TECHNISCHE HOCHSCHULE NÜRNBERG
GEORG SIMON OHM

Fakultät Maschinenbau
und Versorgungstechnik

Nutzung von Windenergieüberschüssen durch Einsatz von Wasserstoffspeichern

Wind2H

Analyse der potentiell zur Verfügung stehenden Überschüsse aus Windenergie und Beurteilung von Wasserstoffspeichern als mögliche Lösung zur Deckung des Speicherbedarfs

Abschlussbericht

Autor:	Carolin Heiter Sterzinger Straße 19 90461 Nürnberg 0176 32470276 heiterca63317@th-nuernberg.de
Matrikel-Nr.:	2798648
Prüfer:	Prof. Dr.-Ing. Matthias Popp
Korrektor:	Lisa Herrmann

Eingereicht am: 02.07.2018 Unterschrift:

Abstract

In dieser Arbeit wird untersucht, inwiefern sich die aufgrund der Volatilität von Windenergie ausbildenden Überschüsse mithilfe von Wasserstoffspeichern nutzen lassen, um Defizite auszugleichen. Dabei wird sich vor allem auf das Klimaziel der Europäischen Metropolregion Nürnberg bezogen, bis zum Jahr 2030 bereits 60 Prozent des Stromverbrauchs durch erneuerbare Energien zu decken. Basierend auf den Merra-2 Daten der NASA, sowie den Netzdaten der Main-Donau Netzgesellschaft, werden Überschüsse und Defizite im Windenergieverlauf sowohl für das Jahr 2017 als auch für 2030 ermittelt. Darüber hinaus werden die unterschiedlichen technologischen Verfahren der Wasserelektrolyse hinsichtlich ihrer Einsatzfähigkeit in Zusammenhang mit regenerativen Energieträgern erklärt und verglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz von Speichern im Jahr 2030 eine notwendige Voraussetzung ist, um das Klimaziel zu erreichen und gleichzeitig eine hohe Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

Inhaltsverzeichnis

Abstract II
Abbildungsverzeichnis IV
Abkürzungsverzeichnis V
1. Einleitung ..... - 1 -
2. Zielsetzung und Forschungsfragen ..... - 2 -
3. Stand der Technik ..... - 4 -
3.1 Windenergie ..... - 4 -
3.2 Wasserstoffspeicher ..... - 6 -
3.2.1 Elektrolyse allgemein ..... - 6 -
3.2.2 Alkalische Elektrolyse ..... - 6 -
3.2.3 Polymerelektrolyt-Elektrolyse ..... - 7 -
3.2.4 Hochtemperatur-Wasserdampf-Elektrolyse ..... - 8 -
3.2.5 Vergleich der Elektrolyseverfahren ..... - 8 -
3.3 Pilotprojekte ..... - 10 -
4. Datenaufbereitung und –auswertung ..... - 11 -
4.1 Stromverbrauch in der EMN ..... - 11 -
4.2 Windenergie - Verläufe ..... - 13 -
4.2.1 Potentiell verfügbare Windenergie vs. Stromverbrauch (Szenario 2030) ..... - 14 -
4.2.2 Vorhandene Windenergie vs. Stromverbrauch (Szenario 2030) ..... - 15 -
4.2.3 Vorhandene Windenergie vs. Stromverbrauch (aktueller Zustand) ..... - 16 -
5. Analyse des Speicherbedarfs ..... - 18 -
5.1 Speicherbedarf EMN ..... - 18 -
5.2 Speicherbedarf Wald-Windpark Reichertshüll ..... - 20 -
6. Fazit ..... - 21 -
7. Ausblick ..... - 22 -
Literaturverzeichnis ..... - 23 -

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Stromerzeugung aus Windenergie 2017 (Bundesverband WindEnergie, 2018).....- 4 -

Abbildung 2: Verteilung der EinsMan-Maßnahmen nach Energieträgern (Bundesnetzagentur, 2018a) - 5 -

Abbildung 3: Alkalische Elektrolyse mit mobilem Elektrolyt (Kurzweil und Dietlmeier, 2015, S. 433)- 7 -

Abbildung 4: Verlauf Stromverbrauch der EMN im Jahr 2017 .....- 11 -

Abbildung 5: Verlauf potentiell verfügbare Windenergie in der EMN (Vergleichsjahr 2017, 642 zusätzliche WEA) .....- 14 -

Abbildung 6: Stromverbrauch (Windanteil 38,7%) vs. potentiell verfügbare Windenergie (zusätzliche 642 WEA) .....- 15 -

Abbildung 7: Vorhandene Windenergie vs. Stromverbrauch (Szenario 2030) .....- 16 -

Abbildung 8: Vorhandene Windenergie vs. Stromverbrauch (aktuell, Windanteil 9,7%).....- 17 -

Abbildung 9: Verlauf der Windenergieüberschüsse und -defizite (Szenario 2030) .....- 18 -

Abkürzungsverzeichnis

AEL	Alkalische Elektrolyse
BHKW	Blockheizkraftwerk
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EMN	Europäische Metropolregion Nürnberg
FAE	fixed alkaline electrolysis
HTES	high temperature electrolysis of steam
KWKG	Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz
PEM	proton exchange membrane
SOEL	solid oxide electrolysis
SPE	solid polymer electrolyte
WEA	Windenergieanlage

1. Einleitung

Das Thema Energiewende stellt für die Bundesregierung derzeit ein hochaktuelles Thema dar. Indem verstärkt auf erneuerbare Energien gesetzt wird, soll der Einsatz von Kernkraft und Kohle als Energieträger nach und nach verringert werden (Die Bundesregierung, 2018). Im Jahr 2017 betrug der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch bereits 36,2 Prozent (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2018). Dabei wurde insbesondere in Projekte im Bereich der Photovoltaik und Windenergie investiert (Die Bundesregierung, 2018).

Die Umstellung auf erneuerbare Energien bringt allerdings auch neue Herausforderungen mit sich. Da sich die regenerative Energiebereitstellung nicht am Bedarf orientiert, werden Lösungen zur Speicherung benötigt, um den Ausgleich von Spitzen- und Defizitzeiten möglich zu machen. Darüber hinaus bringt die Umstellung der Energieversorgung auch einen strukturellen Wandel mit sich. Die Versorgung wird zunehmend dezentral, da regenerative Energieträger überall vorhanden sind und somit zahlreiche kleine Anlagen entstehen können (Gailing und Röhring, 2015). Die dort erzeugte Energie wird im Gegensatz zu Großprojekten nicht ins Hochspannungsnetz eingespeist, sondern direkt in Erzeugungsnähe verbraucht. Das Thema Dezentralisierung wird von der Bundesregierung daher als eine der großen Herausforderungen der Energiewende betrachtet (Die Bundesregierung, 2018).

Auch die Metropolregion Nürnberg schenkt dem Thema Energiewende besondere Aufmerksamkeit. In dem zuletzt 2017 aktualisierten Klimapakt setzt sie es sich zum Ziel, die CO_2-Emissionen bis zum Jahr 2030 um 40 Prozent und bis zum Jahr 2050 um 95 Prozent gegenüber dem Jahr 2017 zu reduzieren (Metropolregion Nürnberg, 2017). Die EMN beabsichtigt so eine Vorreiterrolle für die dezentrale Energiewende in Deutschland einzunehmen.

2. Zielsetzung und Forschungsfragen

Grundlage für die Erstellung der vorliegenden Studienarbeit bilden die Zielsetzungen des Klimapaktes der EMN. Dieser wurde bereits im Jahr 2012 beschlossen, allerdings im Jahr 2017 erneut aktualisiert, nachdem bei der im Jahr 2015 stattfindenden Klimakonferenz in Paris eine neue Klimaschutzvereinbarung verabschiedet wurde (Metropolregion Nürnberg, 2017). Der aktualisierte Klimapakt betrachtet als maßgebliche Kennzahlen den Endenergieverbrauch, den Anteil an regenerativen Energien sowie an Kraft-Wärme-Kopplung und die CO_2-Emissionen. Um in diesen Bereichen die Zielsetzungen zu realisieren, ist es unter anderem notwendig die erneuerbaren Energieträger auszubauen und sich mit neuen Speichertechnologien und Netzstrukturen auseinanderzusetzen.

Aufbauend auf diesen Herausforderungen erstellen die Studenten der Technischen Hochschule Nürnberg, Fakultät Maschinenbau mit Studienschwerpunkt Energietechnik, Projektarbeiten, die unterschiedliche Themenbereiche näher beleuchten und deren Ziel es ist, Lösungsansätze zum Thema Energiewende der EMN zu erarbeiten.

Die vorliegende Projektarbeit untersucht, welchen Beitrag die Windenergie durch Nutzung der Überschüsse in Verbindung mit Wasserstoffspeichern im Jahr 2030 zur Energieversorgung der Metropolregion leisten kann.

Die notwendigen Daten zum Windenergieverlauf liefert dabei die Datenbank MERRA-2 der NASA, Daten zum Stromverbrauch in der EMN werden über die Main-Donau-Netzgesellschaft bezogen. Zunächst ist es daher wichtig, die beiden Datensätze so aufzubereiten, dass sie anschließend in einen direkten Vergleich gebracht werden können. So soll der Windenergieverlauf in der EMN bestimmt werden und anschließend dem Stromverbrauch gegenübergestellt werden, der im Jahr 2030 durch Windenergie gedeckt werden soll. Auch kann so erfasst werden, wie sich die gegenwärtige Situation in der EMN gestaltet. Darüber hinaus werden die Verläufe näher analysiert, indem die Energiemengen von Überschüssen und Defiziten ermittelt werden.

Dies führt zum nächsten Punkt der Arbeit, der Frage nach Speicheroptionen. In diesem Sinne werden Wasserstoffspeicher und die damit verbundenen Wasserelektrolyseverfahren näher betrachtet und auf ihre Einsatztauglichkeit in Verbindung mit regenerativen Energieträgern hin untersucht. Mittels der berechneten Defizite kann außerdem eine Aussage darüber getroffen werden, welche Speicherkapazitäten notwendig wären. Anhand von bereits existierenden

Pilotprojekten kann abschließend bewertet werden, ob der Einsatz von Wasserstoffspeichern auch in der EMN eine in Zukunft realistische Option ist.

Die im Folgenden behandelten Forschungsfragen lauten somit:

1. Welche Überschüsse und Defizite gibt es in der EMN aufgrund des Potentials an Windenergie für das Vergleichsjahr 2017?

2. Wie bilden sich die Überschüsse durch Windenergie in Gegenden der EMN, in welchen bereits Windenergieanlagen stehen, aus?

3. Welche Speicherkapazitäten wären zur Speicherung der Überschüsse notwendig?

4. Sind Wasserstoffspeicher eine realistische Option und gibt es in der Metropolregion Windkraftanlagen, wo deren Einsatz sinnvoll wäre?

3. Stand der Technik

3.1 Windenergie

Bundesweit befinden sich in Deutschland knapp 30.000 Windenergieanlagen mit einer installierten Leistung von circa 56.000 Megawatt (Bundesverband WindEnergie, 2018). Der Anteil der Windenergie an der deutschen Stromproduktion betrug im Jahr 2017 im Schnitt 18,8 Prozent. Allein im Jahr 2017 wurden 1792 neue WEA errichtet, was der bislang größten Anzahl an neu errichteten WEA seit dem Beginn der Entwicklung von Windenergie entspricht (Deutsche WindGuard, 2017). Dies ist unter anderem auf kurze energetische Amortisationszeiten und neue technische Entwicklungen zurückzuführen (Umweltbundesamt, 2014). So können WEA mittlerweile nicht mehr nur in Küstenregionen oder auf Freiflächen errichtet und wirtschaftlich betrieben werden, sondern aufgrund der mittlerweile erreichten möglichen Nabenhöhen auch in Waldgebieten eingesetzt werden.

Bezogen auf das Jahr 2017 hatte die durchschnittliche WEA eine Nabenhöhe von 128 Meter, einen Rotordurchmesser von 113 Meter und eine Anlagenleistung von 2.976 Kilowatt. Aktuelle WEA liefern jedoch schon höhere Nennleistungen. Auch die für den Ausbauplan in der Metropolregion betrachteten WEA gehen von einer Anlagenleistung von 4,1 Megawatt aus.

Der fluktuierende Verlauf der Windenergie macht Speichermöglichkeiten zu einem wichtigen Thema. Die Volatilität ist bereits im stündlichen Verlauf deutlich erkennbar, aber auch die monatlich erzeugten Energiemengen weisen starke Differenzen auf. Abbildung 1 zeigt die schwankende Einspeisung nach Monaten in Deutschland für das Jahr 2017.

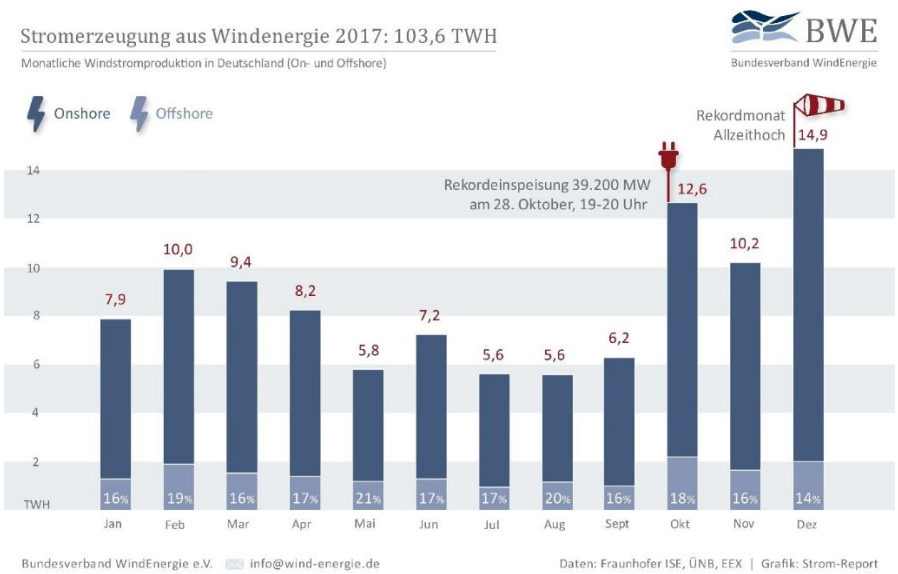

Abbildung 1: Stromerzeugung aus Windenergie 2017 (Bundesverband WindEnergie, 2018)

Wie daraus ersichtlich wird, steht in den Wintermonaten mehr Windenergie zur Verfügung als im Sommer. Jedoch zeigen sich auch beim Vergleich der einzelnen Wintermonate schon starke Unterschiede.

Trotz der noch steigenden Anzahl an WEA kommt es bei den bestehenden immer wieder zu Abregelungen. Der hinter dieser Maßnahme stehende Begriff nennt sich Einspeisemanagement. Wenn zu viel Strom produziert wird und es daher zu Netzengpässen kommt, sieht das EEG sowie das KWKG vor, dass zunächst die konventionellen Kraftwerke abgeregelt werden (Bundesnetzagentur, 2018b). Erst als letzte Maßnahme darf die Abregelung der EE-Anlagen erfolgen. Im Jahr 2017 wurden in Deutschland vom ersten bis zum dritten Quartal 3.209 GWh abgeregelt. Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, sind Windenergieanlagen am häufigsten von den Maßnahmen infolge des Einspeisemanagements betroffen.

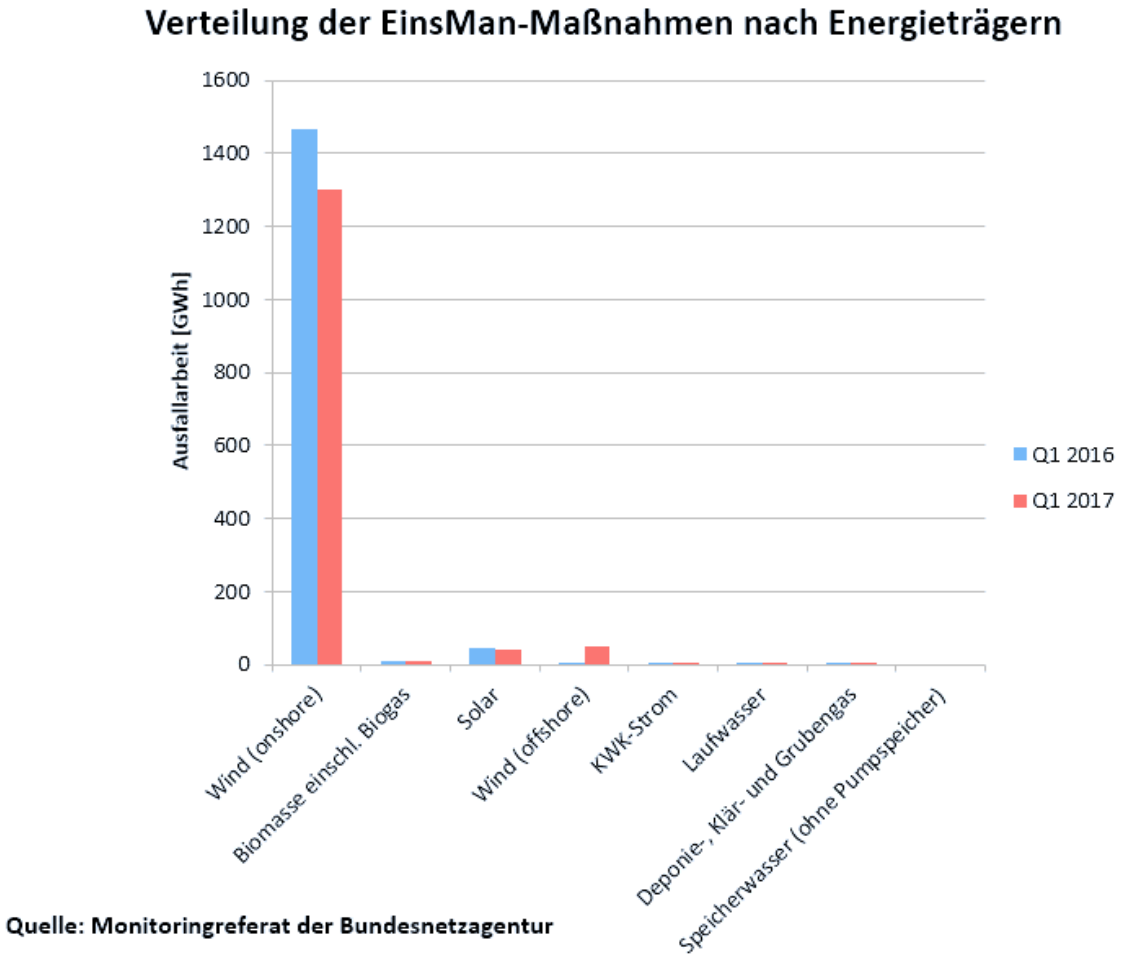

Abbildung 2: Verteilung der EinsMan-Maßnahmen nach Energieträgern (Bundesnetzagentur, 2018a)

3.2 Wasserstoffspeicher

Die Speicherfrage ist eine der zentralen Bestandteile der Energiewende. Überschüssige Energien können so Defizitzeiten ausgleichen, die regenerative Energiebereitstellung kann regelbar gemacht werden und somit Netzstabilität garantieren. Vor allem in chemischen Speichern werden zukünftige Lösungsansätze gesehen. Dabei spielt Wasserstoff eine der Hauptrollen. Im Folgenden werden die verschiedenen Verfahren zur elektrolytischen Gewinnung von Wasserstoff und deren Bedeutung in Zusammenhang mit nachhaltiger Energieerzeugung näher betrachtet.

3.2.1 Elektrolyse allgemein

Das grundsätzliche Prinzip der Elektrolyse besteht darin, dass durch das Anlegen eines elektrischen Stroms Wasser zersetzt wird. Da reines Wasser kein elektrischer Leiter ist, ist stets das Zugeben einer Säure oder Lauge notwendig (Kurzweil und Dietlmeier, 2015). Die Zersetzungsspannung muss theoretisch mindestens 1,23 Volt betragen. Dabei findet an der Kathode (Minuspol) die Abscheidung des Wasserstoffs und an der Anode (Pluspol) die Abscheidung des Sauerstoffs statt. Die derzeit gängigen drei Elektrolyseverfahren sind die alkalische Elektrolyse, die Polymerelektrolyt-Elektrolyse sowie die Hochtemperatur-Wasserdampf-Elektrolyse.

3.2.2 Alkalische Elektrolyse

Die alkalische Elektrolyse kann nach zwei unterschiedlichen Verfahren ablaufen. Dabei wird „[nach] der mechanischen Beweglichkeit des Elektrolyten […] unterschieden“ (Kurzweil und Dietlmeier, 2015, S. 432). Dieser liegt entweder mobil oder fixiert vor.

Bei der mobilen Variante zirkuliert der Elektrolyt im Anoden- und Kathodenraum (vgl Abb. 3), welche durch eine Membran getrennt sind.

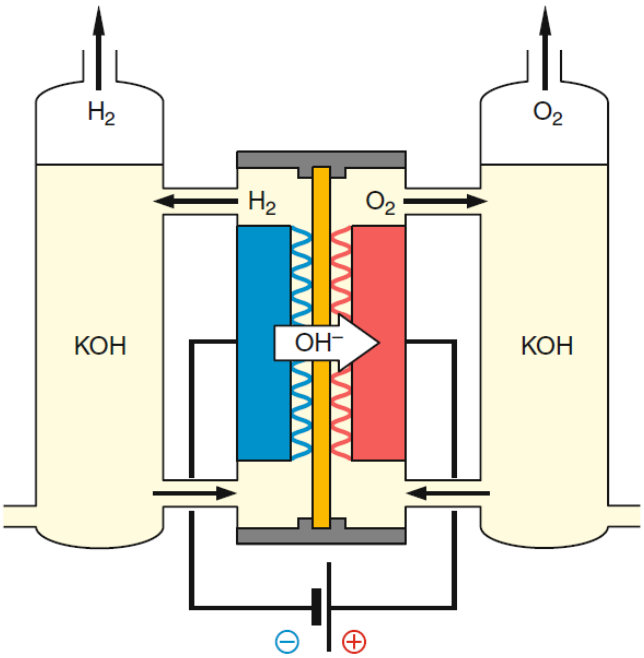

Abbildung 3: Alkalische Elektrolyse mit mobilem Elektrolyt (Kurzweil und Dietlmeier, 2015, S. 433)

Der Wasserstoff entsteht durch die kathodenseitig ablaufende Reaktion (Sterner und Stadler, 2017, S. 356):

$$2H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$$

Die entstandenen Wasserstoffmoleküle liegen nun gasförmig vor, steigen aufgrund der Schwerkraft auf und treten aus dem Elektrolyt aus. Die Hydroxidionen wandern durch die Membran zur Anode und reagieren dort zu Wasser und Sauerstoff:

$$2OH^- \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2O + 2e^-$$

Auch die Sauerstoffmoleküle verlassen den Elektrolyten durch gasförmiges Aufsteigen. Das elektrochemisch verbrauchte Wasser wird lediglich nachgefüllt.

Bei der fixierten Variante der alkalischen Elektrolyse (FAE) wird der Elektrolyt durch Kapillarkräfte in einer porösen Matrix festgehalten. Gasblasen können diese Matrix problemlos verlassen, da sie einer geringeren Oberflächenspannung unterliegen. Das verbrauchte Wasser muss der Matrix mittels Wasserdampfpermeation zugeführt werden.

3.2.3 Polymerelektrolyt-Elektrolyse

Das zweite Elektrolyseverfahren wird als SPE- oder PEM-Elektrolyse bezeichnet. Grund hierfür ist, dass einerseits eine protonenleitende Membran (PEM) und andererseits ein polymerer Festelektrolyt (SPE) vorliegen. Bei diesem Verfahren wird das Wasser

üblicherweise an der Anodenseite zugeführt. Dort entstehen zunächst Sauerstoffmoleküle und Protonen (Sterner und Stadler, 2017, S. 358):

$$H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^-$$

Die Protonen diffundieren durch die Membran und reagieren kathodenseitig zu Wasserstoff:

$$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$$

3.2.4 Hochtemperatur-Wasserdampf-Elektrolyse

Die Hochtemperatur-Wasserdampf-Elektrolyse (HTES) ist auch unter der Abkürzung SOEL bekannt, da sie unter Verwendung keramischer Festelektrolyte abläuft. Da bei diesem Verfahren nicht Wasser, sondern Wasserdampf gespalten wird, sinkt die theoretische Zersetzungsspannung um mehr als 0,5 V.

Die Zersetzungsreaktionen lauten dabei wie folgt (Sterner und Stadler, 2017, S. 360):

Kathodenseitig: $H_2O + 2e^- \rightarrow H_2 + O^{2-}$

Anodenseitig: $O^{2-} \rightarrow 2e^- + \frac{1}{2}O_2$

Eine Besonderheit bei der HTES ist, dass aufgrund einer Nebenreaktion die direkte Erzeugung von Synthesegas möglich ist. Darüber hinaus ist die HTES reversibel, das bedeutet, die zur Elektrolyse notwendigen Komponenten können ebenfalls als Brennstoffzelle verwendet werden.

3.2.5 Vergleich der Elektrolyseverfahren

Generell ist die Elektrolyse aufgrund ihrer Flexibilität ein geeignetes Verfahren, um in Kombination mit regenerativen Energieträgern Wasserstoff herzustellen.

Ein Vergleich zwischen den Verfahren zeigt, dass die alkalische Elektrolyse die am stärksten verbreitete Technologie darstellt. Das System ist langzeitig am besten erprobt und erforscht und wird daher vor allem bei Anlagen im Megawattbereich eingesetzt (Kurzweil und Dietlmeier, 2015, S.446). Gleichzeitig ist es auch das kostengünstigste Verfahren. Die Lebensdauer alkalischer Elektrolysesysteme beträgt bis zu 30 Jahre, wobei nach zehn Jahren eine Generalüberholung notwendig ist. Allerdings ist aufgrund des Laugenkreislaufes die Reinigung sehr aufwändig. Des Weiteren ist ein Betrieb im unteren Teillastbereich kritisch, da sich die durch Fremdgase entstehenden Verunreinigungen in diesem Bereich prozentual mehr ausprägen.

PEM Elektrolyseure finden aktuell noch vorwiegend im kleinen Leistungsbereich (bis 160 kW) Anwendung. Einer der größten Vorteile gegenüber der AEL besteht in der weitaus besseren Teillastfähigkeit, da es selbst im Teillastbereich nahe der null Prozent aufgrund des Festelektrolyten keine Gasverunreinigungen gibt und die Systeme verzögerungsfrei auf Lastschwankungen reagieren (Kurzweil und Dietlmeier, 2015, S.455). Die Lebensdauer der Systeme beträgt derzeit bis zu 20 Jahre. Nachteilig sind bei diesem Verfahren vor allem die hohen Werkstoffkosten.

Die HTES/SOEL ist im Vergleich zur AEL und PEM Elektrolyse weniger erforscht (Smolinka et al., 2010, S. 15). Ein intermittierender Betrieb ist nachteilig, da die daraus resultierenden mechanischen Belastungen die Lebensdauer des Systems stark reduzieren. Da ein schnelles dynamisches Verhalten für die Speicherung regenerativer Energie ausschlaggebend ist, ist die HTES für diesen Einsatzbereich eher ungeeignet.

Das technisch am besten geeignete Elektrolyseverfahren zur Umwandlung erneuerbarer Energien ist somit die PEM Elektrolyse.

3.3 Pilotprojekte

Derzeit existieren in Deutschland sieben Forschungs- und Pilotprojekte, die sich explizit mit der Thematik der Wasserstoffspeicherung in Kombination mit regenerativen Energieträgern beschäftigen (Deutsche Energie-Agentur, 2018). Davon sind bereits fünf in Betrieb. Auf zwei dieser Projekte, den Energiepark Mainz sowie die Multi-Energie-Tankstelle H2BER, wird im Folgenden näher eingegangen.

Der Energiepark Mainz verfügt über drei Elektrolyseure mit Protonen-Austausch-Membran, die eine Spitzenleistung von je zwei Megawatt erbringen können. Betrieben werden diese mit Strom, der aus überschüssiger Windenergie eines naheliegenden Windparks bezogen wird. Es ist das weltweit erste Projekt, dass die PEM-Elektrolyse in dieser Größenordnung anwendet. Die Wahl dieser Technologie wird vom Energiepark Mainz durch die „…hochdynamische Fahrweise, wie sie bei einer Stromversorgung aus erneuerbaren Energien benötigt wird“ (Energiepark Mainz, 2018) begründet. In Betrieb genommen wurde die Anlage im Jahr 2015, zwei Jahre später wurde in den Regelbetrieb übergegangen. Ziel des Projekts ist einerseits die erneuerbaren Energien durch Speicherung regelbar zu machen und so ins lokale Netz integrieren zu können und andererseits auch die weitere Erforschung neuer Technologien der Elektrolyse (Deutsche Energie-Agentur, 2018). Der Energiepark Mainz sieht sich daher in einer Vorreiterrolle für ganz Deutschland:

> „Die Anlage kann bis zu 6 Megawatt Strom aufnehmen und hat damit eine für Engpässe im Verteilnetz relevante Leistungsklasse. Ähnliche Anlagen könnten daher in Zukunft an vielen Standorten sinnvoll eingesetzt werden.“ (Energiepark Mainz, 2018)

Der Elektrolyseur der Wasserstofftankstelle H2BER wird mit dem erzeugten Strom eines angrenzenden Windparks sowie einiger Solarmodule betrieben (Deutsche Energie-Agentur, 2018). Die Zielsetzung des Projekts ist dabei, die Kosten der Wasserstoffgewinnung durch Optimierung einzelner Anlagenbestandteile soweit wie möglich zu reduzieren. Das gewählte Verfahren ist in diesem Projekt die alkalische Druckelektrolyse (45 bar). Die Leistung beträgt 500 Kilowatt. Der Wasserstoff wird vorrangig durch die Wasserstofftankstelle als Kraftstoff genutzt, kann jedoch auch im benachbarten BHKW zur Gewinnung von Strom und Wärme weiter verwertet werden (Reiner Lemoine Institut, 2018). Das Projekt nutzt dabei sowohl Druckspeicher als auch Feststoffspeicher. Letztere werden derzeit intensiv erforscht, da sie eine große Sicherheit bieten und „…große Mengen Wasserstoff mit hoher Dichte bei niedrigem Druck (…) speichern [können].“ (Scheiner, 2014)

4. Datenaufbereitung und –auswertung

4.1 Stromverbrauch in der EMN

Die Ermittlung des Stromverbrauchs erfolgte über die online verfügbaren Daten der Main-Donau-Netzgesellschaft für das Jahr 2017 (Main-Donau Netzgesellschaft, 2018). Dabei musste sowohl die über die vorgelagerte Ebene, der Bayernwerk AG, bezogene Höchstentnahmelast als auch die dezentrale Netzeinspeisung mit einbezogen werden. Im dezentralen Netz wurden die einzelnen Einspeisungen aufsummiert. Hinzuaddiert wurden anschließend die aus dem überregionalen Verteilnetz (110 kV) bezogenen Höchstentnahmelasten.

Zu beachten ist, dass das Netzgebiet der Main-Donau-Netzgesellschaft nicht mit dem Gebiet der EMN übereinstimmt. Das Netzgebiet umfasst knapp 1,3 Millionen Einwohner (Main-Donau Netzgesellschaft, 2018) wohingegen die EMN über 3,5 Millionen Einwohner zählt (Metropolregion Nürnberg, 2018). Daher wurde die Annahme getroffen, dass der Stromverbrauch entsprechend der Einwohnerzahl hochskaliert werden kann. So ließ sich der stündliche Stromverbrauch in der EMN für das Jahr 2017 bestimmen. Dargestellt ist dieser in der Abbildung 4, der Verlauf wurde mit einem Polynom sechsten Grades angenähert.

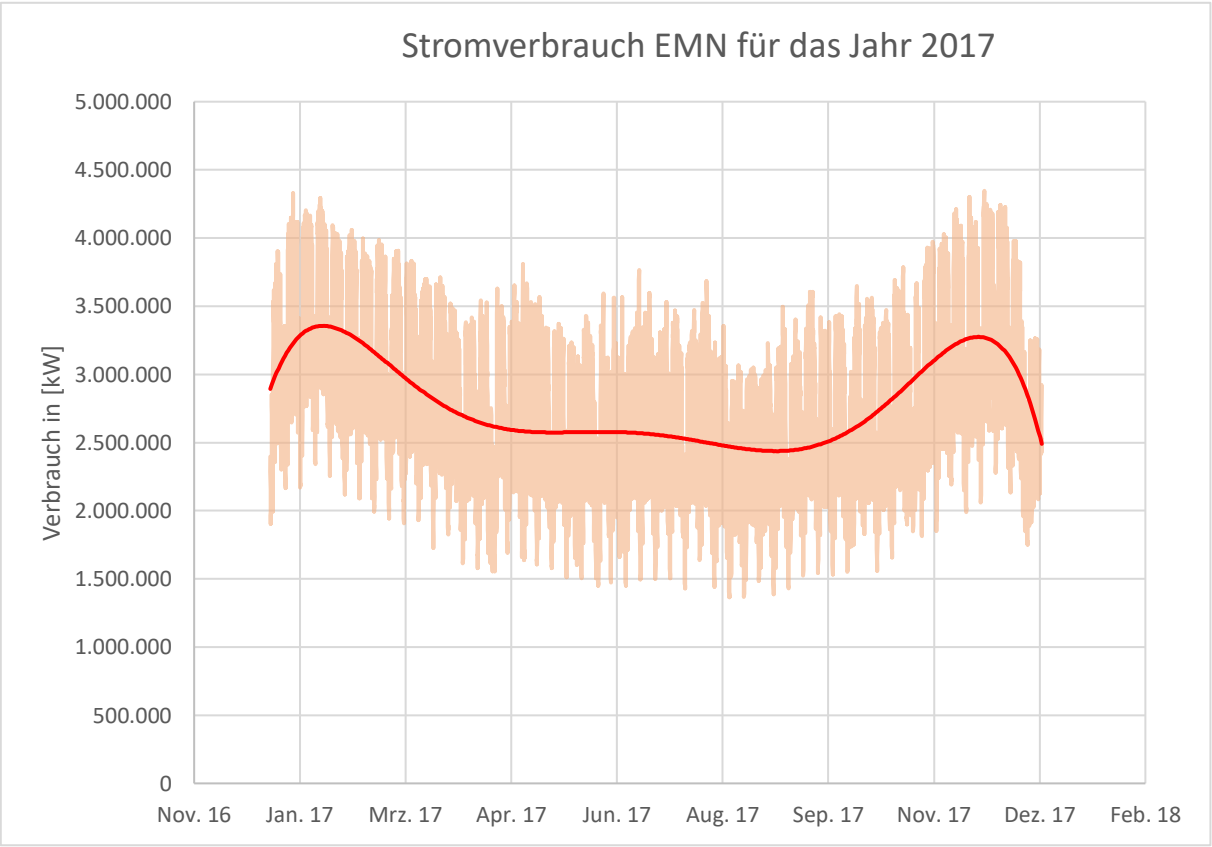

Abbildung 4: Verlauf Stromverbrauch der EMN im Jahr 2017

Der Stromverbrauch zeigt den erwarteten Verlauf. So ist im Sommer ein geringerer Verbrauch als im Winter zu verzeichnen. Das jeweils zum Jahreswechsel auftretende Verbrauchstief kann durch die Weihnachtsfeiertage und damit einhergehende Betriebsschließungen begründet werden.

Da im Folgenden ein Vergleich zwischen dem Stromverbrauch und der potentiell in der EMN vorhandenen Windenergie hergestellt werden soll, ist es notwendig nur den Anteil des Stromverbrauchs zu betrachten, der als Zielwert für das Jahr 2030 vorgesehen ist. Das durch die EMN definierte Ziel ist es 60 Prozent des erzeugten Stroms aus regenerativen Energieträgern zu gewinnen. Da der Anteil an Energie durch Wasserkraft beziehungsweise Biomasse als nicht mehr ausbaufähig angenommen wird, kann dieser weiterhin mit circa 14 Prozent mit einberechnet werden, folglich 7,9 Prozent bezogen auf das 60-Prozent-Ziel. Der restliche Stromanteil soll durch Wind und Sonne erzeugt werden, wobei der Mix 70 Prozent Windenergie und 30 Prozent Photovoltaik betragen soll. So ergibt sich letztendlich ein prozentualer Anteil an Windenergie von 38,7 Prozent. Aufbauend auf diesem Ergebnis kann so im folgenden Abschnitt der durch Windenergie erzeugte Stromverbrauch dargestellt werden und in einen direkten Vergleich mit der potentiell vorhandenen Windenergie gebracht werden.

4.2 Windenergie - Verläufe

Die Daten zur Windenergie wurden mithilfe der MERRA-2 Datenbank der NASA ermittelt. Insgesamt wurden so 20 Rastergebiete definiert, die ungefähr der EMN entsprechen. Für diese Rastergebiete lag jeweils die spezifische Windenergie vor. Dabei wurde die spezifische Windenergie in einer Höhe von 80 Metern für die folgenden Berechnungen zugrunde gelegt, da die in der durchschnittlichen Nabenhöhe von 130 Metern vorliegende spezifische Windenergie zu hoch ist und nicht der Realität entspricht. Dies liegt vor allem daran, dass Bodeneinflüsse nicht weiter beachtet werden. Im nächsten Schritt ließ sich die von einer Anlage erzeugte Leistung ermitteln, indem ein durchschnittlicher Rotordurchmesser von 150 Meter vorausgesetzt wurde. Die potentiell vorliegende Windenergie wurde gesamt definiert als die im Jahr 2017 durchschnittlich verbrauchte Windenergie, die durch bereits bestehende WEA erzeugt wurde, zusätzlich der Windenergie die mithilfe des Ausbauplans gewonnen werden könnte. Dieser sieht vor, dass potentiell weitere 642 Windenergieanlagen in der EMN errichtet werden können[1]. Somit konnte die gesamte in der EMN verfügbare Windenergie berechnet werden.

Beispielrechnung zur Bestimmung der Windenergie:

$$P_{WEA,80m} = 49{,}5\,\frac{W}{m^2}$$

Unter Berücksichtigung einer Durchschnittsrotorfläche von A=17.671,46 m² und potentiell 642 weiterer WEA:

$$P_{WEA,1890\ Anlagen} = 49{,}5\,\frac{W}{m^2} * 17.671{,}46\ m^2 * 642 = 561{,}6\ MW$$

Da in der EMN im Jahr 2017 gesamt 2371 GWh Strom aus Windenergie erzeugt wurden, betrug die durchschnittliche vorliegende Leistung:

$$P_{Wind,EMN,2017} = \frac{2371\ GWh}{8760\ h} = 270{,}66\ MW$$

Die potentiell zusätzlich verfügbare Windenergie wurde anschließend zur durchschnittlich vorliegenden Leistung addiert. Somit kann das Windenergiepotential, das in der EMN im Jahr 2017 vorlag, näherungsweise dargestellt werden (siehe Abb. 5).

[1] Anzahl an potentiell möglichen WEA sind der Projektstudie von Lisa Herrmann entnommen

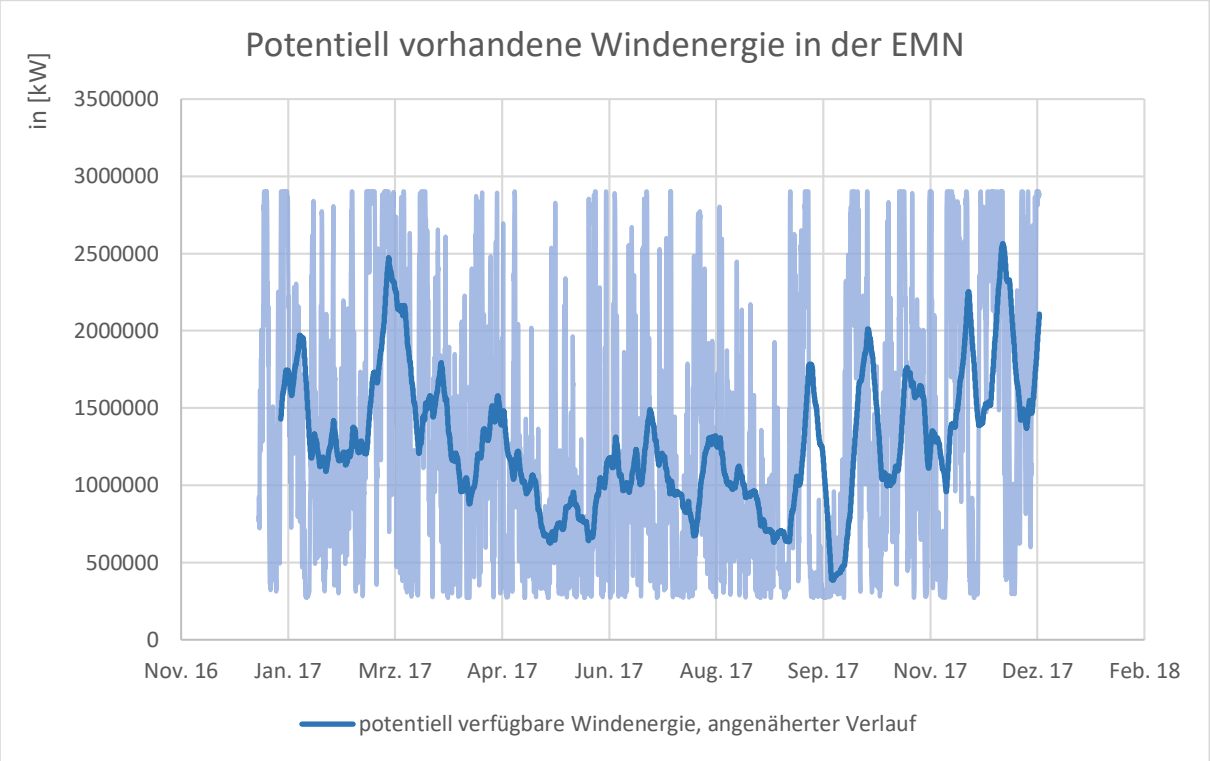

Abbildung 5: Verlauf potentiell verfügbare Windenergie in der EMN (Vergleichsjahr 2017, 642 zusätzliche WEA)

Der angenäherte Verlauf, der durch Mittelwertbildung erzeugt wurde, zeigt, dass die im Sommer verfügbare Windenergie etwas geringer ist und die größten potentiellen Erzeugungsspitzen in den Wintermonaten vorkommen.

4.2.1 Potentiell verfügbare Windenergie vs. Stromverbrauch (Szenario 2030)

Die potentiell verfügbare Windenergie wurde nun in einen direkten Vergleich mit dem im Jahr 2017 in der EMN gegebenen Stromverbrauch gestellt (siehe Abb. 6). Dabei wurde nur der Anteil am Stromverbrauch betrachtet, der als Windenergieanteil für das Jahr 2030 prognostiziert wird.

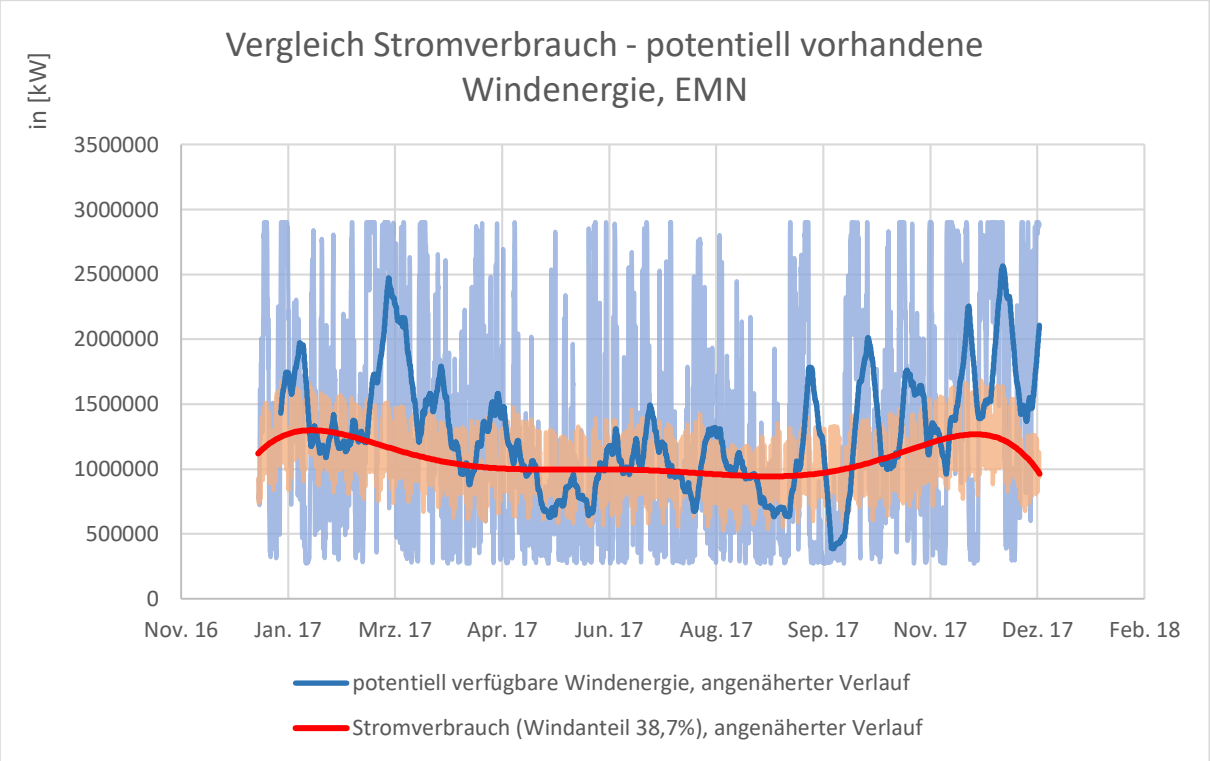

Abbildung 6: Stromverbrauch (Windanteil 38,7%) vs. potentiell verfügbare Windenergie (zusätzliche 642 WEA)

Wie in aus dem Diagramm ersichtlich wird, bilden sich in dem für 2030 gebildeten Szenario deutliche Überschüsse, aber auch Defizite aus. Beachtet werden muss an dieser Stelle, dass der Stromverbrauch des Jahres 2017 als Referenz genommen wurde. Es muss mit einkalkuliert werden, dass dieser bis zum Jahr 2030 noch ansteigt. Daher ist davon auszugehen, dass sich Überschüsse und Defizite weitestgehend gleichmäßig verteilen. Soll der durch Windenergie erzeugte Strom den zu deckenden Strombedarf von 38,7 Prozent im Jahr 2030 entsprechen, wird dies nur mithilfe von Speichermöglichkeiten umsetzbar sein. Andererseits müsste zu jedem Zeitpunkt eine über dem Strombedarf liegende Windenergie verfügbar sein, das bedeutet eine weit höhere Anzahl benötigter WEA und es wäre von zahlreichen Abregelungen aufgrund von Netzengpässen auszugehen. Dass der fluktuierende Verlauf ebenfalls durch einen optimalen Sonne-Wind-Energiemix ausgeglichen werden kann, wird bei dieser Betrachtung außer Acht gelassen.

4.2.2 Vorhandene Windenergie vs. Stromverbrauch (Szenario 2030)

Gesamt stehen in der EMN aktuell 627 Windenergieanlagen. Diese sind weitestgehend gleichmäßig verteilt, weswegen die Betrachtung eines speziellen Rastergebietes der MERRA 2 Daten keinen Sinn macht. Daher wurde der aktuelle Windenergieverlauf über die gesamte EMN betrachtet und mit dem Stromverbrauch in der EMN verglichen (siehe Abb. 7). Der Stromverbrauch reflektiert wieder nur den Windenergieanteil und bezieht sich prozentual auf

das Szenario 2030. Für die Berechnung wurde erneut mit den Windenergiedaten des Jahres 2017 gerechnet. Allerdings wurde nun eine Leistung für die 627 WEA errechnet, unter der Annahme eines Rotordurchmessers von 113 m, da die bisher angenommenen 150 m zwar in Bezug auf zukünftige WEA realistisch sind, jedoch nicht für die derzeitige Situation verwendet werden können.

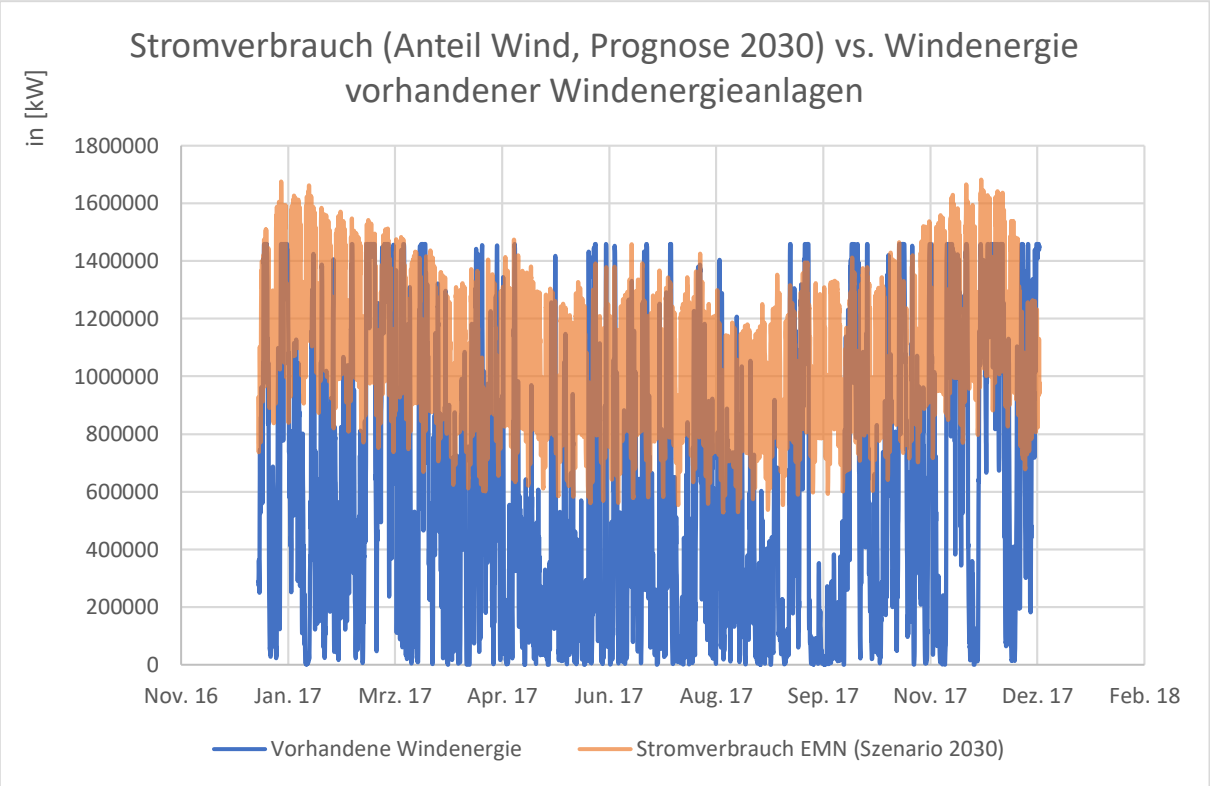

Abbildung 7: Vorhandene Windenergie vs. Stromverbrauch (Szenario 2030)

Wie im Diagramm erkennbar ist, liegt die durch bestehende WEA bereitgestellte Energie fast durchgehend unterhalb des durch Windenergie erzeugten Stromverbrauchs, der bezogen auf den optimalen Mix im Jahr 2030 benötigt wäre. Unter diesen Umständen ist eine Speicherung daher nicht notwendig, da es zu keinem Zeitpunkt zu Überschüssen kommt, die Netzengpässe nach sich ziehen könnten.

4.2.3 Vorhandene Windenergie vs. Stromverbrauch (aktueller Zustand)

Da dieser Zustand jedoch nicht der gegenwärtigen Situation entspricht, wurde zusätzlich untersucht, inwiefern sich Überschüsse ausbilden, wenn der derzeitige durch Windenergie erzeugte Stromverbrauch betrachtet wird. Hierzu wurde zunächst der regenerative Stromanteil aus Windenergie ermittelt. Wie bereits berechnet, betrug der gesamte Stromverbrauch in der EMN 24.427,4 GWh, davon waren 2371 GWh regenerativ durch Windenergie erzeugt. Das ergibt einen Anteil von 9,7 Prozent.

In Abbildung 8 sind die sich hieraus ergebenden Verläufe von Windenergie und Stromverbrauch zu sehen.

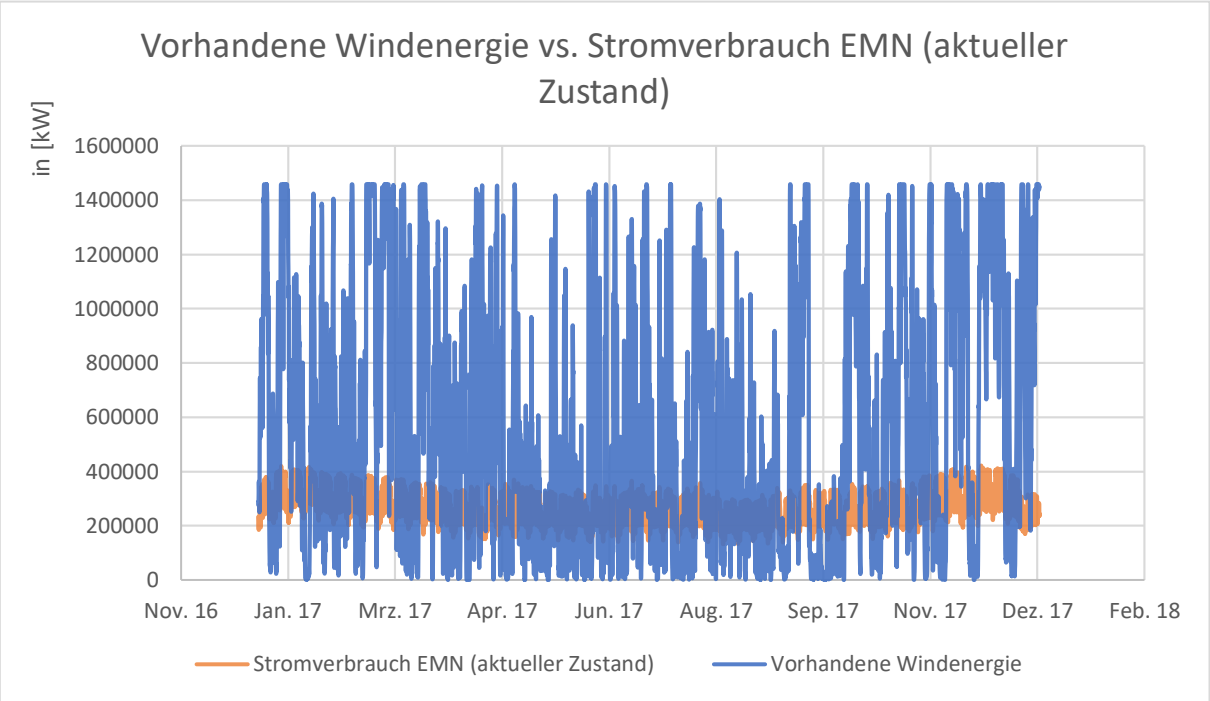

Abbildung 8: Vorhandene Windenergie vs. Stromverbrauch (aktuell, Windanteil 9,7%)

Aus der Abbildung wird erkenntlich, dass auch derzeit schon Überschüsse vorliegen. Allerdings existieren in der EMN zum aktuellen Zeitpunkt viele WEA mit nur ein oder zwei Windrädern, größere Windparks sind aufgrund der 10-H-Regelung noch eine Seltenheit. Bezüglich der vergleichsweise geringen Leistungseinspeisungen kommt es bisher aber kaum zu Netzengpässen und die Fluktuation kann durch konventionelle Energieträger gut ausgeglichen werden. Die Speicherungsfrage stellt daher auch in diesem Fall kein Thema dar, mit Ausnahme der wenigen großen Windparks, die gesondert betrachtet werden müssen.

5. Analyse des Speicherbedarfs

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, lohnt sich eine Speicherung vor allem in Bezug auf das Klimaziel 2030. Werden 60 Prozent des Stromverbrauchs regenerativ bereitgestellt, ist es nicht mehr ausreichend den Strommix bezüglich Wind- und Sonnenenergie anzupassen, sondern es werden zusätzlich Speichermöglichkeiten benötigt, um einen Ausgleich von Überschuss- und Defizitzeiten zu gewährleisten.

5.1 Speicherbedarf EMN

Im Folgenden wird das in Abschnitt 4.2.1 beschriebene Szenario für 2030 näher untersucht. Die sich hierfür ausbildenden Überschüsse und Defizite sind in Abbildung 9 dargestellt.

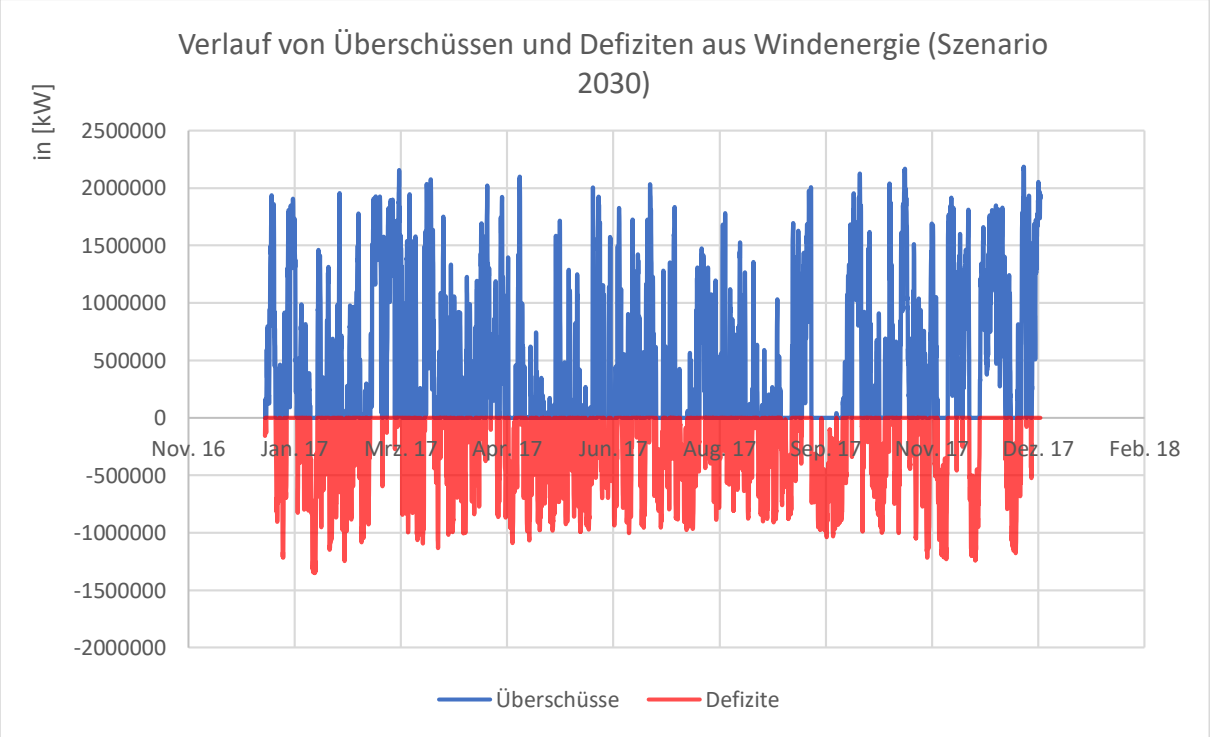

Abbildung 9: Verlauf der Windenergieüberschüsse und -defizite (Szenario 2030)

Wie aus dem Diagramm ersichtlich wird, sind die vorliegenden Überschüsse stärker ausgeprägt als die Defizite. Die rechnerische Ermittlung ergibt für den Jahresüberschuss eine Energiemenge von 4044 GWh gegenüber der Energiemenge des Jahresdefizits von 2180 GWh.

Im Jahr 2017 wurden in der EMN 24.427 GWh Strom verbraucht. Der darauf bezogene voraussichtlich im Jahr 2030 aus Windenergie erzeugte Strom läge somit bei 9453 GWh. Dieser Wert kann nun mit dem Ausmaß der Defizite verglichen werden. Die Energiemenge der Defizite spielt dabei die wesentliche Rolle, da diese ausgeglichen werden müssen, um am Ende das Ziel der 60 prozentigen Energieversorgung durch regenerative Anlagen zu erreichen. Aus der Gegenüberstellung der beiden Energiemengen wird ersichtlich, dass die Defizite in etwa ein Viertel des Gesamtwindenergiebedarfs betragen. Wird dieser Gedanke weiterverfolgt, so würde dies bedeuten, dass für jedes vierte Windrad ein Elektrolyseur zur Verfügung steht, der bei Volllastleistung des Windrads den erzeugten Strom aufnimmt und umwandelt.

5.2 Speicherbedarf Wald-Windpark Reichertshüll

Der Wald-Windpark Reichertshüll im Raitenbucher Forst ist in der EMN aktuell der Windpark mit der größten Gesamtleistung. Er verfügt über elf WEA vom Typ Nordex N131 mit einer Anlagenleistung von je 3,3 MW (Ostwind, 2018). Da der Windpark erst im Jahr 2017 in Betrieb genommen wurde, war es in Bezug auf die vorliegende Projektarbeit nicht möglich, Daten zum Energiemengenumfang von Abregelungsmaßnahmen zu erhalten. Allerdings kann in der bereits erwähnten allgemeinen Überlegung bezüglich des Stromverbrauch-Defizit-Verhältnisses die Annahme getroffen werden, dass sich die Ausbildung von Überschüssen und Defiziten von der EMN auf einzelne Anlagen übertragen lässt. Dass würde bedeuten, dass bei einer gesamten Windparkleistung von 36,3 MW ein oder mehrere Elektrolyseure mit einer Gesamtleistung von ungefähr 9 MW benötigt werden würden. Für die bestehenden Pilotprojekte konnten keine Angaben zur Leistung des zugehörigen Energieparks in Erfahrung gebracht werden, weswegen an dieser Stelle kein Vergleich gezogen werden kann. Die gesamte Auslegung einer Elektrolyseanlage würde darüber hinaus den Umfang der vorliegenden Arbeit übersteigen und kann auch nicht verallgemeinernd angenommen werden. Es wäre allerdings denkbar, dies in Verbindung mit definierten Ausbauplänen für das Jahr 2030 in Bezug auf einen bestimmten Wind- oder Energiepark in zukünftigen Arbeiten weiterführend zu untersuchen.

6. Fazit

Die derzeitige Situation der Stromerzeugung in der EMN erfordert aufgrund der prozentualen Verteilung von regenerativen und konventionellen Energieträgern keine Speicherkapazität. Die konventionellen Kraftwerke können die Volatilität der erneuerbaren Energieträger ausreichend ausgleichen, um eine dauerhafte Versorgungssicherheit zu garantieren. Im Jahr 2030 wird dieser Ausgleich bei einem 60 prozentigen Anteil an erneuerbaren Energieträgern nicht mehr möglich sein. Der Einsatz von Speichern ist dann zur Sicherstellung der Versorgung unerlässlich. Da die Wirtschaftlichkeit von Elektrolyseanlagen dem aktuellen Stand der Technik zufolge mit steigender Leistungsklasse zunimmt, ist es insbesondere ratsam die Speicher in großen Windparks einzusetzen (Smolinka et al., 2010, S.32). Vorstellbar ist ebenfalls den zur Elektrolyse benötigten Strom nicht ausschließlich aus Windenergie, sondern ebenfalls aus Solarenergie zu beziehen. Dafür sind jedoch die zukünftigen Ausbaupläne der erneuerbaren Energieträger maßgeblich, anhand derer dann ein sinnvoller Einsatz von Speichern festgelegt werden kann.

Abschließend können daher zwei Parameter benannt werden, die den entscheidenden Einfluss auf die Frage haben, inwiefern der Einsatz von Speichern sinnvoll ist: zum einen spielt der prozentuale Anteil der erneuerbaren Energien am gesamten Stromverbrauch eine wichtige Rolle. Denn mit steigendem Anteil wächst auch die Häufigkeit der Abregelungen, infolge des Einspeisemanagements, wie es sich in anderen Bundesländern bereits zeigt. Desweiteren können die konventionellen Kraftwerke keinen Ausgleich mehr bewerkstelligen und somit die Versorgung sicherstellen. Zum anderen ist der Einsatz von Elektrolyseuren und Speichern hinsichtlich der Kosten nur in Verbindung mit großen Wind- oder Energieparks wirtschaftlich.

7. Ausblick

Die vorliegende Arbeit ist dazu gedacht den Prozess der Speicherung durch Wasserelektrolyse als Teilprozess einer zukünftigen regenerativen Stromerzeugung näher zu betrachten. Allerdings ist für eine Umsetzung des Konzeptes eine umfangreiche Sichtweise erforderlich, die nicht nur die Speicherung, sondern ebenfalls die Rückspeisung in das Stromnetz miteinbezieht. Die Möglichkeiten sind hier vielfältig, von Gasturbinen und Blockheizkraftwerken bis hin zu Brennstoffzellen.

Dies ist nur einer der Gründe, weswegen die Arbeit wirtschaftliche Aspekte nicht weiter untersucht. Denn der hundertprozentige Umstieg auf eine regenerative Stromerzeugung bis zum Jahr 2050 ändert die Rahmenbedingungen grundlegend. Daher liefert die derzeitige Situation kein vergleichbares Bild, anhand dessen eine Beurteilung der Wirtschaftlichkeit übertragbar und sinnvoll wäre. Darüber hinaus bedarf es auch geeigneter politischer Randbedingungen, um ein Gelingen der Energiewende zu bewerkstelligen. Somit wird am Ende der flexible Einsatz von Erneuerbaren Energien möglich und stellt eine realistische Option für eine zukünftig hundertprozentige grüne Stromversorgung dar.

Literaturverzeichnis

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2018): Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2017. Grafiken und Diagramme unter Verwendung aktueller Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat).

Bundesnetzagentur (Hg.) (2018a): Aktueller Bericht zu Netz- und Systemsicherheitsmaßnahmen (2. und 3. Quartal 2017). Quartalsbericht in Zahlen. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Netz_Systemsicherheit/Netz_Systemsicherheit_node.html, zuletzt geprüft am 02.06.2018.

Bundesnetzagentur (Hg.) (2018b): Leitfaden Einspeisemanagement. Online verfügbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Einspeisemanagement/einspeisemanagement-node.html, zuletzt geprüft am 09.06.2018.

Bundesverband WindEnergie (Hg.): Überblick: Windenergie in Deutschland. Online verfügbar unter https://www.wind-energie.de/themen/statistiken, zuletzt geprüft am 17.05.2018.

Deutsche Energie-Agentur (Hg.): Strategieplattform Power to Gas. Energiepark Mainz. Online verfügbar unter http://www.powertogas.info/power-to-gas/pilotprojekte-im-ueberblick/energiepark-mainz/, zuletzt geprüft am 06.06.2018.

Deutsche Energie-Agentur (Hg.): Strategieplattform Power to Gas. Multi-Energie-Tankstelle H2BER. Online verfügbar unter http://www.powertogas.info/power-to-gas/pilotprojekte-im-ueberblick/multi-energie-tankstelle/, zuletzt geprüft am 06.06.2018.

Deutsche Energie-Agentur (Hg.): Strategieplattform Power to Gas. Pilotprojekte. Online verfügbar unter http://www.powertogas.info/power-to-gas/pilotprojekte-im-ueberblick/?no_cache=1, zuletzt geprüft am 09.06.2018.

Deutsche WindGuard (2017): Status des Windenergieausbaus an Land in Deutschland. BWE; VDMA. Online verfügbar unter https://www.wind-energie.de/sites/default/files/download/publication/factsheet-status-des-onshore-windenergieausbaus-deutschland-2017/20180125_factsheet_status_windenergieausbau_an_land_2017.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2018.

Die Bundesregierung (Hg.): Energiewende im Überblick. Online verfügbar unter https://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/Energiekonzept/0-Buehne/buehnenartikel-links-energiewende-im-ueberblick.html, zuletzt geprüft am 13.05.2018.

Die Bundesregierung (Hg.) (2018): Schlüssel für eine erfolgreiche Energiewende. Online verfügbar unter https://www.bundesregierung.de/Content/DE/Artikel/2017/05/2017-05-02-energieforschung.html, zuletzt geprüft am 13.05.2018.

Energiepark Mainz (Hg.): Technologie. Online verfügbar unter http://www.energiepark-mainz.de/wissen/technologie/, zuletzt geprüft am 05.06.2018.

Gailing, Ludger; Röhring, Andreas (2015): Was ist dezentral an der Energiewende? Infrastrukturen erneuerbarer Energien als Herausforderungen und Chancen für ländliche Räume. In: *Raumforsch Raumordn* 73 (1), S. 31–43. DOI: 10.1007/s13147-014-0322-7.

Kurzweil, Peter; Dietlmeier, Otto K. (2015): Elektrochemische Speicher. Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, rechtliche Grundlagen. Wiesbaden: Springer Vieweg. Online verfügbar unter http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-10900-4.

Main-Donau Netzgesellschaft (Hg.) (2018): Veröffentlichungen - Strom. Netzkennzahlen & Netzrelevante Daten. Online verfügbar unter https://www.main-donau-netz.de/header/veroeffentlichungen/strom.html, zuletzt geprüft am 09.06.2018.

Metropolregion Nürnberg (2017): Klimapakt der Europäischen Metropolregion Nürnberg, 28.07.2017.

Metropolregion Nürnberg (Hg.) (2018): Daten & Fakten. Online verfügbar unter https://www.metropolregionnuernberg.de/daten-fakten/daten-fakten.html, zuletzt geprüft am 09.06.2018.

Ostwind (Hg.) (2018): Wald-Windpark Reichertshüll. Online verfügbar unter https://www.ostwind.de/projekte/aktuelle-projekte/reichertshuell/, zuletzt geprüft am 09.06.2018.

Reiner Lemoine Institut (2018): H2BER2 – Entwicklung und Erprobung von Betriebsstrategien für die H2-Tankstelle am Flughafen BER. Online verfügbar unter https://reiner-lemoine-institut.de/h2ber2-entwicklung-und-erprobung-von-betriebsstrategien-fuer-die-h2-tankstelle-am-flughafen-ber/, zuletzt geprüft am 12.06.2018.

Scheiner, Jens (2014): GKN und McPhy kooperieren bei Wasserstoffspeichern. Hg. v. Automobil Industrie. Online verfügbar unter https://www.automobil-industrie.vogel.de/gkn-und-mcphy-kooperieren-bei-wasserstoffspeichern-a-454607/, zuletzt geprüft am 17.06.2018.

Smolinka, Tom; Günther, Martin; Garche, Jürgen (2010): NOW-Studie: Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien. Kurzfassung des Abschlussberichts. Fraunhofer ISE.

Sterner, Michael; Stadler, Ingo (Hg.) (2017): Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration. 2. korrigierte und ergänzte Auflage. Berlin: Springer Vieweg. Online verfügbar unter http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-48893-5.

Umweltbundesamt (Hg.) (2014): Windenergie. Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/windenergie#textpart-1, zuletzt geprüft am 17.05.2018.