

**Netztechnischer Beitrag  
von Kleinwasserkraftwerken zur  
Energiewende in Deutschland beispielhaft  
für Nordhessen**

Gutachten



**BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL**

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

22.02.2016

## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse .....	1
1 Einleitung.....	3
2 Beitrag der Kleinwasserkraft zur verlässlichen, regenerativen Erzeugung elektrischer Energie ....	4
2.1 Anteil der Kleinwasserkraft an der regenerativen Energieerzeugung in Nordhessen und Deutschland.....	5
2.2 Vorteile von Kleinwasserkraftwerken .....	5
3 Beitrag der Kleinwasserkraftwerke zur Reduzierung/Vermeidung des Netzausbaus auf Verteilnetzebene beispielhaft für Nordhessen .....	7
3.1 Einfluss der Energiewende auf die Mittel- und Niederspannungsnetze.....	7
3.2 Nutzen der Kleinwasserkraftwerke im Kontext der Energiewende .....	8
3.2.1 Netzdienliches Verhalten von dezentralen Einspeisern.....	8
3.2.2 Lokale Spannungsregelung durch Kleinwasserkraftwerke.....	9
3.2.3 Reduzierung von Netzverlusten .....	10
3.2.4 Beitrag von Kleinwasserkraftwerken zur Versorgungsqualität .....	10
3.2.5 Kleinwasserkraftwerke als Teilnehmer eines virtuellen Kraftwerks .....	10
3.2.6 Potentiale durch dynamische Stauraumbewirtschaftung .....	11
3.3 Konkrete Netzanalysen.....	12
3.3.1 Vorgehensweise der Netzanalysen .....	12
3.3.2 Untersuchtes Netzgebiet.....	12
3.3.3 Szenarienentwicklung.....	12
3.3.4 Ergebnisse der Netzanalysen.....	13
3.4 Kleinwasserkraftwerke in den Verteilnetzen Deutschlands.....	17
4 Referenzen .....	18

## Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse

Die Wasserkraft – und als deren Teil die Kleinwasserkraft – stellt seit Jahrzehnten als verlässlicher und kostengünstiger Energieträger einen wichtigen Bestandteil des Energiemixes in Deutschland, Europa und der Welt dar. Ihre Bedeutung wird im Zuge der fortschreitenden Energiewende weiter steigen, da sie eine zuverlässige und nicht-volatile regenerative Energiequelle darstellt. So hat auch die amtierende Bundesregierung bereits in ihrem Koalitionsvertrag die sogenannte „Grundlastfähigkeit der regenerativen Energien“ als einen wesentlichen nächsten Schritt auf dem Weg zu einer mehrheitlich regenerativen Energieversorgung beschrieben. Hier stellen die **Wasserkraftwerke aufgrund ihrer Verlässlichkeit einen wichtigen Bestandteil** dar. Da sich zurzeit in Deutschland aufgrund der rechtlich ökologischen Einschränkungen nur noch verhältnismäßig geringe neue Potentiale für Wasserkraftwerke erschließen lassen, gilt es, in jedem Fall bestehende Kapazitäten zu erhalten und bestmöglich zu nutzen.

Aber auch wegen ihres erheblichen netzdienlichen Verhaltens sind Kleinwasserkraftwerke in Deutschland von hoher Bedeutung: Denn durch die gleichmäßige Einspeisung der Kleinwasserkraftwerke können große regenerative Energiemengen bereitgestellt werden, ohne die Netze mit für Windenergie- und Photovoltaikanlagen typischen Leistungsspitzen zu belasten. So konnte im Rahmen des Gutachtens gezeigt werden, dass der Netzausbaubedarf – ein wesentlicher Kostentreiber der Energiewende – in Verteilnetzen bei Ersatz der Kleinwasserkraftwerke durch Windenergie- und Photovoltaikanlagen erheblich ansteigen würde: Unter den zugrunde gelegten Rahmenbedingungen müsste in den untersuchten, repräsentativen nordhessischen Mittelspannungsnetzen die Gesamtleitungslänge um ca. 14% ausgebaut werden, um weiterhin einen zuverlässigen Netzbetrieb zu gewährleisten, was mit Kosten in Höhe von etwa 3,1 Mio. EUR verbunden ist. Für in die Mittelspannungsebene einspeisende Kleinwasserkraftwerke konnte im Mittel ein **Ausbaufaktor** von etwa **840 EUR je kW Einspeiseleistung** bei Ersatz durch adäquate regenerative Energiequellen ermittelt werden. Dagegen spielt der Ausbaubedarf in den Niederspannungsnetzen eine untergeordnete Rolle. Durch eine Hochrechnung der Ergebnisse der im Rahmen des Gutachtens untersuchten, repräsentative Netze auf die gesamte **Region Nordhessen** lassen sich **Netzausbaukosten** im Mittel- und Niederspannungsnetz von fast **20 Mio. EUR**, für das **Bundesland Hessen** sogar in einer Größenordnung von **rund 90 Mio. Euro** bei Ersatz der Wasserkraft durch adäquate regenerative Energiequellen angeben.<sup>1</sup> Hinzu kommt möglicher weiterer Ausbaubedarf in den im Rahmen dieser Untersuchung nicht betrachteten Hochspannungs- und Transportnetzen. Dementsprechend würde die für eine erfolgreiche Energiewende notwendige weitere Integration von regenerativen Einspeisern deutlich erschwert. Schließlich müssten die resultierenden Netzausbaukosten unweigerlich durch **steigende Netznutzungsentgelte** und **damit steigende Strompreise** auf alle Verbraucher umgelegt werden.

Eine Außerbetriebnahme der Kleinwasserkraftwerke würde nicht nur die ohnehin schwierige Situation in vielen ländlichen Verteilnetzen weiter verschärfen, sondern auch bedeuten, dass man sich der in

---

<sup>1</sup> Hierbei ist zu berücksichtigen, dass durch die Inhomogenität der Netze, die konkrete Anschlussebene der regenerativen Erzeugungsanlagen sowie die örtlichen Gegebenheiten (ausgewiesene Windvorzugsflächen) Abweichungen möglich sind. Für eine exakte Ermittlung der Netzausbaukosten ist eine vollständige Überplanung aller betroffenen Verteilnetze erforderlich.

der **Regelbarkeit der Kleinwasserkraftwerke (Wirk- und Blindleistung) liegenden Möglichkeiten** beraubt. So leisten diese heute wichtige Beiträge zur lokalen Spannungshaltung bis hin zur möglichen Inselnetzfähigkeit, welche zukünftig im Rahmen eines großflächigen Blackouts der Energieversorgung für den Inselnetzbetrieb und den Netzwiederaufbau von großer Bedeutung sein könnte. Dieser wichtige zusätzliche Nutzwert kann in der Regel mit einfachen und wenig aufwendigen Modifikationen erzielt werden.

Nicht zuletzt **verringert eine verbrauchsnahe Erzeugung** aus Kleinwasserkraftwerken **die Verluste** in den elektrischen Versorgungsnetzen **erheblich** (in den untersuchten, repräsentativen Niederspannungsnetzen in Nordhessen um mehr als 4%, in den untersuchten, repräsentativen Mittelspannungsnetzen um fast 6%) und trägt damit zu einer weiteren Effizienzsteigerung der Verteilnetze bei.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Kleinwasserkraftwerke als **kostengünstiger und verlässlicher Energieträger in Zukunft** noch weiter an Bedeutung gewinnen werden. Sie **reduzieren sowohl den Netzausbaubedarf** auf Verteilnetzebene – gerade in den ländlichen Mittel- und Niederspannungsnetzen – **als auch die Netzverluste erheblich** und leisten damit einen **wertvollen Beitrag zu einer bezahlbaren Energiewende**.

Die Netztechnische Wirksamkeit der Wasserkraftwerke trifft in besonderem Maß für alle Bundesländer mit Mittelgebirgen zu, die in langer Tradition einen hohen Wasserkraftanteil aufweisen, mit Schwerpunkt in Bayern und Baden-Württemberg, aber auch in Hessen.

# 1 Einleitung

Weltweit finden erhebliche Veränderungen in der Art und Weise unserer Energieversorgung statt. In Deutschland ist ein grundsätzlicher Wandel der Energieversorgung bereits Realität, zudem gilt die Bundesrepublik mit weitreichenden Energiekonzepten über das Jahr 2050 hinaus sowie dem beschlossenen Ausstieg aus der Kernenergie als ein wesentlicher Antreiber der Energiewende.

Der Übergang von einer im Wesentlichen zentralisierten Energieversorgung durch große Kohle- und Kernkraftwerke hin zu einer zunächst mehrheitlich und später vollständig regenerativen Versorgung durch eine Vielzahl dezentraler Erzeugungsanlagen und wenige zentrale Kraftwerke stellt das Gesamtsystem Energieversorgung vor unterschiedlichste neue Anforderungen. Zwei wesentliche technische Probleme sind dabei als Kernaufgabe zu lösen, um die Energiewende weiter voran zu treiben: Einerseits müssen Speichertechnologien weiterentwickelt werden, um den regenerativen Strom zwischen zu speichern für Zeiten, in denen kein Wind weht und keine Sonne scheint. Andererseits muss die bestehende Struktur der Energieversorgungsnetze an die veränderten Randbedingungen angepasst werden. Heute vorliegende Netzstrukturen wurden vor vielen Jahren vor grundsätzlich unterschiedlichem Hintergrund geplant und sind für die aktuellen Anforderungen keinesfalls geeignet.

Während das sogenannte Transportnetz, das für einen effizienten, überregionalen Energietransport erforderlich ist, im Wesentlichen durch mehrere tausend Kilometer neuer Leitungen erweitert werden muss [1], [2], trifft das sogenannte Verteilnetz, das für den lokalen und regionalen Energietransport benötigt wird, und hier vor allem die Mittel- und Niederspannungsnetze, die unter jedem Bürgersteig verlegt sind und den Strom bis in die Haushalte und Gewerbegebiete verteilen, ein deutlich umfangreicherer Erweiterungsbedarf [3]: Neben unvermeidbarem Netzausbau, d.h. der Errichtung neuer Transformatoren und zusätzlicher Leitungen, müssen die bisher passiven Verteilnetze zu aktiven, automatisierten Verteilnetzen (sog. „Smart Grids“ bzw. „intelligenten“ Netzen) erweitert werden, so dass ein insgesamt aktives, automatisiertes elektrisches Netz über alle Spannungsebenen hinweg entsteht. Nur so lässt sich der kostspielige, konventionelle Netzausbau reduzieren – die „intelligenten“ Netze leisten also einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen einer bezahlbaren Energiewende.

Die elektrischen Netze allein sind jedoch kein Garantiegeber für eine erfolgreiche Energiewende. Vielmehr stellen sie das Rückgrat einer erneuerbaren, dezentralen Energieversorgung dar. Weitere elementare Bausteine der Energiewende 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.

Das vorliegende Gutachten befasst sich mit dem – aufgrund ihrer Verlässlichkeit – wichtigen Beitrag von Kleinwasserkraftwerken zur Energiewende in Nordhessen. Dabei steht die Bewertung von Kleinwasserkraftwerken 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 Kleinwasserkraftwerke hinsichtlich der Auswirkungen auf die Umwelt sowie eine Abschätzung etwaiger Ausbaupotentiale wurde bereits an anderer Stelle untersucht [4], [5], [6] und ist nicht Bestandteil des Gutachtens.

## 2 Beitrag der Kleinwasserkraft zur verlässlichen, regenerativen Erzeugung elektrischer Energie

Die Realisierung der Energiewende in Deutschland hat einen rasanten Zubau von regenerativen Erzeugungsanlagen zur Folge. Zu den für Deutschland relevanten Energieträgern zur Stromerzeugung zählen neben der Wasserkraft die Windenergie, die Photovoltaik und die sogenannte Biomasse. Da die in Deutschland vorhandenen Potentiale zur Nutzung von Wasserkraft zur Stromerzeugung durch rechtlich ökologische Vorgaben stark eingeschränkt sind, wird sich der weitere Zubau erneuerbarer Einspeiser auf Windenergie, Photovoltaik und Biomasse konzentrieren. Durch Modernisierung, Reaktivierung und Neubau von Wasserkraftanlagen könnte noch ein erhebliches zusätzliches Potential genutzt werden [6], [7], [8].

Insbesondere Windenergie- sowie Photovoltaikanlagen unterliegen aber einer sehr 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 über 2500 Jahresvolllaststunden, was einem Jahresnutzungsgrad von lediglich 19% bis 29% entspricht. Noch deutlicher zeigt sich dieser Umstand bei Photovoltaikanlagen mit – je nach Region – 700 bis max. 1000 Jahresvolllaststunden und einem Jahresnutzungsgrad von höchstens 12% [9]. Daher stellte die Photovoltaik im Jahr 2014 insgesamt lediglich einen Anteil von ca. 5,7% am Nettostromverbrauch bereit [9], verfügt allerdings gleichzeitig mit aktuell etwa 38,5 GW installierter Leistung [10] über den größten Anteil der regenerativen Einspeiser und sogar aller Kraftwerkstypen in Deutschland [11].

Demgegenüber verfügen Wasserkraftwerke im Durchschnitt über mehr als 4.500 Jahresvolllaststunden, was einem Jahresnutzungsgrad von mehr als 50% entspricht (vgl. [11], [12]). Kleinwasserkraftwerke erreichen in der Regel noch höhere Werte. Darüber hinaus sind Wasserkraftwerke hochverfügbar und damit im Mittel mehr als 8.000 Stunden pro Jahr in Betrieb und speisen kontinuierlich regenerative Energie in die Netze ein. Wasserkraftwerke sind damit zunächst den sogenannten Grundlastkraftwerken zuzuordnen, die eine stetige Stromerzeugung gewährleisten.

Bei Bedarf können Wasserkraftwerke aber auch als zuverlässige und verlässliche 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 Androsselung 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 Regelungspotential voll ausschöpfen (vgl. 3.2.6).

Bedingt durch den steigenden Anteil der fluktuierenden regenerativen Einspeiser wie Photovoltaik- und Windenergieanlagen im Kraftwerkspark ist eine verlässliche und gleichzeitig regelbare Bereitstellung elektrischer Energie umso wichtiger [7], die mit Hilfe von Kleinwasserkraftwerken als ein Baustein des Energieversorgungssystems lokal bereitgestellt werden kann.

## 2.1 Anteil der Kleinwasserkraft an der regenerativen Energieerzeugung in Nordhessen und Deutschland

In Deutschland produzieren insgesamt ca. 7300 bis 7600 Wasserkraftwerke Strom [6], [13]. Dabei wird zwischen großen Wasserkraftwerken mit einer installierten (elektrischen) Nennleistung von  $P_n > 1$  MW sowie Kleinwasserkraftwerken mit einer installierten Leistung von  $P_n \leq 1$  MW unterschieden. Zur Leistungsklasse  $P_n > 1$  MW zählen etwa 400 Wasserkraftwerke, demgegenüber stehen etwa 7.000 Kleinwasserkraftwerke. Der Anteil großer Wasserkraftwerke mit einer insgesamt installierten Leistung von 3,4 GW an der Gesamtstromerzeugung aus Wasserkraft beträgt dabei ca. 85%, Kleinwasserkraftwerke erzeugen mit einer insgesamt installierten Leistung von 0,65 GW ca. 15% der Gesamtstrommenge aus Wasserkraft. [6]

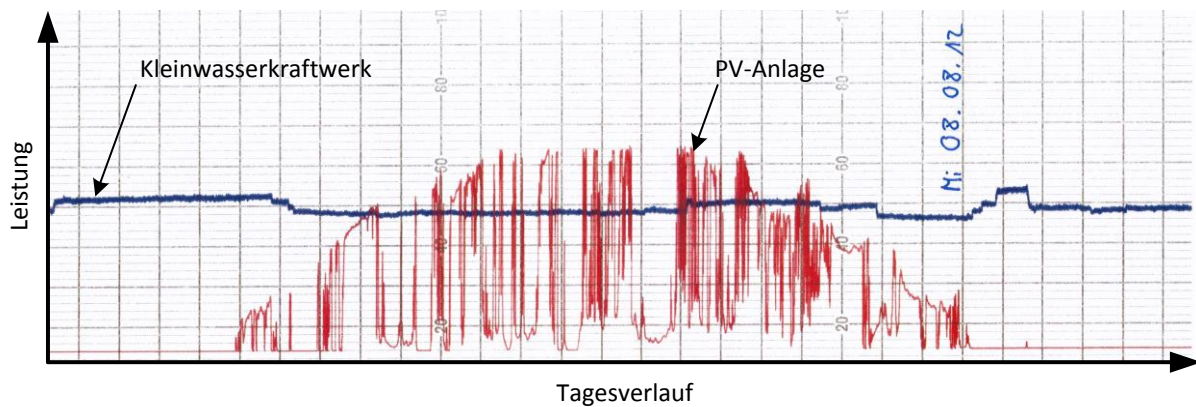
Aktuell werden in Deutschland etwa 30% des Stroms aus erneuerbaren Energieträgern gewonnen (vgl. [9], [12]). Obwohl lediglich ca. 4,1 GW installierter Leistung auf die Wasserkraft entfallen [6], erzeugen sie einen Anteil von über 3,3% an der gesamten Bruttostromerzeugung [9]. Dies entspricht zugleich etwa 12% der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern [12].

In Hessen sind ca. 620 Wasserkraftwerke installiert, 2% gehören dabei zur Leistungsklasse  $P_n > 1$  MW, 98% der Anlagen sind Kleinwasserkraftwerke [5]. Die Wasserkraftwerke hatten im Jahr 2013 einen Anteil von etwa 1,5% an der gesamten Bruttostromerzeugung [14] [15] und einen Anteil von etwa 8% an der Bruttostromerzeugung aus regenerativen Energieträgern. Etwa 490 der 620 hessischen Wasserkraftwerke sind dabei EEG-relevante Anlagen mit einer gesamten installierten Leistung von ca. 107 MW [16]. Auf die Region Nordhessen entfallen dabei etwa 220 EEG-relevante Wasserkraftanlagen mit einer installierten Leistung von 24 MW und einer mittleren jährlichen Stromerzeugung von ungefähr 75 GWh im Laufe der letzten Jahre [16].

## 2.2 Vorteile von Kleinwasserkraftwerken

Zwar ist der Bau und Betrieb von Wasserkraftwerken ähnlich wie bei vielen übrigen (regenerativen) Kraftwerkstypen mit einem Eingriff in die Natur verbunden, gleichzeitig besitzen Wasserkraftwerke aber einige wesentliche Vorteile für die Stromerzeugung [4], [6], [17]. Daher muss grundsätzlich zwischen ökonomischen und ökologischen Kosten und Nutzen abgewogen werden. Insbesondere ist hervorzuheben, dass die Kleinwasserkraftwerke wesentlich zur verlässlichen regenerativen Stromerzeugung beitragen und daher im zukünftigen Energiekonzept der Bundesrepublik Deutschland keinesfalls vernachlässigt werden dürfen.

Die bereits dargestellte hohe Anzahl von Jahresvolllaststunden gilt für Wasserkraftwerke allgemein. Kleinwasserkraftwerke erreichen in der Regel mehr als 5.000 Volllaststunden/Jahr (vgl. [5]). Bei mehr als 8.000 Betriebsstunden/Jahr [6], [12], [5] leisten Kleinwasserkraftwerke somit einen grundlastfähigen Beitrag zur elektrischen Energieversorgung in Deutschland. Abbildung 2.1 zeigt einen typischen Tagesverlauf einer Photovoltaik- und einer Kleinwasserkraft-Einspeisung im Vergleich. Während das Photovoltaik-Einspeiseprofil neben der zu erwarteten Leistungsspitze in den Mittagsstunden auch viele kleine Spitzen und Einbrüche aufweist, die sich allgemein nicht mit dem Leistungsbedarf decken, ist der Leistungsverlauf von Wasserkraftanlagen stetig.



**Abbildung 2.1: Vergleich der eingespeisten Leistung zwischen Photovoltaik-Anlage und Kleinwasserkraftwerk [18]**

Da sich Einspeisung und Last zu jedem beliebigen Zeitpunkt exakt ausgleichen müssen, folgen die konventionellen Kraftwerke durch Regelungsprozesse bislang der momentan benötigten Leistung. Mit Fortschreiten der Energiewende nimmt allerdings der Anteil der dargebotsabhängigen Einspeiser drastisch zu, sodass die Verfügbarkeit der regenerativen Einspeiser erheblich an Bedeutung gewinnt. So hat auch die amtierende Bundesregierung die zunehmende Wichtigkeit der verlässlichen regenerativen Einspeisung erkannt und bereits im Koalitionsvertrag die sogenannte „Grundlastfähigkeit der regenerativen Energien“ als einen der notwendigen nächsten Schritte im Rahmen der Energiewende genannt [19].

Neben Biomasseanlagen spielen die Wasserkraftwerke und insbesondere auch die Kleinwasserkraftwerke als hochverfügbare [17], verlässliche und regelbare regenerative Energiequelle eine wesentliche Rolle, um einen Leistungsausgleich zwischen Bereitstellung und Bedarf elektrischer Energie herzustellen. Zum einen können dezentrale Kleinwasserkraftwerke zum Leistungsbilanzausgleich im Rahmen der Sekundärregelung und Minutenreserve eingesetzt werden: Je nach installierter Leistung der Kleinwasserkraftwerke ist hierbei allerdings zur Erreichung der heutigen Mindestangebotsgröße für die Regelleistungsbereitstellung eine Zusammenfassung mehrerer Kraftwerke zu einem virtuellen Kraftwerk erforderlich. Zum anderen kann aber auch ein Teil des notwendigen Speicher- und Ausgleichsbedarfs zur Überbrückung von wind- und sonnenarmen Tagen durch entsprechend geregelte Kleinwasserkraftwerke gedeckt und damit die hohen verknüpften Kosten reduziert werden.

Für den Einsatz von Wasserkraftanlagen sprechen zudem die langjährige Betriebserfahrung und deren im Vergleich zu anderen regenerativen Technologien einfache und robuste Konstruktion. Diese reduziert den Wartungsaufwand erheblich, zudem ist die Konstruktion im Allgemeinen für einen sehr langen Betriebszeitraum von in der Regel mehr als 50 Jahren ausgelegt. Ein weiterer wesentlicher Vorteil der Wasserkraft sind die auf den sehr langen Betriebszeitraum bezogenen niedrigen Stromerzeugungskosten, insbesondere, da mit durch die EEG-Umlage stetig steigenden Strompreisen auch die Bezahlbarkeit der Energiewende immer mehr in den Mittelpunkt der öffentlichen Diskussion rückt. Zwar sind die Investitionskosten bei der Errichtung der Kleinwasserkraftwerke aufgrund der wasserbaulichen Arbeiten gegebenenfalls höher als bei konventionellen Kraftwerken, jedoch entstehen während der gesamten Betriebszeit eines Kleinwasserkraftwerks faktisch keine Primärenergiekosten. Lediglich Instandhaltungskosten sowie ggfs. Modernisierungskosten müssen während der Betriebszeit berücksichtigt werden.



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 generell, aber auch bei Kleinwasserkraftwerken im Speziellen extrem hoch im Vergleich zu allen anderen Energieerzeugungsformen [17].

Die Kleinwasserkraft stellt damit insgesamt einen sehr verlässlichen, stetigen und erneuerbaren Energieträger mit äußerst geringen Betriebskosten dar. Die Stromerzeugung erfolgt gänzlich ohne Ausstoß von Treibhausgasen.

### **3 Beitrag der Kleinwasserkraftwerke zur Reduzierung/Vermeidung des Netzausbaus auf Verteilnetzebene beispielhaft für Nordhessen**

Im Kontext der Energiewende und der hiermit verknüpften Integration von Windenergie- und Photovoltaikanlagen erwachsen neue Anforderungen an die Verteilnetze. Während die Netze bislang für eine Verteilung der von vergleichsweise wenigen Großkraftwerken erzeugten elektrischen Energie konzipiert wurden, müssen diese nun die Energie regenerativer Einspeiser aufnehmen: Aus Verteilnetzen werden also immer mehr „Einsammelnetze“ – eine Aufgabe, für die die Verteilnetze nicht ausgelegt wurden.

#### **3.1 Einfluss der Energiewende auf die Mittel- und Niederspannungsnetze**

Zwar stehen in der öffentlichen Wahrnehmung vielfach die Übertragungsnetze im Mittelpunkt der Diskussion, allerdings erfahren Verteilnetze, zu denen sowohl die 110 kV-Hochspannungsnetze sowie die Mittel- und Niederspannungsnetze zählen, aus netztechnischer Sicht durch die Energiewende einen mindestens ebenso großen Wandel [3], [20]. Dies gilt besonders für ländliche Verteilnetze, in denen der größte Teil der regenerativen Einspeiser angeschlossen ist. Gerade der erhebliche Zubau der Photovoltaik, 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:

Die gemäß Norm geforderte Spannungsqualität, insbesondere die Spannungshöhe, kann zeitweise, bedingt durch eine hohe Windenergie- oder Photovoltaik-Einspeisung in Verbindung mit einer gleichzeitig geringen Verbraucherlast, nicht mehr eingehalten werden. Dies führt zu unerwünschten Abschaltungen einzelner dezentraler Einspeiser, zu Ausfällen einzelner Netzbereiche oder im schlimmsten Fall sogar zu Defekten an Endkundengeräten oder Netzkomponenten. Darüber hinaus können auch Überlastungen innerhalb des Netzes bedingt durch besonders hohe Einspeiseleistungen auftreten. In diesen Fällen ist es erforderlich, das Netz mit Hilfe von 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. Damit fallen hohe Kosten für den Netzausbau bei einer insgesamt nur geringen mittleren Auslastung des Netzes an [21], [22].

Insbesondere bei konventionellem Netzausbau ist mit erheblichen Kosten für Komponenten und Erweiterungsarbeiten zu rechnen, die zu einem Großteil auf Tiefbauarbeiten für die Verlegung von Kabeln zurückzuführen sind – ein Faktor, der eine Erweiterung der Netzkapazität, die lediglich zu wenigen Zeitpunkten im Jahr vollständig benötigt wird, schnell unwirtschaftlich werden lässt [23]. Als Alternative zu konventionellen Netzausbaumaßnahmen können durch intelligente Netze einerseits Netzausbaukosten gespart, andererseits die bereits bestehende Netzkapazität optimal ausgenutzt werden [23], [24]. 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 Kleinwasserkraftwerke im Kontext der Energiewende**

Kleinwasserkraftwerke wurden bisher im Wesentlichen als stetige Grundlast-Einspeiser wahrgenommen. 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 lassen sich die Kleinwasserkraftwerke ohne wesentlichen zusätzlichen Aufwand in die entstehenden intelligenten Netze integrieren und können somit für verschiedene netzdienliche Funktionen erschlossen werden.

Intelligente Verteilnetze werden zukünftig eine Vielzahl von netzdienlichen Funktionen übernehmen, die bisher aufgrund der fehlenden Informations- und Kommunikationstechnik auf Verteilnetzebene nur auf der Transportnetzebene zur Verfügung standen [24]. Durch die hohe Anzahl an dezentralen Kleinwasserkraftwerken in Verbindung mit der hohen Anzahl an Jahresvolllast- und Betriebsstunden können gerade Kleinwasserkraftwerke einen wertvollen, da im Vergleich zu anderen dezentralen Einspeisern 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 Kleinwasserkraftwerke unterstützend beitragen können.

### **3.2.1 Netzdienliches Verhalten von dezentralen Einspeisern**

Für die Umsetzung der Energiewende ist es entscheidend, den zur Gewährleistung eines normgerechten Betriebs der Verteilnetze erforderlichen Ausbau möglichst kosteneffizient zu gestalten. Während konventioneller Netzausbau unter Einsatz von zusätzlichen Kabeln und leistungstärkeren 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. Kleinwasserkraftwerken als zuverlässige, hochverfügbare und regelbare Einspeisungen kommt dabei eine wichtige Bedeutung zu.

### 3.2.2 Lokale Spannungsregelung durch Kleinwasserkraftwerke

Die aktuell bedeutendste Problematik gerade im ländlichen Verteilnetz ist die Gewährleistung der erforderlichen Spannungsqualität, insbesondere hinsichtlich der Spannungshöhe. Gemäß der Norm DIN EN 50160 ist eine Spannung im Bereich von  $\pm 10\%$  um die Nennspannung von 230V/400V 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 insbesondere in Zusammenspiel mit der historisch bedingten Auslegung der Netze für den Starklastfall zeitweise zu einer Überschreitung dieses Toleranzbereichs kommen, die dann zu unerwünschten Abschaltungen dezentraler Einspeiser oder schlimmstenfalls zu spannungsbedingten Defekten bei angeschlossenen Netzteilnehmer führen. Durch die kontinuierliche und gleichmäßige Einspeisung können Kleinwasserkraftwerke viel mehr Energie einspeisen, ohne das Toleranzband zu überschreiten.

Neben den sogenannten regelbaren Ortsnetztransformatoren, die in ein intelligentes Niederspannungsnetz eingebunden werden können und für eine teilweise Entkopplung der Spannung in Mittel- und Niederspannungsnetz sorgen und damit auch eine teilweise 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. Eine Bereitstellung von Blindleistung durch Kleinwasserkraftwerke kann die lokale Spannungshaltung und damit die Gewährleistung einer ausreichenden Spannungsqualität nachhaltig unterstützen. Durch eine Blindleistungsregelung bleibt die eingespeiste Wirkleistung in vollem Umfang erhalten.

Die Wirksamkeit der Blindleistungsregelung ist jedoch von der Netztopologie, d.h. dem konkreten Aufbau des jeweiligen Netzes abhängig und dementsprechend in einigen Fällen sehr effektiv, in anderen Fällen wiederum kann durch die Blindleistungsregelung allein die Spannungshaltung nicht gewährleistet werden.

Als weitere Möglichkeit zur lokalen Spannungsregelung bietet sich daher die Wirkleistungsregelung dezentraler Einspeiser an: Durch eine kurzzeitige Reduzierung der eingespeisten Leistung können Spannungsspitzen vermieden werden. Dadurch geht prinzipiell ein entsprechender Anteil an regenerativer Wirkleistung verloren, jedoch ist die Regelungsmöglichkeit grundsätzlich sehr effektiv, im Regelfall nur von kurzer Dauer und vermeidet Netzausbaukosten in erheblichem Maße. Sofern im Netz installierte Kleinwasserkraftwerke intelligent geregelt werden können, entsteht damit ein höheres Potential an Photovoltaik-Anschlussmöglichkeiten ohne zusätzlichen Netzausbau.

Die Kleinwasserkraftwerke unterstützen zudem die Spannungshaltung in Zeiten schwacher Photovoltaik-Einspeisung bei erhöhter Last. Durch eine zusätzliche Nutzung von Energiespeichern könnte eine derartige, wirkleistungsbasierte Spannungsregelung noch effektiver ablaufen: die eingespeiste Leistung von Windkraft-, PV- oder Wasserkraftanlagen wird nicht abgeregelt, sondern in einem Energiespeicher wie beispielsweise Batterien zwischengespeichert. Bei geringer Photovoltaik- oder Windenergieeinspeisung und erhöhter Last kann die gespeicherte Energie dann wieder in das Netz eingespeist werden.

Kleinwasserkraftwerke 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

Durch den Transport von Energie über weite Strecken sind Übertragungsverluste unvermeidbar. Eine wesentliche Chance 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 dezentraler und verbrauchsnahe die Einspeisung ist, desto geringer sind die Netzverluste. Auch hier kommt den Kleinwasserkraftwerken also eine wichtige Bedeutung zu.

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 Kleinwasserkraftwerken tragen diese damit grundsätzlich zu einer Reduzierung der über weitere Strecken zu übertragenden (Ausgleichs-)Energienmenge bei und reduzieren somit die Netzverluste auf allen Spannungsebenen des Energieversorgungssystems.

### 3.2.4 Beitrag von Kleinwasserkraftwerken zur Versorgungsqualität

Die Zuverlässigkeit der elektrischen Energieversorgung ist sowohl für Privatkunden, aber in noch größerem Maße für Handwerk, Gewerbe, Industrie- und Landwirtschaftsbetriebe von hoher Bedeutung. In der Vergangenheit ist es zu einigen größeren Versorgungsunterbrechungen aufgrund von Störungen auf der Transportnetzebene gekommen. In einem Energiesystem, das mehrheitlich auf eine regenerative Energieerzeugung setzt, müssen zukünftig die dezentralen Einspeiser die gewohnt hohe Versorgungsqualität gewährleisten.

Insbesondere beim Versorgungswiederaufbau nach einem großflächigen Netzausfall (sogenannter Blackout) kommt verlässlichen, weil stetigen Einspeisern wie Kleinwasserkraftwerken 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“ [25] treffend erkennt. Hier soll zukünftig – im Fall eines großflächigen Blackouts – ausgehend von kleinen, stabilen Versorgungsinseln aus, die beispielsweise durch virtuelle Kraftwerke (vgl. Abschnitt 3.2.5) aufgebaut und gestützt werden, das Gesamtsystem wiederaufgebaut werden.

Hier können Kleinwasserkraftwerke – bei ausreichender Leistungsfähigkeit und geringfügigen Modifikationen – durch ihre prinzipielle Inselnetzfähigkeit und die Versorgung wichtiger Verbraucher bzw. kritischer Infrastruktur (z.B. Feuerwehr, Krankenhaus etc.) einen wertvollen Beitrag leisten.

### 3.2.5 Kleinwasserkraftwerke als Teilnehmer eines virtuellen Kraftwerks

Durch die Zusammenfassung mehrerer dezentraler Einspeiser insbesondere mit verschiedenen Energieträgern zu einem virtuellen Kraftwerk kann ein wesentlicher Beitrag zur Lösung für eine der zentralen Herausforderungen der Energiewende geleistet werden. 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. Virtuelle Kraftwerke können Gesamtwirkungsgrade von über 90% erreichen [26].

Virtuelle Kraftwerke werden umso effizienter und flexibler einsetzbar, je diverser das Einspeiseportfolio des Kraftwerksverbunds aufgebaut ist. Neben Photovoltaik- und Windenergie-Anlagen sowie steuerbaren Verbrauchern und Energiespeichern haben vor allem auch Kleinwasserkraftwerke aufgrund der sehr guten Integrationsfähigkeit in intelligente Netzsysteme, der verlässlichen und steuerbaren Einspeisung, der faktisch nicht vorhandenen Primärenergiekosten und der damit geringen Betriebskosten ihren berechtigten Platz im virtuellen Kraftwerk. Durch die kontinuierliche Einspeisung leisten sie einen wichtigen Beitrag zur Grundlastfähigkeit und Regelbarkeit des virtuellen Kraftwerks (vgl. [26]).

### **3.2.6 Potentiale durch dynamische Stauraumbewirtschaftung**

Die ohnehin sehr gute Regelbarkeit der Kleinwasserkraftwerke lässt sich nochmals steigern, wenn die Potentiale der sogenannten dynamischen Stauraumbewirtschaftung genutzt werden können. 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 [27].

Die zunehmende Integration der volatilen Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien erfordert neben den bereits dargestellten Herausforderungen für den Netzbetrieb auch eine weitergehende Betrachtung möglicher Speichertechnologien. Die Wasserkraft kann in diesem Zusammenhang durch Pumpspeicherkraftwerke und Laufwasserkraftwerke mit dynamischer Stauraumbewirtschaftung zur Speicherung von Energie verwendet werden, die erst im Moment des Bedarfs wieder in Form elektrischer Energie bereitgestellt wird. Vorteilhaft ist bei der dynamischen Stauraumbewirtschaftung auch, dass zur Einspeicherung der Energie keine Energiewandlung erforderlich ist, wodurch der Wirkungsgrad eines Speichervorgangs steigt.

Aus rechtlicher Sichtweise sollte geklärt werden, ob eine dynamische Stauraumbewirtschaftung ermöglicht werden kann, um weitere erhebliche Regelenergiepotentiale durch Kleinwasserkraftwerke erschließen zu können.

### 3.3 Konkrete Netzanalysen

Im Folgenden soll am Beispiel der Region Nordhessen gezeigt werden, wie die Kleinwasserkraftwerke zur Reduzierung von Netzausbaukosten und Netzverlusten beitragen. Möglich wird dies, indem der Status quo der Einspeisesituation mit dem hypothetischen Entfall von installierten Kleinwasserkraftwerken aus dem Erzeugungsmix verglichen wird.

#### 3.3.1 Vorgehensweise der Netzanalysen

Zu diesem Zweck wird nach Auswahl geeigneter Netzstrukturen eine detaillierte Netznachbildung durchgeführt. Als Grundlage für umfangreiche und aussagefähige Analysen dient eine Szenarienentwicklung für die Lasten und Einspeiser, mit deren Hilfe Zielnetzplanungen sowohl für die aktuelle Einspeisesituation mit als auch eine hypothetische ohne Kleinwasserkraftwerke durchgeführt werden können. Hierbei werden zwei Betriebspunkte „Starkeinspeisung bei minimaler Last“ und „Starklast ohne Einspeisung“ in die Leistungsflussberechnungen einbezogen, die eine Analyse der Spannungshaltung, der Betriebsmittelauslastung, der Wirk- und Blindleistungsflüsse sowie der Netzverluste in den auslegungsrelevanten Belastungsfällen des Netzes erlaubt. Im Anschluss werden die Ergebnisse der Netzberechnungen auf das Gebiet Nordhessen sowie Hessen insgesamt hochgerechnet und für einen technischen und wirtschaftlichen Vergleich der Zielnetzplanungen mit und ohne Wasserkraftwerke herangezogen.

#### 3.3.2 Untersuchtes Netzgebiet

Konkret wurden in einem Gebiet mit einer Fläche von etwa 200 km<sup>2</sup> Mittelspannungsnetze mit insgesamt sechs Mittelspannungsabgängen sowie eine Ortschaft mit fünf Niederspannungsnetzen (ca. 40 ha) durch einen regionalen Netzbetreiber ausgewählt, die für Netzstrukturen in Nordhessen mit einem hohen Anteil von (Klein-)Wasserkraftwerken repräsentativ sind. Hierdurch entsteht eine ausreichend hohe Datenbasis, um mit Hilfe von Hochrechnungen Gesamtaussagen für die Netze Nordhessens und schließlich auch das gesamte hessische Netzgebiet treffen zu können.

#### 3.3.3 Szenarienentwicklung

Während Kleinwasserkraftwerke 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 dem untersuchten Netzgebiet Wasserkraftwerke mit einer installierten Leistung von etwa 3,7 MW in der Mittelspannungsebene und in den untersuchten Niederspannungsnetzen zwei Kleinwasserkraftwerke mit zusammen etwa 56 kW angeschlossen.

Unter der Annahme, dass keine Kleinwasserkraftwerke zur Verfügung stehen und die im Jahresverlauf durch die Kleinwasserkraftwerke in den betrachteten Netzen eingespeiste regenerative Energie ersatzweise durch Windenergie- für das Mittelspannungsnetz bzw. Photovoltaik-Anlagen für die Niederspannungsnetze bereitgestellt werden müsste, ergäbe sich folgende Situation:

Bei einer angenommenen Volllaststundenzahl von 5.500 pro Jahr für die Wasserkraftwerke ergibt sich eine eingespeiste regenerative Energie von ca. 20,4 GWh/Jahr in der Mittelspannungsebene, die nun von Windenergieanlagen erzeugt werden muss. Für diese wird ein Mittelwert von 1.650 Jahresvolllaststunden angesetzt, der leicht über den Mittelwerten der vergangenen Jahre für Windenergieanlagen

in Hessen liegt, um technologischen Fortschritten der Anlagen Rechnung zu tragen. Somit ergibt sich eine installierte Summenleistung von etwa 12,5 MW. Zur Definition eines realistischen Zubauszenarios werden fünf Windenergieanlagen mit je 2,5 MW auf die untersuchten Mittelspannungsabgänge verteilt.

Entsprechend sind in den untersuchten Niederspannungsnetzen Photovoltaik-Anlagen (1000 Jahresvolllaststunden) mit einer installierten Leistung von insgesamt 310 kW vorzusehen, um die Kleinwasserkraftwerke energetisch zu ersetzen (vgl. Abbildung 3.1). Hierzu werden insgesamt 27 Photovoltaikanlagen mit für die Siedlungsstruktur typischen installierten Leistungen zwischen 7 kW und 30 kW verteilt. Hierbei sind noch keine gegebenenfalls zusätzlich geplanten Anlagen, die im Rahmen der Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien im Erzeugungsmix ohnehin in die Netze zu integrieren sind, berücksichtigt.

### 3.3.4 Ergebnisse der Netzanalysen

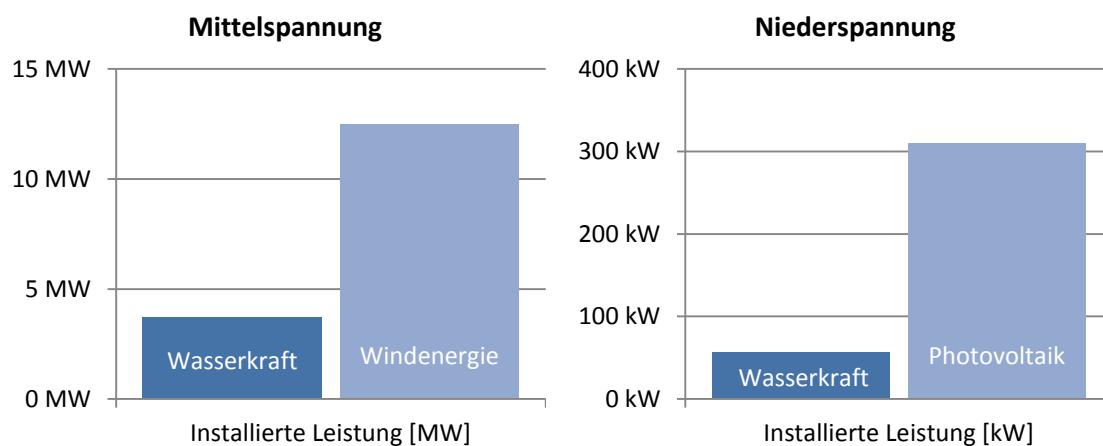


Abbildung 3.1: Vergleich der installierten Leistung der Wasserkraftwerke mit dem erforderlichen Ersatzausbau

Um einen normgerechten Netzbetrieb zu gewährleisten, müssen die Mittel- und Niederspannungsnetze in der untersuchten Region in Nordhessen mit neuen Leitungen erweitert werden. Lediglich zwei der fünf in der Mittelspannungsebene anzuschließenden Windenergieanlagen rufen keinerlei Zustandsverletzungen hervor. Für die drei übrigen betrachteten Anlagen sind hingegen in der Mittelspannungsebene neue Kabel (in Form von Stützpunktleitungen) mit einer Länge von insgesamt ca. 25 km zu verlegen. Dies entspricht einem Erweiterungsbedarf der bestehenden Netzlänge um etwa 14% (siehe Abbildung 3.2). Hieraus resultieren Investitionskosten von etwa 3.100.000 EUR für die Erweiterung des Umspannwerkes, die Kabel und notwendige Tiefbaumaßnahmen. In den untersuchten Niederspannungsnetzen werden insgesamt ca. 330m zusätzlicher oder neuer Leitungen (in Form neuer Stützpunktleitungen und der Verstärkung bestehender Leitungen) benötigt, mit denen Investitionskosten in Höhe von ca. 29.000 EUR verbunden sind.

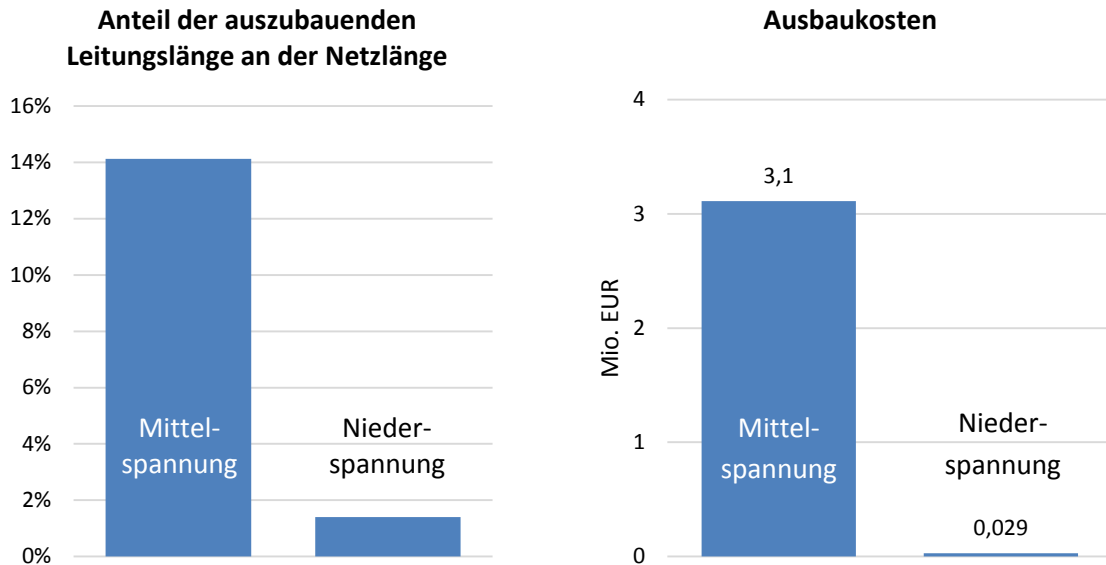


Abbildung 3.2: Vergleich der Ergebnisse der Netzplanung von Mittel- und Niederspannungsnetzen

Die ausgewählten und untersuchten Mittel- und Niederspannungsnetze können als repräsentative ländliche Verteilnetze in der Region Nordhessen angesehen werden. Damit lassen sich vereinfacht zwei Investitionskostenfaktoren ableiten, die für eine Abschätzung der zusätzlichen Netzausbaukosten für die Region Nordhessen heran gezogen werden sollen: Bei Ersetzung der Wasserkraftwerke im untersuchten Mittelspannungsnetz mit einer installierte Leistung von 3,70 MW ergibt sich der spezifische Investitionskostenfaktor zu etwa 840 EUR/kW installierter Wasserkraftwerksleistung (siehe Abbildung 3.3). Für die Niederspannungsnetze mit einer installierten Leistung von Wasserkraftwerken von etwa 50 kW liegt der spezifische Investitionskostenfaktor bei Ersetzung der Wasserkraftwerke auf vergleichbarem Niveau bei ca. 510 EUR/kW installierter Kleinwasserkraftwerksleistung. Hierbei wurden etwaige Netzanschlusskosten auf Seiten der Betreiber der dezentralen Erzeugungsanlagen noch nicht berücksichtigt.

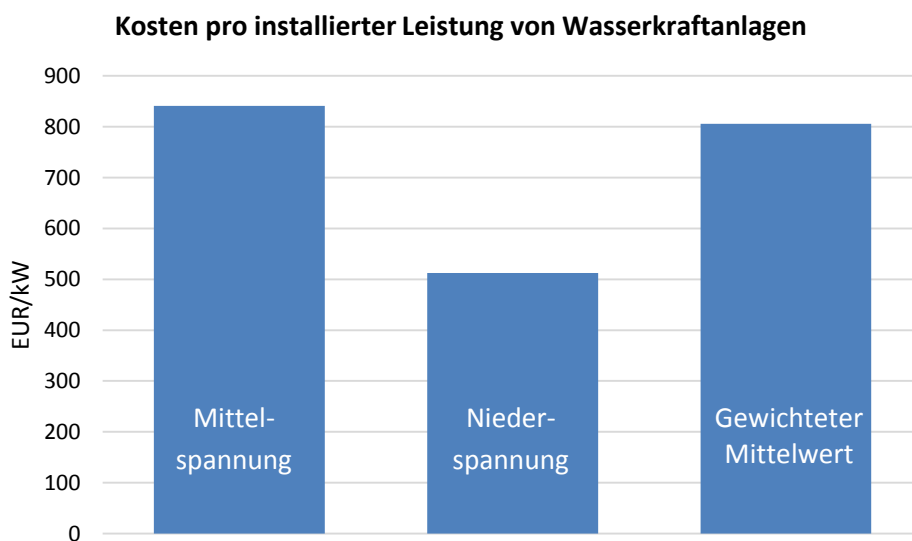


Abbildung 3.3: Spezifische Netzausbaukosten bei dem Ersatz von Wasserkraftanlagen durch adäquate regenerative Energiequellen (Windenergieanlagen (Mittelspannung) bzw. Photovoltaikanlagen (Niederspannung)) sowie der nach Anschlussleistung gewichtete Mittelwert



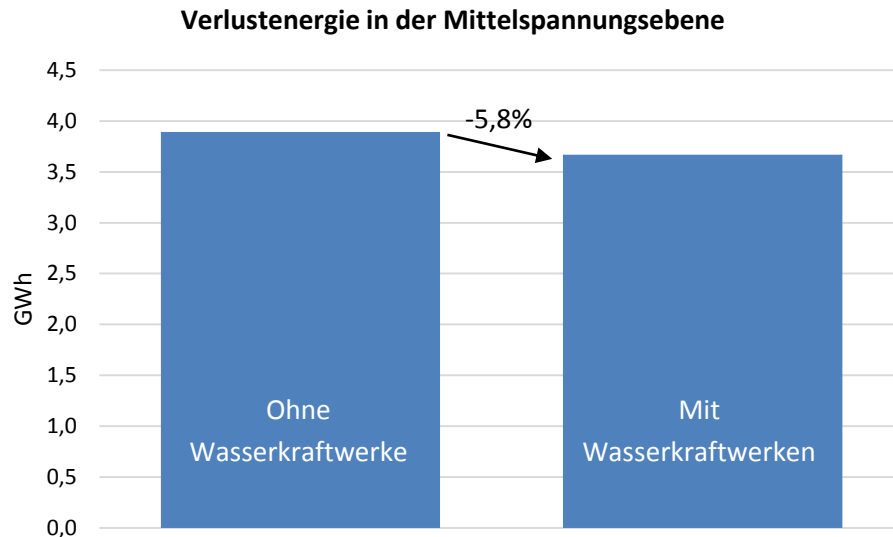
Nach [5] tragen Wasserkraftanlagen mit einer installierten Leistung der Wasserkraftwerke bis zu 100kW, die vorwiegend in der Niederspannungsebene angeschlossen werden, in Hessen mit etwa 10,6% zur gesamten installierten Leistung bei. Gerade durch die vergleichsweise geringen installierten Leistungen gepaart mit der Dezentralität dieser Anlagen kann ein Teil der Grundlast und des Energiebedarfs der jeweiligen Niederspannungsnetzwerke lokal gedeckt werden, ohne dass hohe Rückspeiseleistungen in die überlagerten Ebenen wiederum hohe Netzausbaukosten verursachen. Bei Wahl eines geeigneten Netzanschlusspunktes tragen die dezentralen Wasserkraftwerke demnach zur Sicherung der Netzstabilität innerhalb der Anschlussspannungsebene bei, indem die Spannungshaltung entlang der Leitungen unterstützt wird.

Die übrigen Wasserkraftwerke, die mit 89,4% zur installierten Leistung beitragen, werden vorwiegend in der Mittelspannungsebene angeschlossen. Über eine Wichtung ergeben sich insgesamt die mittleren spezifischen Ausbaukosten bei Ersatz der Wasserkraftwerke zu etwa 800EUR/kW installierter Leistung von Wasserkraftwerken.

Unterstellt man hypothetisch, dass diese insgesamt installierte Wasserkraftwerksleistung von 24 MW in der Region Nordhessen [16] durch andere regenerative Energien aus Windkraft und Photovoltaik ersetzt würden, resultieren daraus zusätzliche Ausbaukosten des Verteilnetzes in einer Höhe von etwa 19 Mio. EUR. Für das Bundesland Hessen mit einer installierten Leistung der Wasserkraftwerke von 107 MW [16] ergeben sich demzufolge zusätzliche Investitionskosten von ungefähr 86 Mio. EUR. Hieraus ist ersichtlich, dass die kleinen Wasserkraftwerke einen nicht unbedeutenden Anteil der erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung haben und einen wertvollen Beitrag allein durch Begrenzung des Netzausbaubedarfs der hessischen Verteilnetze liefern. Insbesondere arbeiten die bereits vorhandenen, in das Netz integrierten Kleinwasserkraftwerke aufgrund ihrer beständigen Einspeisung netzverträglich, sodass die bestehenden Verteilnetzstrukturen für die Einspeisung von Strom aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen besser ausgenutzt werden können

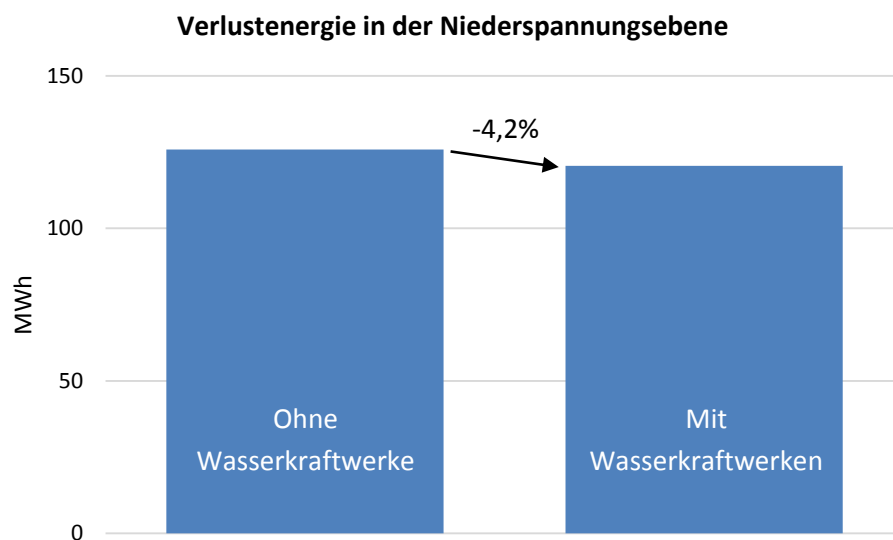
Ein weiterer Vorteil der dezentral einspeisenden kleinen Wasserkraftwerke sind die vermiedenen Stromverluste des Netzes:

Durch die lokale Wasserkrafteinspeisung in Verbrauchernähe kann die aus dem vorgelagerten 110kV-Netz bezogene Leistung in den untersuchten Mittelspannungsnetzen um bis zu 3,7 MW reduziert werden, sodass aufgrund des dann niedrigeren Betriebsstroms auf den Mittelspannungsleitungen die Netzverluste sinken. Dieser Effekt ist umso größer, je besser die Dimensionierung der Wasserkraftanlagen auf der lokalen Lastsituation entspricht. Wird ein Berechnungsszenario mit hoher Verbraucherlast bei gleichzeitig geringer Photovoltaik-Einspeisung angenommen, so sinken die Netzverluste durch Betrieb der Wasserkraftwerke um bis zu ca. 34kW Momentanleistung. Nimmt man in einem aus der Volllaststundenanzahl der Wasserkraftwerke abgeschätzten konservativen Ansatz eine kontinuierliche Reduzierung der Netzverluste um 26kW an, so ergibt sich im gesamten Jahr eine um mindestens 225 MWh verringerte Verlustenergie von etwa 3.670 MWh für die untersuchten, repräsentativen Mittelspannungsnetze. Das entspricht einer Reduzierung der Netzverluste um etwa 5,8% (siehe Abbildung 3.4). Bei durchschnittlichen Energiebeschaffungskosten von 6ct/kWh für die Verlustenergie ergeben sich Kostenersparnisse in Höhe von etwa 13.500EUR/Jahr. Auf das gesamte Gebiet von Hessen übertragen beläuft sich die jährliche Kostenersparnis auf etwa 380.000 EUR.



**Abbildung 3.4:** Vergleich der Netzverluste unter Berücksichtigung bzw. Vernachlässigung von Kleinwasserkraftwerken in Mittelspannungsnetzen

Auch in den untersuchten Niederspannungsnetzen lässt sich ein entsprechender Einfluss auf die Verlustleistung ermitteln. Dort reduziert sich die Verlustleistung im Starklastfall in Situationen ohne Photovoltaikeinspeisung in Summe um etwa 0,8 kW Momentanleistung, was einer Verlustleistungsreduktion um mehr als 4 % entspricht (siehe Abbildung 3.5). Für die untersuchten Niederspannungsnetze entspricht dies mit dem bereits für die Mittelspannung beschriebenen Ansatz einer jährlichen Verlustreduktion um etwa 5 MWh und auf das gesamte Gebiet von Hessen übertragen etwa 150 MWh/Jahr (9.000 EUR/Jahr).



**Abbildung 3.5:** Vergleich der Netzverluste unter Berücksichtigung bzw. Vernachlässigung von Kleinwasserkraftwerken in Niederspannungsnetzen

Darüber hinaus würden bei hypothetischen Ersetzung der Wasserkraftwerke durch Windenergieanlagen bzw. Photovoltaikanlagen die Netzverluste zu Zeiten hoher Einspeisung aufgrund der hohen Momentanleistung überproportional ansteigen – vielfach übersteigt die Einspeisung dann die Last, sodass durch den Abtransport der Energie zum überlagerten Hochspannungsnetz wiederum vergleichsweise

hohe Netzverluste anfallen. Zusätzlich könnte hierbei auch im Hochspannungsnetz zusätzlicher Ausbaubedarf entstehen, der durch den Einsatz von Wasserkraftwerken vermieden wird.

### **3.4 Kleinwasserkraftwerke in den Verteilnetzen Deutschlands**

Insgesamt lässt sich für Kleinwasserkraftwerke eine erhebliche netzdienliche Wirksamkeit nachweisen. Der Grad der Wirksamkeit von Kleinwasserkraftwerken beispielsweise zur Reduzierung des Netzausbaubedarfs oder der Reduktion von Netzverlusten hängt von der Anzahl, der Leistung und der Position der Kleinwasserkraftwerke innerhalb eines Netzes ab und ist somit grundsätzlich netzindividuell. In jedem Fall bilden die Kleinwasserkraftwerke eine verlässliche, grundlastfähige, dezentrale Einspeisung. In einer zunehmend regenerativen Energieversorgung werden zudem die dargestellten netzdienlichen Nutzungsweisen noch bedeutender, weil die kleinen Wasserkraftwerke einen Teil der positiven und negativen Regelleistung bzw. Ausgleichsenergie erbringen können, die bislang durch die allmählich wegfallenden konventionellen Großkraftwerke erbracht wurden

Die Kleinwasserkraftwerke sind deswegen durch die hohe Verfügbarkeit sowie ihre Regelfähigkeit eine verlässliche Stromeinspeisung und bilden durch die zukünftige Integration in intelligente Netze und virtuelle Kraftwerke einen wichtigen Baustein zur Realisierung einer bezahlbaren und zugleich zuverlässigen Energiewende in Deutschland.

## 4 Referenzen

- [1] 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.
- [2] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), „dena-Netzstudie II. Integration erneuerbarer Energien in die deutsche Stromversorgung im Zeitraum 2015 – 2020 mit Ausblick 2025,“ Berlin, 2010.
- [3] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), „dena-Verteilnetzstudie. Ausbau- und Innovationsbedarf der Stromverteilnetze in Deutschland bis 2030,“ Berlin, 2012.
- [4] W. Rippl, „Studie zur ökologischen Bewertung von kleinen Wasserkraftanlagen,“ Berlin, 01/2004.
- [5] S. Theobald, „Analyse der hessischen Wasserkraftnutzung und Entwicklung eines Planungswerkzeuges „WKA-Aspekte“,“ Kassel, 08/2011.
- [6] 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.
- [7] Umweltbundesamt, „Energieziel 2050: 100% Strom aus erneuerbaren Quellen,“ Dessau-Roßlau, 2010.
- [8] 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.
- [9] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V., „Erneuerbare Energien und das EEG: Zahlen, Fakten, Grafiken (2015),“ 2015.
- [10] H. Wirth, „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland,“ Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, 2015.
- [11] 50 Hertz Transmission GmbH, Amprion GmbH, TenneT TSO GmbH, TransnetBW GmbH, „Netzentwicklungsplan Strom,“ 2015.
- [12] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., „Bruttostromerzeugung in Deutschland von 1990 bis 2014 nach Energieträgern,“ 2015.
- [13] T. Frank, „Stand und Potenziale zur Energieerzeugung aus Wasserkraft,“ Energietag Wasserwirtschaft, Wuppertal, 2013.
- [14] Hessisches Statistisches Landesamt, „Statistik-Hessen.de: Bruttostromerzeugung nach Energieträgern und Nettostromverbrauch nach Abnehmergruppen,“ [Online]. Available: <http://www.statistik-hessen.de/themenauswahl/industrie-bau-handwerk-energie/landesdaten/energieversorgung/bruttostromerzeugung-nach-energetraegern-und-nettostromverbrauch-nach-abnehmergruppen/index.html>. [Zugriff am 17.12.2015].

- [15] Hessisches Statistisches Landesamt, „Statistik-Hessen.de:Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern,“ [Online]. Available: <http://www.statistik-hessen.de/themenauswahl/industriebau-handwerk-energie/landesdaten/energieversorgung/stromerzeugung-aus-erneuerbaren-energieeraegern/index.html>. [Zugriff am 17.12.2015].
- [16] cdw Stiftungsverbund gGmbH - Energiewende Nordhessen, „Daten zur Strombereitstellung erneuerbarer Energien Deutschland, Hessen und Nordhessen (Stand 05/15),“ Mai 2015. [Online]. Available: [http://www.energiewende-nordhessen.com/fileadmin/fm-dam/energiewende-nordhessen/dokumente/20150528\\_Daten\\_zur\\_Strombereitstellung\\_Energiekompas.pdf](http://www.energiewende-nordhessen.com/fileadmin/fm-dam/energiewende-nordhessen/dokumente/20150528_Daten_zur_Strombereitstellung_Energiekompas.pdf). [Zugriff am 07. Dezember 2015].
- [17] J. Giesecke, S. Heimerl und E. Mosonyi, „Wasserkraftanlagen - Planung, Bau und Betrieb (6. Auflage),“ Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [18] E-Werk Schweiger, „Tagesverlauf der Einspeiseleistung von Photovoltaik- und Wasserkraftanlagen“.
- [19] Bundesregierung der Bundesrepublik Deutschland, „Deutschlands Zukunft gestalten - Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD, 18. Legislaturperiode,“ Berlin, 2013.
- [20] E-Bridge, IAEW, Offis, „Moderne Verteilernetze für Deutschland (Verteilernetzstudie),“ 2014.
- [21] P. Birkner, S. Küppers und M. Zdrallek, *Anforderungen und zukünftiger Bedarf für intelligente Netze in Deutschland*, Berlin, Offenbach: VDE Verlag, 2010.
- [22] 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.
- [23] M. Zdrallek, *Intelligenz statt Kupfer!*, netzpraxis (Editorial), 9/2012.
- [24] 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).
- [25] 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.
- [26] Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, „Konzept zur Realisierung eines "Virtuellen Kraftwerks" in Nordrhein-Westfalen,“ 2014.
- [27] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., „Flexibilisierung der Laufwasserkraftwerke in Bayern - Potenzialabschätzung der flexibel einsetzbaren Leistung in Laufwasserkraftwerken in Bayern - Endbericht,“ München, 2013.
- [28] L. Spitalny, D. Unger und J. Myrzik, *Potential of Small Hydro Power Plants for Delivery Ancillary Services in Germany*, Lissabon, Portugal: CIRED Workshop, Paper 0129, 2012.
- [29] D. Unger, L. Spitalny und J. Myrzik, *Voltage Control by Small Hydro Power Plants Integrated into a Virtual Power Plant*, Cleveland, Ohio, USA: IEEE EnergyTech, 2012.
- [30] Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V., „Auswertungstabellen zur Energiebilanz Deutschland 1990 bis 2014,“ 2015.

- [31] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen; Bundeskartellamt, „Monitoringbericht 2014,“ 2014.
- [32] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2014,“ 2015.