsubstrats	k_0	0,00 m	DWA-M 509, Kap. 8.2.4.3
erf. min. Wassertiefe entspr. maßgebender Fischart	biol. min h_u	0,25 m	DWA-M 509, Bild 259
erf. min. Wassertiefe entspr. Tab. 43	min h_u	0,70 m	DWA-M 509, Tab. 43
min. Wassertiefe gewählt	h_u	0,70 m	
min. effektive Wassertiefe gewählt	h_{eff}	0,70 m	
effektives Beckenvolumen	$V_{\text{Becken, eff}}$	3,41 m ³	

Auf der Grundlage der geometrischen Dimensionen wird der Abfluss für den Vertikalschlitzpass gemäß DWA-M 509 (Gl. 8.14) ermittelt. Die Berechnung folgt hierbei dem in DWA-M 509 Kapitel 8.2.4.3 beschriebenen Ablauf. Der Abfluss eines Raugerinnes mit Beckenstruktur wird nach DWA-M 509 (Gl. 7.23) bestimmt. Die Vorgehensweise bei der Berechnung ist in DWA-M 509 Kapitel 7.6.3 dargestellt.

Die Dotationen der Fischaufstiegsanlagen, wie sie nach DWA-Merkblatt DWA-M 509 für repräsentative Anlagen als Dotation berechnet wurden, sind in Tabelle A 6 aufgeführt. Zum Vergleich sind die Werte, die in der Potenzialstudie Arnsberg und in der vorliegenden Untersuchung verwendet wurden, dargestellt.

Der Vergleich zeigt, dass die nach DWA-M 509 berechneten Werte für Bachforelle und Äsche relativ nahe an den Werten des Szenarios „mittlere Dotation“ liegen. Für Lachs, Barbe und Brasse ergeben sich niedrigere Werte. Die Unterschiede kommen dadurch zustande, dass den Angaben im Handbuch Querbauwerke NRW Schätzwerte zugrunde liegen, während im Merkblatt DWA-M 509 detaillierte Vorgaben als Berechnungsgrundlagen existieren, die die biologischen Grundlagen sowie die Hydraulik innerhalb der Fischaufstiegsanlage relativ genau abbilden.

Tabelle A 6: Dotation von Fischaufstiegsanlagen für Zielarten aus der Fischgewässertypisierung gemäß Merkblatt DWA-M 509 (MKULNV 2014) und (BZR-ARN 2013)

Zielart	Dotation FAA* (DWA-M 509) [l/s]	Dotation FAA (Handbuch Querbauwerke NRW, MUNLV, 2005) bzw. (BZR-ARN, 2013) [l/s]
	Dotation	Szenario "mittlere Dotation"
Brasse	450	700**
Barbe / Lachs	400	700
Äsche	350	250
Bachforelle	170	150

* mittlere Werte für Raugerinne mit Beckenstruktur und Schlitzpass berechnet nach DWA-M 509;

** Brasse als anspruchsgleiche Art wie Barbe / Lachs

II.iv Szenarien für ökologische Abflüsse Q_{FAA} und Q_{min}

Die Wahl der Größe der ökologischen Abflüsse Q_{FAA} und Q_{min} kann insbesondere bei kleineren Gewässern, die über einen niedrigen Abfluss verfügen, einen erheblichen Einfluss auf die Größe des berechneten Potenzials haben. Um diesen Einfluss abschätzen zu können, wurde das technisch-theoretische Potenzial für Variationen von Q_{FAA} und Q_{min} berechnet. Dabei wurden die Werte gemäß Tabelle A 7 und Tabelle A 8 variiert.

Tabelle A 7: Variation der Dotation Fischaufstiegsanlage

Zielart	Dotation FAA [m³/s]
Bachforelle	0,15 – 0,17
Äsche	0,25 – 0,35
Barbe / Lachs	0,4 - 0,7
Brasse	0,4 - 0,7

Tabelle A 8: Variation des Mindestabflusses

Einzugsgebietsgröße	Mindestabfluss Q_{min}		
	Standard Orientierungswert	Erhöhter Orientierungswert	Erhöhter Orientierungswert mit Zuschlag für kleine Gewässer
20 – 50 km²	0,5 MNQ	0,6 MNQ	0,5 MNQ
≥ 50 km²	0,33 MNQ	0,5 MNQ	1,0 MNQ

Die in den fünf untersuchten Szenarien der Potenzialberechnung verwendeten Dotationen der Fischaufstiegsanlagen und des Mindestabflusses sind in Tabelle A 9 zusammengestellt. Dabei wurde in vier Szenarien für Ausleitungsstandorte berücksichtigt, dass sowohl an der WKA im Kanal als auch am ausleitenden Querbauwerk eine Fischaufstiegsanlage existiert. Nur für Variante V3 wurde mit einer Fischaufstiegsanlage gerechnet.

Tabelle A 9: Variationen ökologischer Abflüsse für Varianten ökologischer Abflüsse

Variante	Dotation Fischaufstiegsanlage* Q_{FAA}	Mindestabfluss Q_{min}	Fischaufstiegsanlagen Anzahl (Lage**)
V0 (entspricht Studie Arnsberg)	Handbuch Querbauwerke NRW	0,33 / 0,5 MNQ	2 (QBW, WKA)
V1	Handbuch Querbauwerke NRW	0,5 / 0,6 MNQ	2 (QBW, WKA)
V2	DWA-M 509	0,5 / 0,6 MNQ	2 (QBW, WKA)
V3	DWA-M 509	0,5 / 0,6 MNQ	1 (WKA)
V4	Handbuch Querbauwerke NRW	0,5 / 1,0 MNQ	2 (QBW, WKA)

* siehe Tabelle A 6

** bei Ausleitungskraftwerken; bei Flusskraftwerken ist in der Regel nur eine FAA erforderlich

Die Zahl möglicher Wasserkraftanlagen mit einem ungenutzten technisch-theoretischen Potenzial ist in Abbildung A 6 wiedergegeben. In allen Szenarien verfügen etwa 20 % der Standorte über ein ungenutztes Leistungspotenzial ≥ 50 kW. Während die Zahl der potenziellen Standorte für $P \geq 50$ kW etwa gleich bleibt, verringert sie sich für Standorte mit $P < 50$ kW mit steigendem Mindestabfluss Q_{min} . Wird die Dotation der Fischaufstiegsanlagen nach DWA-M 509 angesetzt, ergibt sich eine geringe Zunahme der Standorte, die erwartungsgemäß weiter ansteigt, wenn an Stelle von 2 Fischaufstiegsanlagen nur eine berücksichtigt wird.

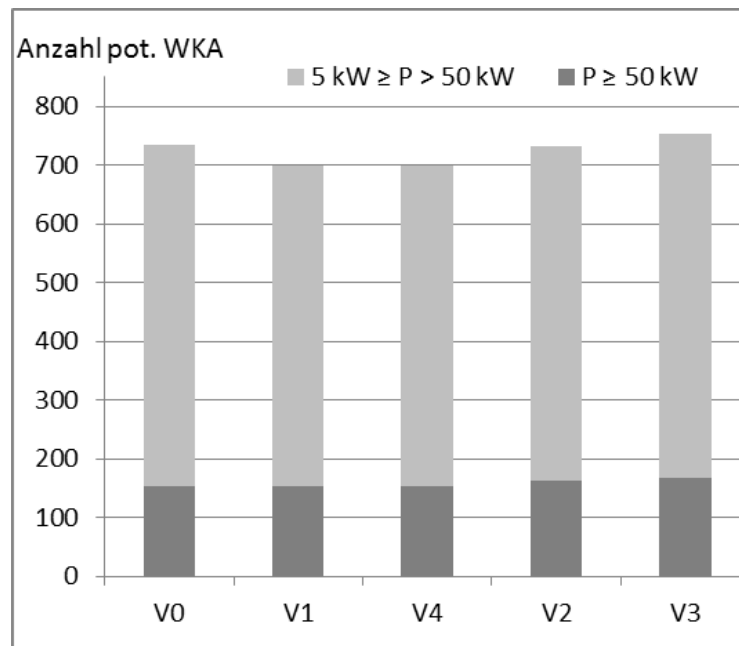


Abbildung A 6: Zahl der Wasserkraftanlagen mit ungenutztem technisch-theoretischen Potenzial für Szenarien der ökologischen Abflüsse

Es zeigt sich auch in den Szenarien, dass die potenziellen Anlagen der Leistung $P \geq 50 \text{ kW}$ den großen Anteil des ungenutzten technisch-theoretischen Leistungspotenzials von 75 bis 80 % bereitstellen. Die Variation von $Q_{\min}$ hat kaum einen Einfluss auf das Leistungspotenzial während die Dotation der Fischaufstiegsanlagen nach DWA-M 509 zu einem Anstieg von 5 % führt. Wird nur eine Fischaufstiegsanlage berücksichtigt, führt dies zu einer Zunahme von 10 % im Leistungspotenzial.

Das ungenutzte technisch-theoretische Erzeugungspotenzial zeigt für die Szenarien ein ähnliches Bild wie das Leistungspotenzial.

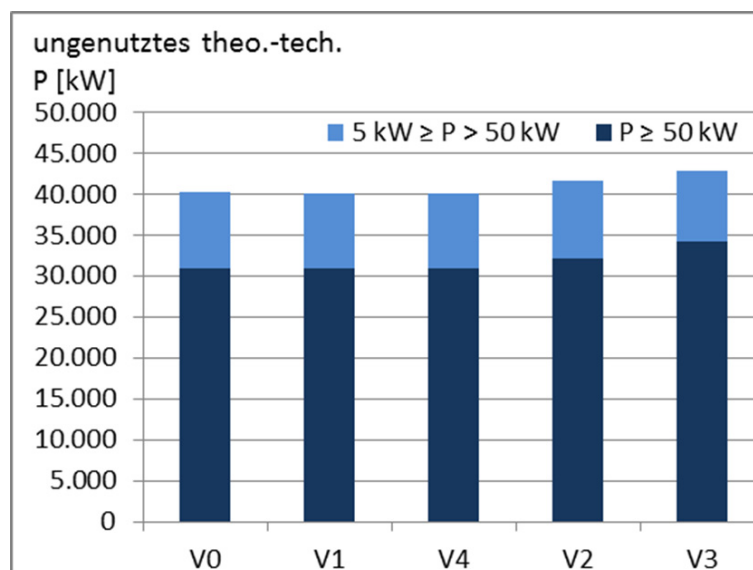


Abbildung A 7: Ungenutztes technisch-theoretisches Leistungspotenzial für Szenarien ökologischer Abflüsse

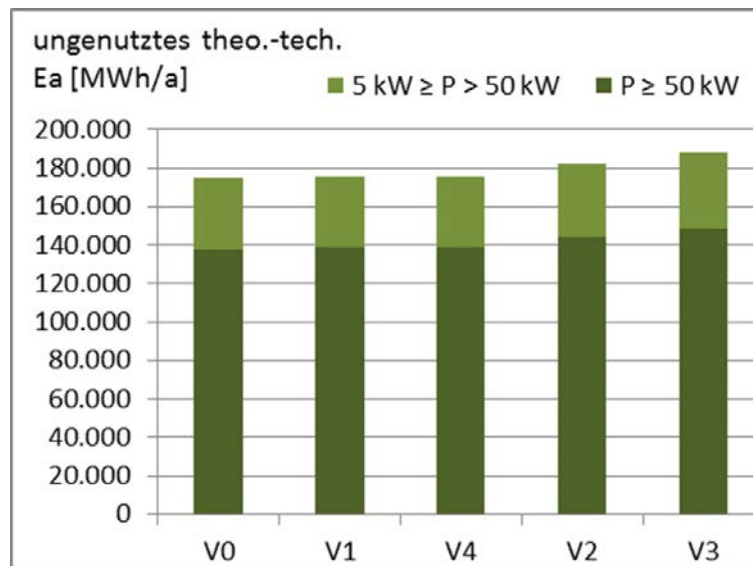


Abbildung A 8: Ungenutztes technisch-theoretisches Erzeugungspotenzial für Szenarien ökologischer Abflüsse

Die Berechnung der Szenarien zeigt, dass der Einfluss des Mindestabflusses auf das Erzeugungs- und Leistungspotenzial der Anlagen relativ gering ist. Die Variation der Dotation der Fischaufstiegsanlagen wirkt sich augenscheinlich hauptsächlich in den Gewässerabschnitten mit den Zielarten Barbe und Lachs aus, da nach DWA-M 509 hier eine geringere Dotation erforderlich wäre (ca. 400 l/s), als im Handbuch Querbauwerke NRW festgelegt wurde (ca. 700 l/s). Eine ähnliche Zunahme im ungenutzten Potenzial von wenigen Prozent zeigt sich, wenn in den Berechnungen für Ausleitungskraftwerke nur eine Fischaufstiegsanlage berücksichtigt wird.

II.v Mindestabfluss

Nach MUNLV (2009) werden für $Q_{\min}$ die Orientierungswerte aus Tabelle A 10 vorgegeben. Neben den Standard-Orientierungswerten kommen bei gewässerökologisch empfindlichen Strecken erhöhte Orientierungswerte zur Anwendung. Zusätzlich kann $Q_{\min}$ bei einer gewässerspezifischen Betrachtung aufgrund lokaler Gegebenheiten (u. a. Abflussverhalten im Gewässer, Gewässerstruktur) nach MUNLV (2005) durch Zu- und Abschläge zu den Orientierungswerten modifiziert werden, so dass für Gewässer mit einem sehr ungleichmäßigen Abflussverhalten Werte von bis zu 1,2 MNQ erreicht werden.

Gilt das Mutterbett als Wanderkorridor, müssen bestimmte Fließtiefen in Abhängigkeit von der Fließgewässerzone eingehalten werden. U. U. ist eine Einzelfallprüfung erforderlich. Da innerhalb der vorliegenden Studie die detaillierte Betrachtung der Gewässer nicht möglich war, wurde in Absprache mit Fischereiexperten des MKULNV die Verwendung der Standard Orientierungswerte für $Q_{\min}$ festgelegt (Tabelle A 10), wie sie auch in der Potenzialstudie Arnsberg (BZR-ARN, 2013) verwendet wurden.

Tabelle A 10: Orientierungswerte für den Mindestabfluss $Q_{\min}$ (MUNLV 2005, 2009)

Einzugsgebietsgröße	Standard Orientierungswert $Q_{\min}$	Erhöhter Orientierungswert $Q_{\min}$
20 – 50 km ²	0,5 MNQ	0,6 MNQ
≥ 50 km ²	0,33 MNQ	0,5 MNQ

III Bestand an Wasserkraftanlagen in den Kreisen in NRW

Die folgenden Tabellen stellen den ermittelten Bestand an Wasserkraftanlagen in den Kreisen in NRW zum Stand Ende 2015 dar. Auf der Grundlage der vorliegenden Daten kann festgestellt werden, dass sich in 38 der 53 Kreise und kreisfreien Städte in NRW Wasserkraftanlagen in Betrieb befinden. Nur diese Kreise sind in Tabelle A 11: berücksichtigt.

Tabelle A 11: Bestand an Wasserkraftanlagen in den Kreisen von NRW

Kreis	Anzahl WKA	Installierte Leitung [kW]	Jahresarbeit [MWh/a]
Bochum	2	1.950	4.175
Borken	10	493	1.533
Coesfeld	6	216	672
Düren	11	26.386	51.389
Ennepe-Ruhr-Kreis	10	11.795	47.117
Essen	4	18.200	55.798
Euskirchen	4	3.108	2.654
Gütersloh	11	125	1.208
Hagen	11	4.768	6.860
Hamm	2	915	4.283
Herford	8	380	2.178
Hochsauerlandkreis	92	18.526	72.308
Höxter	37	2.491	8.387
Leverkusen	3	535	1.872
Lippe	17	638	1.334
Märkischer Kreis	38	15.318	49.279
Mettmann	4	54	409
Minden-Lübbecke	3	8.375	53.172
Mülheim a. d. Ruhr	2	11.550	18.051
Münster	2	200	476
Oberbergischer Kreis	22	10.437	24.204
Olpe	19	24.043	36.685
Paderborn	21	944	3.342
Recklinghausen	1	22	1,5

Kreis	Anzahl WKA	Installierte Leitung [kW]	Jahresarbeit [MWh/a]
Remscheid	2	58	203
Rhein-Erft-Kreis	1	42	202
Rheinisch-Bergischer Kreis	4	486	2.075
Rhein-Kreis Neuss	3	190	875
Rhein-Sieg-Kreis	6	2.003	5.660
Siegen-Wittgenstein	12	167	836
Soest	28	12.609	33.656
Solingen	5	1.228	3.594
Städteregion Aachen	7	1.575	5.931
Steinfurt	7	299	1.830
Unna	6	7.683	26.517
Viersen	1	7,5	4,4
Warendorf	2	107	208
Wuppertal	3	1.032	3.973

IV Ungenutzte differenzierte Potenziale in den Kreisen, Regierungsbezirken und Planungsregionen in NRW

Die Tabellen A 12 – A 14 geben einen Überblick über die ungenutzten differenzierten Potenziale in den Kreisen, Regierungsbezirken und Planungsregionen in NRW im maximalen Szenario. 33 Kreise verfügen über Standorte mit einem ungenutzten differenzierten Potenzial für den Neubau oder Ausbau von Wasserkraftanlagen.

Tabelle A 12: Ungenutzte differenzierte Potenziale in den Kreisen in NRW (maximales Szenario)

Kreis	Anzahl potenzieller WKA	Technisch-theoretische Leistung [kW]	Technisch-theoretische Jahresarbeit [MWh/a]
Bochum	3	967	5.154
Borken	1	79	325
Bottrop	1	63	260
Coesfeld	3	164	622
Duisburg	1	2.704	12.574
Düren	8	1.149	5.912
Ennepe-Ruhr-Kreis	7	2.224	11.328
Essen	4	1.019	5.727
Euskirchen	3	240	954
Gütersloh	2	220	902
Hagen	5	694	3.216
Hamm	1	196	1.149
Heinsberg	2	530	2.465
Herford	5	632	2.866
Hochsauerlandkreis	13	1.470	5.181
Höxter	3	933	4.373
Leverkusen	1	68	408
Lippe	3	235	1.094
Märkischer Kreis	15	1.821	8.495
Minden-Lübbecke	4	2.284	10.734
Mülheim a.d. Ruhr	3	1.079	4.928

Kreis	Anzahl potenzieller WKA	Technisch-theoretische Leistung [kW]	Technisch-theoretische Jahresarbeit [MWh/a]
Münster	3	309	1.208
Oberbergischer Kreis	8	2.051	5.073
Olpe	6	996	2.813
Paderborn	4	390	1.875
Rhein-Erft-Kreis	1	54	276
Rheinisch-Bergischer Kreis	3	332	1.315
Rhein-Kreis Neuss	2	139	600
Rhein-Sieg-Kreis	2	126	491
Siegen-Wittgenstein	1	133	473
Soest	5	439	2.009
Unna	3	537	2.460
Wuppertal	2	136	656

Tabelle A 13: Ungenutzte differenzierte Potenziale in den Regierungsbezirken in NRW (maximales Szenario)

Regierungsbezirk	Anzahl potenzieller WKA	Technisch-theoretische Leistung [kW]	Technisch-theoretische Jahresarbeit [MWh/a]
Arnsberg	59	9.477	42.279
Detmold	21	4.694	21.845
Düsseldorf	12	5.076	24.485
Köln	28	4.550	16.894
Münster	8	615	2.414

Tabelle A 14: Ungenutzte differenzierte Potenziale in den Planungsregionen in NRW (maximales Szenario)

Planungsregion	Anzahl potenzieller WKA	Technisch-theoretische Leistung [kW]	Technisch-theoretische Jahresarbeit [MWh/a]
Arnsberg	37	4.402	16.923
Detmold	21	4.694	21.845
Düsseldorf	4	275	1.256
Köln	28	4.550	16.894
Münster	7	551	2.155
Regionalverband Ruhr	31	9.940	48.845

V Bestand an Wasserkraftanlagen und ungenutzte differenzierte Potenziale in den Gemeinden in NRW

Tabelle A 15 zeigt den Bestand an Wasserkraftanlagen und das ungenutzte differenzierte Potenzial in den Gemeinden Nordrhein-Westfalens. Von den 396 Gemeinden in NRW verfügen 153 Gemeinden über Wasserkraftanlagen, die sich in Betrieb befinden. Für 64 der 396 Gemeinden in NRW konnte ein ungenutztes differenziertes Potenzial für den Neubau oder Ausbau von Wasserkraftanlagen ermittelt werden.

Tabelle A 15: Anzahl, installierte Leistung und Jahresarbeit der in Betrieb befindlichen Wasserkraftanlagen und ungenutzte differenzierte Potenziale mit Anzahl, ungenutztem Leistungs- und Erzeugungspotenzial für Neubau oder Ausbau von Wasserkraftanlagen in den Gemeinden in NRW

Gemeinde	Bestand			ungenutztes differenziertes Potenzial		
	Anzahl WKA	Installierte Leistung [kW]	Jahresarbeit [MWh/a]	Anzahl potenzieller WKA (Neu oder Ausbau)	technisch-theoretisches Leistungspotenzial [kW]	theoretisches Erzeugungspotenzial [MWh/a]
Aachen	2	248	1.100	-	-	-
Ahaus	1	16	61	-	-	-
Altena	2	641	1.968	1	94	496
Anröchte	1	55	170	-	-	-
Arnsberg	11	4.986	27.030	2	193	951
Attendorn	3	19.402	25.202	1	237	949
Bad Berleburg	1	4,0	14	-	-	-
Bad Driburg	2	34	33	-	-	-
Bad Laasphe	3	18	38	-	-	-
Bad Münstereifel	1	15	16	-	-	-
Bad Oeynhausen	-	-	-	2	391	1.932
Bad Salzuflen	-	-	-	1	89	413
Bad Sassendorf	2	30	11	-	-	-
Bad Wünnenberg	3	73	135	-	-	-
Balve	3	116	169	-	-	-
Bedburg	-	-	-	1	54	276
Bestwig	5	1.200	1.668	4	420	905

Gemeinde	Bestand			ungenutztes differenziertes Potenzial		
	Anzahl WKA	Installierte Leistung [kW]	Jahresarbeit [MWh/a]	Anzahl potenzieller WKA (Neu oder Ausbau)	technisch-theoretisches Leitungspotenzial [kW]	theoretisches Erzeugungspotenzial [MWh/a]
Beverungen	1	100	480	-	-	-
Bocholt	2	137	580	1	79	325
Bochum	2	1.950	4.175	3	967	5.154
Borchen	3	95	131	-	-	-
Borgentreich	1	7,5	10	-	-	-
Bottrop	-	-	-	1	63	260
Brakel	6	235	1.384	-	-	-
Breckerfeld	2	424	1.287	-	-	-
Brilon	11	481	2.339	-	-	-
Bünde	1	30	168	-	-	-
Burbach	2	13	45	-	-	-
Büren	8	475	1.636	-	-	-
Coesfeld	4	107	198	-	-	-
Dahlem	-	-	-	1	91	345
Duisburg	-	-	-	1	2.704	12.574
Düren	2	80	267	4	466	2.384
Engelskirchen	6	4.060	7.795	3	400	1.518
Ennepetal	3	9,0	30	-	-	-
Ense	2	998	3.020	-	-	-
Erkrath	1	30	2,0	-	-	-
Erndtebrück	1	13	10	-	-	-
Erwitte	1	1,0	1,1	-	-	-
Eslohe (Sauerland)	5	127	128	-	-	-
Essen	4	18.200	55.798	4	1.019	5.727
Extertal	4	185	353	-	-	-
Finnentrop	5	4.158	9.330	-	-	-

Gemeinde	Bestand			ungenutztes differenziertes Potenzial		
	Anzahl WKA	Instal- lierte Leis- tung [kW]	Jahres- arbeit [MWh/a]	Anzahl poten- zieller WKA (Neu oder Aus- bau)	technisch- theoreti- sches Leitungs- potenzial [kW]	theoreti- sches Erzeu- gungs- potenzial [MWh/a]
Fröndenberg/Ruhr	2	1.744	5.817	-	-	-
Gescher	2	75	214	-	-	-
Geseke	4	68	182	-	-	-
Greven	2	25	49	-	-	-
Grevenbroich	2	155	572	2	139	600
Gummersbach	3	2.737	2.786	-	-	-
Gütersloh	5	45	1.009	-	-	-
Haan	1	12	58			
Hagen	11	4.768	6.860	5	694	3.216
Hallenberg	6	179	436	-	-	-
Haltern am See	1	22	1,5	-	-	-
Halver	6	89	241			
Hamm	2	915	4.283	1	196	1.149
Harsewinkel	2	28	117	2	220	902
Hattingen	1	132	302	-	-	-
Heimbach	3	25.275	46.500	-	-	-
Heinsberg	-	-	-	2	530	2.465
Hellenthal	1	3.000	2.600	-	-	-
Hennef (Sieg)	1	4,0	7,3	-	-	-
Herdecke	1	2.200	8.211	1	460	1.534
Herford	1	3,0	634	3	322	1.517
Holzwickede	1	2.530	9.048	1	56	450
Hörstel	1	15	45	-	-	-
Hövelhof	1	11	21	-	-	-
Höxter	3	330	1.314			
Hückeswagen	1	440	2.000	1	182	746
Hürtgenwald	1	67	10	-	-	-

Gemeinde	Bestand			ungenutztes differenziertes Potenzial		
	Anzahl WKA	Instal- lierte Leis- tung [kW]	Jahres- arbeit [MWh/a]	Anzahl poten- zieller WKA (Neu oder Aus- bau)	technisch- theoreti- sches Leitungs- potenzial [kW]	theoreti- sches Erzeu- gungs- potenzial [MWh/a]
Inden	-	-	-	1	50	206
Iserlohn	2	58	18	1	98	586
Kalletal	4	175	210	-	-	-
Kierspe	2	27	18	1	54	191
Kirchhundem	3	41	69	-	-	-
Kirchlengern	1	155	744	2	309	1.348
Kreuzau	4	956	4.608	1	57	336
Lage	1	60	202	-	-	-
Legden	1	26	35	-	-	-
Leichlingen (Rheinland)	1	31	86	-	-	-
Lemgo	5	92	276	2	147	681
Lennestadt	8	442	2.084	4	327	1.141
Leverkusen	3	535	1.872	1	68	408
Lichtenau	1	20	816	-	-	-
Linnich	-	-	-	1	461	2.401
Lippstadt	1	25	51	3	288	1.290
Löhne	2	122	541	-	-	-
Lüdenscheid	4	497	1.645	-	-	-
Lüdinghausen	-	-	-	2	110	416
Lügde	1	20	41	-	-	-
Marienheide	3	70	347	-	-	-
Marsberg	13	2.302	6.880	-	-	-
Mechernich	1	3,0	4,1	-	-	-
Meinerzhagen	3	52	127	-	-	-
Menden	3	4.055	14.005	2	357	1.750
Meschede	12	4.551	13.558	5	636	2.476

Gemeinde	Bestand			ungenutztes differenziertes Potenzial		
	Anzahl WKA	Instal- lierte Leis- tung [kW]	Jahres- arbeit [MWh/a]	Anzahl poten- zieller WKA (Neu oder Aus- bau)	technisch- theoreti- sches Leitungs- potenzial [kW]	theoreti- sches Erzeu- gungs- potenzial [MWh/a]
Mettmann	2	12	350	-	-	-
Möhnesee	2	7.700	14.199	-	-	-
Monschau	1	570	1.000	-	-	-
Mülheim an der Ruhr	2	11.550	18.051	3	1.079	4928
Netphen	2	87	601			
Münster	2	200	476	3	309	1.208
Nachrodt- Wiblingwerde	2	2.000	4.033	2	310	1.320
Neunkirchen- Seelscheid	1	20	70	1	52	209
Neuss	1	35	303			
Niederzier	-	-	-	1	115	586
Nideggen	1	7,5	3,5	-	-	-
Nieheim	1	11	23	-	-	-
Nottuln	1	11	3,1	-	-	-
Nümbrecht	1	55	145	-	-	-
Ochtrup	1	22	41	-	-	-
Olfen	1	98	470	1	54	205
Olpe	-	-	-	1	432	723
Olsberg	4	3.677	6.634	-	-	-
Overath	1	160	677	3	332	1.315
Paderborn	3	222	388	4	390	1.875
Petershagen	3	8.375	53.172	2	1.893	8.801
Plettenberg	2	2.350	8.220	4	542	2.350
Pulheim	1	42	202	-	-	-
Radevormwald	3	1.822	8.219	2	1.240	1.916

Gemeinde	Bestand			ungenutztes differenziertes Potenzial		
	Anzahl WKA	Installierte Leistung [kW]	Jahresarbeit [MWh/a]	Anzahl potenzieller WKA (Neu oder Ausbau)	technisch-theoretisches Leitungspotenzial [kW]	theoretisches Erzeugungspotenzial [MWh/a]
Reichshof	1	380	232	-	-	-
Remscheid	2	58	203	-	-	-
Rhede	1	49	164	-	-	-
Rheine	2	177	1.560	-	-	-
Rietberg	2	27	45	-	-	-
Rödinghausen	1	10	12	-	-	-
Roetgen	1	100	700	-	-	-
Ruppichteroth	1	37	178	-	-	-
Rüthen	4	94	325	-	-	-
Saerbeck	1	60	136	-	-	-
Salzkotten	2	48	216	-	-	-
Schalksmühle	2	383	874	1	81	351
Schieder-Schwalenberg	2	106	253	-	-	-
Schleiden	1	90	34	2	149	609
Schloß Holte-Stukenbrock	1	9,0	17	-	-	-
Schmallenberg	11	277	794	1	60	243
Schwalmtal	1	7,5	4,4	-	-	-
Schwerte	2	3.319	11.332	2	481	2.010
Siegburg	1	425	1.480	-	-	-
Siegen	2	13	59	1	133	473
Simmerath	1	280	1.000	-	-	-
Solingen	5	1.228	3.594	-	-	-
Spence	2	60	79	-	-	-
Stadtlohn	1	40	119	-	-	-
Steinhagen	1	16	21	-	-	-

Gemeinde	Bestand			ungenutztes differenziertes Potenzial		
	Anzahl WKA	Instal- lierte Leis- tung [kW]	Jahres- arbeit [MWh/a]	Anzahl poten- zieller WKA (Neu oder Aus- bau)	technisch- theoreti- sches Leitungs- potenzial [kW]	theoreti- sches Erzeu- gungs- potenzial [MWh/a]
Steinheim	3	120	220	-	-	-
Stolberg (Rhld.)	2	377	2.130	-	-	-
Südlohn	1	10	38	-	-	-
Sundern	5	555	12.457	1	161	606
Telgte	2	107	208	-	-	-
Vreden	1	140	323	-	-	-
Warburg	16	1.604	4.815	3	933	4.373
Warstein	7	359	952	-	-	-
Welper	1	35	27	-	-	-
Werdohl	7	5.051	17.961	3	284	1.452
Wermelskirchen	2	295	1.312	-	-	-
Werne	1	90	321	-	-	-
Wetter	1	6.600	24.000	2	170	728
Wickede	3	3.245	14.716	2	152	719
Wiehl	2	720	2.228	1	160	607
Willebadessen	4	51	107	-	-	-
Windeck	3	1.537	3.995	1	74	282
Winterberg	9	192	384	-	-	-
Wipperfürth	2	153	452	1	70	285
Witten	2	2.430	13.287	4	1.594	9.066
Wuppertal	3	1.032	3.973	2	136	656
Summe	427	188.961	532.955	128	24.414	107.914

Landesamt für Natur,
Umwelt und Verbraucherschutz
Nordrhein-Westfalen
Leibnizstraße 10
45659 Recklinghausen
Telefon 02361 305-0
poststelle@lanuv.nrw.de

www.lanuv.nrw.de

