Netztechnischer Beitrag von kleinen Wasserkraftwerken zu einer sicheren und kostengünstigen Stromversorgung in Deutschland

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek

Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungs-technik

BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL

Netztechnischer Beitrag von kleinen Wasserkraftwerken zu einer sicheren und kostengünstigen Stromversorgung in Deutschland

BERGISCHE
UNIVERSITÄT
WUPPERTAL

Lehrstuhl für Elektrische Energieversorgungstechnik
Prof. Dr.-Ing. Markus Zdrallek
Rainer-Gruenter-Str. 21
42119 Wuppertal

Wuppertal, 10.07.2018

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse 1
1 Einleitung 3
2 Beitrag der kleinen Wasserkraft zur verlässlichen, regenerativen Erzeugung elektrischer Energie 4
2.1 Anteil der kleinen Wasserkraft an der regenerativen Energieerzeugung in Deutschland 5
2.2 Vorteile von kleinen Wasserkraftwerken 5
3 Beitrag der kleinen Wasserkraftwerke zur Vermeidung des Netzausbaus auf Verteilnetzebene 7
3.1 Einfluss der Energiewende auf die Mittel- und Niederspannungsnetze 7
3.2 Nutzen der kleinen Wasserkraft im Kontext der Energiewende 8
3.2.1 Netzdienliches Verhalten von dezentralen Einspeisern 8
3.2.2 Lokale Spannungsregelung durch kleine Wasserkraftwerke 9
3.2.3 Reduzierung von Netzverlusten 9
3.2.4 Beitrag von kleinen Wasserkraftwerken zur Versorgungsqualität 10
3.2.5 Kleine Wasserkraftwerke als Teilnehmer eines virtuellen Kraftwerks 10
3.2.6 Potenziale durch dynamische Stauraumbewirtschaftung 11
3.3 Netzanalysen 11
3.3.1 Vorgehensweise der Netzanalysen 11
3.3.2 Untersuchtes Netzgebiet 12
3.3.3 Szenarienentwicklung 12
3.3.4 Ergebnisse der Netzanalysen 13
3.4 Hochrechnung: Netzausbaukosten ohne kleine Wasserkraftwerke in den Verteilnetzen Deutschlands 15
4 Ausblick 18
5 Referenzen 19

Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse

Erkenntnis 1: Die verlässlichen Wasserkraftwerke sind eine wichtige Säule der Energiewende

Die Wasserkraft leistet als schwankungsarme regenerative Energiequelle mit ihrem flächendeckenden Einsatz einen erheblichen Beitrag zur emissionsarmen deutschen Stromversorgung und wird bei fortschreitender Energiewende noch weiter an Bedeutung gewinnen. Insbesondere die geforderte „stetige Stromversorgung auch durch regenerative Energien“ wird zu einem guten Teil durch Wasserkraftwerke realisiert. Auf Grund der rechtlichen/ökologischen Herausforderungen bei der Erschließung neuer Wasserkraftwerke, sollten bestehende Kapazitäten – jeglicher Anlagengröße – deswegen unbedingt **erhalten und effizient genutzt** werden.

Erkenntnis 2: Kleine Wasserkraftwerke reduzieren den Netzausbaubedarf im Verteilnetz erheblich

Kleinere Wasserkraftwerke sind wegen ihres netzdienlichen Verhaltens von großer Bedeutung für die deutsche Stromversorgung, da sie ihre Leistung stetig und mit hohen Volllastnutzungsstunden einspeisen, ohne Netzüberlastungen zu verursachen. Dies reduziert den Netzausbaubedarf der Verteilnetze erheblich. Auch deshalb ist es wichtig, die bestehenden Kapazitäten der kleinen Wasserkraft zu erhalten sowie ihren wirtschaftlichen Betrieb zu gewährleisten. Würde das nicht gelingen, müsste die durch kleine Wasserkraftwerke (< 1 MW) bereitgestellte Energiemenge durch Windkraft- und Photovoltaik-Anlagen substituiert werden, wodurch sich die zusätzlichen Netzausbaukosten allein im Mittel- und Niederspannungsnetz in Deutschland auf etwa **750 Millionen Euro** belaufen würden.

Erkenntnis 3: Verbrauchsnahe Erzeugung aus kleinen Wasserkraftwerken verringert die Netzverluste signifikant

Auf Grund der Langlebigkeit von Wasserkraftanlagen sind vielfach die Netze um die Wasserkraft herum entstanden. Kleine Wasserkraftwerke speisen daher direkt in die verbrauchsnahen unteren Spannungsebenen des Verteilnetzes ein und vermeiden somit Übertragungsverluste höherer Ebenen. Außerdem verursachen sie – verglichen mit anderen dezentralen Einspeisern – durch ihre Konstanz deutlich weniger (quadratisch abhängige) Netzverluste in den unteren Spannungsebenen selbst und steigern so die Gesamteffizienz (von der Erzeugung bis zum Verbrauch). Verglichen mit Windkraft- und Photovoltaikanlagen reduzieren kleine Wasserkraftwerke die Verluste im Mittel und Niederspannungsnetz um 4 - 6 %, hinzu kommen weitere Verlustreduzierungen auf höheren Netzebenen.

Erkenntnis 4: Kleine Wasserkraftwerke stabilisieren zukünftig das Gesamtsystem durch Bereitstellung von Systemdienstleistungen

Kleine Wasserkraftwerke können durch ihre prinzipiell gute Regelbarkeit die Frequenzhaltung und damit die Stabilität des Gesamtsystems aktiv unterstützen (Regelleistungserbringung). Dies wird vor dem Hintergrund des vorgesehenen Ausscheidens konventioneller Kraftwerke immer relevanter. Sofern die Wasserkraftwerke über eine dynamische Stauraumbewirtschaftung verfügen, lässt sich diese Regelung sogar nahezu ohne jeglichen „Verlust“ an regenerativ erzeugter Energie realisieren.

Erkenntnis 5: Kleine Wasserkraftwerke erhöhen die Versorgungsqualität auf Verteilnetzebene
Die gute Regelbarkeit (Wirk- und Blindleistung) leistet ebenfalls einen wichtigen Beitrag zur Versorgungs- und Spannungsqualität im Stromverteilnetz. Die Leistung der kleinen Wasserkraftwerke kann individuell den aktuellen Netzbedürfnissen angepasst werden. Abweichungen kann so unmittelbar und wirksam entgegengewirkt werden.

Erkenntnis 6: Inselnetz- und schwarzstartfähige kleine Wasserkraftwerke können bei großflächigen Blackouts lokal die Versorgung aufrechterhalten
Als regelbare dezentrale Erzeuger könnten kleine Wasserkraftwerke – nach kleineren Modifizierungen – lokale Inselnetze versorgen und so die Versorgung selbst bei einem großflächigen Blackout aufrechterhalten. Dies erhöht die Versorgungszuverlässigkeit und ist insbesondere für die Versorgung kritischer Infrastruktur von wichtiger Bedeutung.

Erkenntnis 7: Kleine Wasserkraftwerke als kostengünstiger Baustein der Energieversorgung
Die jahrzehntelange Betriebserfahrung und einfache und robuste Konstruktion von Wasserkraftwerken führt zum einen zu geringen Wartungsaufwänden und wirkt sich zum anderen in sehr langen Betriebsdauern von mehr als 50 Jahren aus. Dadurch erreichen Wasserkraftwerke sehr niedrige Stromerzeugungskosten, weswegen die Wasserkraft lediglich 2 % der gesamten EEG-Umlagekosten verantwortet [1].

Erkenntnis 8: Kleine Wasserkraftwerke dienen als dezentrale Energiespeicher
Die zunehmende Integration volatiler regenerativer Einspeiser führt zu einer Erhöhung des Speicherbedarfs. Laufwasserkraftwerke mit dynamischer Stauraumbewirtschaftung könnten einen Teil des Speicherbedarfs abdecken. Da für diese Art der Speicherung – wie zum Beispiel bei einem Batteriespeicher – keine Energieumwandlung nötig ist, entstehen keine Wirkungsgradverluste.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass kleine Wasserkraftwerke als **über die Lebensdauer kostengünstiger und verlässlicher Energieträger in Zukunft** noch weiter an Bedeutung gewinnen. Sie **reduzieren sowohl den Netzausbaubedarf** auf Verteilnetzebene – gerade in den ländlichen Mittel- und Niederspannungsnetzen – **als auch die Netzverluste erheblich.** Im Falle eines Wegfalls der kleinen Wasserkraftwerke träten weitere signifikante Ausbaukosten der Hochspannungsnetze sowie gegebenenfalls der Verbundnetze und Aufwendungen für zusätzliche Netzkomponenten wie Speicher und Regelungsanlagen hinzu. In Summe würde ein Verzicht auf kleine Wasserkraftanlagen Mehrkosten von etwa **einer Milliarde Euro** erzeugen.

1 Einleitung

Der energiewendebedingte Übergang von einer zentral geprägten Energieversorgung durch große fossil betriebene Kraftwerke hin zu einer regenerativen Versorgung durch eine Vielzahl dezentraler Erzeugungsanlagen stellt das Energiesystem vor große Herausforderungen. Hierfür müssen erstens Speichertechnologien weiterentwickelt werden, um den regenerativen Strom zwischen zu speichern und zweitens muss die bestehende Struktur der Energieversorgungsnetze an die veränderten Randbedingungen angepasst werden. Die heute vorliegende Netzstruktur wurde vor vielen Jahren vor dem Hintergrund der damaligen zentralen und fossilen Energieproduktion geplant und gebaut und ist daher für die aktuellen Anforderungen keinesfalls geeignet.

Die Netze lassen sich grundsätzlich in zwei Bereiche unterteilen: Das Transportnetz und das Verteilnetz. Ersteres ist für einen effizienten überregionalen Energietransport zuständig und muss im Laufe der Energiewende im Wesentlichen durch mehrere tausend Kilometer neuer Leitungen erweitert werden [2], [3]. Letzteres wird für den lokalen und regionalen Energietransport benötigt und besitzt folglich einen deutlich umfangreicheren Erweiterungsbedarf, da zukünftig sowohl der Großteil der Einspeiser als auch der Großteil der Verbraucher an dieses angeschlossen wird [4]: Neben unvermeidbarem Netzausbau, d.h. der Errichtung neuer Transformatoren und zusätzlicher Leitungen, müssen außerdem die bisher ungesteuerten Verteilnetze zu aktiven, automatisierten Netzen (sog. „Smart Grids“ bzw. „intelligenten“ Netzen) erweitert werden, so dass ein insgesamt automatisiertes elektrisches Netz über alle Spannungsebenen hinweg entsteht.

Der Umbau der elektrischen Netze allein garantiert jedoch noch nicht den Erfolg der Energiewende. Weitere elementare Bausteine sind die dezentralen erneuerbaren Energieerzeuger selbst sowie deren Integration in die elektrischen Netze. Nur im Zusammenspiel zwischen Netz, dezentralen Erzeugern und energieeffizienten Verbrauchern gelingt eine zukunftsfähige, regenerative Energieversorgung. Die Digitalisierung liefert die technologischen Möglichkeiten, dieses zunehmend komplexe Energiesystem von Millionen Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen sinnvoll zu vernetzen, intelligent zu steuern und im Betrieb effizient aufeinander abzustimmen.

Das vorliegende Gutachten befasst sich mit dem netztechnischen Beitrag der kleinen Wasserkraft zu einer erfolgreichen Energiewende. Dabei steht die Bewertung aus Sicht der elektrischen Energieversorgung, d.h. deren Einbindung in die elektrischen Netze, der Nutzen für virtuelle Kraftwerke und die Möglichkeiten zur Reduzierung bzw. Vermeidung von Netzausbaumaßnahmen im Vordergrund. Eine Bewertung der kleinen Wasserkraftwerke hinsichtlich der Auswirkungen auf die Umwelt sowie eine Abschätzung etwaiger Ausbaupotenziale wurde bereits an anderer Stelle untersucht [5], [6], [7] und ist nicht Bestandteil des Gutachtens.

2 Beitrag der kleinen Wasserkraft zur verlässlichen, regenerativen Erzeugung elektrischer Energie

Die Energiewende zeichnet sich durch einen rasanten Zubau von regenerativen Erzeugungsanlagen aus. Zu den für Deutschland relevanten regenerativen Energieträgern zur Stromerzeugung zählen neben der Wasserkraft die Windenergie, die Photovoltaik und die Biomasse. Da die in Deutschland vorhandenen Potenziale zur Nutzung von Wasserkraft zur Stromerzeugung durch rechtlich ökologische Vorgaben bzw. Restriktionen stark eingeschränkt sind und auch das Biomassepotenzial begrenzt ist, wird sich der Großteil des Zubaus erneuerbarer Einspeiser auf Windenergie und Photovoltaik konzentrieren. Durch Modernisierung, Reaktivierung und Neubau von Wasserkraftanlagen könnte jedoch noch ein erhebliches zusätzliches Potenzial genutzt werden [7], [8], [9].

Windenergie- und Photovoltaikanlagen unterliegen einer hohen Volatilität hinsichtlich der Einspeiseleistung. Ein Maß für die Volatilität der Einspeisung ist die sogenannte Ausnutzungsdauer, umgangssprachlich auch als Jahresvolllaststunden bezeichnet. Diese stellt eine Umrechnung der im Jahresverlauf insgesamt eingespeisten regenerativen Energie in ein Nennleistungs-Äquivalent für eine konstante Einspeisung dar. Onshore-Windenergieanlagen erreichen typischerweise etwa 1.650 bis 2500 Jahresvolllaststunden[1], was einem Jahresnutzungsgrad von 19 % bis 29 % entspricht. Photovoltaikanlagen erreichen je nach Region 700 bis max. 1000 Jahresvolllaststunden und somit einen Jahresnutzungsgrad von 12 % [10].

Wasserkraftwerke verfügen im Durchschnitt über mehr als 4.500 Jahresvolllaststunden, was einem Jahresnutzungsgrad von mehr als 50 % entspricht (vgl. [12], [13]). Kleine Wasserkraftwerke erreichen zum Teil noch höhere Werte (bis 5.500). Sie sind zudem hochverfügbar und damit im Mittel mehr als 8.000 Stunden pro Jahr in Betrieb und speisen kontinuierlich in die Netze ein. Wasserkraftwerke sind damit verlässliche Stromproduzenten und gewährleisten eine stetige Stromerzeugung.

Bei Bedarf können Wasserkraftwerke auch als zuverlässige Regelungskraftwerke betrieben werden: Zum einen kann negative Regelleistung bereitgestellt werden, indem die sehr konstante Einspeiseleistung auf Abruf reduziert wird, zum anderen kann durch eine leichte Drosselung von Wasserkraftwerken im Normalbetrieb auch zusätzliche Einspeiseleistung bereitgestellt werden. Besonders bei Einsatz einer dynamischen Stauraumbewirtschaftung und hiermit verknüpfte Speicherkapazitäten in der potentiellen Energie des Wassers lässt sich das Regelungspotenzial voll ausschöpfen (vgl. 3.2.6).

Bedingt durch den steigenden Anteil der fluktuierenden regenerativen Einspeiser im Kraftwerkspark ist eine verlässliche und gleichzeitig regelbare Bereitstellung elektrischer Energie umso wichtiger [8], die mit Hilfe von kleinen Wasserkraftwerken als ein Baustein des Energieversorgungssystems lokal bereitgestellt werden kann.

[1] Moderne, sehr große Anlagen mit Türmen > 150 m können auch bis zu 3.500 Vollaststunden erreichen

2.1 Anteil der kleinen Wasserkraft an der regenerativen Energieerzeugung in Deutschland

In Deutschland produzieren insgesamt ca. 7300 bis 7600 Wasserkraftwerke Strom [7], [14]. Dabei wird zwischen großen Wasserkraftwerken mit einer installierten (elektrischen) Nennleistung von $P_n > 1\,MW$ sowie kleinen mit einer installierten Leistung von $P_n \leq 1\,MW$ unterschieden. Zur großen Leistungsklasse zählen etwa 400 Wasserkraftwerke, wohingegen sich etwa 7.000 kleine Wasserkraftwerke im Betrieb befinden. Der Anteil großer Wasserkraftwerke an der Gesamtstrommenge beträgt dabei ca. 85 %, kleine Wasserkraftwerke erzeugen ca. 15 % [7]. Obwohl deutschlandweit lediglich ca. 4,1 GW der 103 GW installierter erneuerbarer Leistung auf die Wasserkraft entfallen (ca. 4 %) [7] [15], erzeugen sie einen Anteil von etwa 12% der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern [13].

2.2 Vorteile von kleinen Wasserkraftwerken

Der Bau und Betrieb von Wasserkraftwerken ist zwar analog zu jeder Art der Energieerzeugung mit einem Eingriff in die Natur verbunden, besitzt allerdings einige wesentliche Vorteile für die Stromerzeugung [5], [7], [16].

Die bereits dargestellte hohe Anzahl von Jahresvolllaststunden gilt für Wasserkraftwerke allgemein. Kleine Wasserkraftwerke erreichen in der Regel mehr als 5.000 Volllaststunden/Jahr (vgl. [6]). Durch ihre Betriebsstundenanzahl von mehr als 8.000 pro Jahr [7], [13], [6] leisten kleine Wasserkraftwerke folglich einen nennenswerten verlässlichen Beitrag zur elektrischen Energieversorgung in Deutschland. Abbildung 2-1 zeigt einen typischen Tagesverlauf einer Photovoltaik- und einer Wasserkraft-Einspeisung im Vergleich. Der Leistungsverlauf von Wasserkraftanlagen zeigt sich als sehr stetig.

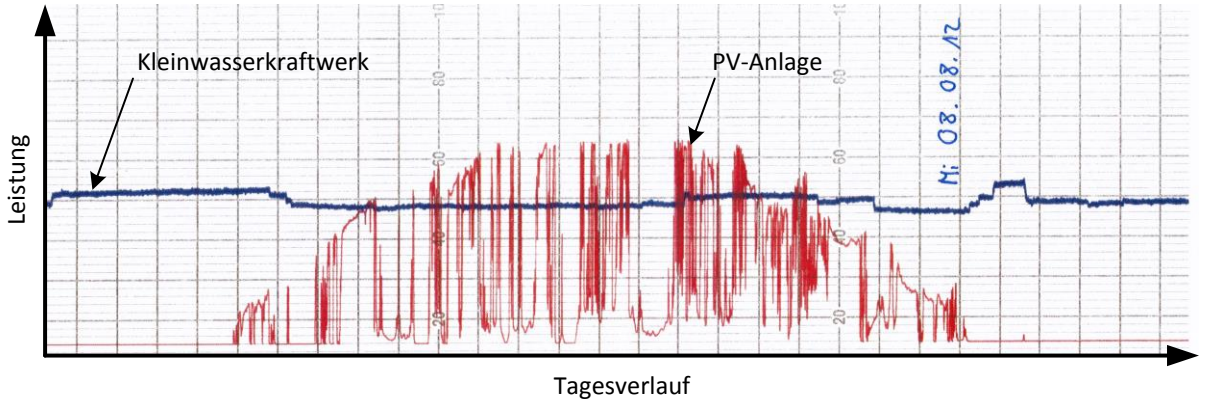

Abbildung 2-1: Vergleich der eingespeisten Leistung zwischen Photovoltaikanlage und Wasserkraftwerke (Anlagenstandort nahe München) [17]

Der Ausgleich von Einspeisung und Verbrauch wird derzeit größtenteils durch die Regelung konventioneller Kraftwerke erreicht. Mit Fortschreiten der Energiewende nimmt die Anzahl konventioneller Kraftwerke jedoch drastisch ab, sodass die Verfügbarkeit der regenerativen Einspeiser erheblich an Bedeutung gewinnt. Die Wichtigkeit der sicheren Versorgung durch regenerativen Energien wird daher auch politisch als ein notwendiger Schritt im Rahmen der Energiewende angesehen [18]. Hierbei spielen die Wasserkraftwerke und insbesondere die kleinen Wasserkraftwerke als hochverfügbare [16], verlässliche und regelbare regenerative Einspeiser eine wesentliche Rolle.

Dezentrale kleine Wasserkraftwerke können einerseits zum Leistungsbilanzausgleich im Rahmen der Sekundärregelung und Minutenreserve eingesetzt werden. Je nach installierter Leistung ist hierbei zur Erreichung der derzeitigen Mindestangebotsgröße für die Regelleistungsbereitstellung eine Zusammenfassung mehrerer Kraftwerke zu einem virtuellen Kraftwerk erforderlich. Andererseits kann aber auch ein Teil des notwendigen Speicher- und Ausgleichsbedarfs zur Überbrückung von wind- und sonnenarmen Tagen durch entsprechend geregelte kleine Wasserkraftwerke gedeckt werden.

Für den Einsatz von Wasserkraftanlagen sprechen weiterhin die langjährige Betriebserfahrung und deren im Vergleich zu anderen regenerativen Technologien einfache und robuste Konstruktion. Ferner sind auch die auf den sehr langen Betriebszeitraum bezogenen niedrigen Stromerzeugungskosten zu berücksichtigen. Der sogenannte Erntefaktor, d.h. das Verhältnis der während der Betriebsdauer erzeugten Energie zu jener Energiesumme, die für Herstellung, Betrieb und Abbruch eines Kraftwerkes aufzubringen ist, ist bei Wasserkraftwerken mit etwa 50 höher als bei allen anderen regenerativen Energieerzeugungsformen [19] [16].

Die kleine Wasserkraft stellt damit insgesamt einen sehr verlässlichen, stetigen und erneuerbaren Energieträger mit äußerst geringen Betriebskosten dar. Die Stromerzeugung erfolgt faktisch ohne Ausstoß von Treibhausgasen, wie nachstehende Abbildung zeigt.

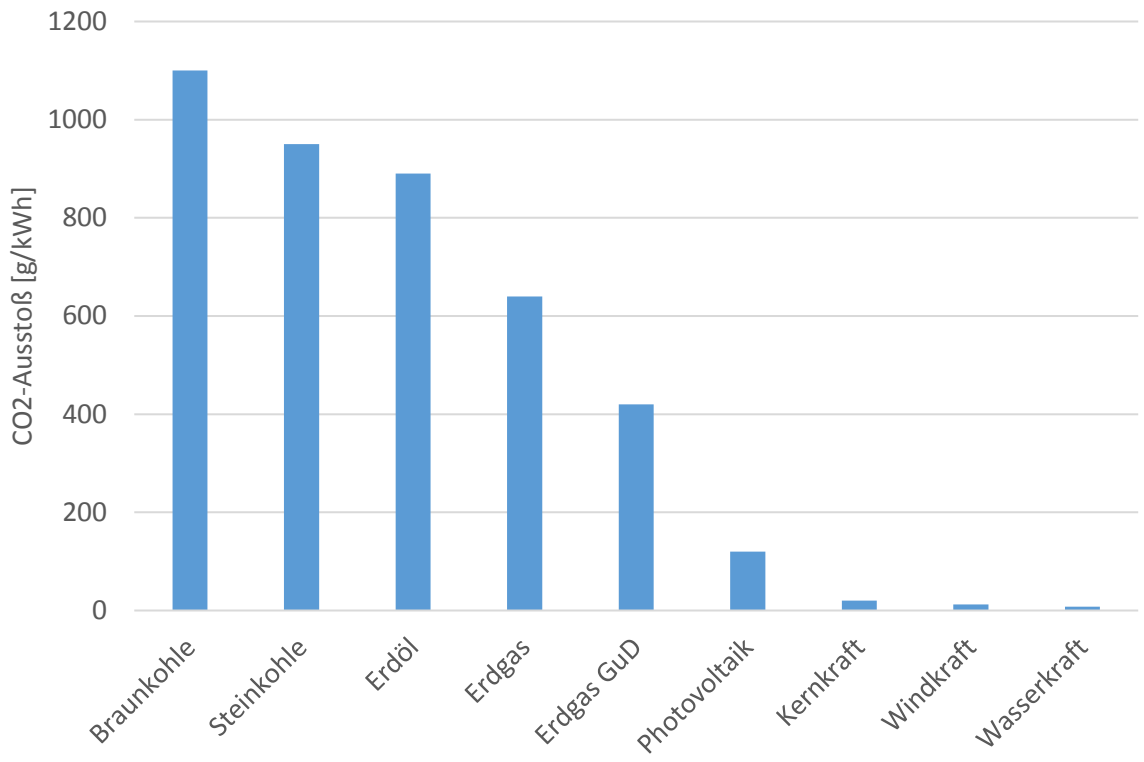

Abbildung 2-2: Durchschnittlicher CO2-Ausstoß je Erzeugungsart nach [20]

3 Beitrag der kleinen Wasserkraftwerke zur Vermeidung des Netzausbaus auf Verteilnetzebene

Im Folgenden werden sowohl die genauen Einflüsse der Energiewende auf die Verteilnetze beschrieben als auch der Nutzen von kleinen Wasserkraftwerken in diesem Kontext beleuchtet. Dafür wird der technische Einfluss eines hypothetischen Ersatzes der kleinen Wasserkraftwerke durch volatile regenerative Einspeiser auf die Verteilnetze analysiert.

3.1 Einfluss der Energiewende auf die Mittel- und Niederspannungsnetze

Im Rahmen der Energiewende sind immer größere Energiemengen aus Windenergie- und Photovoltaikanlagen in die Verteilnetze zu integrieren. Während diese Netze bisher hauptsächlich die Aufgabe hatten, den elektrischen Stroms aus vergleichsweise wenigen Großkraftwerken zu verteilen, müssen sie nun Energie regenerativer Einspeiser direkt aufnehmen. Aus Verteilnetzen werden also immer mehr „Einsammelnetze“ – eine Aufgabe, für die die Verteilnetze nicht ausgelegt wurden.

Obwohl in der öffentlichen Wahrnehmung häufig die Übertragungsnetze im Mittelpunkt der Diskussion stehen, erfahren Verteilnetze, zu denen sowohl die 110kV-Hochspannungsnetze sowie die Mittel- und Niederspannungsnetze (10 kV und 20 kV bzw. 230/400 V) zählen, aus netztechnischer Sicht durch die Energiewende in der Tat einen mindestens ebenso großen Wandel [4], [21]. Insbesondere für ländliche Verteilnetze, in denen der größte Teil der regenerativen Einspeiser angeschlossen ist, konnte dies bereits vielfach nachgewiesen werden. Der erhebliche Zubau von Photovoltaikanlagen, die auf Dächern von Wohnhäusern, Landwirtschafts- und Industriebetrieben installiert und an die Niederspannungsnetze angeschlossen werden oder über das Mittelspannungsnetz eingebundenen Photovoltaik- und Windparks, können zu zwei für den sicheren Netzbetrieb kritischen Problemen führen:

Zum einen kann die starke Einspeisung aus den genannten regenerativen Einspeisern in Verbindung mit einer gleichzeitig geringen Verbraucherlast, dazu führen, dass die gemäß Norm geforderte Spannungsqualität, insbesondere die Spannungshöhe, zeitweise nicht mehr eingehalten werden kann. Gemäß der Norm DIN EN 50160 ist eine Spannung im Bereich von +/- 10 % um die Nennspannung von 230 V/400 V in der Niederspannung bzw. 10 kV oder 20 kV in der Mittelspannung zulässig. In den Verteilnetzen kann es durch die hohen Einspeiseleistungen von Wind- und Photovoltaik-Anlagen zeitweise zu einer Überschreitung dieses Toleranzbereichs kommen. Dies führt nicht nur zu unerwünschten Abschaltungen einzelner dezentraler Einspeiser, sondern zu möglichen Ausfällen einzelner Netzbereiche oder im schlimmsten Fall sogar zu Defekten an Netzkomponenten oder Endkundengeräten.

Zum anderen können auch Überlastungen, also zu hohe Stromflüsse im Netz, bedingt durch besonders hohe Einspeiseleistungen auftreten, welche zu Schäden an den Netzkomponenten führen.

Um die genannten Probleme zu beheben, ist das Netz mit Hilfe von kostenintensiven Netzausbaumaßnahmen an die neuen, lokalen Anforderungen anzupassen. Da die dargestellten kritischen Netzsituationen jedoch in der Regel nur kurzzeitig auftreten, wird die zusätzlich erforderliche Netzkapazität, die sich an der möglichen maximalen Einspeiseleistung richtet, nur zu einem geringen zeitlichen Anteil tatsächlich benötigt. Dies gilt besonders ausgeprägt in Mittelspannungsnetzen, in der die Einspeisespitzen von angeschlossenen Windenergie- und Photovoltaikanlagen nur selten gleichzeitig in voller Höhe auftreten, aber die Netze dafür ausgelegt sein müssen. Damit fallen hohe Kosten für den Netzausbau bei

einer insgesamt nur geringen mittleren Auslastung des Netzes an, da die Netze trotzdem für diese Spitzen ausgelegt werden müssen [22], [23].

Der standardmäßig angewandte konventionelle Netzausbau, der den Austausch und zusätzlichen Verbau von technischen Komponenten wie Leitungen und Transformatoren bezeichnet, ist mit erheblichen Kosten verbunden. Diese entfallen nicht nur auf die Komponenten selbst, sondern zum Großteil auf Tiefbauarbeiten und Installationskosten. So wird die Erweiterung der Netzkapazität, die lediglich zu wenigen Zeitpunkten im Jahr vollständig benötigt wird, schnell unwirtschaftlich [24]. Als Alternative zu konventionellen Netzausbaumaßnahmen können durch intelligente Netze einerseits Netzausbaukosten gespart, andererseits die bereits bestehende Netzkapazität optimal ausgenutzt werden [24], [25]. Prognosen gehen davon aus, dass die Aufnahmekapazität für dezentrale Einspeiser durch die Nutzung intelligenter Netze und die Regelung dezentraler Einspeiser in kritischen Situationen verdoppelt werden kann.

3.2 Nutzen der kleinen Wasserkraft im Kontext der Energiewende

Während Photovoltaik- und Windenergieanlagen dargebotsabhängig Strom produzieren, also je nach Sonneneinstrahlung und Windstärke, gelten Wasserkraftwerke bisher im Wesentlichen als stetige Einspeiser. In Zukunft ist jedoch eine deutlich flexiblere Nutzung dieser Kraftwerke denkbar, um einen Beitrag zu einer wirtschaftlichen Realisierung der Energiewende zu ermöglichen. Durch eine technische Erweiterung mit zusätzlichen Regelfunktionen[2] lassen sich kleine Wasserkraftwerke ohne wesentlichen zusätzlichen Aufwand in die entstehenden intelligenten Netze integrieren und können somit für verschiedene netzdienliche Funktionen erschlossen werden.

Durch die Ausstattung mit Informations- und Kommunikationstechnik werden Verteilnetze zunehmend „intelligent“ und werden zukünftig eine Vielzahl von netzdienlichen Funktionen übernehmen, die bisher auf Grund der fehlenden technischen Möglichkeiten nur auf der Transportnetzebene zur Verfügung standen [25]. Durch die hohe Anzahl an dezentralen kleinen Wasserkraftwerken in Verbindung mit der hohen Anzahl an Jahresvolllast- und Betriebsstunden können gerade kleine Wasserkraftwerke einen wertvollen verlässlichen Beitrag zu netzdienlichen Funktionen leisten.

Im Folgenden werden die Eigenschaften und Erfordernisse für ein netzdienliches Verhalten dezentraler Einspeiser und einige wichtige Funktionen dargestellt, zu denen die kleinen Wasserkraftwerke unterstützend beitragen können.

3.2.1 Netzdienliches Verhalten von dezentralen Einspeisern

Für die Umsetzung der Energiewende ist es im allgemeinen Interesse, den zur Gewährleistung eines normgerechten Betriebs der Verteilnetze erforderlichen Ausbau möglichst kosteneffizient zu gestalten. Während konventioneller Netzausbau unter Einsatz von zusätzlichen Kabeln und leistungsstärkeren Transformatoren mit hohen Kosten verbunden ist, stellen intelligente Verteilnetze einen ersten Schritt dazu dar, das Ziel einer bezahlbaren Energiewende zu erreichen.

Die intelligenten Netze sind dabei aber auf die Ansteuerbarkeit der dezentralen Einspeiser, beispielsweise einer Wirkleistungs- bzw. Blindleistungsregelbarkeit, angewiesen, um die erforderliche Spannungsqualität einzuhalten und Überlastungen zu vermeiden. Kleinen

[2] Insbesondere ein erweitertes und frei einstellbares Blindleistungsregelungsband sowie eine (automatisierte) Fernsteuerbarkeit (Wirk- und Blindleistung)

Wasserkraftwerken kommt dabei als zuverlässigen, hochverfügbaren und regelbaren Einspeisern eine wichtige Bedeutung zu.

3.2.2 Lokale Spannungsregelung durch kleine Wasserkraftwerke

Insbesondere im ländlichen Bereich, wo kleine Wasserkraftwerke vornehmlich vorzufinden sind, ist die Gewährleistung der erforderlichen Spannungsqualität, insbesondere hinsichtlich der Spannungshöhe, eine bedeutende Herausforderung (vgl. 3.1). Kleine Wasserkraftwerke können durch die kontinuierliche und gleichmäßige Einspeisung sehr viel Energie einspeisen, ohne das Toleranzband zu verletzen.

Neben den sogenannten regelbaren Ortsnetztransformatoren, die teilweise für eine Entkopplung der Spannung in Mittel- und Niederspannungsnetz sorgen und damit auch teilweise eine Problemlösung für beide Spannungsebenen ermöglichen, stehen auf Seiten der dezentralen Einspeiser prinzipiell zwei Möglichkeiten zur Verfügung, um die Spannung im Niederspannungsnetz lokal zu beeinflussen:

- Durch die Blindleistungsregelung von dezentralen Einspeisern kann die Spannung im Netz angehoben bzw. abgesenkt werden. Diese zur Regelung verwendete Blindleistung kann durch kleine Wasserkraftwerke bereitgestellt werden und damit die Gewährleistung einer ausreichenden Spannungsqualität nachhaltig unterstützen. Die eingespeiste Wirkleistung bleibt dabei in vollem Umfang erhalten. Die Wirksamkeit der Blindleistungsregelung ist jedoch von der Netztopologie, d. h. dem konkreten Aufbau des jeweiligen Netzes, abhängig.
- Eine weitere Möglichkeit zur lokalen Spannungsregelung ist die Wirkleistungsregelung dezentraler Einspeiser: Durch eine kurzzeitige Reduzierung der eingespeisten Leistung können Spannungsspitzen vermieden werden. Dadurch geht jedoch prinzipiell ein entsprechender Anteil an regenerativ erzeugter Energie verloren. Die Regelungsmöglichkeit ist allerdings grundsätzlich sehr effektiv, im Regelfall nur von kurzer Dauer und vermeidet Netzausbaukosten in erheblichem Maße. Sofern im Netz installierte kleine Wasserkraftwerke intelligent geregelt werden können, entsteht damit ein höheres Potenzial volatile regenerative Einspeiser ohne zusätzlichen Netzausbau ans Netz anschließen zu können.

Kleine Wasserkraftwerke unterstützen zudem die Spannungshaltung in Zeiten schwacher regenerativer Einspeisung bei erhöhter Last. Sie können somit einen wichtigen Beitrag zur komplexer werdenden lokalen Spannungshaltung gerade in den extrem belasteten ländlichen Mittel- und Niederspannungsnetzen leisten.

3.2.3 Reduzierung von Netzverlusten

Beim Transport von elektrischer Energie über weite Strecken sind Übertragungsverluste unvermeidbar. Ein wesentlicher Vorteil der Energiewende besteht auch darin, durch eine breit aufgestellte dezentrale Einspeisestruktur die erforderliche Menge an zu transportierender Energie und damit die entstehenden Verluste deutlich zu reduzieren. Je kürzer die (Netz-)Entfernung zwischen Erzeuger und Verbraucher, desto geringer sind die Verluste. Auch hier kommt den kleinen Wasserkraftwerken eine wichtige Bedeutung zu. Denn in der Vergangenheit siedelten sich viele Industrie- und Gewerbebetriebe entlang der Gewässer an und nutzen die Kraft des Wassers für ihre Produktionsprozesse (Sägen, Mahlen, Schleifen, Hämmern etc.). Dadurch liegt auch heutzutage noch die Erzeugung des Wasserkraftstroms nah am Verbrauch.

Neben der Reduzierung von Übertragungsverlusten generell kann durch eine dezentral geprägte Einspeisestruktur auch der Bedarf für den Ausbau des Transportnetzes abgemildert werden. Die zuvor dargestellten intelligenten Netze sowie die Integration eines breiten, dezentralen Einspeiseportfolios sind dazu jedoch eine Grundvoraussetzung.

Durch die im Vergleich zu Photovoltaik- und Windenergieanlagen verlässliche lokale Einspeisung von kleinen Wasserkraftwerken tragen diese damit grundsätzlich zu einer Reduzierung der über weite Strecken zu übertragenden (Ausgleichs-)Energiemenge bei und reduzieren somit die Netzverluste auf allen Spannungsebenen des Energieversorgungssystems.

3.2.4 Beitrag von kleinen Wasserkraftwerken zur Versorgungsqualität

Die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung ist insbesondere für Gewerbe, Industrie- und Landwirtschaftsbetriebe von hoher Bedeutung. In einem Energiesystem, das mehrheitlich auf eine regenerative Energieerzeugung setzt, müssen ebenjene in der Regel dezentralen Einspeiser die gewünscht hohe Versorgungsqualität gewährleisten.

Insbesondere beim Versorgungswiederaufbau nach einem großflächigen Netzausfall (sogenannter Blackout) kommt verlässlichen Einspeisern wie Wasserkraftwerken eine besondere Bedeutung zu, wie auch der Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestags in seinem Abschlussbericht zur „Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften – am Beispiel eines großräumigen und langandauernden Ausfalls der Stromversorgung“ [26] treffend erkennt. Ein Ansatz zum Wiederaufbau des Gesamtsystems im Fall eines großflächigen Blackouts setzt auf kleine, stabile Versorgungsinseln, die beispielsweise durch virtuelle Kraftwerke (vgl. Abschnitt 3.2.5) aufgebaut und gestützt werden. Als Teil solcher Inselnetze können kleine Wasserkraftwerke – bei ausreichender Leistungsfähigkeit – einen wertvollen Beitrag leisten.

3.2.5 Kleine Wasserkraftwerke als Teilnehmer eines virtuellen Kraftwerks

Mehrere dezentrale Einspeiser, insbesondere mit verschiedenen Energieträgern, können zu einem sogenannten virtuellen Kraftwerk zusammengeschlossen werden und so einen wesentlichen Beitrag zur Lösung für zentrale Herausforderungen der Energiewende leisten. Versorgungssicherheit, Marktfähigkeit und Netzstabilität in der Stromversorgung der Zukunft können mit virtuellen Kraftwerken signifikant erhöht werden. Im Vergleich zu Großkraftwerken sind virtuelle Kraftwerke flexibler. Dadurch kann die Produktion sehr schnell an die Residuallast angepasst werden. Zudem können sie Gesamtwirkungsgrade von über 90 % erreichen [27].

Die Diversität des Einspeiseportfolios stellt dabei einen wesentlichen Faktor für die mögliche Effizienz und Flexibilität eines Virtuellen Kraftwerks dar. Im Allgemeinen werden Photovoltaik- und Windenergie-Anlagen sowie steuerbare Verbraucher und Energiespeicher zusammengeschlossen. Kleine Wasserkraftwerke eignen sich ebenfalls sehr gut für die Aufnahme in ein Virtuelles Kraftwerke durch die sehr gute Integrationsfähigkeit in intelligente Netzsysteme, die verlässliche und steuerbare Einspeisung, die faktisch nicht vorhandenen Primärenergiekosten und die damit geringen Betriebskosten. Durch die kontinuierliche Einspeisung leisten sie darin einen wichtigen Beitrag zur Grundlastfähigkeit und Regelbarkeit (vgl. [27]).

3.2.6 Potenziale durch dynamische Stauraumbewirtschaftung

Die Potenziale der sogenannten dynamischen Stauraumbewirtschaftung können genutzt werden, um die ohnehin sehr gute Regelbarkeit der kleinen Wasserkraftwerke weiter zu steigern. Durch ein flexibel einsetzbares Stauvolumen kann eine weitergehende Entkopplung von natürlichem Abfluss und elektrischer Energieerzeugung der Laufwasserkraftwerke erreicht werden. Damit können Wasserkraftwerke vor allem im kurzzeitig flexiblen Betrieb beispielsweise zur Bereitstellung von Regelleistung zur Frequenzregelung im Verbundnetz beitragen [28].

Der zunehmende Anteil der volatilen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien verursacht nicht nur die beschriebenen technischen Herausforderungen im Netz, sondern auch systemische Herausforderungen. Durch die Dargebotsabhängigkeit der elektrischen Energieversorgung werden zukünftig in großem Maße Speicher benötigt, die dafür sorgen, dass stets elektrische Energie zur Verfügung steht, auch wenn beispielsweise die Sonneneinstrahlung und Windstärke gering sind. Die (kleine) Wasserkraft kann in diesem Zusammenhang zur Speicherung von Energie verwendet werden, die erst im Moment des Bedarfs wieder in Form elektrischer Energie bereitgestellt wird. Die dynamische Stauraumbewirtung hat den zusätzlichen Vorteil, dass zur Einspeicherung der Energie keine Energiewandlung erforderlich ist, wodurch der Wirkungsgrad eines Speichervorgangs steigt.

3.3 Netzanalysen

Im Folgenden wird erläutert und am Beispiel unterschiedlicher Netze gezeigt, wie die kleinen Wasserkraftwerke zur Reduzierung von Netzausbaukosten und Netzverlusten beitragen. Möglich wird dies, indem der Status quo der Einspeisesituation mit dem hypothetischen Entfall von installierten kleinen Wasserkraftwerken aus dem Erzeugungsmix verglichen wird.

3.3.1 Vorgehensweise der Netzanalysen

Nach Auswahl geeigneter Netzstrukturen wird eine detaillierte Netznachbildung in einem rechenfähigen Modell durchgeführt. Als Grundlage für umfangreiche und aussagefähige Analysen dienen Szenarien für die Lasten und Einspeiser, mit deren Hilfe Zielnetzplanungen sowohl für die aktuelle Einspeisesituation mit als auch eine hypothetische ohne kleine Wasserkraftwerke durchgeführt werden können. Hierbei werden die zwei auslegungsrelevanten Betriebspunkte „Starkeinspeisung bei minimaler Last“ und „Starklast ohne Einspeisung“ in die Leistungsflussberechnungen einbezogen. Dabei wird eine Analyse der Spannungshaltung, der Betriebsmittelauslastung und der Wirk- und Blindleistungsflüsse in den genannten Belastungsfällen des Netzes durchgeführt. Um einen sicheren und im Rahmen der einschlägigen technischen Normen zulässigen Netzbetrieb zu gewährleisten, sind die Netze in den untersuchten Regionen auf Grund der erhöhten Netzbelastung zu ertüchtigen. Dafür sind zusätzliche Betriebsmittel (wie Kabel oder Transformatoren) höherer Leistungsklassen ins Netz zu integrieren. Die dafür anfallenden Kosten werden summiert und als Bewertungskriterium herangezogen.

Im Anschluss werden die Ergebnisse der Netzberechnungen auf Deutschland insgesamt hochgerechnet und für einen technischen und wirtschaftlichen Vergleich der Zielnetzplanungen mit und ohne Wasserkraftwerke verwendet. Dafür werden die untersuchten Netzgebiete auf Basis struktureller und geographischer Kriterien in Cluster eingeteilt und die Ergebnisse entsprechend des Anteils des Clusters an der in Deutschland installierten Nennleistung von kleinen Wasserkraftwerken hochgerechnet.

3.3.2 Untersuchtes Netzgebiet

Gemeinsam mit fünf großen bis mittelgroßen Verteilungsnetzbetreibern aus verschiedenen Regionen Deutschlands wurden Netzstrukturen (17 Netze) für die Untersuchungen ausgewählt, die mit einem hohen Anteil von kleinen Wasserkraftwerken repräsentativ sind. Die Netze stammen aus den Regionen West-, Mittel- und Süddeutschland und sind von ländlichen Strukturen geprägt. Stromnetze aus solch ländlich geprägten Regionen weisen eine vergleichsweise geringe Lastdichte und vergleichsweise lange Leitungen auf. Wegen dieser Eigenschaften sind solche Netzstrukturen in der Regel nicht dafür geeignet, stark steigende Last- oder Einspeisekapazitäten ohne zusätzlichen Netzausbau zu ermöglichen.

Die ausgewählten Netzgebiete repräsentieren gut diejenigen Netzstrukturen, in denen kleine Wasserkraftwerke in der Regel vorzufinden sind. Außerdem ist eine ausreichend hohe Datenbasis gelegt, um mit Hilfe von Hochrechnungen Gesamtaussagen für die Netze Deutschlands treffen zu können.

3.3.3 Szenarienentwicklung

Während besonders kleine Wasserkraftwerke mit einer Leistung bis zu 100 kW häufig direkt in die Niederspannungsnetze einspeisen, werden Wasserkraftwerke größerer Leistung mitunter direkt oder über eigene Transformatoren an das Mittelspannungsnetz angeschlossen. Aktuell sind in den fünf untersuchten Netzgebieten Wasserkraftwerke mit einer installierten Leistung von 19,7 MW in der Mittelspannungsebene und von 430 kW in der Niederspannungseben angeschlossen.

Unter der Annahme, dass keine kleinen Wasserkraftwerke (installierte Leistung kleiner als 1 MW) zur Verfügung stehen und die im Jahresverlauf durch die diese in den betrachteten Netzen eingespeiste regenerative Energie ersatzweise durch Windenergie- bzw. Photovoltaik-Anlagen bereitgestellt werden müsste, ergäbe sich folgende Situation:

Bei einer angenommenen Volllaststundenzahl von 5.500 pro Jahr für die kleinen Wasserkraftwerke ergibt sich eine eingespeiste regenerative Energie von ca. 108 GWh pro Jahr in der Mittelspannungsebene. Prinzipiell soll diese nun von Windenergieanlagen erzeugt werden. In Ausnahmefällen, beispielwese auf Grund einer strikten Regulierung des Zubaus der Windenergie wie etwa in Bayern, werden auch Photovoltaikanlagen eingesetzt. Für Windenergieanlagen wird ein Mittelwert von 1.800 Jahresvolllaststunden angesetzt, der leicht über den Mittelwerten der vergangenen Jahre für Windenergieanlagen in Deutschland liegt, um dem technologischen Fortschritt der Anlagen Rechnung zu tragen. Somit ergibt sich eine installierte Summenleistung von etwa 60,3 MW. Zur Definition eines realistischen Zubauszenarios werden Windenergieanlagen mit je 2,5 MW auf die untersuchten Mittelspannungsnetze zufällig verteilt. Für den hypothetischen Ersatz von Wasserkraftanlagen in der Mittelspannung sind entsprechend Windenergieanlagen mit einer dreimal höheren installierten Leistung als die vorhandenen Wasserkraftanlagen vorzusehen. (vgl. Abbildung 3-1, rechts).

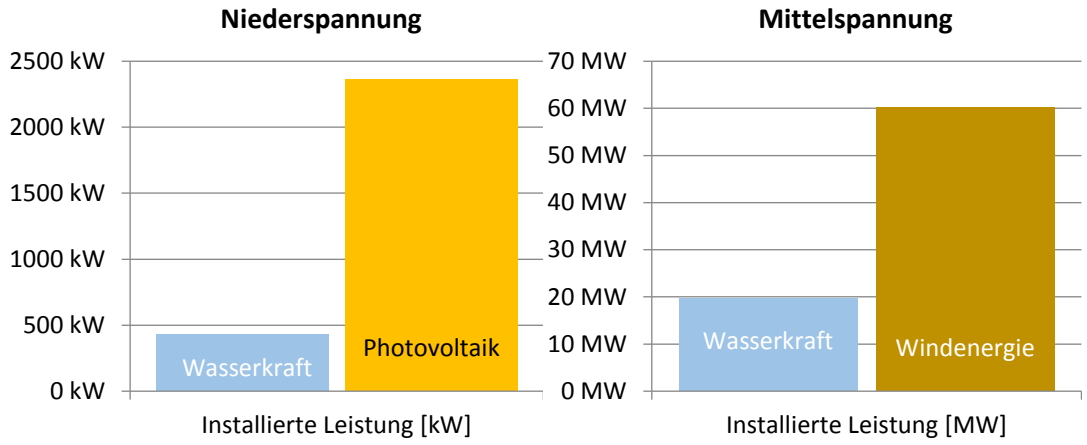

Abbildung 3-1: Vergleich der installierten Leistung der Wasserkraftwerke mit dem erforderlichen Ersatzausbau

Nach derselben Systematik sind in den untersuchten Niederspannungsnetzen Photovoltaik-Anlagen (1000 Jahresvolllaststunden) mit einer installierten Leistung von insgesamt 2,4 MW vorzusehen, um die kleinen Wasserkraftwerke energetisch zu ersetzen (vgl. Abbildung 3-1, links). Dies entspricht einem Verhältnis der installierten Leistung von PV zur Wasserkraft von 5,5. In der Untersuchung werden zufällig Photovoltaikanlagen mit für die Siedlungsstruktur typischen installierten Leistungen zwischen 7 kW und 30 kW auf die Netze verteilt. Hierbei sind noch keine gegebenenfalls zusätzlich geplanten Anlagen berücksichtigt, die im Rahmen der Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien ohnehin in die Netze zu integrieren sind und diese ggf. weiter belasten.

3.3.4 Ergebnisse der Netzanalysen

Wie bereits erläutert, wären die Mittel- und Niederspannungsnetze in den untersuchten Regionen ohne Wasserkraftwerke zu ertüchtigen bzw. auszubauen, um einen sicheren und normgerechten Betrieb zu gewährleisten. In der Mittelspannungsebene wären neue Kabel (in Form von Stützpunktleitungen) mit einer Länge von insgesamt rund 71 km zu verlegen. Dies entspricht einem Erweiterungsbedarf der bestehenden Netzlänge um etwa 11 % (siehe Abbildung 3-2, jeweils linker Balken). Hieraus resultieren Investitionskosten von etwa sechs Mio. EURO für die Erweiterung der Umspannwerke, Tiefbaumaßnahmen sowie den Erwerb und den Anschluss neuer Kabel.

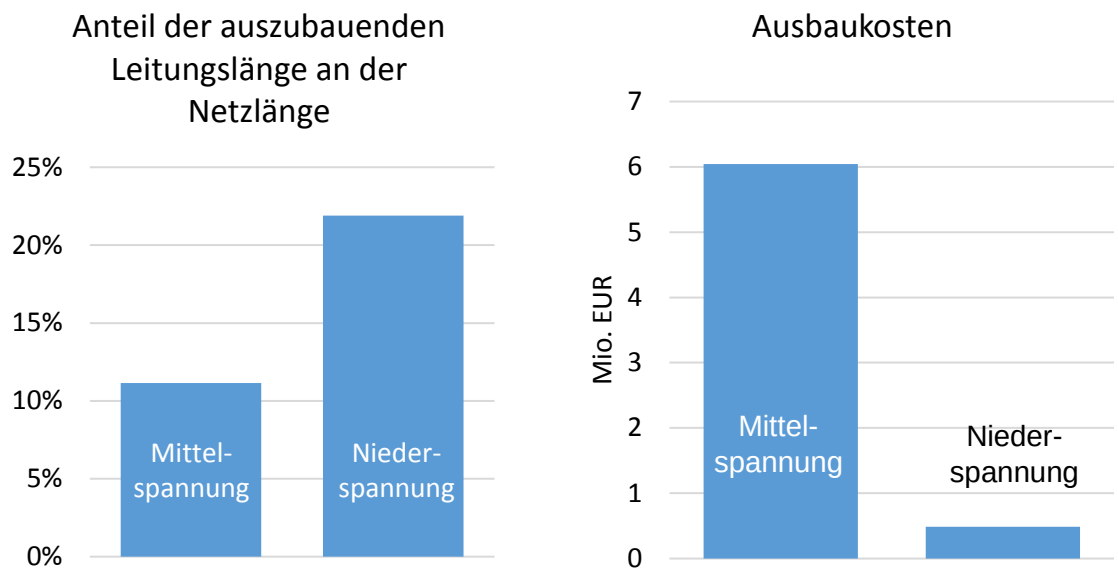

Abbildung 3-2: Vergleich der Ergebnisse der Netzplanung von Mittel- und Niederspannungsnetzen

In den untersuchten Niederspannungsnetzen müssten insgesamt ca. 5,6 km neue Leitungen (in Form neuer Stützpunktleitungen und der Verstärkung bestehender Leitungen) sowie neue Transformatoren installiert werden. Dies entspricht einen Erweiterungsbedarf der bestehenden Netzlänge um etwa 22 % und Investitionskosten in Höhe von ca. 490.000 EURO (siehe Abbildung 3-2, jeweils rechter Balken). Über beide Spannungsebenen werden in lediglich vier von 17 untersuchten Netzen keine technischen Restriktionen verletzt, sodass dort unter den Modellannahmen kein Ausbaubedarf besteht.

Die ausgewählten und untersuchten Mittel- und Niederspannungsnetze können als repräsentativ für ländliche Verteilungsnetze in Deutschland angesehen werden, in denen Wasserkraftanlagen angeschlossen sind. Es lassen sich vereinfacht Investitionskostenfaktoren ableiten, die für eine Abschätzung der zusätzlichen Netzausbaukosten dienen und somit hochgerechnet für Gesamtdeutschland herangezogen werden können.

Bezogen auf die Spannungsebenen ergeben sich die in Abbildung 3-3 dargestellten Werte. Für die Mittelspannungsnetze mit einer installierten Leistung von Wasserkraftwerken von etwa 19,7 MW liegt der spezifische Investitionskostenfaktor bei Ersetzung der Wasserkraftwerke bei ca. 306 Euro je kW installierter Leistung. In den untersuchten Niederspannungsnetzen ergibt sich ein deutlich höherer Faktor von 1.139 Euro je kW. Der hypothetische Netzausbau verursacht in der Niederspannung damit etwa 3,7-mal so hohe Kosten wie in der Mittelspannung, sodass insbesondere sehr kleine Wasserkraftanalgen (<100 kW) einen hohen Beitrag zur Netzausbauvermeidung tragen. Ohne Berücksichtigung der Spannungsebene, also auf die einzelnen Netze bezogen, ergeben sich je nach Ausbaubedarf spezifische Investitionskostenfaktoren zwischen 57 Euro je kW und 6.380 Euro je kW.

Insgesamt wurden hierbei etwaige Netzanschlusskosten auf Seiten der Betreiber der dezentralen Erzeugungsanlagen noch nicht berücksichtigt.

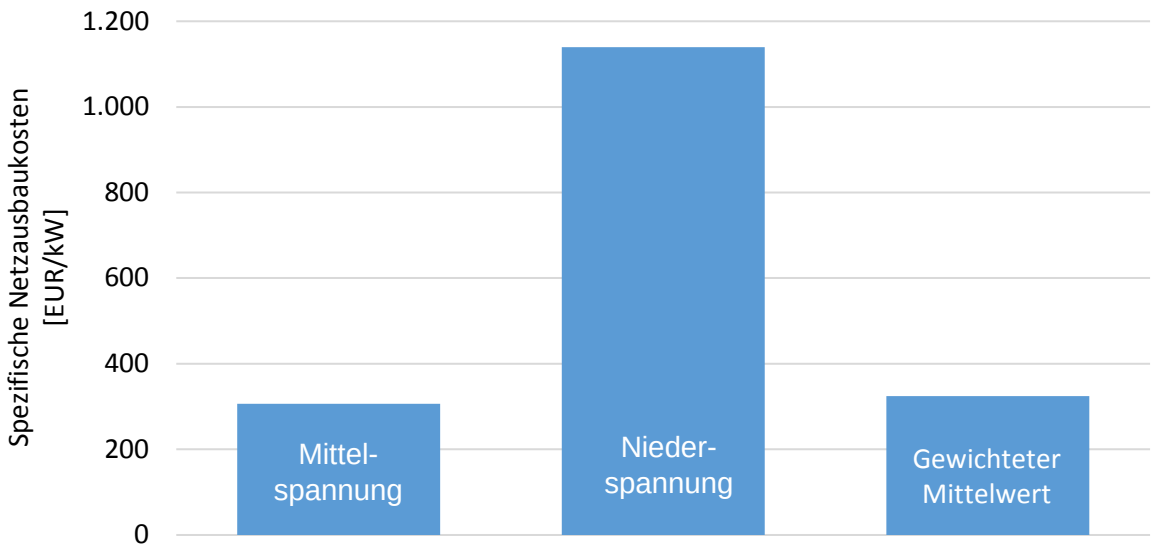

Abbildung 3-3: Spezifische Netzausbaukosten bei dem Ersatz von Wasserkraftanlagen durch adäquate regenerative Energiequellen (Windenergieanlagen bzw. Photovoltaikanlagen) sowie der nach Anschlussleistung gewichtete Mittelwert

3.4 Hochrechnung: Netzausbaukosten ohne kleine Wasserkraftwerke in den Verteilnetzen Deutschlands

Um eine Hochrechnung der Ergebnisse der spezifischen Netzanalysen auf Deutschland zu ermöglichen, wurden die untersuchten Netze auf Basis struktureller und geographischer Kriterien in verschiedene Cluster eingeteilt. Es wurden die Cluster *Bayerisches Alpenvorland (1)*, *Schwäbisches Alpenvorland (2)*, *Mitteldeutsches Mittelgebirge (3)*, *Westdeutsches Mittelgebirge* (4) sowie *Allgemeines Flusstal (5)* ermittelt (vgl. Abbildung 3-4).

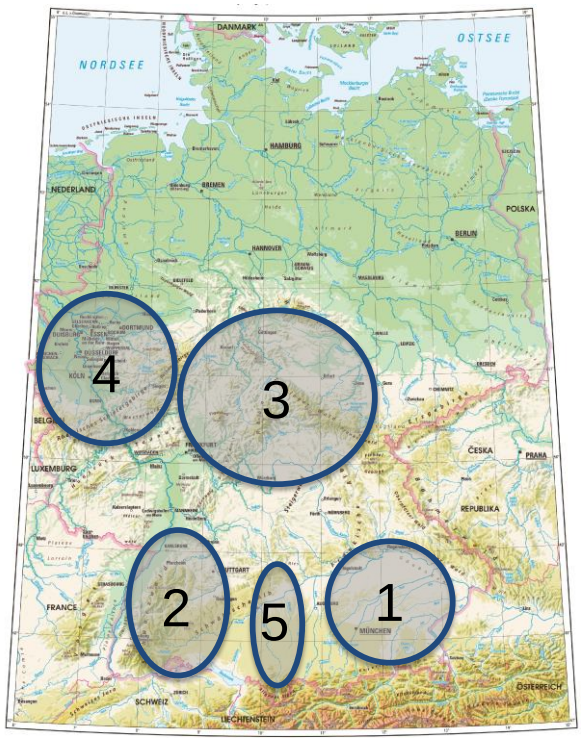

Abbildung 3-4: Cluster von Regionen mit angeschlossenen Wasserkraftanlagen auf Grundlage der vorliegenden Netzregionen (Karte aus [29])

Als prägender Faktor geht dabei insbesondere die installierte Wasserkraftleistung in die Bestimmung der Cluster ein. Während auf das Cluster *Bayerisches Alpenvorland* ein sehr hoher Anteil der insgesamt in Deutschland installierten Wasserkraft entfällt, weist das Cluster *Westdeutsches Mittelgebirge* einen vergleichsweise geringen Anteil. Regionen, aus denen keine Netzdaten für die Untersuchungen vorlagen, wurden den passenden Clustern zu geordnet. So wird beispielsweise der Anteil der deutschlandweit installierten kleinen Wasserkraft, der auf das Bundesland Sachsen entfällt, dem Cluster *Mitteldeutsches Mittelgebirge* zugeschlagen. Die installierte Leistung an kleiner Wasserkraft, die auf die unterschiedlichen Cluster entfällt, bildet so die Grundlage für die Hochrechnung der Netzanalysen. In Abbildung 3-5 ist der entsprechende Anteil der ermittelten Cluster an der gesamtdeutschen Leistung dargestellt.

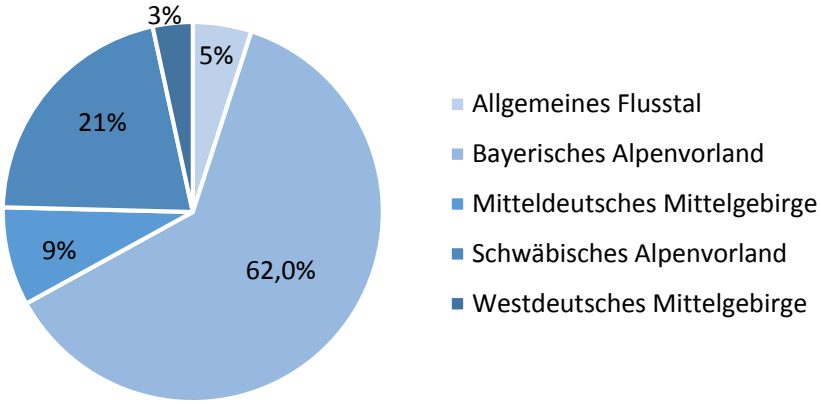

Abbildung 3-5: Auf die ermittelten Cluster entfallender Anteil installierter Leistung kleiner Wasserkraftanlagen bezogen auf Gesamtdeutschland

Das Ergebnis der Netzanalysen sind die absoluten Netzausbaukosten je Netz. Auf Grund ihrer strukturellen Parameter und der geographischen Lage repräsentieren die Netze die verschiedenen Cluster. Die für jedes Netz absoluten Netzausbaukosten werden auf Basis der installierten Wasserkraftleistung gewichtet und dieser Wert als spezifische Netzausbaukosten dem entsprechenden Cluster zugeordnet. Diese spezifischen Kosten können der Abbildung 3-6 entnommen werden. Die höchsten spezifischen Netzausbaukosten weist demnach das Cluster *Bayerisches Alpenvorland* mit 847 Euro je kW auf, das Cluster *schwäbisches Alpenvorland* mit 64 Euro je kW die niedrigsten.

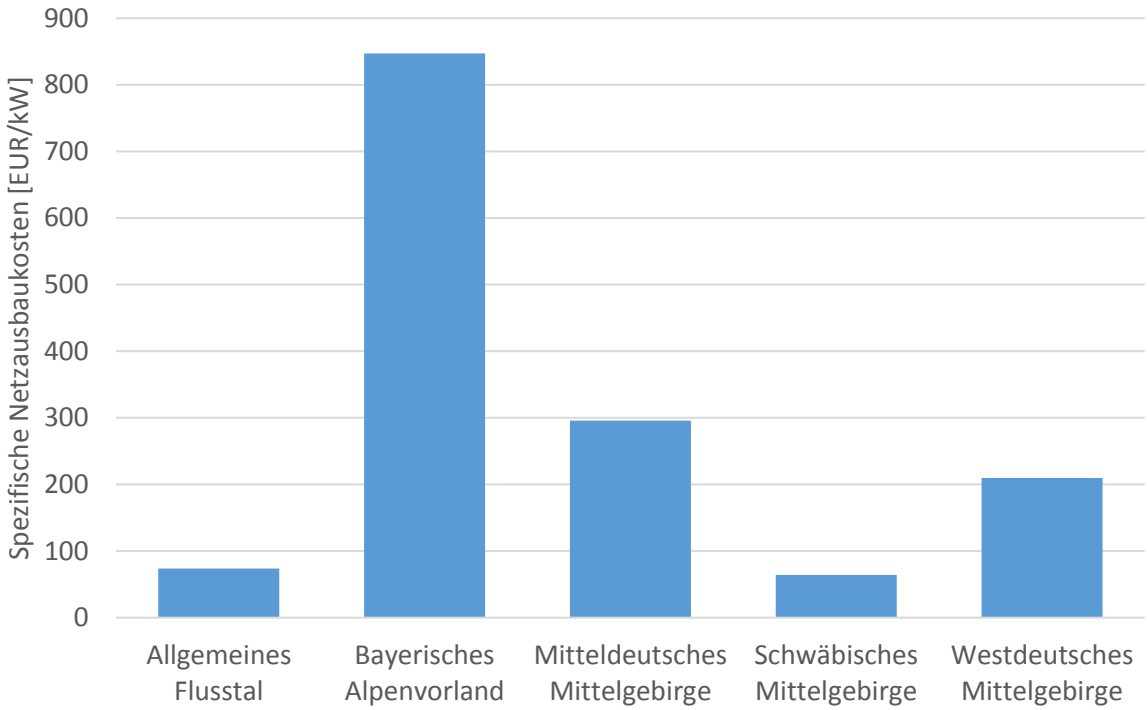

Abbildung 3-6: Spezifische Netzausbaukosten je Cluster

Anschließend werden die spezifischen Netzausbaukosten mit der insgesamt je Cluster installierten Leistung kleiner Wasserkraft skaliert, um die je Cluster anfallenden Netzausbaukosten zu erhalten. Da die ermittelten Cluster alle Regionen Deutschlands mit installierter Wasserkraft repräsentieren und auch für alle Cluster Netzdaten vorliegen, aus denen entsprechende Netzausbaukosten bestimmt werden können, ergibt die Summe über alle Cluster die deutschlandweiten Netzausbaukosten auf Basis der Modellannahmen.

Im Durchschnitt aller Cluster ergeben sich somit spannungsebenenübergreifende spezifische Investitionskosten von rund 574 Euro je kW installierter Wasserkraftleistung. Diese variieren jedoch stark zwischen den einzelnen Clustern (von 120 Euro je kW bis 850 Euro je kW). Multipliziert mit der installierten Wasserkraftwerksleistung je Cluster ergeben sich deutschlandweit summierte Netzausbaukosten von rund **762 Millionen Euro**. Auf Grund der unterschiedlichen regionalen Ausprägung der Wasserkraft, ist jedoch eine deutliche Streuung der Kosten zwischen den einzelnen Clustern vorhanden. Insbesondere auf das *Bayerische Alpenvorland* entfallen signifikante Netzausbaukosten, da es sowohl die höchsten spezifischen Netzausbaukosten als auch den größten Anteil an der deutschlandweit installierten Wasserkraftwerksleistung ausweist.

Im Falle eines Wegfalls der kleinen Wasserkraftwerke träten außerdem weitere signifikante Ausbaukosten der Hochspannungsnetze, Aufwendungen für zusätzliche Netzkomponenten wie Speicher und Regelungsanlagen (zur Erbringung einer stetigen Wirk- und Blindleistung) sowie erhöhte Netzverluste hinzu (etwa 4-6% in betroffenen Netzen). In Summe würde ein Verzicht auf kleine Wasserkraftanlagen somit Mehrkosten von etwa **einer Milliarde Euro** erzeugen.

4 Ausblick

Eine zunehmend regenerative Energieversorgung lässt sich kostengünstiger und einfacher gestalten, wenn langfristig auch verlässliche regenerative Einspeiser zur Kompensation der wegfallenden fossilen Kraftwerke eingesetzt werden können. In Deutschland werden topographisch und klimatisch bedingt Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen den höchsten Beitrag an regenerativer Energie bereitstellen. Der stetige Zuwachs dieser volatilen Einspeiser führt jedoch zu steigenden Netzausbau-, Speicher- und Regelungskosten. Die Umsetzung solcher Zubauprojekte könnte zukünftig komplizierter und aufwendiger werden, zum Beispiel auf Grund von zunehmenden Flächenrestriktionen und der damit einhergehenden gesellschaftlichen Diskussionen.

Wasserkraftanlagen unterliegen keiner hohen Einspeisefluktuation und stellen somit auch zukünftig eine verlässliche und hoch verfügbare regenerative Energiequelle dar, sodass sie einen Teil der derzeitigen Aufgaben der fossilen Kraftwerke übernehmen können. Die Bestandsanlagen fügen sich außerdem in den meisten Fällen schon seit vielen Jahrzehnten in das Landschaftsbild harmonisch ein und weisen einen geringen Flächenbedarf auf. Die Wasserkraft leistet somit einen wichtigen Beitrag zu einer volkswirtschaftlich effizienten und regenerativ geprägten Energieversorgung. Daher sollte der bestehende Wasserkraftanlagenpark unbedingt erhalten bleiben.

Die vorliegende Studie stellt lediglich die Netzdienlichkeit der derzeit bestehenden Anlagen dar. Mit einem weiteren Ausbau würde der positive Beitrag der Wasserkraft etwa proportional zur installierten Leistung zunehmen. Dieses Potenzial ist leicht zu heben und sollte im Sinne einer umfassenden Energiewende nach Möglichkeit genutzt werden. Es ist daher zu empfehlen, bisher ungenutzte Standorte auf eine potentielle Wasserkraftnutzung hin zu untersuchen und bestehende Anlagen hinsichtlich ihrer Effizienz und Leistungsfähigkeit beständig zu verbessern.

5 Referenzen

[1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „EEG in Zahlen: Vergütungen, Differenzkosten und EEG-Umlage 2000 bis 2018," Berlin, 2017.

[2] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), „dena-Netzstudie I. Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020," Köln, 2005.

[3] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), „dena-Netzstudie II. Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025," Berlin, 2010.

[4] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), „dena-Verteilnetzstudie. Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030," Berlin, 2012.

[5] W. Ripl, „Studie zur ökologischen Bewertung von kleinen Wasserkraftanlagen," Berlin, 01/2004.

[6] S. Theobald, „Analyse der hessischen Wasserkraftnutzung und Entwicklung eines Planungswerkzeuges „WKA-Aspekte"," Kassel, 08/2011.

[7] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, „Potentialermittlung für den Ausbau der Wasserkraftnutzung in Deutschland als Grundlage für die Entwicklung einer geeigneten Ausbaustrategie," erstellt durch Ingenieurbüro Floecksmühle, IHS Universität Stuttgart, Hydrotec Ing.-GmbH, Fichtner GmbH & Co. KG, Aachen, 2010.

[8] Umweltbundesamt, „Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen," Dessau-Roßlau, 2010.

[9] E.ON Wasserkraft GmbH, Bayerische Elektrizitätswerke GmbH, „Potenzialstudie „Ausbaupotentiale Wasserkraft in Bayern" - Bericht aus Sicht der beiden großen Betreiber von Wasserkraftanlagen in Bayern," Landshut, Augsburg, 2009.

[10] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., „Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2015)," 2015.

[11] Fraunhofer ISE, „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland," Freiburg, 2018.

[12] 50 Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH, „Netzentwicklungsplan Strom," 2015.

[13] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., „Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2014 nach Energieträgern," 2015.

[14] T. Frank, „Stand und Potenziale zur Energieerzeugung aus Wasserkraft," Energietag Wasserwirtschaft, Wuppertal, 2013.

[15] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Erneuerbare Energien in Zahlen - Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2016," Berlin, 2017.

[16] J. Giesecke, S. Heimerl und E. Mosonyi, „Wasserkraftanlagen - Planung, Bau und Betrieb (6. Auflage)," Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2014.

[17] E-Werk Schweiger, „Tagesverlauf der Einspeiseleistung von Photovoltaik- und Wasserkraftanlagen".

[18] Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland, „Deutschlands Zukunft gestalten - Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD, 18. Legislaturperiode," Berlin, 2013.

[19] D. Weißbach et al., „Energy intensities, EROIs (energy returned on invested), and energy payback times of electricity generating power plants," *Energy,* pp. 210-221, 1 April 2013.

[20] Wissenschaftliche Dienste des deutschen Bundestages, „CO2-Bilanzen verschiedener Energieträger im Vergleich," Berlin, 2007.

[21] E-Bridge, IAEW, Offis, „Moderne Verteilernetze für Deutschland (Verteilernetzstudie)," 2014.

[22] P. Birkner, S. Küppers und M. Zdrallek, *Anforderungen und zukünftiger Bedarf für intelligente Netze in Deutschland,* Berlin, Offenbach: VDE Verlag, 2010.

[23] T. Wippenbeck, C. Matrose und A. Schnettler, *Nicht beobachtbare Innere Überlastsituationen in Niederspannungs-Verteilungsnetzen mit dezentralen Einspeisern und heute üblichen Schutzsystemen,* Würzburg: Tagungsband ETG Kongress, 2011.

[24] M. Zdrallek, *Intelligenz statt Kupfer!,* netzpraxis (Editorial), 9/2012.

[25] N. Neusel-Lange, C. Oerter, M. Zdrallek, S. Behrend, B. Mecking, P. Birkner, U. Dietzler und R. Schermuly, *Intelligentes Verteilungsnetzmanagement – Rückgrat für die Energiewende,* ew - Magazin für die Energiewirtschaft (Ausgabe 14/2013).

[26] Ausschuss für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung des Deutschen Bundestages, „Gefährdung und Verletzbarkeit moderner Gesellschaften – am Beispiel eines großräumigen und langandauernden Ausfalls der Stromversorgung," Berlin, 2011.

[27] Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, „Konzept zur Realisierung eines "Virtuellen Kraftwerks" in Nordrhein-Westfalen," 2014.

[28] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., „Flexibilisierung der Laufwasserkraftwerke in Bayern - Potenzialabschätzung der flexibel einsetzbaren Leistung in Laufwasserkraftwerken in Bayern - Endbericht," München, 2013.

[29] Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main.

[30] International Renewable Energy Agency (IRENA), Nennleistung der Kleinwasserkraftanlagen nach ausgewählten Ländern Europas im Jahr 2016.