

Technische Hochschule Nürnberg
Studiengang Maschinenbau Energietechnik

Projektarbeit

Potenzialanalyse eines Merra2-Sektors mit Schwerpunkt Laufwasserkraftwerke

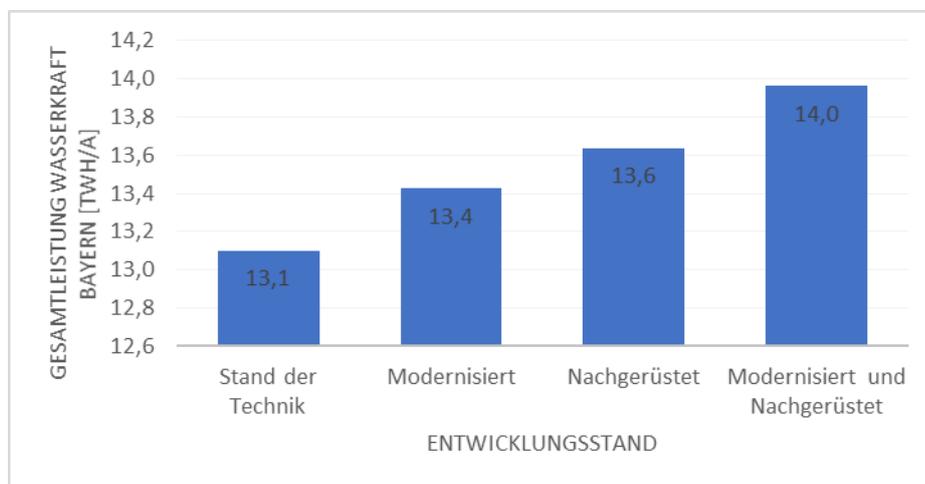


Abbildung 1: Wasserkraftpotenzial Bayern

Thema:	Potenzialanalyse eines Merra2-Sektors bezüglich seiner erneuerbaren Energiequellen mit dem Schwerpunkt auf die Modernisierung und den Ausbau von Laufwasserkraftwerken
Akronym:	ModernLaufwa
E-Mail:	kai@tbergner.de
Autor:	Bergner, Kai
Abgabedatum:	18.12.2019
Betreuer:	Herr Prof. Dr. Matthias Popp

Abstract

Basierend auf den erneuerbaren Energien Solarenergie, Windenergie, Biomasse und Laufwasser wird eine zukünftige Stromversorgung der Europäischen Metropolregion Nürnberg modelliert. Mit drei gängigen Speicher-Ansätzen wird eine möglichst ökonomische Prognose gestellt.

Schwerpunkt der Betrachtung sind Laufwasserkraftwerke und deren Modernisierungs- und Ausbaupotenzial. Nach Analyse des Ist-Zustandes werden mögliche technische Modernisierungen genannt und auf deren Stromentstehungskosten eingegangen. Das Ausbaupotenzial wird anhand einer Jahresdauerlinie erläutert.

Inhalt

Inhalt.....	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Formelverzeichnis	V
1 Allgemein	1
2 Einführung	2
3 Potenzialanalyse eines Merra-2 Sektors	4
3.1 Windkraft.....	4
3.2 Solarenergie	4
3.3 Laufwasser.....	5
3.4 Biomasse.....	8
3.5 Verbrauch	8
3.6 Speichertechnologien.....	9
3.7 Zusammenfassung	10
4 Modernisierung und Ausbau	11
4.1 Technischer Zustand.....	11
4.2 Technische Modernisierung	12
4.3 Stromentstehungskosten	14
4.4 Optimierung anhand einer Jahresdauerlinie	15
5 Zusammenfassung	18
6 Eidesstattliche Erklärung	19
Literaturverzeichnis	20

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wasserkraftpotenzial Bayern	I
Abbildung 2: Strommix Bayern 2016	1
Abbildung 3: Strommix erneuerbare Energien Bayern 2016	2
Abbildung 4: Merra-2 Raster.....	3
Abbildung 5: Windleistung Winter	4
Abbildung 6: Windleistung Sommer	4
Abbildung 7: Solarleistung Sommer	5
Abbildung 8: Solarleistung Winter.....	5
Abbildung 9: Jahresdauerlinie Regnitz.....	6
Abbildung 10: Laufwasserleistung Sommer	7
Abbildung 11: Laufwasserleistung Hochwasser	7
Abbildung 12: Laufwasserleistung Winter.....	8
Abbildung 13: Stromverbrauch Durchschnitt	9
Abbildung 14: Stromverbrauch Feiertage	9
Abbildung 15: Benötigter Ausbau	10
Abbildung 16: Baujahr, Revisionsjahr und Ende der wasserrechtlichen Zulassung.....	12
Abbildung 17: WKAs differenziert nach Ende der EEG-Vergütung	12
Abbildung 18: Vergleich Stromentstehungskosten mit EEG-Vergütung 2014	14
Abbildung 19: Stromentstehungskosten von modernisierten Anlagen	15
Abbildung 20: Jahresdauerlinie Main-Donau-Kanal.....	16
Abbildung 21: Wirkungsgradverlauf verschiedener Turbinen.....	17
Abbildung 22: fiktive Ausbauleistung.....	17

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Speicherkonzepte.....	10
Tabelle 2: Technische Daten Kraftwerk Hirschaid	13
Tabelle 3: Modellierungswerte	16

Formelverzeichnis

1.....	14
--------	----

1 Allgemein

Mit dem Kohle- und Atomausstieg hat sich Deutschland ein klares Ziel gesetzt. Weg von fossilen und nuklearen Brennstoffen und hin zu erneuerbaren und umweltschonenden Energiequellen. Doch mit diesem Entschluss kommt eine grundlegende Umstellung unserer Energieversorgung, was vor allem auch einen Einschnitt in unsere Gesellschaft und Wirtschaft darstellt. Doch die Energiewende ist keinesfalls in kurzer Zeit durchsetzbar, vielmehr handelt es sich hier um ein Mehrgenerationenprojekt, welches ein zielstrebiges Arbeiten über die nächsten Jahrzehnte abverlangt. (BMWi 2019a).

Stand 2016 wurden in Bayern bereits 43,8 % der Stromerzeugung auf erneuerbare Energien gestützt. Durch den geplanten Wegfall der Kernenergie (Stand 2016: 38,0 %) kommt ein enormes Defizit auf die bayerische Energieversorgung zu. Deshalb ist es unabdingbar die bereits sehr gut ausgebauten regenerativen Energiequellen noch weiter zu fördern. Die folgenden Abbildungen veranschaulichen den Strommix in Bayern im Jahr 2016 und gliedern die erneuerbaren Energien weiter in deren Erzeugung auf. (BMU 2016).

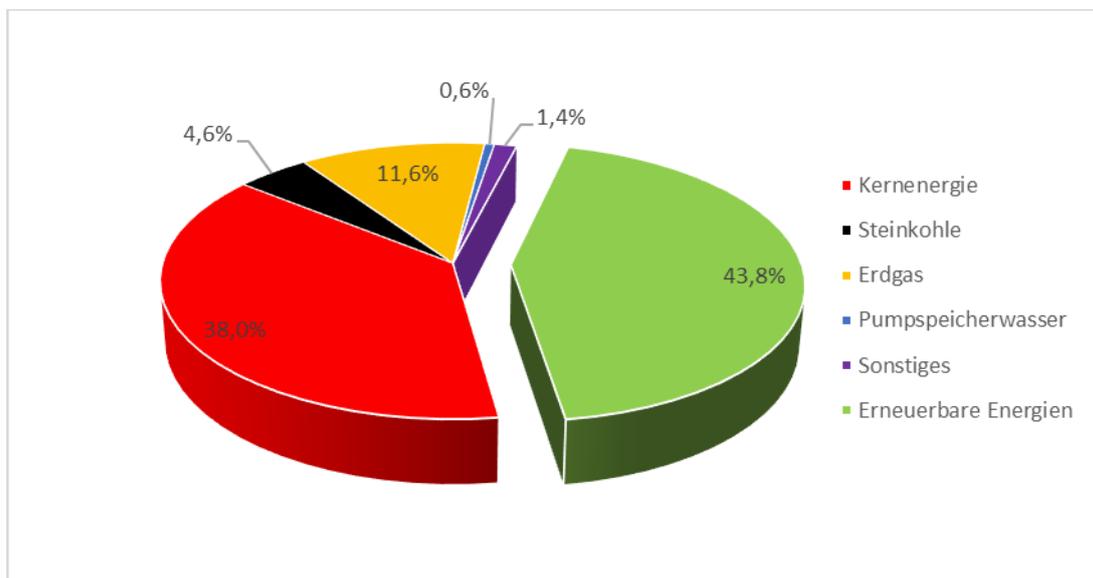


Abbildung 2: Strommix Bayern 2016

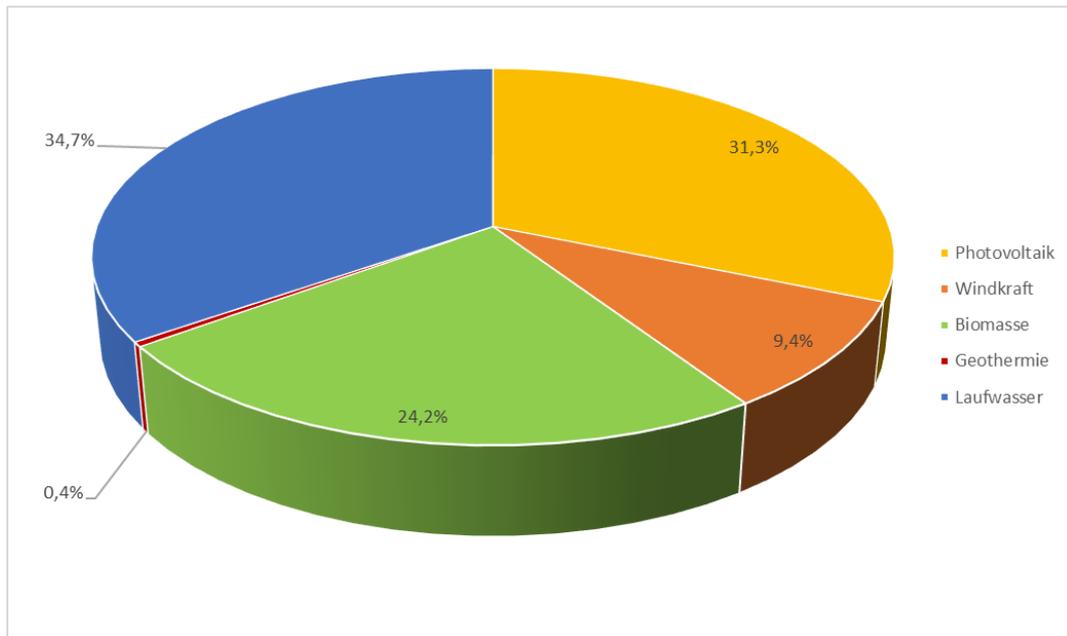


Abbildung 3: Strommix erneuerbare Energien Bayern 2016

2 Einführung

Im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit werden die vier unten genannten Forschungsfragen behandelt:

- In welchem Maß ist das Wasserkraftpotenzial in der Metropolregion Nürnberg bereits ausgeschöpft?
- Wie weit kann durch Modernisierung und Ausbau bereits bestehender Wasserkraftanlagen eine Leistungssteigerung erreicht werden?
- Wie können Altbestände ökologisch und ökonomisch ausgebaut werden?
- Wie gestaltet sich die Potenzialausnutzung erneuerbarer Energien in dem gewählten Merra2-Sektor?

Die ersten drei Forschungsfragen bilden das Schwerpunktthema dieser Arbeit und sollen einzelne Aspekte von Laufwasserkraftwerken gezielt aufgreifen und behandeln.

Für die letzte Forschungsfrage wurde die Europäische Metropolregion Nürnberg in Sektoren aufgeteilt und von den Projektteilnehmern einzeln auf verschiedene regenerative Energien untersucht. Im Folgenden wird der Merra-2-Sektor C2 des abgebildeten Rasters behandelt. Hierfür wurden anhand von zahlreichen Berechnungen in den Bereichen Windenergie, Solarenergie, Laufwasser, Biomasse, Speichermöglichkeiten und Stromverbrauch ein Modell entwickelt, in welchem die EMN mit grünem Strom versorgt werden kann.

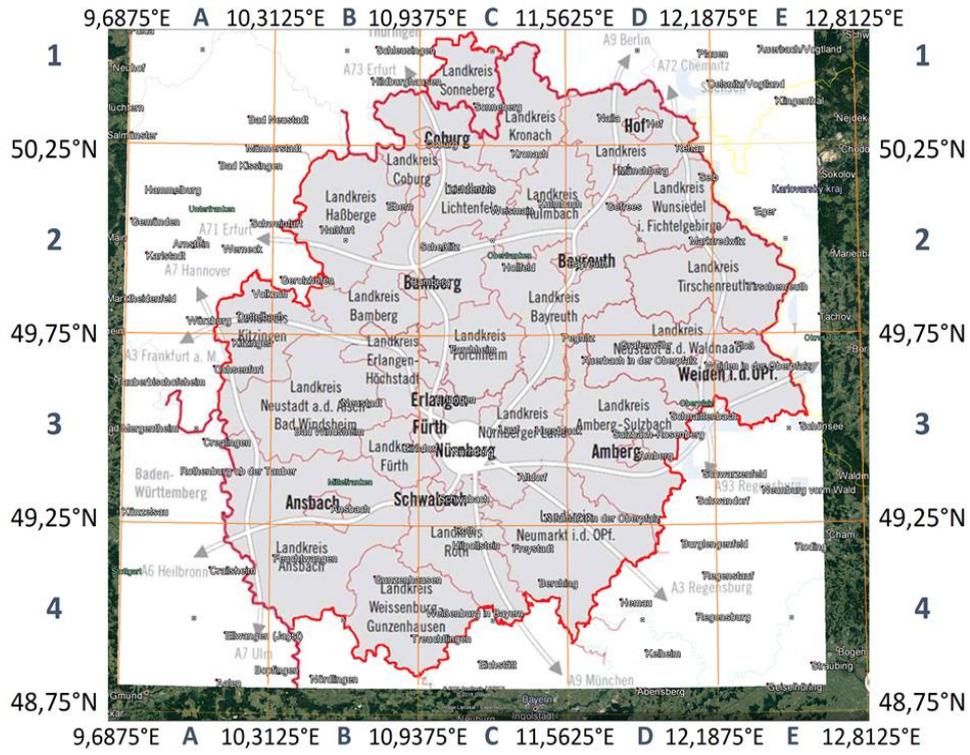


Abbildung 4: Merra-2 Raster

3 Potenzialanalyse eines Merra-2 Sektors

3.1 Windkraft

Für die Potenzialanalyse der Windkraft im Sektor wurde der Korrekturfaktor zu 80 % bestimmt. Betrachtet werden nur Windkraftanlagen mit einer Nabenhöhe von 160 m. Wie es für erneuerbare Energie typisch ist, zeigt auch die prognostizierte Windkraftleistung eine hohe Fluktuation. Generell lässt sich über den Jahresverlauf zeigen, dass viel Windpotenzial im Sektor ungenutzt bleibt und die theoretische Leistung weit über der genutzten Windleistung liegt. Dieser Sachverhalt wird in der folgenden Abbildung veranschaulicht.

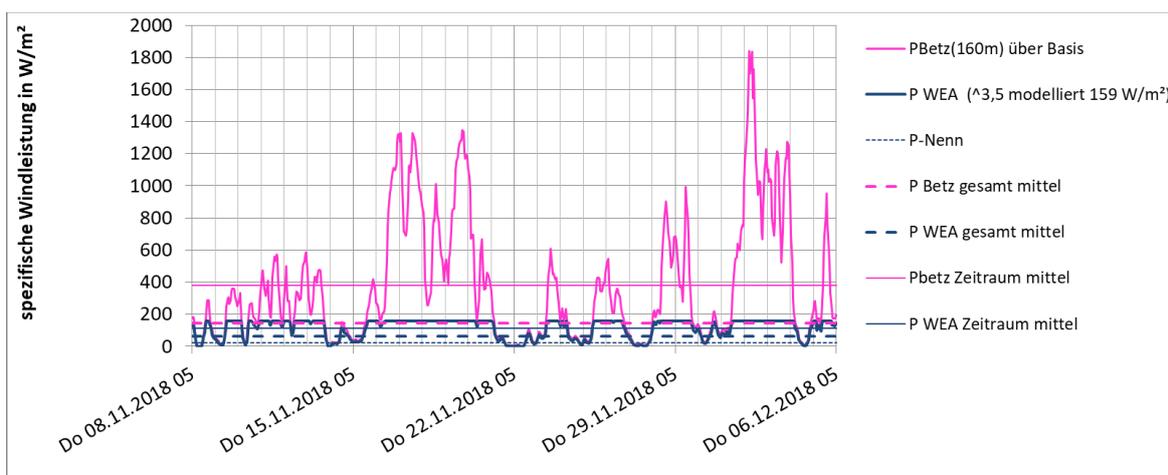


Abbildung 5: Windleistung Winter

Über den Sommer hinweg kommt es jedoch öfters zur Flaute, weshalb die spezifische Windleistung zeitweise abfällt.

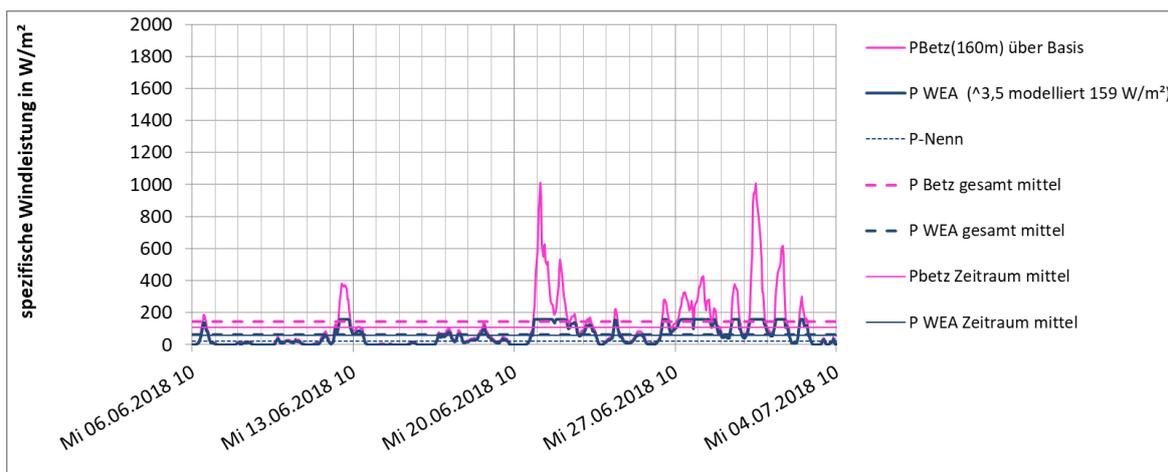


Abbildung 6: Windleistung Sommer

3.2 Solarenergie

Die abgebildeten Graphen zeigen den Verlauf der spezifischen Solarleistung im Sommer und Winter. Solarenergie ist an die Sonnenstunden gebunden, was bedeutet, dass in der Nacht keine

Leistung abgegriffen werden kann. Des Weiteren ist die spezifische Leistung im Winter wesentlich geringer, als im Sommer, was sich auf den Neigungswinkel und den Abstand von Sonne zu Erde zurückführen lässt. Zudem wird die Leistung im Winter zusätzlich durch Wolken abgeschwächt.

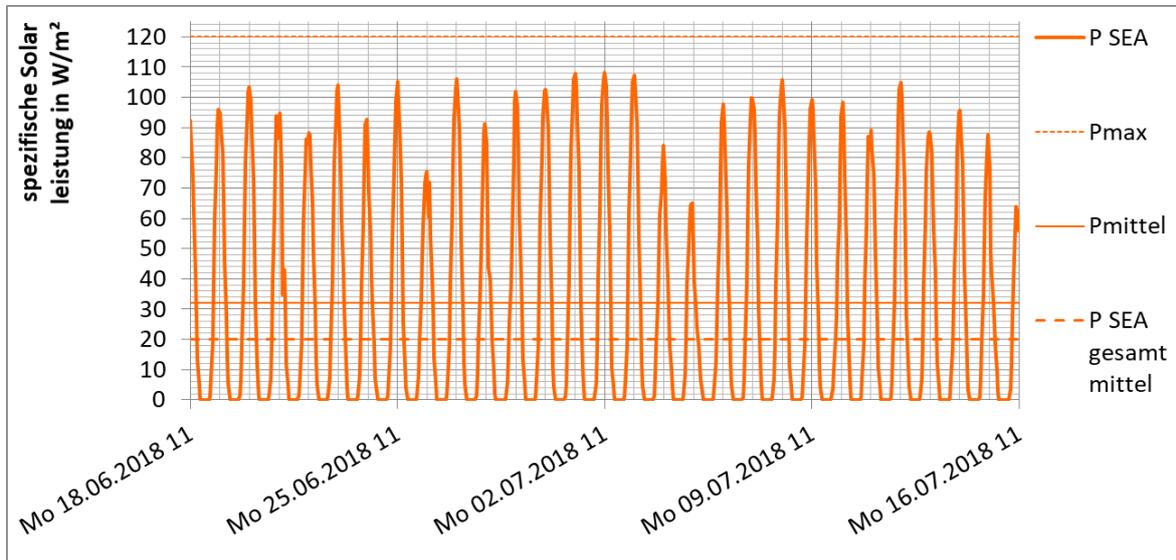


Abbildung 7: Solarleistung Sommer

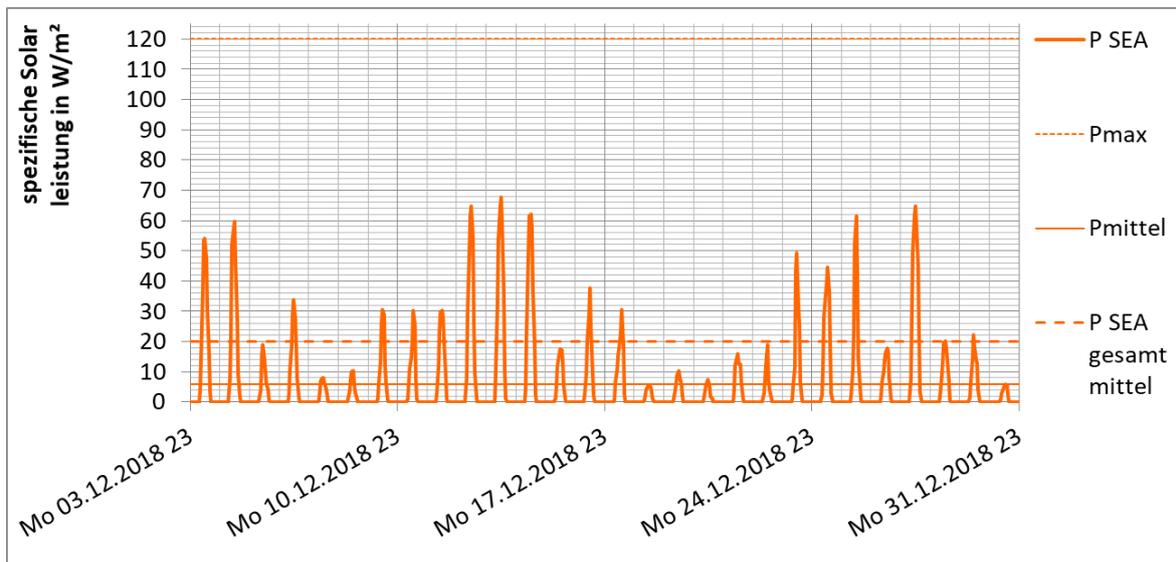


Abbildung 8: Solarleistung Winter

3.3 Laufwasser

Für die Ermittlung der Laufwasserleistung im Sektor wurden zunächst alle relevanten Fließgewässer in größeren Flüssen zusammengefasst. Dies hat ergeben, dass es genügt die Abflüsse von Main, Regnitz und Wiesent an den Sektor-Grenzen zu analysieren. Über die Datenbank des Gewässerkundlichen Dienstes Bayerns konnten die Abflüssen an den gewählten Messstellen für das Jahr 2018 bezogen werden. Dividiert man den Jährlichen Abfluss eines Flusses durch die Summe aller drei jährlichen Abflüssen erhält man den Laufwasseranteil im

jeweiligen gebiet. Den größten Laufwasseranteil im Sektor C2 hat die Regnitz mit 64,4 %, danach folgen der Main mit 28,2 % und die Wiesent mit 7,4 %. Für die Berechnung muss eine Bypass-Menge von 1 m³/s berücksichtigt werden (Guntram Ebel, Arne Gluch, Martin Kehl 2015, S. 45). Die Einschaltleistung wurde so gewählt, dass auch bei geringen Durchflüssen bereits Strom eingespeist werden kann. Anhand der Jahresdauerlinie konnte in guter Näherung die Ausbauleistung für jeden Fluss bestimmt werden.

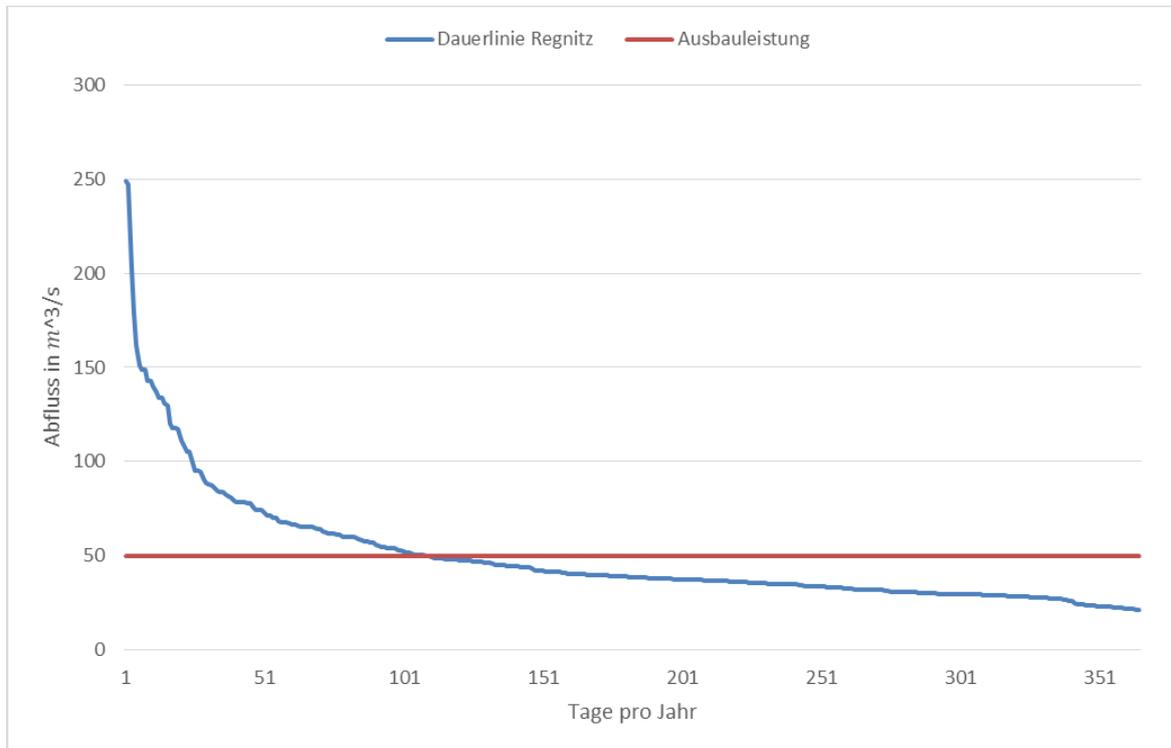


Abbildung 9: Jahresdauerlinie Regnitz

Abschließend müssen noch Verluste und Ausfälle bei Hochwasser berücksichtigt werden. Steigt der Pegel des Unterwassers zu weit an, genügt die Höhendifferenz zum Oberlauf nicht mehr um die Turbinen zu betreiben.

Bei Betrachtung der Laufwasserleistung im Sektor C2 werden 100 % Laufwasserleistung als jährlicher Durchschnitt angenommen. Dementsprechend liegt bei 160 % die obere Leistungsgrenze für das Laufwasser. Ähnlich wie bei anderen erneuerbaren Energien ist eine starke Fluktuation zu beobachten. Jedoch unterscheidet sich die Laufwasserleistung von anderen regenerativen Energien durch die Intervalle der Fluktuation. Generell sind die Abflüsse der einzelnen Flüsse träge und ändern sich vor allem in Abhängigkeit der Jahreszeit. Wie in den Abbildungen gezeigt stellt sich im Sommer ein mittlerer Leistungswert von gerade einmal 70 % ein, was nicht ausreichend ist um Laufwasserkraftwerke zu betreiben.

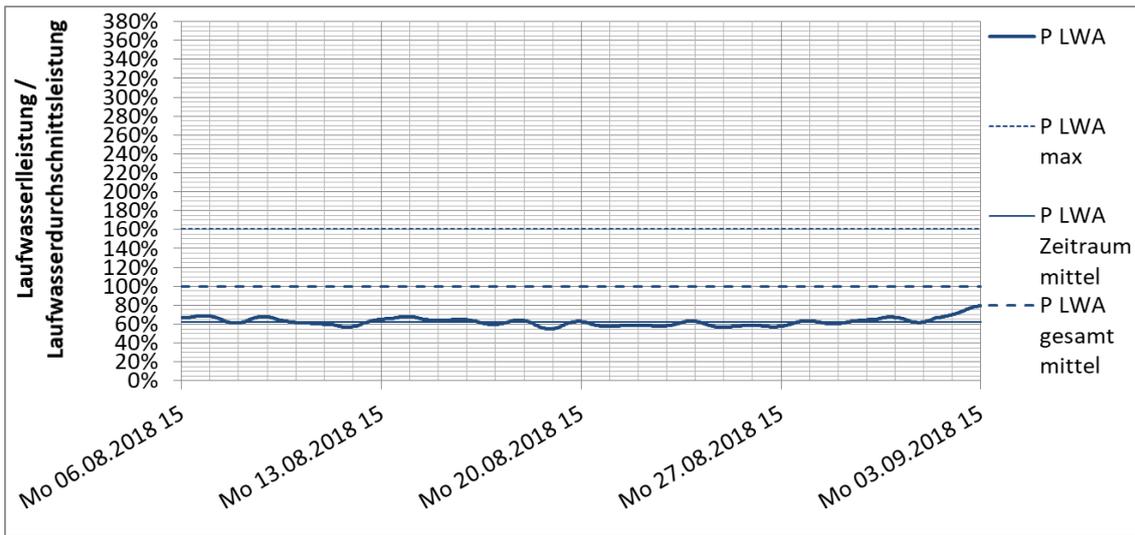


Abbildung 10: Laufwasserleistung Sommer

Im Winter dagegen liegt die Laufwasserleistung fast immer bei 160%, was bedeutet, dass Laufwasserkraftwerke über lange Zeit mit voller Auslastung Strom einspeisen können.

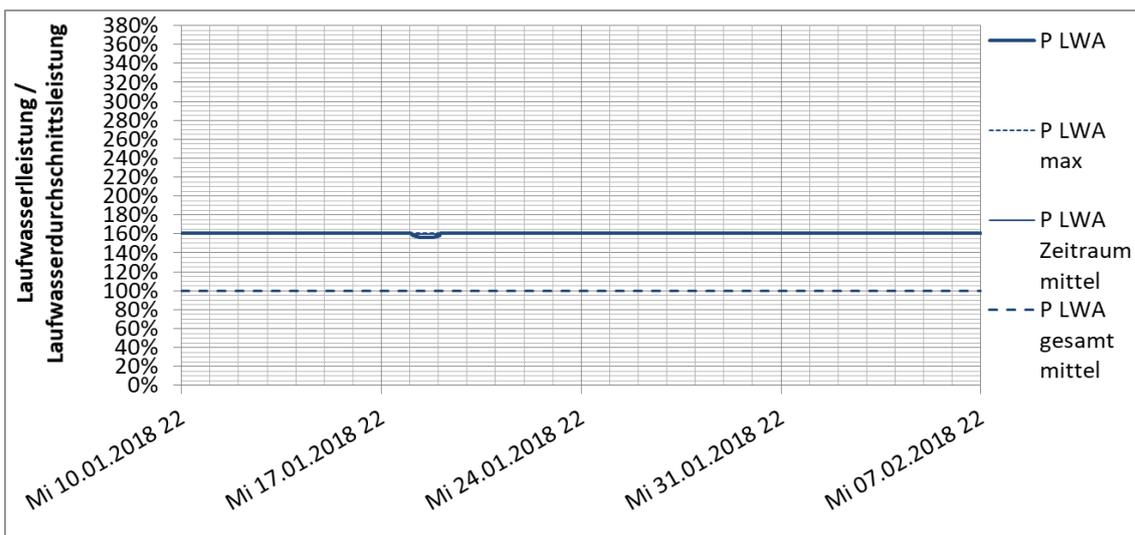


Abbildung 11: Laufwasserleistung Hochwasser

Neben den beiden Extremen, Dürre im Sommer und Hochwasser im Winter, liegen bei den Abflüssen öfters im Jahr Grenzzustände vor. Die Abbildung zeigt den Leistungsverlauf im Dezember 2018. Innerhalb eines Monats liegt die Durchschnittsleistung mehrfach bei 160 % aber auch sehr oft bei gerade einmal 60 %. Für diesen Leistungsverlauf wird eine hohe Flexibilität von den Wasserkraftwerken erwartet, so dass diese in sehr kurzen Intervallen den Betriebszustand ändern können.

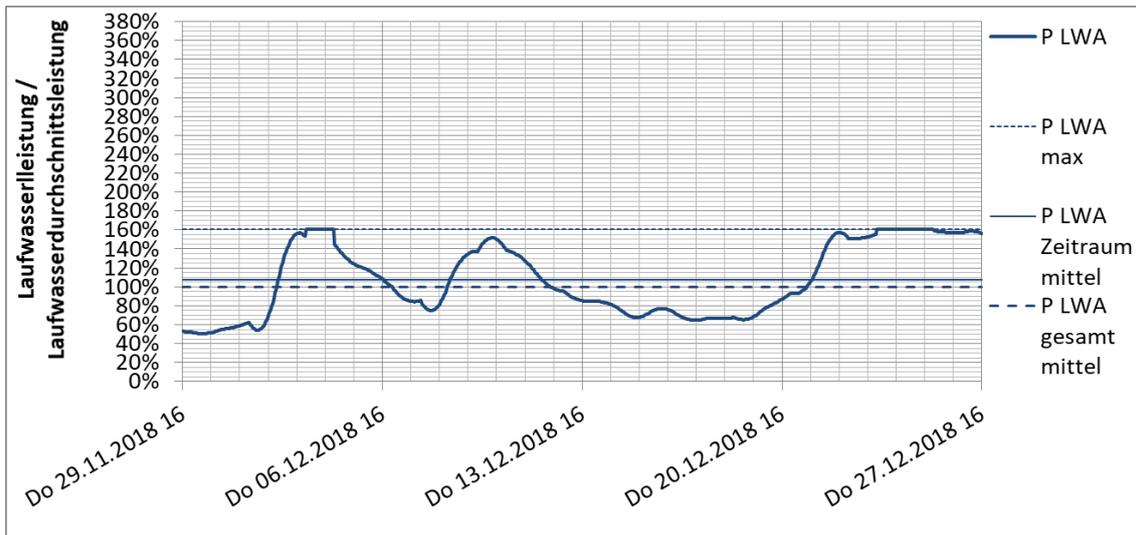


Abbildung 12: Laufwasserleistung Winter

3.4 Biomasse

Zum Zeitpunkt der Berechnung sind im Sektor C2 insgesamt 47.294 kW Biomasse-Leistung installiert. Da Biogasanlagen und Biomassenkraftwerke weitestgehend unabhängig von Jahreszeit oder Tageszeit arbeiten kann in guter Näherung eine Biomasse-Leistung von konstant ca. 10.000 kW pro Viertelstunde angenommen werden um die Versorgung zu simulieren.

3.5 Verbrauch

Der Stromverbrauch im Sektor C2 steigt und sinkt regelmäßig mit den Wochentagen. An normalen Werktagen verhält sich der Verbrauch immer ähnlich. In einer durchschnittlichen Woche steigt der Stromverbrauch auf bis zu 80 MW an. An Samstagen fällt der Verbrauch den Werktagen gegenüber leicht ab, bis er schließlich Sonntag sein Wochentief erreicht. Dieses Verhalten lässt sich auf den Stromverbrauch von Gewerbe zurückführen. Untermuert wird diese These durch den Stromverbrauch über die Weihnachtsfeiertage 2018. Zwischen dem 24.12. und dem Jahreswechsel sind die meisten Gewerblichen Betriebe geschlossen. Somit sinkt der Verbrauch auf die Grundlast des Sektors herab, was hier nur noch ungefähr 30 MW sind.

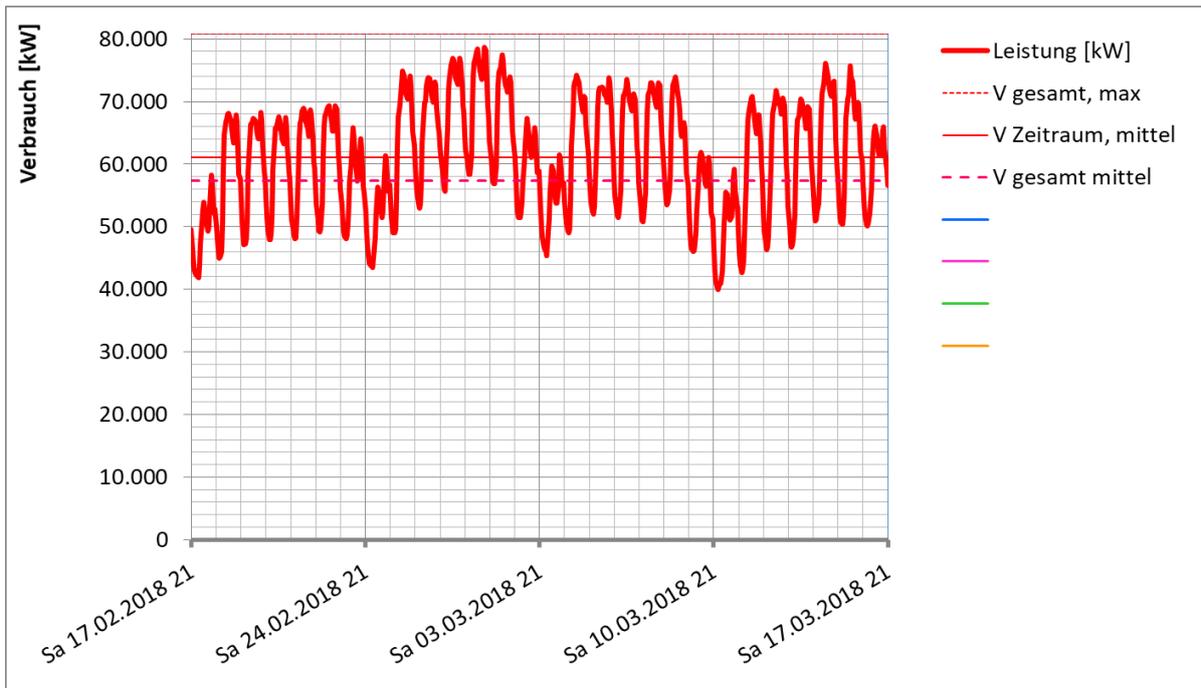


Abbildung 13: Stromverbrauch Durchschnitt

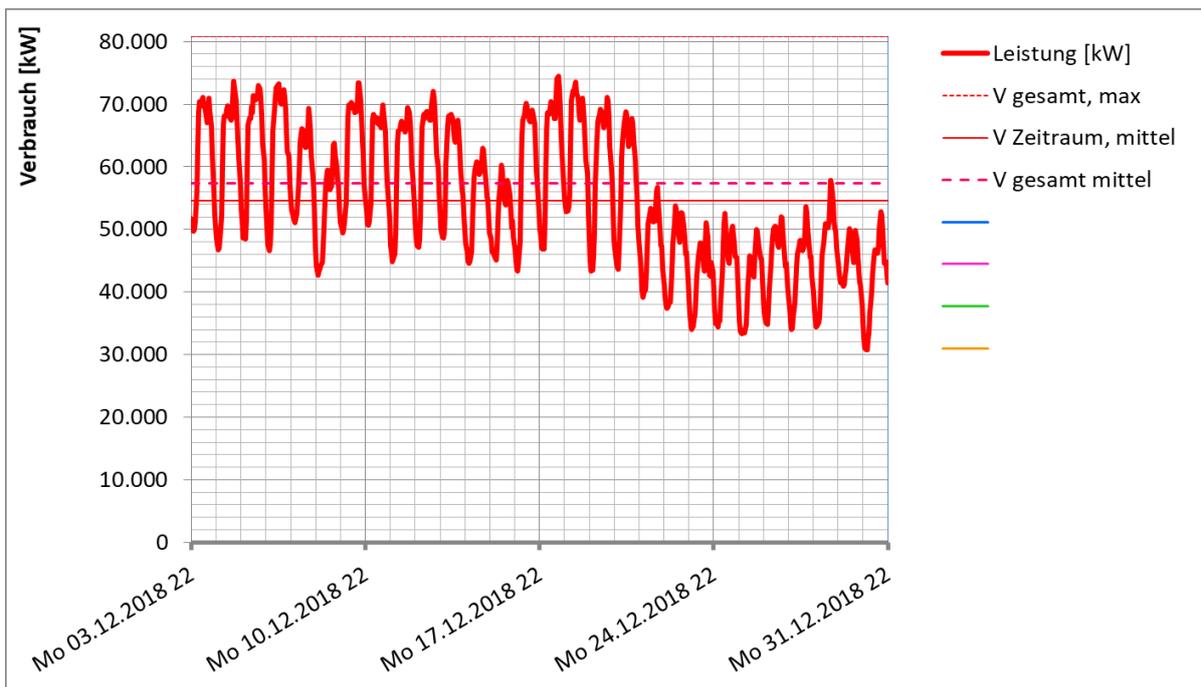


Abbildung 14: Stromverbrauch Feiertage

3.6 Speichertechnologien

In die Analyse fließen drei gängige Speichertechnologien ein (Pumpspeicherwerk, Power-to-X und Batteriespeicher auf Lithiumbasis). Die Technologien unterscheiden sich wesentlich in Ihren Wirkungsgraden, der Speicherladeleistung vor den entstehenden Kosten.

3.7 Zusammenfassung

Die abschließende Berechnung hat für die verschiedenen Speicherkonzepte ergeben wie viel neue Windkraftanlagen und Solaranlagen benötigt werden. Das Ergebnis ist in der unten stehenden Abbildung dargestellt. Die Berechnung beruht auf einigen Annahmen. So wurde zum Beispiel festgelegt, dass eine Windkraftanlage mit Nabenhöhe 160 m eine Leistung von ca. 1280 kW pro Anlage hat. Für Solaranlagen wurde angenommen, dass pro Quadratmeter 20 W erbracht werden.

Die berechneten Stromentstehungskosten sind zudem in der unten stehenden Tabelle aufgeführt. Das preiswerteste Konzept bieten demzufolge Pumpspeicherkraftwerke und die teuerste Alternative sind lithiumbasierte Batterien. In Verbindung mit den Ergebnissen aus Abbildung 15 bieten Pumpspeicherkraftwerke das größte Potential die regenerative Stromversorgung der EMN zu ermöglichen.

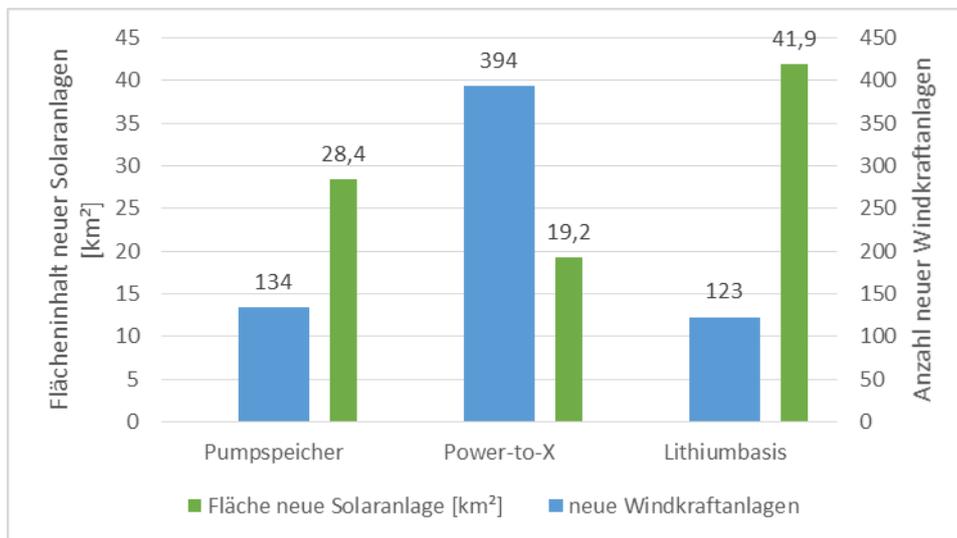


Abbildung 15: Benötigter Ausbau

Tabelle 1: Speicherkonzepte

	Pumpspeicherwerk	Power-to-X	Lithiumbasis
Wirkungsgrad [%]	75	30	90
Speicherladeleistung [%]	140	350	120
Stromentstehungskosten [ct/kWh]	17,39	18,56	22,30
Herstellkosten [€/kW]	11.812,00	11.457,00	16.847,00
Kapitalkosten [€/kW a]	820,80	886,03	1.140,83
Betriebskosten [€/kW]	703,30	740,71	813,61

4 Modernisierung und Ausbau

Mit der Neufassung des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG, § 35 Absatz 3) beschloss der Bundesgesetzgeber das bereits bestehende Querbauten auf Ihre Wasserkrafttechnische-Eignung zu prüfen sind. (StMWi 2017). Der Grund hierfür ist, dass Neubauten heutzutage meist nicht mehr wirtschaftlich realisierbar sind. Bestehende Restriktionen (wie Gewässer- oder Fischschutz) erschweren die Genehmigung und Planung von zukünftigen Anlagenstandorten enorm. (BMW i 2019b, S. 5). Deshalb liegt es nahe bereits bestehende Eingriffe in die Natur, wie Querbauwerke, für Laufwasserkraftwerke zu nutzen.

Neben dem Ausbau und Neubau von Wasserkraftanlagen sollte jedoch das Modernisierungspotenzial bereits bestehender Anlagen nicht unterschätzt werden. Neue Technologien und moderne Leittechnik können die Wirkungsgradklassen der Altbestände erhöhen und zudem noch einen wirtschaftlichen Vorteil generieren.

4.1 Technischer Zustand

Bevor das das Potenzial von Bestandsanlagen analysiert werden kann, müssen zuerst die Rahmenbedingungen beleuchtet werden. Eine Umfrage des BMW i zum technischen Zustand von Wasserkraftanlagen mit 267 beteiligten Anlagen hat ergeben, dass ein Großteil der befragten Anlagen zwischen 1920 und 1960 geplant und gebaut wurden. Somit haben fast alle Kraftwerke ihre durchschnittliche Nutzungsdauer, welche bei ungefähr 20 Jahren liegt, bereits weit überschritten. Ein großer Teil dieser Laufwasserkraftwerke kann außerdem keine regelmäßigen Revisionen und technische Modernisierungen vorweisen. (BMW i 2019b, S. 5). Die abgebildete Graphik zeigt, in welchen Jahren die befragten Anlagen errichtet wurden und ob und wann eine Revision durchgeführt wurde. Zudem wird durch das Diagramm deutlich, dass sehr alte Anlagen oft über zeitlich unbegrenzte Zulassungen verfügen. In den Daten ist jedoch nicht ersichtlich, welche Arbeiten im Rahmen der Revisionen durchgeführt wurden oder ob bereits eine Modernisierung vorgenommen wurde. (Keuneke 2015, S. 30). Die Verteilung der Zulassungsdauern deckt sich in einem gewissen Rahmen mit den Enden der EEG-Vergütungen, welche im zweiten Diagramm differenziert gezeigt werden. Eine Verlängerung der EEG-Vergütung kann nur unter Erfüllung von diversen Modernisierungsrichtlinien erfolgen. Somit müssen beispielsweise 2029 ungefähr 600 Wasserkraftwerke eine ausführliche Revision vorweisen, was als positiv zu werten ist. Andererseits ist zu beachten, dass über 250 WKAs bedingungslos weiter die EEG-Vergütung erhalten, unabhängig von deren technischen Zuständen. Durch diese langen Vertragslaufzeiten entsteht bei den Kraftwerksbetreibern auch nicht die Notwendigkeit die Anlagen auf einem technisch modernen Level zu halten. (Keuneke 2015, S. 31).

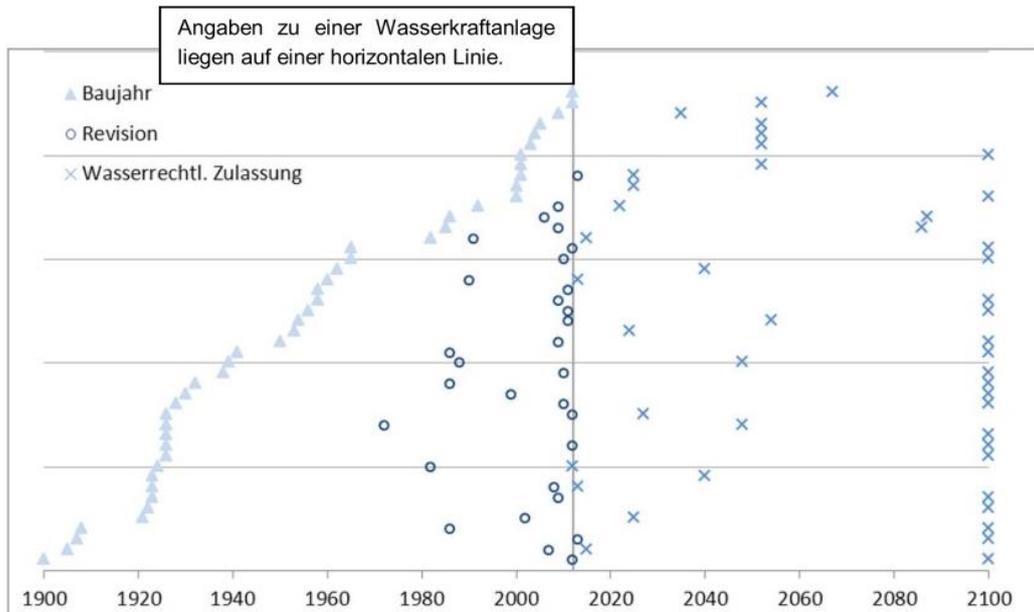


Abbildung 16: Baujahr, Revisionsjahr und Ende der wasserrechtlichen Zulassung

(Keuneke 2015, S. 30)

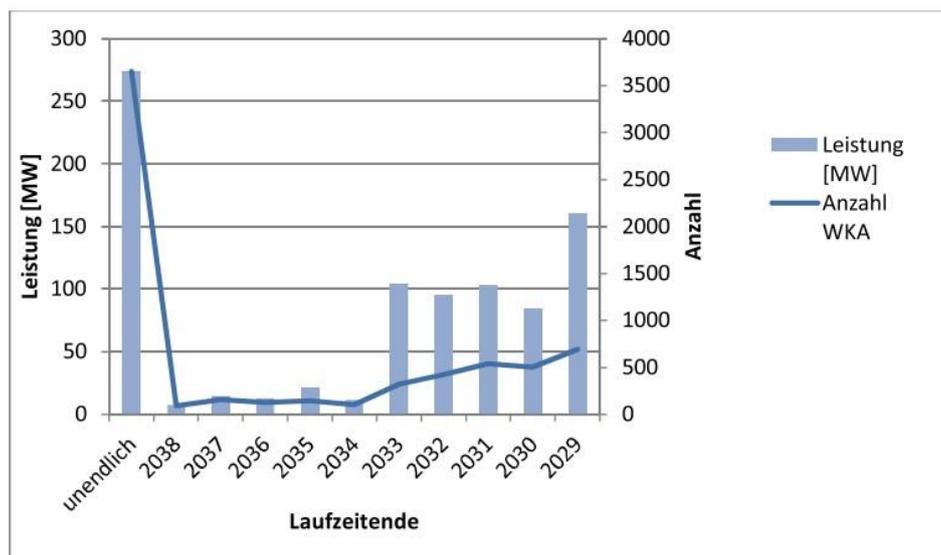


Abbildung 17: WKAs differenziert nach Ende der EEG-Vergütung

(Keuneke 2015, S. 31)

4.2 Technische Modernisierung

Nachdem es in Deutschland, wie oben beschrieben, aufgrund von gesellschaftlichen, ökologischen oder ökonomischen Randbedingungen nur unter erschwerten Bedingungen möglich ist, neue Laufwasserkraftwerke zu errichten, sollte das Hauptaugenmerk auf technischen Modernisierungen für Altanlagen liegen. (Giesecke und Heimerl 2014, S. 49). Solche Modernisierungen sind sehr vielseitig und reichen von kleinen Ersatzbeschaffungen bis hin zu neuen Turbosätzen für die gesamte Anlage.

Ein prominentes Beispiel für eine umfängliche Modernisierung ist das Kraftwerke Rheinfeld, welches im Jahr 1898 errichtet wurde und 2011 komplett modernisiert wurde. Die Gesamtleistung konnte somit von 25,7 MW auf 100 MW um mehr als das Dreifache gesteigert werden. (Quaschnig 2018, S. 258). Derartige Leistungssteigerungen können nur erreicht werden, wenn große Teile der Anlage auf einen modernen technischen Stand gebracht werden. Neue Turbinen können eine Wirkungsgradsteigerung von 5 – 11 % herbeiführen. Hochtemperatur-Supraleitende Generatoren (HTS) steigern die Jahresarbeit um ungefähr 2 – 4 % und obwohl bereits viele Laufwasserkraftwerke über effiziente Leittechnik verfügen, besteht hier ein Optimierungspotenzial von 3 – 11 %. Somit kann alleine durch technische Nachrüstung unter optimalen Bedingungen der Gesamtwirkungsgrad der Anlage um bis zu 11 - 26 % gesteigert werden. (BMU 2010, S. 21).

Als Beispielanlage kann hier das Wasserkraftwerk Hirschaid, welches im späteren Verlauf erneut aufgegriffen wird, genannt werden. Die Anlage wurde 1922 in Strullendorf am Main-Donau-Kanal errichtet. Die momentane Ausbauleistung liegt bei 3,6 MW mit einer Durchflussmenge von 50 m³/s. (Gemeinde Strullendorf). Die genannten Prozessparameter konnten jedoch erst nach einer umfassenden Modernisierung im Jahr 2008 erreicht werden. Im Rahmen der Modernisierung wurden die Laufräder von zwei Maschinen erneuert. Hierfür ist jeweils ein linksdrehendes und ein rechtsdrehendes Laufrad nach Francis mit optimiertem Design installiert worden. In der abgebildeten Tabelle sind die Parameter der Maschine Nr. 2 und Nr. 3 von 1922 denen von 2008 gegenübergestellt.

Tabelle 2: Technische Daten Kraftwerk Hirschaid

	1922	2008
Fallhöhe H [m]	8,5	10,22
Wassermenge \dot{Q} [m³/s]	17	22
Drehzahl n [min⁻¹]	215	215
Leistung P [MW]	1,2	1,7
Durchmesser \varnothing [mm]	1600	1600

Drehzahl und Durchmesser sind aus technischen und konstruktiven Gründen nicht angepasst worden. Durch die Durchflusststeigerung von 17 m³/s auf 22 m³/s und eine Anpassung der Fallhöhe von 8,5 m auf 10,22 m konnte eine Leistungssteigerung um rund 0,5 MW Ausbauleistung erzielt werden. (Stellba Hydro GmbH & Co KG 2008).

Die Leistung der Anlage lässt sich wie folgt bestimmen:

$$P = \dot{Q} \cdot H \cdot g \cdot \eta_{Turbine} \quad 1$$

Anhand dieses Zusammenhangs konnte durch die Fallhöhe und den Durchfluss die Ausbauleistung direkt proportional gesteigert werden.

4.3 Stromentstehungskosten

Um zu beurteilen, ob Modernisierungs- oder Ausbaurbeiten an Laufwasserkraftwerken ökonomisch vorteilhaft sind, müssen zuerst die Stromentstehungskosten von Wasserkraftwerken betrachtet werden. Stromentstehungskosten werden grundsätzlich immer aus den Anschaffungskosten, Betriebskosten, Personalkosten und der Kapitalverzinsung über die Lebensdauer bestimmt. In der abgebildeten Grafik sind Stromentstehungskosten von verschiedenen Leistungsklassen und die dazugehörige EEG-Vergütung 2014 eingetragen.

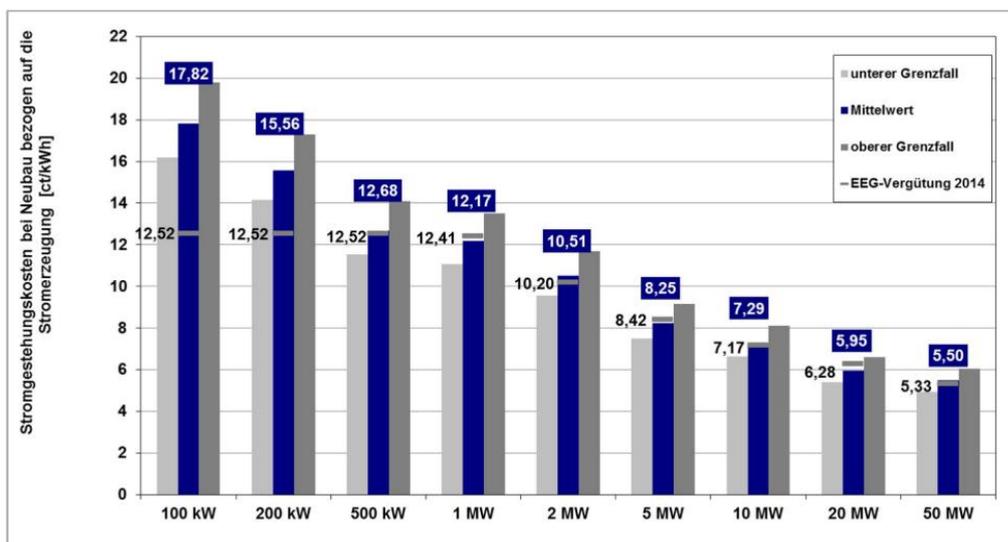


Abbildung 18: Vergleich Stromentstehungskosten mit EEG-Vergütung 2014

(Keuneke 2015, S. 32)

Um eine Vergütung nach EEG sinnvoll zu gestalten muss die Anlagenleistung mindestens 500 kW betragen. Niedrigere Leistungsbereiche würden zu finanziellen Verlusten führen. Da jedoch durch die EEG-Vergütung ein Ausbau der erneuerbaren Energien gefördert werden sollen, ist es nötig die Stromentstehungskosten von modernisierten oder ausgebauten Laufwasserkraftwerken mit den Vergütungen zu vergleichen.

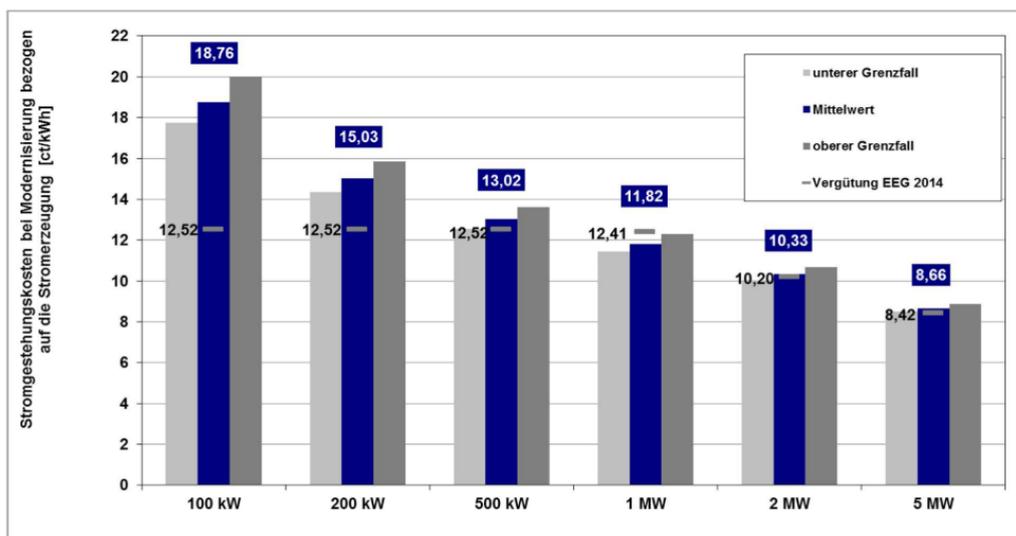


Abbildung 19: Stromerzeugungskosten von modernisierten Anlagen

(Keuneke 2015, S. 33)

Die Daten zeigen deutlich, dass eine freiwillige Modernisierung der Anlagenbetreiber das Laufwasserkraftwerk noch unwirtschaftlicher macht, sofern nach EEG 2014 vergütet wird. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie verzeichnet trotz dieser finanziell schwachen Förderung einen Zuwachs an modernisierten Anlagen. Gründe hierfür könnten längere Nutzungsdauer, steuerliche Abschreibungsmöglichkeiten. Zudem zieht das Bundesministerium auch in Betracht, dass Anlagenbetreiber ihre Anlagen modernisieren und ausbauen um ihr Kapital krisensicher zu investieren. (BMWi 2019b, S. 4).

4.4 Optimierung anhand einer Jahresdauerlinie

Sind Modernisierungen monetär nicht mehr rentabel für Laufwasserkraftwerke, bietet sich immer noch die Möglichkeit die Anlage besser an die vorhandene Anströmung anzupassen. Die Ausbauleistung von Wasserkraftwerken kann anhand einer Dauerlinie bestimmt werden. Hierbei muss ein Kompromiss zwischen Saisonen mit Niedrigwasser und Hochwasser geschlossen werden. Somit bleiben oft Wasserpotenziale ungenutzt. Anhand dem Wasserkraftwerk Hirschaid kann im Folgenden das Vorgehen für einen optimierten Ausbau gezeigt werden. Die Messdaten wurden der Datenbank der Messstelle 24208806 entnommen.

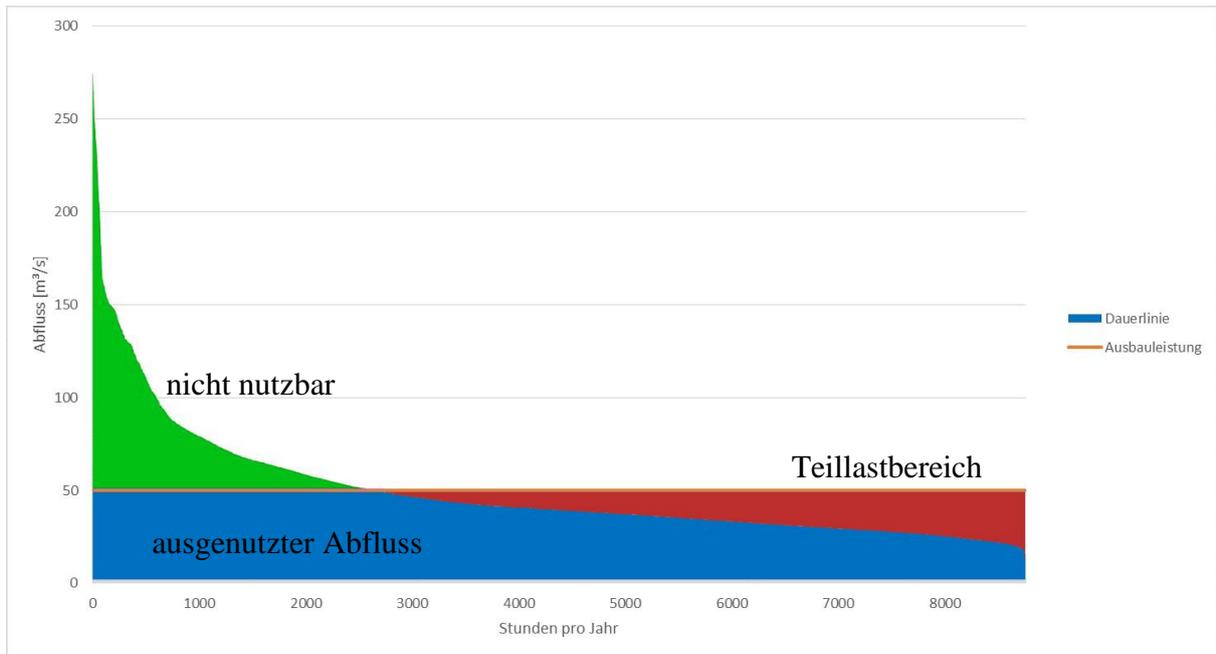


Abbildung 20: Jahresdauerlinie Main-Donau-Kanal

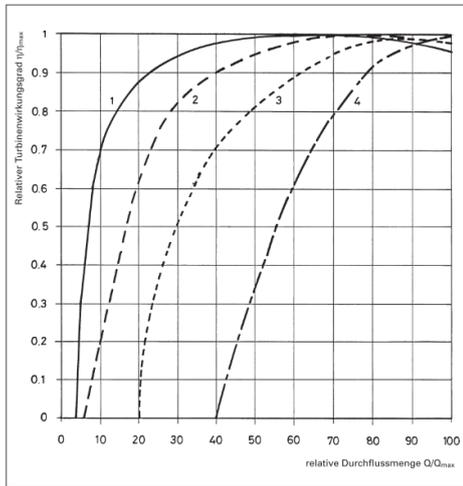
Bei der Betrachtung der Jahresdauerlinie 2018 fällt auf, dass der Seitenarm des Main-Donau-Kanal an vielen Tagen weit mehr Wasser liefert, als die Anlage mit einem Ausbaudurchfluss von $50 \text{ m}^3/\text{s}$ verarbeiten kann. Mit den in der Tabelle abgebildeten Modellierungswerten kann nun ein fiktiver Ausbau des Wasserkraftwerks berechnet und untersucht werden.

Tabelle 3: Modellierungswerte

Fallhöhe H [m]	10,22
Drehzahl n [min^{-1}]	215
Durchfluss für zusätzliche Turbine [m^3/s]	15
Wirkungsgrad η [%]	85

(Stellba Hydro GmbH & Co KG 2008)

Für eine Nettofallhöhe von rund 10 m und einem fiktiven Durchfluss von $15 \text{ m}^3/\text{s}$ eignet sich eine Kaplan-Turbine mit verstellbaren Flügeln. Der variable Winkel der Turbinenblätter ermöglicht eine stufenlose Anpassung der Turbine an die situative Anströmung. Daher weißt eine Kaplan-Turbine auch bei einem Durchfluss, der von dem Ausbaudurchfluss abweicht, einen hohen Wirkungsgrad auf. Bei einer ideal geregelten Anströmung kann ein Wirkungsgrad von knapp 90 % erreicht werden. Um jedoch weiteren Anlagenverlust zu berücksichtigen wird ein Wirkungsgrad von 85 % angenommen. Eine Pelton-Turbine würde sich für die beschriebene Anwendung besser eignen, jedoch benötigt diese eine höhere Fallhöhe, welche im Kraftwerk Hirschaid nicht realisierbar ist.



Größenordnung des maximalen Wirkungsgrades η_{\max}		
Kurve 1:	Peltonturbine Durchströmturbine zweizellig	$\eta_{\max} = 84\text{--}90\%$ $\eta_{\max} = 78\text{--}84\%$
Kurve 2:	Kaplanturbine	$\eta_{\max} = 84\text{--}90\%$
Kurve 3:	Francisturbine Durchströmturbine einzellig	$\eta_{\max} = 84\text{--}90\%$ $\eta_{\max} = 78\text{--}84\%$
Kurve 4:	Pumpen im Turbinenbetrieb	$\eta_{\max} = 75\text{--}90\%$

Abbildung 21: Wirkungsgradverlauf verschiedener Turbinen

(BFK 1995, S. 33)

Mit den genannten Parametern kann folgende Dauerlinie modelliert werden, in der die Kaplan-Turbine rot eingezeichnet ist. Mit einem Nenndurchfluss von $15 \text{ m}^3/\text{s}$ hat die Turbine eine Nennleistung von $1,3 \text{ MW}$. An insgesamt 67 Tagen im Jahr (1605 h/a) kann die Kaplan-Turbine mit der vollen Ausbauleistung von $15 \text{ m}^3/\text{s}$ versorgt werden und somit auf Volllast arbeiten. Weitere 44 Tage (1048 h/a) kann im Teillastbereich zwischen $0 - 15 \text{ m}^3/\text{s}$ Strom produziert werden. Somit kann mittels Integration der eingeschlossenen Fläche eine zusätzliche Leistung von jährlich 667 MWh berechnet werden. Bei einer Netto-Vergütung nach EEG 2016 von $8,21 \text{ ct/kWh}$ (Bemessungsleistung bis 2 MW) kann jährlich ein Umsatz von $54.756,15 \text{ €}$ erwirtschaftet werden. (E.ON Wasserkraft GmbH und Bayerische Elektrizitätswerke GmbH 2009, S. 12).

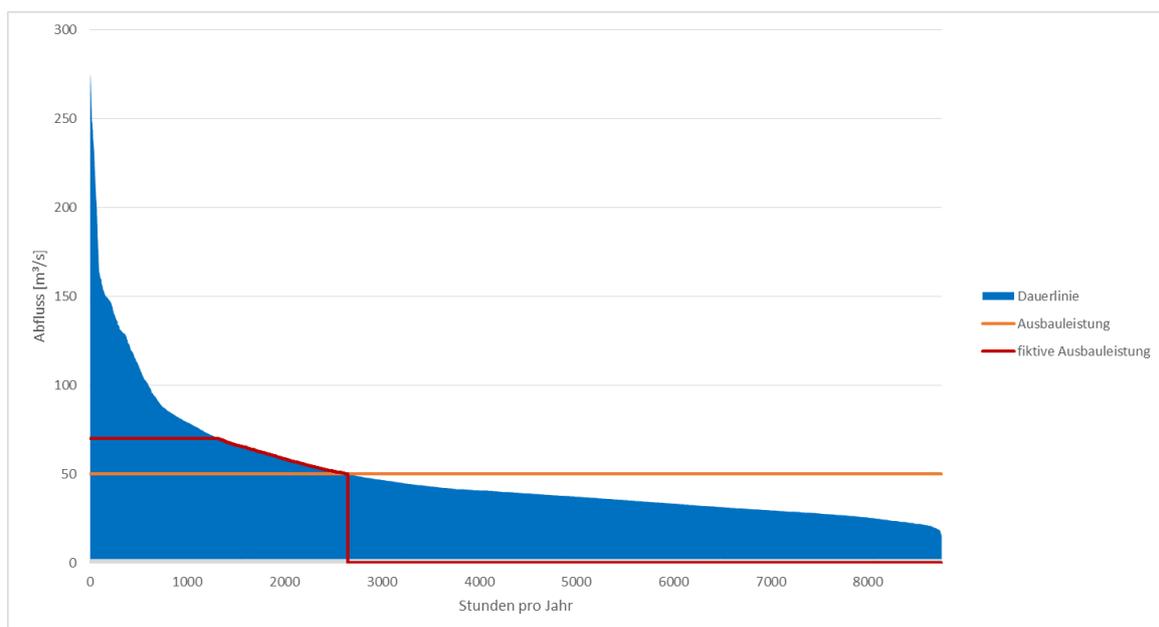


Abbildung 22: fiktive Ausbauleistung

5 Zusammenfassung

Nachdem der Ausbau von Wasserkraft-Anlagen in gesamt Deutschland fast nicht mehr gewinnbringend möglich ist, sind nur noch Modernisierungen und der Ausbau bestehender Anlagen von Interesse. Es wurde gezeigt, dass bei einem großen Teil der in Betrieb befindlichen Laufwasserkraftwerke aus verschiedenen Gründen keine ausreichenden Modernisierungen durchgeführt werden. Für die Anlagenbetreiber besteht hierfür keine Motivation, da viele alte Kraftwerke ohnehin über unbefristete Wassernutzungsrechte verfügen. Nichts desto trotz gibt es vermehrt Anlagenbetreiber, die eine technische Modernisierung durchführen lassen. Monetär lohnen sich solche Investitionen durch eine Wirkungsgradsteigerung und bessere Ausnutzung der Anströmung. Neben Modernisierungsmaßnahmen konnte auch gezeigt werden, dass durch Anbau einer weiteren geeigneten Turbine noch mehr Wasserleistung abgegriffen werden kann.

6 Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Textpassagen, die wörtlich oder dem Sinn nach auf Publikationen oder Vorträge anderen beruhen, sind als solche kenntlich gemacht.

Fürth, 16.07.2020

Ort, Datum

Unterschrift

Literaturverzeichnis

BFK (1995):

Wahl, Dimensionierung und Abnahme einer Kleinturbine: Bundesamt für Konjunkturfragen.

BMU (2010):

Potentialermittlung für den Ausbau der Wasserkraftnutzung in Deutschland:

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

BMU (2016):

Strommix: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.

BMWi (2019a):

Kohleausstieg und Strukturwandel. Online verfügbar unter

<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Wirtschaft/kohleausstieg-und-strukturwandel.html>, zuletzt geprüft am 29.11.2019.

BMWi (2019b):

Marktanalyse Wasserkraft. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Online

verfügbar unter [https://www.erneuerbare-](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/marktanalysen-photovoltaik-wasserkraft.pdf?__blob=publicationFile&v=11)

[energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/marktanalysen-photovoltaik-wasserkraft.pdf?__blob=publicationFile&v=11](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/marktanalysen-photovoltaik-wasserkraft.pdf?__blob=publicationFile&v=11), zuletzt aktualisiert am 13.11.2019.

E.ON Wasserkraft GmbH; Bayerische Elektrizitätswerke GmbH (2009):

Potenzialstudie. Ausbaupotentiale Wasserkraft in Bayern.

Gemeinde Strullendorf:

Wasserkraftwerk. Online verfügbar unter

<http://www.strullendorf.de/gemeinde/index.php/freizeit-kultur/freizeitgestaltung/1099-wasserkraftwerk>, zuletzt geprüft am 05.11.2019.

Giesecke, Jürgen; Heimerl, Stephan (2014):

Wasserkraftanlagen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Guntram Ebel, Arne Gluch, Martin Kehl (2015):

Leitrechen-Bypass-System.

Keuneke, Rita (2015):

Marktanalyse zur Vorbereitung von Ausschreibungen. Vorbereitung und Begleitung der Erstellung des Erfahrungsberichts 2014 gemäß § 65 EEG.

Quaschnig, Volker (2018):

Erneuerbare Energien und Klimaschutz. Hintergründe – Techniken und Planung – Ökonomie und Ökologie – Energiewende. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Hanser (Hanser eLibrary). Online verfügbar unter <https://dx.doi.org/10.3139/9783446457034>.

Stellba Hydro GmbH & Co KG (2008):

Modernisierung und Optimierung von Francis-Doppelturbinen. Online verfügbar unter <http://www.stellba-hydro.com/portfolio-item/modernisierung-und-optimierung-4-st-francis-doppelturbinen/>, zuletzt geprüft am 05.12.2019.

StMWi (2017):

Energie-Atlas Bayern. Neubaupotenzial an bestehenden Querbauwerken. Hg. v. Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie. Online verfügbar unter https://www.energieatlas.bayern.de/thema_wasser/potenzial/neubau.html, zuletzt geprüft am 13.11.2019.