Entwicklung eines Modells zur Stromzeitreihenextrapolation für Deutschland unter Einbeziehung realer Witterungsbedingungen und zukünftiger Technologien

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades „Bachelor of Science (B.Sc.)“ im Studiengang Wirtschaftsingenieur der Fakultät Elektrotechnik und Informatik, Fakultät für Maschinenbau und der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Leibniz Universität Hannover

vorgelegt von

Name: Wiegmann Vorname: Felix

[redacted] [redacted]

Prüfer: Prof. Dr. Breitner

Betreuung: Dr. Johannes Schmiesing, Avacon Netz GmbH

Lachendorf, 04.10.2022

1 Inhalt

2 Abbildungsverzeichnis 2

3 Tabellenverzeichnis 4

4 Abkürzungsverzeichnis 4

5 Formelverzeichnis 5

6 Einleitung 5

7 Abstrakt 9

8 Stand des deutschen Elektroenergiesystems 9

8.1 Smard 9

8.2 Netzentwicklungsplan 10

8.2.1 Szenariopfad A 11

8.2.2 Szenariopfad B 11

8.2.3 Szenariopfad C 11

8.3 Erneuerbare Energien 12

8.3.1 Photovoltaik 12

8.3.2 Windenergie 13

8.3.3 Sonstige erneuerbare Energieträger 15

8.4 Konventionelle Energieträger 16

8.4.1 Gasenergie 16

8.4.2 Kernenergie 16

8.4.3 Kohleenergie 17

8.5 Netzlast 17

8.5.1 Elektromobilität 17

8.5.2 Wärmesektor 18

9 Speichertechnologien 18

10 Modellierung und Kenngrößen 19

10.1 Windenergie 20

10.1.1 Nennleistung 20

10.1.2 Volllaststunden 20

10.1.3 Spezifische Nennleistung 20

10.1.4 Normierte Leistung 20

10.1.5 Generatorkennlinien ... 21
10.1.6 Annäherung der Windgeschwindigkeit ... 22
10.2 Photovoltaik ... 25
10.2.1 Normierte Leistung ... 25
10.2.2 Skalierung Südausrichtung ... 25
10.2.3 Skalierung Ost/Westausrichtung ... 25
10.3 Sonstige Energieträger ... 29
10.4 Elektromobilität ... 31
10.4.1 PKW-Sektor ... 31
10.4.2 NFZ-Sektor ... 32
10.5 Wärmesektor ... 36
10.5.1 Wirkungsgrad COP ... 36
10.5.2 Modell und Parametrisierung ... 36
11 Restliche Netzlast ... 37
12 Ergebnisse ... 38
12.1 Makroskopische Ergebnisse ... 38
12.2 Jahresverlauf ... 41
12.3 Stichprobenvergleich ... 50
12.3.1 Wintertag ... 50
12.3.2 Sommertag ... 55
13 Diskussion ... 58
14 Ausblick ... 59
15 Literaturverzeichnis ... 60
16 Ehrenwörtliche Erklärung ... 63

2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Vizekanzler Robert Habeck Pressekonferenz Januar 22 - (FAZ, 2022) ... 6
Abb. 2: Ausbau der Ladeinfrastruktur Quelle: (BDEW, 2022) ... 7
Abb. 3: Anteil der Stromerzeugung aus EE am Bruttostromverbrauch Quelle: (BDEW, 2021) ... 8
Abb. 4: Installierte Leistungen im Vergleich Quelle: (SMARD, 2022) ... 10
Abb. 5: Entwicklungsprozess des NEP Quelle: (Bundesnetzagentur, kein Datum) ... 11
Abb. 6: Installierte Photovoltaik Leistung Quelle: (SMARD, 2022) ... 13

ÜNB ..... *Übertragungsnetzbetreiber*
V2G ..... *Vehicle to grid*
VNB ..... *Verteilnetzbetreiber*

5 Formelverzeichnis

Formel 1: Leistungsertragsformel Windenergie 13
Formel 2: Nennleistung 20
Formel 3: Volllaststunden 20
Formel 4: Spezifische Nennleistung 20
Formel 5: Normierte Leistung 20
Formel 6: Bestimmung der Windgeschwindigkeit 23
Formel 7: Generatorkennlinie 24
Formel 8: Bestimmung der prognostizierten Leistung 25
Formel 9: Sonnenaufgang und Sonnenuntergang in Abhängigkeit des Tages des Jahres 25
Formel 10: Skalierte Kosinusfunktion in Abhängigkeit der Tageslänge 27
Formel 11: Einschränkung zu Formel 10 28
Formel 12: Einfache Geradengleichung 29
Formel 13: Kosinusfunktion für die Annäherung der durchschnittlichen Verkehrsaufkommens Mo-Sa 33
Formel 14: Sinusfunktion für die Annäherung des durchschnittlichen Verkehrsaufkommens So 33
Formel 15: Anstiegsfaktor 38

6 Einleitung

Die Energiewende ist eines der Forschungsgebiete, welches das letzte Jahrzehnt stark geprägt hat und diesen Trend in den 2020er Jahren fortzusetzen scheint. Abbildung 1 zeigt den Bundesminister für Wirtschaft und Klimaschutz und amtierenden Vizekanzler, Robert Habeck. Dieser stellte im Januar 2022 eine Eröffnungsbilanz zu Klimaschutz und Energiewende vor. Das Fazit: um die langfristig gesetzten Klimaschutzziele noch zu erreichen, müssen Erneuerbare Energien (EE) deutlich

ausgebaut und die Energiewende beschleunigt werden. (BMWK, 2022)

Abb. 1: Vizekanzler Robert Habeck Pressekonferenz Januar 22 - (FAZ, 2022)

In den Medien wird die Energiewende beispielsweise als „das größte wirtschaftspolitische Projekt seit der Wiedervereinigung“ (Spiegel Online, kein Datum) bezeichnet. Die mit der Energiewende einhergehenden nötigen Transformationsprozesse stellen unsere Gesellschaft, Politiker, Industrie und Bürger vor immense Herausforderungen. Während unser Strommix noch immer einen Anteil unter 50% an EE enthält, soll der Ausbau der Elektromobilität und EE in den kommenden Jahren weiter massiv vorangetrieben werden. In Abbildung 2 wird der Anstieg der in Deutschland errichteten Ladepunkte und die Menge der zugelassenen elektrischen Pkw dargestellt. Laut Bundesregierung soll die Anzahl der zugelassenen Elektroautos im Jahr 2030 die Marke von 15 Millionen erreichen. (BMDV, 2022)

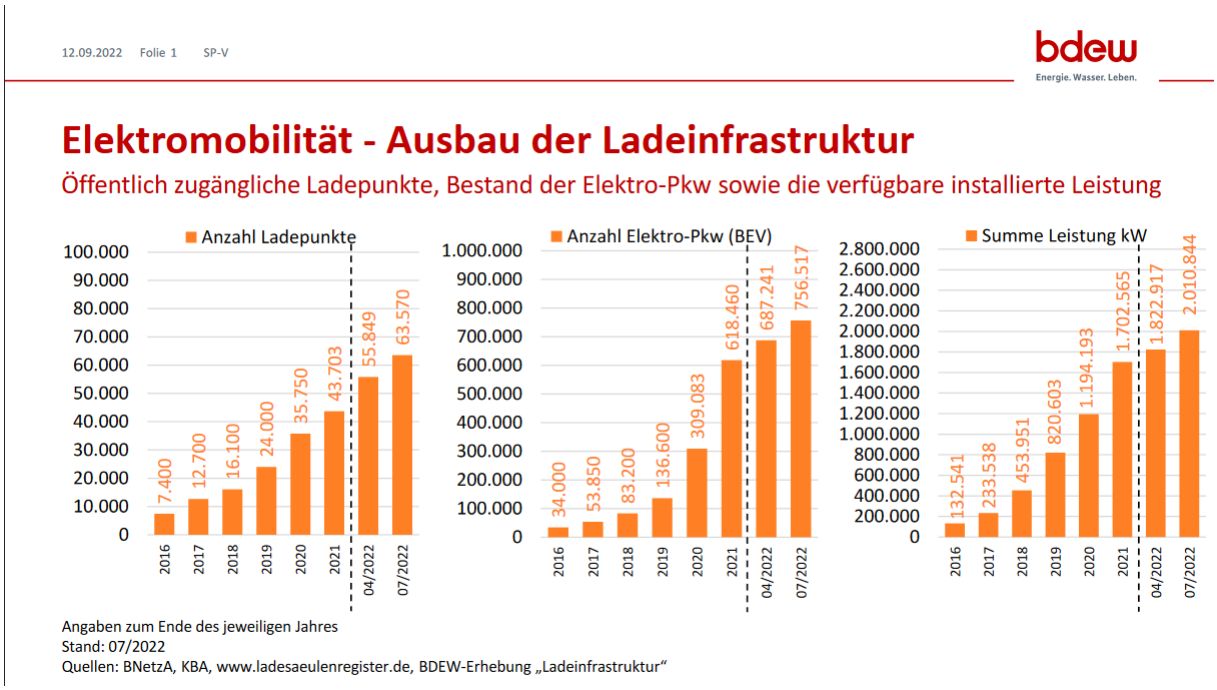

Abb. 2: Ausbau der Ladeinfrastruktur Quelle: (BDEW, 2022)

Geopolitische Entwicklungen wie der Krieg in der Ukraine zeigen auf, wie notwendig die Beschleunigung dieser Transformationsprozesse ist, um auch eine politische und strategische Unabhängigkeit von konventionellen fossilen Energiespeichern, häufig autokratisch regierter Staaten sicherzustellen. Der als gesamtgesellschaftlich zu betrachtende Prozess, welcher im Rahmen der Klimakrise und des damit verbundenen steigenden umweltpolitischen Druckes eine Herausforderung für Deutschland aber auch für europäische Partner und letztendlich auch die globale Gemeinschaft darstellt, kann für die Akteure aber auch eine Chance sein, mit innovativen Modellen und Technologien aus dem Wandel hervorzugehen. Energieintensive Industrien, wie die Stahl- oder Chemieindustrie und bspw. die Salzgitter AG, die als Teil dieser vermehrt auf die Produktion grünen Stahls setzen wird und sich somit Innovations- und Wettbewerbsvorteile gegenüber der Konkurrenz verspricht (Salzgitter AG, 2018). Das eine Versorgungssicherheit trotz des Rückbaus der Kernenergie und dem Kohleausstieg mit einem fortschreitenden Ausbau der EE sichergestellt ist, stellt Agora-Energiewende fest „Bei einer Reduktion der Kohleverstromung um zwei Drittel bei gleichzeitig verstärktem Zubau der Erneuerbaren Energien auf einen Anteil von 65 Prozent am Bruttostromverbrauch bis 2030 bleibt Deutschland Stromexporteur […]“ (Agora Energiewende und Aurora Energy Research, 2018). Dies ist ebenfalls in Abbildung 3 zu erkennen.

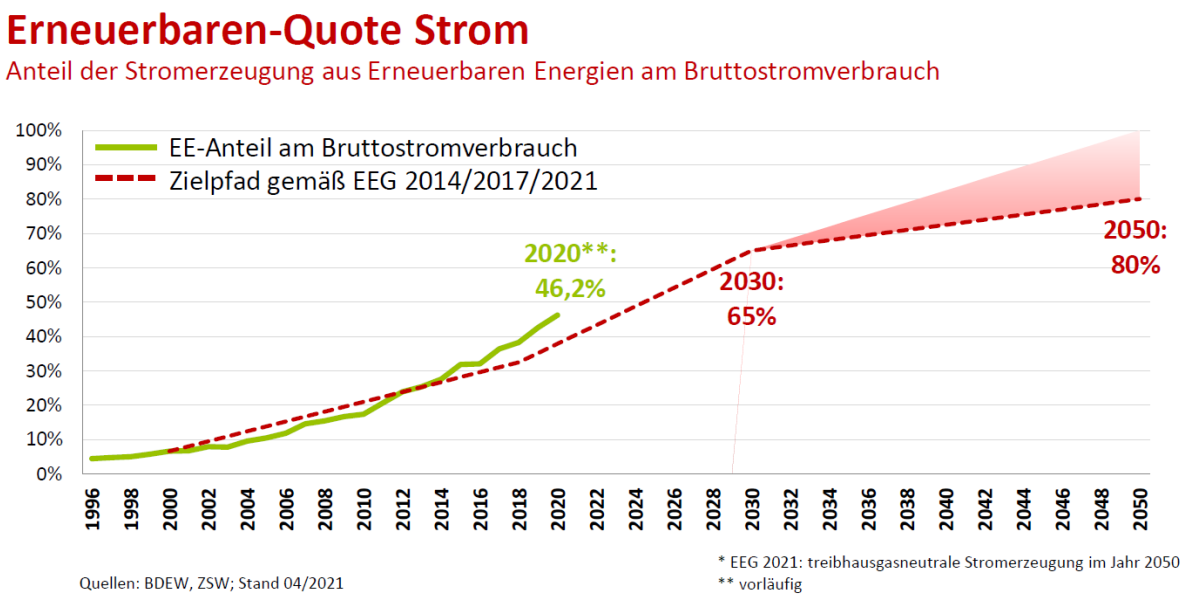

Abb. 3: Anteil der Stromerzeugung aus EE am Bruttostromverbrauch Quelle: (BDEW, 2021)

Nur wenn die Versorgungssicherheit auch unter Betrachtung der angeführten Punkte gesichert ist, kann die Industrie ihre Wettbewerbs- und Standortvorteile umfänglich ausspielen. Um also die Grundlage für diese Versorgungssicherheit zu legen, ist es die Aufgabe der Netzbetreiber wie Avacon, die durch die Energiesystemtransformation folgenden Anforderungen an das Mittel- und Niederspannungsnetz zu ermitteln und einen zielgerichteten Netzausbau zu gewährleisten. Da die Bilanz aus Stromleistungsentnahme und -erzeugung permanent ausgeglichen sein muss, ergibt sich die Notwendigkeit eines Netzausbaus, welcher eng an den Prozess und die Ziele der Energiewende gekoppelt ist. Durch den Ausbau der EE und Abbau der fossilen Energieträger beeinflussen zunehmend Faktoren wie saisonale klimatische Schwankungen, Witterungsverhältnisse und Phänomene wie „Dunkelflauten“ oder „Hellbrisen“ das Stromnetz. (Sauer, et al., 2019) Hieraus ergibt sich die zentrale Forschungsfrage:

- Inwiefern beeinflussen saisonale Schwankungen der Stromerzeugung und des Stromverbrauchs beim Ausbau der EE die Leistungsbilanz des Elektroenergiesystems?

Überschüssen durch den Zubau der erneuerbaren Energien ansteigen, ihre Änderungsrate jedoch weiter sinkt, Diese Beobachtung wird durch den schnelleren Anstieg der ausgebauten Nennleistung gegenüber der langsamer steigenden Netzlast verursacht. Ein großer Teil dieses Anstiegs ist dabei auf die Tage der Sommermonate zurückzuführen, in denen der Ausgleich leichter Mangellagen ohnehin kein unlösbares Problem darstellt. Die Grafik hat zusätzlich keine Aussagekraft zu der tatsächlichen Dauer dieser Überschuss und Mangellagen. Die Betrachtung der verschiedenen Monate zeigt, dass eine Versorgung der erneuerbaren Energien den Bedarf vollständig decken kann. Der gleichmäßige Ausbau der Energieträger Photovoltaik und Windenergie scheint hierbei entscheidend zu sein. Saisonale Schwankungen in den exogenen Größen dieser Energieträger gleichen sich bis zu einem gewissen Maß aus. Windstärkere Wintermonate können durch Windenergie auch an eher Solarenergie schwachen Tagen die Netzlast in weiten Teilen tragen. Umgekehrt ist der gleiche Effekt in den Sommermonaten zu beobachten, in denen Windgeschwindigkeiten im Durchschnitt geringer sind und die Sonneneinstrahlungsdauer durch längere Tage höher ist. Besonders die PV verzeichnet mit seinen Ausbauzielen enorme Überschüsse über den Tag. Übergangsmonate im Frühling und Herbst liefern ein ausgewogenes Verhältnis dieser Effekte. Trotz des grundlegenden Potenzials sind jedoch auch streckenweise Versorgungsengpässe durch Kaltdunkelflauten zu beobachten. In diesen Zeiträumen mit dauerhaft geringem PV-Ertrag, sowie schwachen oder nicht ausreichenden Windstärken. Dieser Effekt kann durch besonders kalte Temperaturen in seiner Spitze durch den abnehmenden Wirkungsgrad der Wärmepumpen deutlich verstärkt werden. Dieser Effekt kann deutlich in den Februar Wochen vom 3. bis 17. beobachtet werden. Die in der Abbildung 41 simulierten Effizienzsteigerungen der Windenergie reichen dabei nicht aus, die Fehlbeträge auszugleichen. Der Vergleich der Szenarien zeigt zusätzlich, dass die Abweichungen dieser zwar merklich sind, doch keine der Szenarien eine direkte Lösung auf die Problematik der Kaltdunkelflaute liefert.

14 Ausblick

Ausgehend der vorgestellten Ergebnisse bleibt primär die Frage der möglichen Auflösbarkeit der längerfristigen Versorgungsengpässe durch Speichertechnologien verschiedener Formen. Hier könnten das Bidirektionale Laden im Bereich der Elektromobilität oder beispielsweise Schwarmspeichertechnologien einen Lösungsansatz bieten. Inwiefern diese in ihren Kapazitäten und ihrem Abfragepotential zu relevanten kritischen Zeitpunkten als potentielle Lösung mit den Forschungsergebnissen vereinbar sein könnten.

Weitergehend könnte das Modell erweitert werden. Denkbare Ansätze sind:

- Eine genauere Modellierung einzelner Sektoren, wie z.B. die Temperaturabhängige Betrachtung des Sektors Verkehr
- Analyse, Modellierung und Einbindung des europäischen Energienetzes. Beantwortung der Frage inwiefern der Ausbau des europäischen Netzes zur Beseitigung des Mangellagenrisikos beiträgt.
- Berücksichtigung der regionalen Erzeugungsunterschiede und Betrachtung des innerdeutschen Netzausbaus. Hier besteht ein weiterer Konflikt des deutschen Energiesystems durch die überwiegend im Norden Deutschlands angesiedelten Windenergieanlagen und den industriellen starken Energiebedarf süddeutscher Regionen besonders um die Ballungsräume Stuttgart und München.
- Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels. Der Ausbau der erneuerbaren Energien ist ein Prozess, welcher maßgeblich für das Erreichen der Dekarbonisierung und der damit verbundenen Einhaltungen der gesetzten Klimaziele ist. Die Betrachtung des Energiesystems und insbesondere seines Wandels ist dahingehend interessant, da der Klimawandel indirekt eine Abhängigkeit von der Energiewende (Beschleunigung, Verzögerung) aufweist und gleichzeitig zu erwarten ist, dass das Energiesystem wiederum von den Folgen des Klimawandels abhängig ist.
- Weitere Betrachtungen könnten Wirtschaftliche Aspekte und die Finanzierbarkeit potenzieller Lösungen sein, sowie die potenziell möglichen finanziellen Schäden.

15 Literaturverzeichnis

Agora Energiewende und Aurora Energy Research, 2018. *65 Prozent Erneuerbare bis 2030 und ein schrittweiser Kohleausstieg Auswirkungen der Vorgaben des Koalitionsvertrags auf Strompreise, CO 2 -Emissionen und Stromhandel.* [Online]
Available at: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2018/65_EE_und_Kohleausstieg/142_Stromsektor-2030_65-Prozent-EE-und-schrittweiser-Kohleausstieg_WEB.pdf
[Zugriff am 2 10 2022].

Anon., kein Datum *Offshore Stiftung.* [Online]
Available at: https://www.offshore-stiftung.de/offshore-windenergie
[Zugriff am 2 10 2022].

BDEW, 2021. *Erneuerbaren Quote Strom.* [Online]
Available at:
https://www.bdew.de/media/documents/Beitrag_und_Ziele_EE_Strom_online_o_jaehrlich_Ba_100