



Universität für Bodenkultur Wien
University of Natural Resources
and Life Sciences, Vienna

Masterarbeit

Energiespeicherpotential von batterieelektrischen Fahrzeugen zum Ausgleich der Fluktuationen von erneuerbaren Energien durch bidirektionales Laden

verfasst von

Benedikt Ilja MENZL, BSc

im Rahmen des Masterstudiums

Umwelt- und Bioressourcenmanagement

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Wien, Mai 2022

Betreut von:

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Tobias Pröll
Institut für Verfahrens- und Energietechnik
Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik

Abstract

The goals of the Paris Agreement cannot be met without sector coupling. The aim of this work is to explore the potential of coupling the sectors of private transport and electric energy production. Sixteen scenarios are developed to evaluate to what extent battery electric vehicles can compensate the fluctuations of renewable energies with regards to bidirectional charging. The results are based on the area of Austria up to the year 2050. Four research questions, simplified here, are presented for this purpose: (F1) What energy storage potential is available in battery electric vehicles in Austria at the end of 2020? (F2) What energy storage potential is available in battery electric vehicles in Austria at the end of 2030? (F3) How many charging cycles of the battery electric vehicles occur per year and how high would the electricity storage capacity of all vehicles have to be in the hypothetical case that seasonal storage were to be targeted in 2030? (F4) To what extent can this energy storage potential theoretically compensate for fluctuations of renewable energies in 2030 to 2050? To answer these research questions, the battery electric vehicles registered in Austria are analyzed and scenarios regarding the future installed (lithium-ion) industrial battery quantity are discussed. In addition, scenarios of the market penetration of these vehicles are created and linked to the results of the data regarding storage sizes. To answer F3 and F4, the WAM+ scenario of the Bundesumweltamt is used and it is elaborated how much energy storage will be needed in the years leading up to 2050. This Data is combined with the results of F1 and F2 so F3 and F4 could be solved with a decision-tree algorithm. To discuss F1-F4, qualitative data sets are taken from the transport and energy sectors and get processed using mathematical functions. The Results of F1 will show an energy storage potential from 1910 MWh to 2451 MWh. For F2 this value, depending on the scenario, increased up to 32600 MWh. Research question F3 can be answered with 730 charging cycles and 3,78 TWh hypothetical seasonal storage and for F4, an average increase in annual coverage hours of 22,64 % is elaborated. The 108 results for F4 are in the range between 4,03 % and 28,40 %.

Kurzfassung

Die Ziele des *Paris Agreements* können nicht ohne die Entkarbonisierung des Energie- und Mobilitätssektors erreicht werden. Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist, das Potenzial der Kopplung der Sektoren Mobilität und Energieerzeugung zu untersuchen. Es wurden Sechzehn Szenarien entwickelt, um zu eruieren, inwieweit batterieelektrische Fahrzeuge die Schwankungen von erneuerbaren Energien mithilfe von bidirektionalem Laden ausgleichen können. Die Ergebnisse dieser Masterarbeit beziehen sich auf das österreichische Bundesgebiet bis zum Jahr 2050. Dazu werden vier Forschungsfragen – die hier vereinfacht dargestellt werden – formuliert: (F1) Welches Energiespeicherpotenzial ist mit Ende des Jahres 2020 im österreichischen Bestand zugelassener batterieelektrischer Fahrzeuge vorhanden? (F2) Welches Energiespeicherpotenzial ist mit Ende des Jahres 2030 im österreichischen Bestand zugelassener batterieelektrischer Fahrzeuge vorhanden? (F3) Wieviele Ladezyklen der batterieelektrischen Fahrzeuge finden pro Jahr statt und wie hoch müsste die Stromspeicherkapazität aller Fahrzeuge im hypothetischen Fall sein, wenn im Jahr 2030 eine saisonale Speicherung angestrebt wird? (F4) Inwieweit kann dieses Energiespeicherpotenzial im Jahr 2030, 2040 und 2050 theoretisch die Fluktuationen von erneuerbaren Energien ausgleichen?

Um die Forschungsfragen beantworten zu können, werden die – in Österreich zugelassenen – batterieelektrischen Fahrzeuge analysiert und Szenarien hinsichtlich der zukünftig installierten (Lithium-Ionen-)Speicherkapazität diskutiert. Darüber hinaus werden Szenarien der Marktdurchdringung dieser Fahrzeuge erstellt und mit den Ergebnissen zu den verfügbaren Speicherkapazitäten verknüpft. Zur Beantwortung von F3 und F4 wird das WAM+ Szenario des Bundesumweltamtes herangezogen. Hier wird herausgearbeitet, wie viel Gesamtspeicherkapazität in den Jahren bis 2050 benötigt werden würde, um die Fluktuationen aus den erneuerbaren Energien auszugleichen. Diese Daten werden mit den Ergebnissen von F1 und F2 kombiniert, sodass F3 und F4 mit einem Entscheidungsbaum-Algorithmus gelöst werden konnten. Zur Diskussion von F1 bis F4 werden quantitative Datensätze aus den Sektoren Verkehr und Energie herangezogen und mit mathematischen Funktionen verknüpft. Die Ergebnisse von F1 zeigen ein Energiespeicherpotenzial von 1.910 MWh bis 2.451 MWh. Für F2 erhöht sich dieser Wert – je nach Szenario – auf bis zu 32.600 MWh. Die Forschungsfrage F3 kann mit 730 Ladezyklen und 3,78 TWh hypothetischer saisonaler Speicherung beantwortet werden und für F4 wird ein durchschnittlicher Anstieg der jährlichen Deckungstunden von 22,64 % errechnet. Die 108 Ergebnisse für F4 liegen in einem Bereich zwischen 4,03 % und 28,40 %.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

Datum

Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Literaturüberblick, Stand der Technik und Grundlagen des Themenbereichs	5
2.1	Ladeschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation	5
2.1.1	AC und DC Ladung	6
2.1.2	Ladebetriebsarten	7
2.1.3	Stand der Technik in Österreich	12
2.2	Die Kommunikationsschnittstelle zwischen BEV und EVSE	14
2.2.1	Signalisierung des maximalen Ladestroms über den Control Pilot-Kontakt	14
2.2.2	Signalisierung der maximalen Belastung des Ladekabels über den Proximity Pilot-Kontakt	17
2.3	Lithium-Ionen-Industriebatterien	18
2.4	WEM, WAM und WAM+ Szenario des Umweltbundesamtes	20
3	Ziel der Arbeit und konkrete Fragestellung	23
3.1	Ziel und Zweck der Arbeit	23
3.2	Konkrete Fragestellung	24
4	Modellierung und Methodik der Datenauswertung	27
4.1	Modellierung und Methodik der ersten Forschungsfrage (F1)	27
4.2	Modellierung und Methodik der zweiten Forschungsfrage (F2)	28
4.3	Modellierung und Methodik der dritten Forschungsfrage (F3)	28
4.4	Modellierung und Methodik der vierten Forschungsfrage (F4)	28
5	Ergebnisse	31
5.1	Der Bestand batterieelektrischer Fahrzeuge in Österreich 2020	31
5.2	Mobiler Speicherbestand in Österreich	36
5.3	Szenarien für den batterieelektrischen Fahrzeugbestand sowie dessen Speicherkapazität in Österreich 2030	39

5.4	Ausgleichspotential mobiler Speicher der Fluktuationen erneuerbarer Energien	47
5.4.1	Ergebnisse der Forschungsfrage 4	56
5.4.2	Verhältnis der Gesamtspeicherkapazität zu der Deckung der Jahresstunden	67
6	Diskussion	69
7	Schlussfolgerung und Ausblick	73
	Literaturverzeichnis	75
	Anhang	80

Abbildungsverzeichnis

1.1	Treibhausgasemissionen Österreichs nach Sektoren im Jahr 2017 [übernommen aus (Umweltbundesamt, 2019a, 60)]	1
2.1	Strang- und Leiterspannung im Niederspannungsnetz [übernommen aus: (Voltimum, 2005)]	6
2.2	SchuKo Schnittstelle nach DIN 49441 [übernommen aus: (Hans Wagner GmbH, o. D.)]	7
2.3	CEE-Schnittstellen nach IEC 60309 [übernommen aus: (Mennekes, 2020)]	7
2.4	Steckertypen 1, 2 und 3 [übernommen aus: (BMDV, 2014)]	9
2.5	Aufbau des CHAdemo-Steckers [Abbildung übernommen aus (Wikipedia, 2022)]	11
2.6	Aufbau des Combined Charging Systems [übernommen aus: (EV Europe, 2020)]	11
2.7	Signalisierung und Anschlussschema Typ 2 nach IEC 62196 [Übernommen aus: (Weemaes, 2019b)]	14
2.8	Darstellung der Pulsweitenmodulation nach ISO:61851 (Mültin, 2019) .	16
2.9	Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle [Übernommen aus: (Hürter, 2020)]	18
2.10	Überblick über gängige Lithium-Ionen-Technologien und ihre Vor- und Nachteile [Übernommen aus: (Saldaña u. a., 2019)].	19
5.1	Personenkraftwagen Bestand in Österreich nach Antriebsform im Jahr 2020 [bearbeitet aus (Statistik Austria, 2021b)]	31
5.2	Entwicklung von BEVs in Österreich [bearbeitet aus (Statistik Austria, 2021b)]	32
5.3	Häufigst zugelassene BEV nach Automobilmarke [bearbeitet aus (Statistik Austria, 2021a)]	33
5.4	Häufigst in Österreich zugelassenes BEV nach Modell [bearbeitet aus (Statistik Austria, 2021a)]	34

5.5	Kumulierte Speicherkapazität der in Österreich zugelassenen BEV [eigene Berechnung nach (Statistik Austria, 2021a)]	37
5.6	Entwicklung von BEVs in Österreich [bearbeitet aus (Statistik Austria, 2021b)]	39
5.7	Durchschnittliche Akkukapazität je zugelassenem BEV [eigene Berechnung nach (Statistik Austria, 2021a)]	40
5.8	Speicherkapazität bis 2030 für Szenario Basis [eigene Berechnung]	42
5.9	Speicherkapazität bis 2030 für Szenario Basis + und Szenario Basis ++ [eigene Berechnung]	43
5.10	Speicherkapazität bis 2030 für Szenario Langstrecke [eigene Berechnung]	44
5.11	Differenz aus Erzeugung inkl. Speicher und Last in Österreich [Eigene Berechnung; Daten aus: (Austrian Power Grid, 2021b) (Austrian Power Grid, 2021a)]	47
5.12	Schematische Darstellung der Funktionen der Stromerbringung nach Typ im Jahr 2020 [Eigene Berechnung; Daten aus: (Austrian Power Grid, 2021a)]	49
5.13	Differenz Erbringung und Last: Szenario 2030, Szenario 2040 und Szenario 2050 [eigene Berechnung]	51
5.14	Ladezyklen der BEVs im Jahr 2030	52
5.15	Wöchentlich, täglich und jährliche kumulierte Differenz zwischen Last und Erbringung [eigene Berechnung]	53
5.16	Entscheidungsbaum zur Berechnung der Forschungsfrage 4	55
5.17	Gegenüberstellung der Gesamtspeicherkapazität (MWh) und der Deckung der Jahresstunden (%)	67
6.1	Stundenbeitrag zur Deckung der Energieversorgung im Jahr 2050 in Prozent [Eigene Berechnung].	71

Tabellenverzeichnis

1.1	Speichertechnologien im Vergleich [Entnommen aus (Kurzweil und Dietlmeier, 2018), (Töpler und Lehmann, 2017) und (Böker u. a., 2019)]	3
2.1	Ladeleistungen der EVSE der EVN AG in Niederösterreich 2020 (EVN AG, 2018)	13
2.2	Zusammenhang von Pulsweitenmodulation und Stromstärke bei der Kommunikation zwischen batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) und Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE) nach ISO:61521 [übernommen aus (Mültin, 2019)]	17
2.3	Maximaler Ladestrom, begrenzt durch den Querschnitt des Ladekabels nach IEC 61851-1 [übernommen aus (Weemaes, 2019b)]	17
5.1	Die am Häufigsten in Österreich zugelassenes BEV nach Modell und Batteriegröße [erweitert aus (Statistik Austria, 2021a)]	35
5.2	In Österreich zugelassene Modellvarianten von BMW (Statistik Austria, 2021a)	36
5.3	In Österreich zugelassene Modellvarianten von AUDI (Statistik Austria, 2021a)	36
5.4	Fahrzeugbestand Österreichs von 2010 bis 2020 in Millionen PKWs (Statistik Austria, 2021a)	39
5.5	Stromaufbringung WAM+ in TJ [übernommen aus: (Austrian Energy Agency, 2015)]	50
5.6	Ergebnisse der Fragestellung inwieweit BEVs die Fluktuationen von erneuerbaren Energien im Jahr 2030 in Österreich ausgleichen können, unter Berücksichtigung der Szenarien S1, S2 und S3, sowie Basis, Basis + Basis ++ und Langstrecke unter der Annahme, dass 10% des technischen SoCs zur Verfügung gestellt werden. Bei den Prozentangaben ist die Abdeckung der jährlichen Stunden dargestellt an denen die Erzeugung den Verbrauch inkl. Ausspeicherung übersteigt [eigene Berechnung]. . .	58

- 5.7 Ergebnisse der Fragestellung inwieweit BEVs die Fluktuationen von erneuerbaren Energien im Jahr 2030 in Österreich ausgleichen können, unter Berücksichtigung der Szenarien S1, S2 und S3, sowie Basis, Basis + Basis ++ und Langstrecke unter der Annahme, dass 20 % des technischen SoCs zur Verfügung gestellt werden. Bei den Prozentangaben ist die Abdeckung der jährlichen Stunden dargestellt an denen die Erzeugung den Verbrauch inkl. Ausspeicherung übersteigt [eigene Berechnung]. . . 59
- 5.8 Ergebnisse der Fragestellung inwieweit BEVs die Fluktuationen von erneuerbaren Energien im Jahr 2030 in Österreich ausgleichen können, unter Berücksichtigung der Szenarien S1, S2 und S3, sowie Basis, Basis + Basis ++ und Langstrecke unter der Annahme, dass 30 % des technischen SoCs zur Verfügung gestellt werden. Bei den Prozentangaben ist die Abdeckung der jährlichen Stunden dargestellt an denen die Erzeugung den Verbrauch inkl. Ausspeicherung übersteigt [eigene Berechnung]. . . 60
- 5.9 Ergebnisse der Fragestellung inwieweit BEVs die Fluktuationen von erneuerbaren Energien im Jahr 2040 in Österreich ausgleichen können, unter Berücksichtigung der Szenarien S1, S2 und S3, sowie Basis, Basis + Basis ++ und Langstrecke unter der Annahme, dass 10 % des technischen SoCs zur Verfügung gestellt werden. Bei den Prozentangaben ist die Abdeckung der jährlichen Stunden dargestellt an denen die Erzeugung den Verbrauch inkl. Ausspeicherung übersteigt [eigene Berechnung]. . . 61
- 5.10 Ergebnisse der Fragestellung inwieweit BEVs die Fluktuationen von erneuerbaren Energien im Jahr 2040 in Österreich ausgleichen können, unter Berücksichtigung der Szenarien S1, S2 und S3, sowie Basis, Basis + Basis ++ und Langstrecke unter der Annahme, dass 20 % des technischen SoCs zur Verfügung gestellt werden. Bei den Prozentangaben ist die Abdeckung der jährlichen Stunden dargestellt an denen die Erzeugung den Verbrauch inkl. Ausspeicherung übersteigt [eigene Berechnung]. . . 62
- 5.11 Ergebnisse der Fragestellung inwieweit BEVs die Fluktuationen von erneuerbaren Energien im Jahr 2040 in Österreich ausgleichen können, unter Berücksichtigung der Szenarien S1, S2 und S3, sowie Basis, Basis + Basis ++ und Langstrecke unter der Annahme, dass 30 % des technischen SoCs zur Verfügung gestellt werden. Bei den Prozentangaben ist die Abdeckung der jährlichen Stunden dargestellt an denen die Erzeugung den Verbrauch inkl. Ausspeicherung übersteigt [eigene Berechnung]. . . 63

- 5.12 Ergebnisse der Fragestellung inwieweit BEVs die Fluktuationen von erneuerbaren Energien im Jahr 2050 in Österreich ausgleichen können, unter Berücksichtigung der Szenarien S1, S2 und S3, sowie Basis, Basis + Basis ++ und Langstrecke unter der Annahme, dass 10 % des technischen SoCs zur Verfügung gestellt werden. Bei den Prozentangaben ist die Abdeckung der jährlichen Stunden dargestellt an denen die Erzeugung den Verbrauch inkl. Ausspeicherung übersteigt [eigene Berechnung]. . . 64
- 5.13 Ergebnisse der Fragestellung inwieweit BEVs die Fluktuationen von erneuerbaren Energien im Jahr 2050 in Österreich ausgleichen können, unter Berücksichtigung der Szenarien S1, S2 und S3, sowie Basis, Basis + Basis ++ und Langstrecke unter der Annahme, dass 20 % des technischen SoCs zur Verfügung gestellt werden. Bei den Prozentangaben ist die Abdeckung der jährlichen Stunden dargestellt an denen die Erzeugung den Verbrauch inkl. Ausspeicherung übersteigt [eigene Berechnung] . . 65
- 5.14 Ergebnisse der Fragestellung inwieweit BEVs die Fluktuationen von erneuerbaren Energien im Jahr 2050 in Österreich ausgleichen können, unter Berücksichtigung der Szenarien S1, S2 und S3, sowie Basis, Basis + Basis ++ und Langstrecke unter der Annahme, dass 30 % des technischen SoCs zur Verfügung gestellt werden. Bei den Prozentangaben ist die Abdeckung der jährlichen Stunden dargestellt an denen die Erzeugung den Verbrauch inkl. Ausspeicherung übersteigt [eigene Berechnung]. . . 66

Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

ACEA	Association des Constructeurs Européens d'Automobiles
BEV	batterieelektrische Fahrzeuge
CCS	Combined Charging System
CHAdemo	elektrische Schnittstelle (Japan)
CP	Control Pilot
EE	erneuerbaren Energien
EVSE	Electric Vehicle Supply Equipment
ICCB	In-Cable Control Box
KWh	Kilowattstunde
L	Außenleiter
N	Neutralleiter
PE	Protective Earth
PHEV	Plug-in-Hybrid batterieelektrische Fahrzeuge
PKW	Personenkraftwagen
PP	Proximity Pilot
PWM	Pulsweitenmodulation
SoC	State of Charge
StVO	Straßenverkehrsordnung 1960
V2G	Vehicle to Grid

Symbolverzeichnis

A Ampere

Δ Delta

Ω Omega

p Druck

V Volt

V Volumen

Kapitel 1

Einleitung

Im Sommer 2016 stimmten sowohl der österreichische Nationalrat, als auch der österreichische Bundesrat dem 2015 in Paris verhandelten *Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen*, – auch *Übereinkommen von Paris, Klimarahmenkonvention (UNFCCC)* oder **Paris Agreement** genannt – zu (Republik Österreich Parlament, 2016). Grundlegendes Ziel des Paris Agreements ist, die durch den anthropogenen Klimawandel ausgelöste, Erderwärmung, auf unter 2°C – in Bezug zu vorindustriellen Werten – bis zum Jahr 2100 zu begrenzen (BMDW, 2020). Um dieses Klimaziel zu erreichen, müssen lt. Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort (2020) die „globalen Treibhausgasemissionen¹ [...] bis Mitte des 21. Jahrhunderts auf (netto) Null gesenkt werden [...]“ (BMDW, 2020, S. 1). Die Treibhausgasemissionen Österreichs (82,3 Mio. Tonnen) setzen sich im Jahr 2017, inklusive Emissionshandel, nach Sektoren folgendermaßen zusammen (Umweltbundesamt, 2019a):

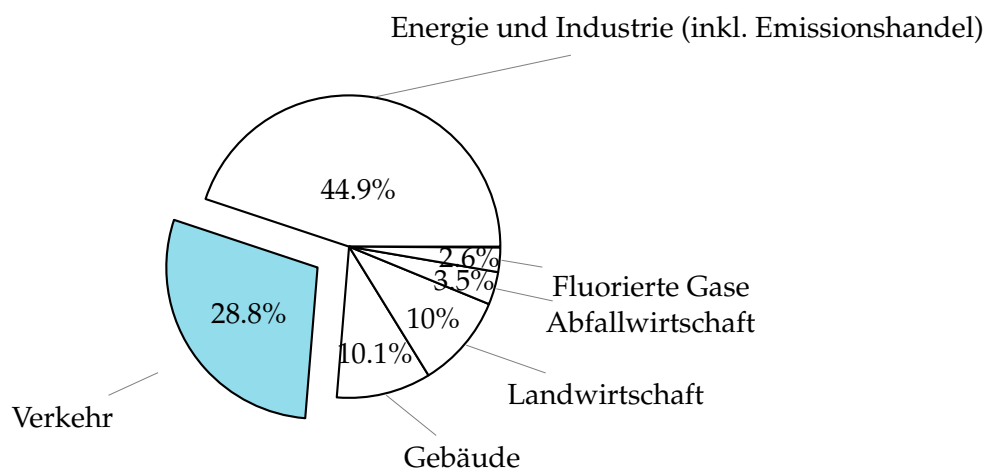


Abbildung 1.1: Treibhausgasemissionen Österreichs nach Sektoren im Jahr 2017 [übernommen aus (Umweltbundesamt, 2019a, 60)]

¹Berichtspflichtige Treibhausgasemissionen: CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆ (United Nations, 2014)

Wie Abbildung 1.1 zeigt, stellt der Sektor Verkehr, mit etwas weniger als einem Drittel der emittierten Emissionen, eine der größten Herausforderungen dar, um die definierten Ziele des Paris Agreements zu erfüllen. Die in Abbildung 1.1 dargestellten 28,8 % der Emissionen – welche dem Verkehr zuzuschreiben sind – setzen sich zu 99 % aus Emissionen aus dem Straßenverkehr zusammen², wobei hierbei etwa 64% auf den Personenverkehr und etwa 36 % auf den Güterverkehr entfallen. Die Emissionen aus dem Personenverkehr werden zu 95,6 % von Diesel- und Benzin-Pkws emittiert, der Rest von Bussen, Motorrädern und Mopeds (Umweltbundesamt, 2019a). Um diese Emissionen zu vermeiden, muss der, auf der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen basierende, Verbrennungskraftmaschinen-Antrieb von Benzin- und Diesel-PKWs durch klimafreundlichere, CO₂-Äquivalent³ arme Technologien ersetzt werden. Eine Möglichkeit hierfür würde die Verwendung von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEVs) für den Personenverkehr bieten. Der CO_{2eq}-Ausstoß von BEVs ist von vielen Faktoren wie etwa Batteriekapazität, Strommix, Leistung, Herstellungsprozessen, Fahrverhalten und Entsorgung/Recycling abhängig. In Summe auf den gesamten Lebenszyklus bezogen, ist er jedoch niedriger als bei der Verbrenner-Alternative (Agora Verkehrswende, 2019). Zudem ist anzumerken, dass Emissionen, welche nicht bei der direkten Nutzung des Fahrzeuges, sondern beispielsweise bei der Energiebereitstellung für die Produktion entstehen, ebenfalls im Paris Agreement unter dem Sektor Energie und Industrie thematisiert werden (vgl. Abbildung 1.1). Wird ein BEV ausschließlich mit nahezu klimaneutralen erneuerbaren Energien (EE) betrieben, ist es während seiner Nutzungsphase des Lebenszyklus nahezu klimaneutral⁴, da das Fahrzeug während der Fahrt keine CO_{2eq}-Emissionen ausstößt (Hüer u. a., 2019). Es ist daher ersichtlich, dass, um die Ziele des Paris Agreements erfüllen zu können, der Sektor *Transport* auf batterieelektrischer Basis maßgeblich vom Sektor *Energie*(erzeugung) abhängig ist. Andererseits beeinflusst der Sektor *Transport* ebenso den Sektor *Energie*. Wie weit sich der elektrische Energieverbrauch Österreichs durch die Etablierung von BEVs erhöhen wird, ist aktuell nicht konkret abzuschätzen, da dies maßgeblich von Anzahl, Größe und Verbrauch der PKWs abhängig ist. Bei Annahme des Stromverbrauchs nach WLTP⁵ von 15,8 kWh des VW e-Golfs, würde sich bei fünf Millionen zugelassenen PKWs in Österreich der Stromverbrauch um etwa 17 % erhöhen⁶. Diese Größenordnung ist mitunter auch in der wissenschaftlichen Literatur zu finden (Fucik und Günsberg, 2017). Die Erzeugung

²Flugverkehr wird im Klimaschutzgesetz an dieser Stelle nicht inkludiert (Umweltbundesamt, 2019a)

³In Folge werden die in Fußnote 1 beschriebenen Treibhausgase als CO₂-Äquivalente (CO_{2eq}.) zusammengefasst

⁴Der CO_{2eq}-Ausstoß von elektrischer Energie mit dem Umweltzeichen „Grüner Strom“ beträgt 0,02kgCO_{2eq} pro kWh in Österreich. [THG-Rechner (Umweltbundesamt, 2019b)]

⁵Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure

⁶Bei einem Verbrauch von 15,8 kWh/100 km, durchschnittlich 15.000 km pro Jahr und 5.040.000 PKWs in Österreich (Kords, 2020a) wird 11,9448 TWh elektrische Energie benötigt. Dies sind 16,57 % der 71,8 TWh des Stromverbrauchs Österreichs 2018 (Kords, 2020b) [Eigene Rechnung]

elektrischer Energie aus EE unterliegt mit Ausnahme von Müllverbrennungs- und Biogasanlagen meteorologischen Fluktuationen (Schüppel, 2014). Diese Fluktuationen werden zwar durch die Kombination verschiedener Erzeugungsarten sowie Im- und Exporte teilweise ausgeglichen, dennoch muss ein erheblicher Teil gespeichert werden. Wie viel Energie für wie lange Zeit gespeichert werden muss, hängt maßgeblich vom Strommix eines Landes ab. Ein hoher Anteil von Solarenergie im Strommix bedingt höhere saisonale Speicherkapazitäten als ein hoher Windstromanteil, da Windenergie die höchsten Potenziale im Winter aufweist, jedoch Österreich über niedrigere Ausbaupotenziale verfügt. Durch den Ausbau von EE kommt es zu sog. Merit-Order-Effekten. An sonnigen windreichen Tagen konkurrieren EE mit sich und der Energiepreis sinkt; an meteorologisch ungünstigen Tagen hingegen kann der Verbrauch nicht abgedeckt werden und somit ist ein Preisanstieg die Folge. Die Stromproduktion hat also je nach Angebot und Nachfrage – auf seine Erzeugung bezogen – eine *Nutzbarkeit* welche sich im Preis an der Börse widerspiegelt⁷ (Schüppel, 2014). Erreichen Speichertechnologien einen Preis pro gespeicherter Energieeinheit (€/kWh) bei welchem es wirtschaftlich vorteilhaft erscheint, Energie zum Zeitpunkt niedriger Preise zu speichern und bei höherer Nachfrage im Netz wieder abzugeben, spricht man von Netzparität. Bei Lithium-Ionen-Batterien ist diese für den Endkunden noch nicht erreicht (Swissolar, 2016).

In der folgenden Tabelle sind mögliche Energiespeichertechnologien gelistet. Grundsätzlich muss bei der Wahl eines Speichers, insbesondere im Rahmen von ‚mobilen Speichern‘, nach Parametern wie Energiedichte, Preis, Zyklenzahl und Wirkungsgrad unterschieden werden. Speichertechnologien, welche nur stationär betrieben werden oder aus technischen Gründen nicht in Personenkraftwagen verbaut werden können, werden hierbei nicht aufgelistet. Zu diesen zählen beispielsweise Lageenergiespeicher, Federenergiespeicher und thermische Speicher.

Tabelle 1.1: Speichertechnologien im Vergleich [Entnommen aus (Kurzweil und Dietlmeier, 2018), (Töpler und Lehmann, 2017) und (Böker u. a., 2019)]

Technologie	Wirkungsgrad	Zyklen	Energiedichte	Entladung
	%	n	Wh/kg	%/Tag
Superkondensator	99	>10 ⁵	5	<<1
Lithium-Ionen Batterie	95	>1000	220	0,03
Bleiakkumulator	85	300-2000	25-40	<0,05
Elektrolyse (H ₂)	38-45	-	33,3*10 ³ (700bar)	-
Druckluftspeicher	42-54	-	$V * \Delta p$	0,5-1
Schwungradspeicher	80-95	-	140	50-100

⁷Die Energiepreisbildung wird hier sehr vereinfacht dargestellt und wird in der hier vorliegenden Masterarbeit nicht näher thematisiert

Wie in Tabelle 1.1 ersichtlich, können einige Speichertechnologien aufgrund ihrer jeweiligen Eigenschaften ausgeschlossen werden. Aufgrund der hohen benötigten Energiedichte können Superkondensatoren und Bleiakkumulatoren nur im Hybridsystem mit einer anderen Speichertechnologie effektiv eingesetzt werden. Eine viel zu hohe Selbstentladung weist der Schwungradspeicher auf, hier würde sich ein Fahrzeug innerhalb von 24 Stunden um mindestens 40 % entladen. Lithium-Ionen-Batterien, Bleiakkumulatoren und mit Druckluft betriebene Fahrzeuge sind möglich, aufgrund der wesentlich geringeren Wirkungsgrade von Bleiakkumulatoren und Druckluftspeichern ist jedoch die Lithium-Ionen-Batterie zu favorisieren. Dies spiegelt sich in den – am Markt zu Verfügung stehenden – Modellen wider, wo die – mit Abstand häufigsten eingesetzte Speichertechnologie in alternativ betriebenen Fahrzeugen, die Lithium-Ionen-Batterie darstellt. In BEVs befinden sich Akkumulatoren, je nach Modell und Hersteller in einer Größenordnung von etwa 20-100 kWh⁸. Ein detaillierter Überblick über die wichtigsten Lithiumbatterie-Technologien wird in Abschnitt 2.3 gegeben.

In der vorliegenden Masterarbeit wird versucht, das Potenzial der Sektorkopplung, d.h. der Synergie zwischen der im Mobilitätssektor verbauten Speicherkapazität und der im Energiesektor zunehmenden Nachfrage nach Speicherkapazität, zu erörtern. In Zeiten, in denen aufgrund meteorologischer Begebenheiten oder hohem Energiebedarf zu wenig elektrische Energie bereitgestellt werden kann, kann durch bidirektionales Laden, Energie aus den Fahrzeugen wieder ins Netz zurück gespeist werden. Somit komplettiert sich der Sektor *Transport* und *Energie*. Hierfür werden im folgenden Kapitel die Grundlagen der hierfür relevanten Themenbereiche erarbeitet.

Im zweiten Kapitel der Masterarbeit werden die theoretischen Grundlagen der hierfür relevanten Themenbereich erarbeitet. Nach der Erarbeitung der Grundlagen werden im dritten Kapitel die vier Forschungsfragen formuliert, im anschließenden vierten Kapitel wird auf die Methodik der Datenauswertung eingegangen. Im fünften Kapitel werden die Ergebnisse der Datenauswertung detailliert dargestellt, welche im sechsten Kapitel auch eingehend diskutiert werden. Das siebte Kapitel beinhaltet eine Schlussfolgerung, die durch einen Ausblick ergänzt wird.

⁸BWM i3 (60 Ah) 18,8 kWh / Tesla Model S P100D 100 kWh

Kapitel 2

Literaturüberblick, Stand der Technik und Grundlagen des Themenbereichs

In diesem Kapitel wird auf die technischen Grundlagen der Schnittstelle zwischen batterieelektrischen Fahrzeugen (BEVs) und Ladesäule (EVSE - Electric Vehicle Supply Equipment) eingegangen und zudem auch eruiert, unter welchen Bedingungen bidirektionales Laden möglich ist. In weiterer Folge wird der Stand der Technik von Lithium-Ionen-Industriebatterien dargestellt und ein Überblick über die vorhandene wissenschaftliche Fachliteratur in Bezug auf das WAM+ Szenario – auf welchem diese Arbeit gründet – gegeben.

2.1 Ladeschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation

Weltweit hat sich eine Vielzahl an elektrischen Schnittstellen etabliert. Insbesondere Informationen zu Haushaltssteckdosen sind in großer Vielzahl und großen Variation in der wissenschaftlichen Fachliteratur zu finden und werden – mit Ausnahme des in Europa häufig verwendeten Schuko-Steckers (Schutz-Kontakt) – in dieser Masterarbeit nicht näher beschrieben. Bei den speziell für die Elektromobilität konzipierten Schnittstellen, wird auf die etabliertesten bzw. erfolgversprechendsten Modelle eingegangen. Um diese nach Steckertyp, Phasen-Anzahl, Leistung und Gleich- bzw. Wechselstrom zu ordnen, werden in diesem Abschnitt als Quellen der *Technische(r) Leitfaden Ladeinfrastruktur* der Nationalen Plattform Elektromobilität (Nationale Plattform Elektromobilität, 2013), das *Kompendium für den interoperablen und bedarfsgerechten Aufbau von Infrastruktur für Elektrofahrzeuge* des deutschen Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMDV, 2014), sowie die Monographie *Elektromobilität und die Rolle der Energiewirtschaft*

(Linnemann und Nagel, 2020) herangezogen. Diese Quellen beziehen sich auf die internationale Norm IEC 61851.

2.1.1 AC und DC Ladung

Bei der Ladung des BEVs mit Wechselstrom (AC), kann entweder einphasig mit maximal $3,7\text{kW}^1$ oder dreiphasig mit 11kW^2 , mit 22kW^3 , sowie mit 44kW^4 geladen werden.

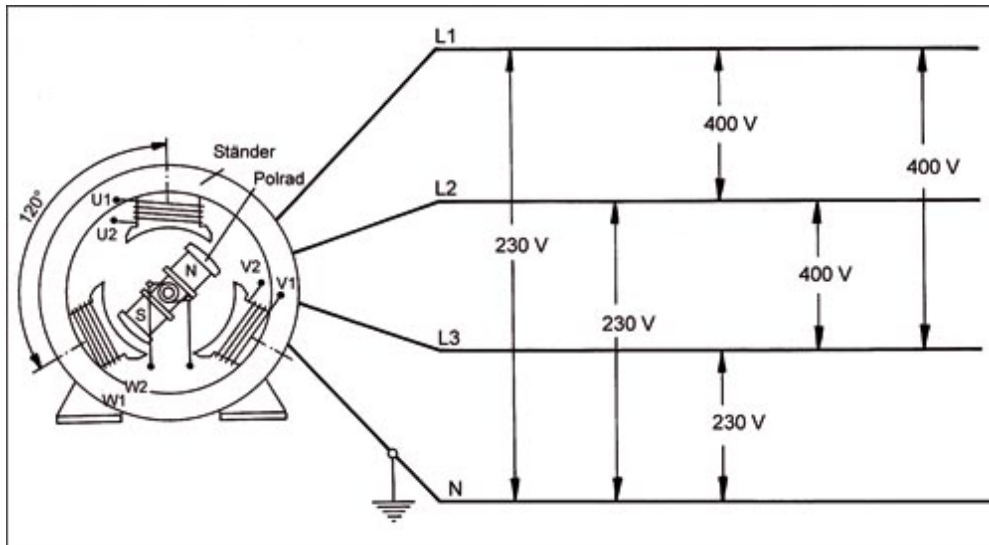


Abbildung 2.1: Strang- und Leiterspannung im Niederspannungsnetz [übernommen aus: (Voltimum, 2005)]

Wie in Abbildung 2.1 grafisch dargestellt, können im Niederspannungsnetz zwei Spannungen abgegriffen werden. Dies ermöglicht Flexibilität, sodass den jeweiligen Anforderungen entsprechend verschiedene Ladebetriebsarten (siehe Abschnitt 2.1.2) realisiert werden können. Bei einem einphasigen Verbraucher muss im Drehstromnetz aus Sicherheitsgründen immer ein Neutraleiter vorhanden sein. Bei der Ladung des BEVs mit Gleichstrom (DC), befindet sich der Wechselrichter nicht im BEV, sondern im EVSE. Je nach Steckertyp sind deutlich höhere Ladeleistungen bis zu mehreren hundert kW angedacht.

¹ $P = U \cdot I \rightarrow 230\text{V} \cdot 16\text{A} = 3,68\text{kW}$

² $P = U \cdot I\sqrt{3} \rightarrow 400\text{V} \cdot 16\text{A} \cdot \sqrt{3} = 11,09\text{kW}$

³ $P = U \cdot I\sqrt{3} \rightarrow 400\text{V} \cdot 32\text{A} \cdot \sqrt{3} = 22,17\text{kW}$

⁴ $P = U \cdot I\sqrt{3} \rightarrow 400\text{V} \cdot 63\text{A} \cdot \sqrt{3} = 43,65\text{kW}$

2.1.2 Ladebetriebsarten

2.1.2.1 Ladebetriebsart 1 (AC) CEE- und Schuko Steckverbindung

Die Ladebetriebsart 1 gilt als veraltet, hierbei wird das EVSE über eine genormte Schuko- oder CEE-Steckdose geladen. Zu dieser Art der Anwendung kommt es vor allem im Eigenheim, wie z.B. in der eigenen Garage. Es wird keine spezielle Ladevorrichtung installiert. Es sollte allerdings überprüft werden, ob die Leitungen und Steckdosen mit Fehlerstromschutzeinrichtungen ausgestattet sind, und alle Querschnitte hohen Belastungen über viele Stunden hinweg standhalten. Bei beiden Steckdosen (CEE und Schuko) ist aufgrund der fehlenden EVSE keine Kommunikation zwischen BEV und Netz- oder Stromanbieter möglich. Von dieser Ladeart wird in den zuvor genannten Quellen jedoch abgeraten. Abbildung 2.2 und 2.3 zeigen skizziert CEE-Steckdosen und eine Schuko-Steckdose (Haushalts-Steckdose). Die skizzierte CEE-Steckdose rechts außen (3P+N+PE) ist nach IEC 60309 für eine Spannungsebene von 380-480 V konzipiert, bei der CEE-Steckdose links in Abbildung 2.3 liegt die Spannungsebene bei 200-250 V. Die CEE-Steckdosen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Anzahl an Außenleiter. Die rote CEE-Steckdose, auch als 3L+N+PE, 6 h bezeichnet, besitzt 3 Außenleiter, einen Neutraleiter und einen Schutzleiter (Position auf 6 Uhr). Die blaue CEE-Steckdose (L+N+PE, 6 h)⁵ besitzt hingegen nur einen Außenleiter (Mennekes, 2020). Bei den Steckerverbindungen ist hier der Steckertyp zur Hausseite gemeint, die andere Seite des Kabels – auf Seite des BEVs – muss einen wechselstromfähigen Steckertyp passend zum Fahrzeug aufweisen, wie z.B. einen Typ 2 Stecker (siehe Ladebetriebsart 3).

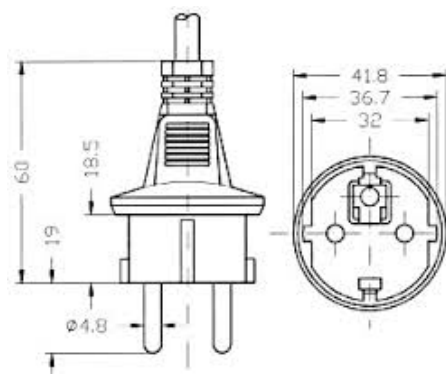


Abbildung 2.2: Schuko Schnittstelle nach DIN 49441 [übernommen aus: (Hans Wagner GmbH, o. D.)]

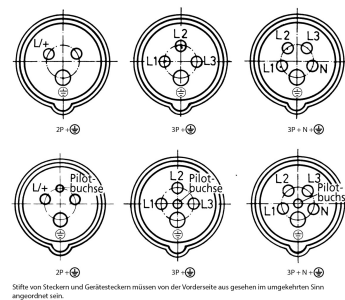


Abbildung 2.3: CEE-Schnittstellen nach IEC 60309 [übernommen aus: (Mennekes, 2020)]

⁵In Abbildung ohne Neutraleiter dargestellt

2.1.2.2 Ladebetriebsart 2 (AC)

Bei der Ladebetriebsart 2 wird ebenfalls kein EVSE verwendet. Die Wallbox oder Ladesäule wird – wie bereits erwähnt – *Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE)* genannt. Es kann sowohl eine Schuko- als auch eine CEE-Steckdose verwendet werden. Im Kabel ist eine Schutz- und Steuereinrichtung (*In-Cable Control Box (ICCB)*) verbaut, welche Sicherheits- und Kommunikationsfunktionen übernimmt. Die ICCB muss mindestens folgende Funktionen übernehmen: Die Kommunikation der maximalen Ladeleistung – die Spannung sollte erst zugeschaltet werden wenn das Kabel mit dem BEV aktiv verbunden ist – einen Fehlerstromschutz, sowie die Überwachung des Schutzleiters (Weemaes, 2019a). Die Stromstärke ist zumeist auf 10 A oder 16 A begrenzt (Weemaes, 2019a). Die Verbindung auf BEV Seite ist – wie bei Ladebetriebsart 1 in Europa – meist ein Typ 2 Stecker. Bei einem Kabel mit integrierter ICCB handelt es sich um eine sicherere Variante der Ladebetriebsart 1, welche einen zusätzlichen Schutz vor Überhitzung und Brandgefahr gewährleistet. Aus diesem Grund werden Ladekabel für die Ladebetriebsart 2 häufig auch als „Notladekabel“ bezeichnet (Weemaes, 2019a). Es sind hierbei Ladeleistungen bis zu 22 kW vorgesehen.

2.1.2.3 Ladebetriebsart 3 (AC)

Bei Ladebetriebsart 3 ist eine fix mit dem Stromnetz verbundene Ladeeinrichtung vorausgesetzt. Dies wird „dedicated“ d.h. zugeordnete Steckdose bezeichnet. Die EVSE kann die Ladung z.B. bei einem Netzausfall unterbrechen und hat einen integrierten Fehler- und Überstromschutz. Das Laden ist mit maximal 44 kW Drehstrom bei einer Stromstärke von 63 A möglich. Die Kommunikation findet über Pulsweitenmodulation (PWM) statt, auf welche in Abschnitt 2.2 näher eingegangen wird. Die Ladeleistung kann direktional von EVSE nach BEV gesteuert werden, somit ist flexibles – mit den Gegebenheiten des Netzes abgestimmtes – Laden möglich. Das Ladekabel ist auf EVSE Seite entweder fix oder mit dem gleichen Stecker wie auf BEV Seite zu verbinden. In weiterer Folge werden nunmehr die möglichen Steckertypen für die Ladebetriebsarten 1 bis 3 näher erläutert.

Typ 1 Stecker

Bei diesem Steckertyp handelt es sich um eine japanische/amerikanische Schnittstelle mit fünf Kontakten (siehe Abbildung 2.4). Einen Neutralleiter (N) rechts oben, einen Außenleiter (L) links oben und einen Schutzleiter (*Protective Earth (PE)*) unten. Zudem befindet sich rechts ein *Control Pilot (CP)*-Kontakt, an welchem Daten übertragen werden können und ein *Proximity Pilot (PP)*-Kontakt, an welchem überprüft wird, ob eine

Verbindung besteht bzw. der Stecker auch tatsächlich mit dem BEV verknüpft ist (Weemaes, 2019a). Da es sich beim Typ 1 Stecker nicht um einen in Europa verbreiteten Steckertyp handelt, wird dieser im Rahmen dieser Masterarbeit nicht näher behandelt. Typ 1, 2 und 3 sind sich ähnlich und können mit Adaptern einfach substituiert werden, da auch das Kommunikationsprotokoll gleich ist. Es sind hierbei Ladeleitungen bis 7,4 kW möglich (Weemaes, 2019a).

Typ 2 Stecker

Der Typ 2 Stecker ist der in Europa am häufigst zu findete Steckertyp und wird zudem auch in EU-Richtlinien empfohlen. Die Schnittstelle hat – wie in Abbildung 2.4 ersichtlich – sieben Kontakte. Diese Kontakte setzen sich aus drei Außenleitern (L1-L3) um Wechselstrom bis 44 kW zu übertragen, einen Neutralleiter (N), und einen Schutzleiter (PE) zusammen. Ähnlich zum Typ 1 Stecker hat er zudem noch zwei Kommunikationskontakte, einen CP- und einen PP-Kontakt. Der Typ 2 Stecker ist auch mit dem – später beschriebenen – *Combined Charging System (CCS)* kompatibel.

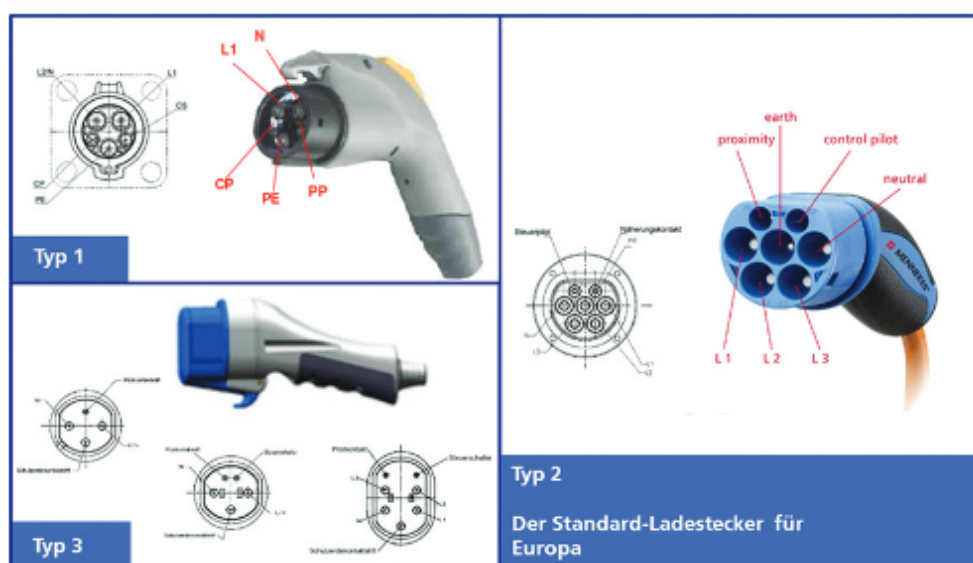


Abbildung 2.4: Steckertypen 1, 2 und 3 [übernommen aus: (BMDV, 2014)]

Typ 3 Stecker

Dieser Steckertyp wurde in Italien und Frankreich eingeführt. Der Vorteil dieser Schnittstelle ist, dass die Kontakte mechanisch nicht berührt werden können (Kindersicherung) (Weemaes, 2019a). Es können bis zu 22 kW geladen werden. Es sind drei Außenleiter (L), ein Neutralleiter (N) und ein Schutzleiter (PE), sowie ein Kommunikationskontakt und

ein PP-Kontakt installiert (siehe Abbildung 2.4). Sowohl in Italien wie auch in Frankreich wird dieser Stecker durch den Typ 2S Stecker (Typ 2 mit Shutter/Blende/Verschluss) zunehmend verdrängt (Weemaes, 2019a). Seit dem Erscheinen des Positionspapiers des europäischen Automobilherstellerverbands *Association des Constructeurs Européens d'Automobiles* (ACEA) 2010 wurde der Weg für die Durchsetzung des Typ 2 Steckers finalisiert. Der Typ 1 Stecker wurde, da er nicht drehstromfähig ist, abgelehnt. Die zusätzlichen Blenden (Shutter) des Typ 3 Steckers wurden als zusätzlich mögliche Fehlerquellen betrachtet (ACEA, 2010) (ACEA, 2011).

2.1.2.4 Ladebetriebsart 4 (DC)

Die Ladebetriebsart 4 definiert das Laden von BEVs mit Gleichstrom (DC). Der Vorteil hierbei ist, dass der Wechselrichter nicht im BEV, sondern im EVSE verbaut ist und somit deutlich höhere Leistungsströme möglich sind. Es sind technisch je nach Schnittstelle Ladeleistungen von hunderten kW erreichbar. Es gibt aktuell zwei Steckverbindingssysteme, welche sich am Markt etabliert haben:

CHAdeMO

Das CHAdeMO⁶-System, welches bereits weltweit Verbreitung findet, wurde von japanischen Automobilherstellern entwickelt und eingeführt. Bei diesem System ist auf Seite des EVSE das Ladekabel fest verbunden, die Verbindung lässt sich physikalisch auf der Seite des BEVs trennen. Die Schnittstelle kann hohe Ladeleistungen an zwei Kontakten übertragen und verfügt insgesamt über folgende zehn Kontakte (Nationale Plattform Elektromobilität, 2013) (Jar u. a., 2016):

- | | |
|----------------------------|---------------------------|
| 1 Schutzleiter (PE) | 6 Leistungskontakt (Plus) |
| 2 CP1 (Control Pilot 1) | 7 Connection Check (CS) |
| 3 Frei (keine Zuweisung) | 8 CAN-H (High) |
| 4 CP 3 (Control Pilot 3) | 9 CAN-L (Low) |
| 5 Leistungskontakt (Minus) | 10 CP 2 (Control Pilot 2) |

Die Kontakte 5 (Minus) und 6 (Plus) sind für die eigentliche Übertragung der Ladeleistung gedacht. Der Kontakt 1 ist als PE reserviert, bei den Kontakten 2, 4, 7, 8, 9 und 10 handelt es sich um Kommunikationskontakte (Jar u. a., 2016). Die bis dato übliche Leistungsübertragung bei CHAdeMO-Schnittstellen beläuft sich auf 50 kW. Das CHAdeMO-

⁶Japanische Abkürzung.

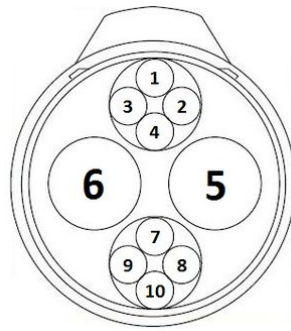


Abbildung 2.5: Aufbau des CHAdeMO-Steckers [Abbildung übernommen aus (Wikipedia, 2022)]

System ist für ein bidirektionales Laden konzipiert (Weemaes, 2019a).

Combined Charging System (CCS)

Das CCS – auch Combo-2 genannt – ist eine Kombination zwischen einem Typ 2 Stecker (AC) und zwei Kontakten (DC) zur Gleichstromladung. Der Vorteil hierbei ist, dass der Typ 2 Stecker auch mit einer CCS-Buchse kompatibel ist und beim DC-Laden die gleichen Kommunikationskontakte (CP und PP), sowie der Schutzleiter verwendet werden. Zudem können bei langsamer Gleichstromladung bis 38 kW (DC-LOW-Ladung) die Typ 2 Kontakte verwendet werden (BMDV, 2014). Obwohl in Europa das CHAdeMO-System weit verbreitet ist, ist anzunehmen, dass sich der CCS-Typ durchsetzen wird, da sich sowohl die Europäische Union (EU) als auch der Europäische Automobilherstellerverband (ACEA) für dieses System entschieden haben.

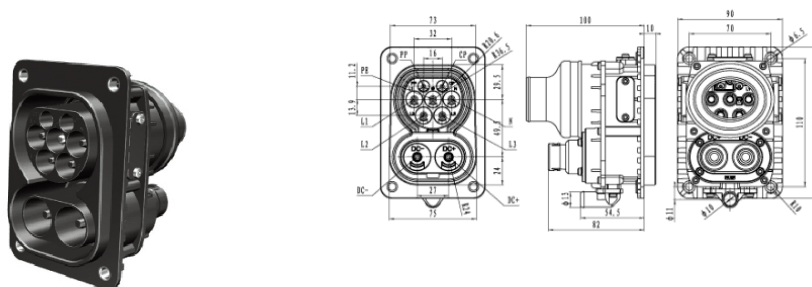


Abbildung 2.6: Aufbau des Combined Charging Systems [übernommen aus: (EV Europe, 2020)]

Tesla Supercharger

Der (europäische) Tesla Supercharger ist aufgrund des gleichen Aufbaus wie der Typ 2 Stecker mit der EVSE kompatibel. Es kann jedoch wegen anderer Kontaktbelegungen, mit einem Typ 2 Stecker nicht an einem Tesla Supercharger EVSE (DC) geladen werden. Hier werden die Kontakte L1-L3 und der Neutralleiter (N) für zwei Plus und zwei Minuspole verwendet (Weemaes, 2019a). Um die vollständige Kompatibilität zwischen CCS-Stecker und Tesla-Ladestationen zu erreichen, muss von Seiten des Automobilherstellers die Freigabeerteilt werden. Dies ist zumindest als Pilotprojekt in einigen EU-Ländern der Fall (Tesla Motors Austria GmbH, 2022).

In der Literatur sind zusätzlich noch Hinweise auf weitere AC und DC Schnittstellen und Kombinationen zu finden. So nennt man beispielsweise die Verbindung des Typ 1 Steckers mit dem CCS *Combo 1*. Zudem gibt es zahlreiche Ankündigungen wie der japanisch-chinesische ChaoJi-Stecker und CCS-Ladestationen – die im Vergleich zu den heute zur Verfügung stehenden – ein Vielfache an Ladeleistung versprechen. Die größte Variation ist bei Ladebetriebsart 1 und 2 zu finden, da es weltweit unzählige Varianten an Haushaltssteckdosen mit unterschiedlichen Auslegungen und Standards gibt. Aus diesem Grund wird auf diese – in Europa nicht verwendeten – Schnittstellen, für deren Etablierung in Europa in der wissenschaftlichen Fachliteratur keinerlei Hinweise zu finden sind, nicht näher eingegangen.

2.1.3 Stand der Technik in Österreich

Beim flexiblen (bi)direktionalen Laden von BEVs handelt es sich um eine neue Technologie, welche sich simultan durch die anlaufende Durchdringung von BEVs im Straßenverkehr etabliert. Der Anteil an BEVs auf den österreichischen Straßen beträgt 2019 nur 0,46% der PKWs (Stadler, 2019). Hierauf wird in Abschnitt 5.1 noch detaillierter eingegangen werden. Es ist schon im frühen Stadium abzusehen, dass es durch das (Schnell-)Laden von BEVs zu Leistungsspitzen kommt, für welche das Stromnetz nicht konzipiert wurde. Aus diesem Grund muss durch ein intelligentes Lademanagement das Stromnetz dahingehend entlastet werden, dass es so ressourceneffizient und kostensparend wie möglich an die neuen Gegebenheiten angepasst werden kann. Neben kabelgebundenem Laden besteht auch die Möglichkeit der Induktionsladung und des Batterie-/Elektrolytwechsels (BMDV, 2014). Auf diese Technologien wird aufgrund der geringeren Marktdurchdringung in der vorliegenden Masterarbeit nicht näher eingegangen. In Österreich kann bis dato an öffentlichen Ladestationen prinzipiell keine elektrische Energie ins Netz zurück gespeist werden. Auch die directionale Ladeleistung ist noch nicht live an die Strombörse gekoppelt, jedoch an die Leistungsfähigkeit der Infrastruktur angepasst. Prinzipiell lassen sich in Österreich die Stromleitungen in Höchstspannung (220 kV

bzw. 380 kV), Hochspannung (60 kV bis 150 kV), Mittelspannung (1 kV bis 35 kV) und Niederspannung (230 V) einteilen. In der Regel sind die Leitungen pro Haushalt für 2- 4 kW ausgelegt (Stadler, 2019). Öffentliche Ladestationen verfügen über unterschiedliche Ladeleistungen. Beispielsweise waren die Ladeleistungen der EVSE des Energiekonzerns EVN AG im Jahr 2020⁷ wie in Tabelle 2.1 dargestellt (EVN AG, 2018):

Tabelle 2.1: Ladeleistungen der EVSE der EVN AG in Niederösterreich 2020 (EVN AG, 2018)

Stromart	Steckertypus	Leistung	Einheit
AC	Schuko	<3,7	kW
AC	Typ 2	3,7	kW
AC	Typ 2	11	kW
AC	Typ 2	22	kW
AC	Typ 2	43	kW
DC	CHAdeMO, CCS	50	kW
DC	CHAdeMO, CCS	80	kW

⁷Die Internetquelle wurde 2018 veröffentlicht und 2020 abgerufen.

2.2 Die Kommunikationsschnittstelle zwischen BEV und EVSE

Signalisierung Schnittstelle Typ 2

Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, ist der Typ 2 Stecker mit den Kommunikationskontakten *Control Pilot (CP)* und *Proximity Pilot (PP)* ausgestattet. Bei diesen Schnittstellen wird analog über den CP-Kontakt dem EVSE mitgeteilt, wie viel Ladestrom maximal zur Verfügung steht und über den PP-Kontakt zwischen BEV und EVSE signalisiert, wie stark das Ladekabel maximal belastet werden darf (Weemaes, 2019b).

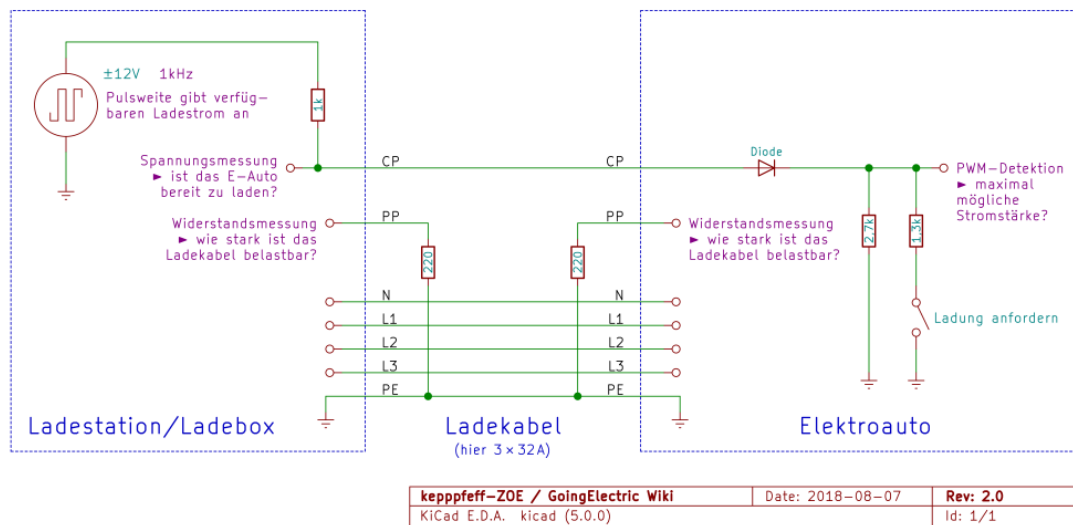


Abbildung 2.7: Signalisierung und Anschlussschema Typ 2 nach IEC 62196 [Übernommen aus: (Weemaes, 2019b)]

2.2.1 Signalisierung des maximalen Ladestroms über den Control Pilot-Kontakt

In der EVSE wird an einem 1 kΩ-Widerstand (R_1) eine Spannung U_1 von +12 V angelegt. Nach dem Widerstand wird, wie in Abbildung 2.7 ersichtlich, die Spannung gemessen. Durch die Messung der Spannung von +12 V wird signalisiert, dass kein BEV mit der Ladesäule verbunden ist. Wird ein BEV an die Ladesäule angesteckt, verbindet der CP-Kontakt die Ladesäule mit einer Diode im BEV (siehe Abbildung 2.7), welche den Stromfluss in die Gegenrichtung sperrt und über einen 2700 kΩ-Widerstand mit der Erdung (PE) verbindet. Dadurch fällt die Spannung am CP in der Ladesäule auf +9 V

ab ⁸ ⁹ ¹⁰ (Spannungsteilerschaltung) (Mathoy, 2008). Durch die Messung der Spannung verfügt die Ladesäule über die Information, dass ein BEV verbunden ist und startet die Signalisierung des maximal möglichen Ladestroms via Pulsweitenmodulation (siehe Abschnitt 2.2.2). Dies geschieht über eine Rechteckspannung zwischen ± 12 V bei 1 kHz und wird im BEV detektiert (siehe Abbildung 2.8). Durch die verbaute Diode und den gegebenen Widerständen schwankt die Spannung nunmehr zwischen +9 V und -12 V (Mathoy, 2008). Somit erkennt die Ladesäule, dass ein BEV angeschlossen ist. Möchte das BEV laden, schaltet es parallel zum Widerstand R_2 einen zweiten Widerstand R_3 mit 1,3 k Ω hinzu. Es wird nun in der Ladesäule eine Spannung von -12 V und +6 V gemessen. Dies wird als Ladevorgang interpretiert. Es kann noch ein weiterer Widerstand mit 270 Ω parallel geschaltet werden (nicht in Grafik 2.7 ersichtlich). Dies lässt die Spannung auf etwa +3 V sinken und signalisiert „with ventilator“ (Mathoy, 2008). Bei Spannungen im Minusbereich (z.B. -1 V bis -12 V) wird ein Error ausgegeben und wie bei einer Spannung von 0 V ebenfalls kein Strom geladen. Ist das BEV bis zum gewünschten Grad aufgeladen, wird der Widerstand R_3 bzw. R_4 wieder weggeschaltet und die Ladesäule befindet sich nun nicht mehr im Lademodus (Weemaes, 2019b). Zusammengefasst kommuniziert die Ladesäule mit dem BEV über den CP-Kontakt und kann sechs Stufen signalisieren. Diese sind in der Norm ISO:61851 und der darauf bezogen Norm ISO:15118-3 folgendermaßen definiert:

- 1 [State A] kein BEV verbunden (+12V)
- 2 [State B] BEV verbunden (+9V -12V)
- 3 [State C] Laden/bereit zu Laden (+6V -12V)
- 4 [State D] mit Ventilator (+3V -12V)
- 5 [State E] kein Laden (0V -12V)
- 6 [State F] Error (-xV -12V)

⁸ $U_i = 0,012A * 1k\Omega = 12V$

⁹ $U_1 = 0,0033A * 1k\Omega = 3,32V$

¹⁰ $U_2 = 0,0033A * 2,7k\Omega = 8,76V$

Pulsweitenmodulation

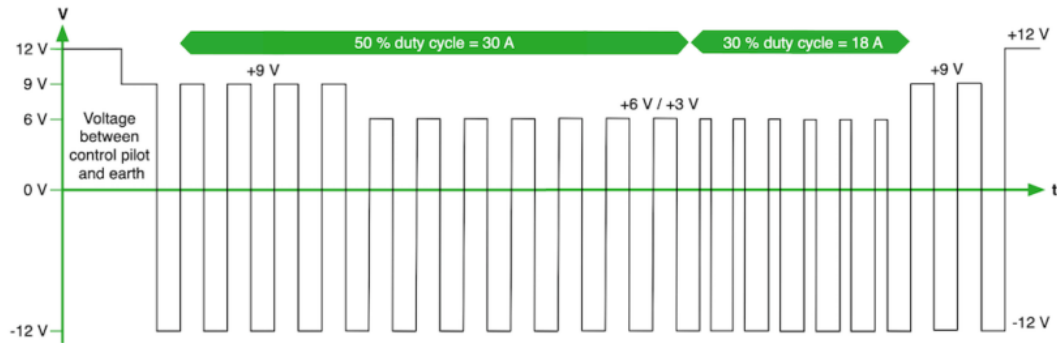


Abbildung 2.8: Darstellung der Pulsweitenmodulation nach ISO:61851 (Mültin, 2019)

Die Rechteckspannung schwingt mit einer Pulsweite von 1 kHz. Mit dieser Pulsweite (eng. *Duty Cycle*) gibt die Ladestation dem BEV an, mit welcher Stromstärke geladen werden darf (Weemaes, 2019b). Die Pulsweite wird im BEV detektiert. Bei einer Pulsweite von 50% von 1 kHz, also 500 Hz, wird mit 30 A geladen. Hierbei gilt von 6 A bis 48 A folgende Formel (Weemaes, 2019b):

$$\text{Verfügbare Stromstärke (in A)} = \text{Duty cycle (in \%)} * 0,6A \quad (2.1)$$

Bei Stromstärken über 48 A bis 96 % Duty Cycle (80 A) wird folgende Formel geltend (ISO:61851):

$$\text{Verfügbare Stromstärke (in A)} = (\text{Duty cycle (in \%)} - 64) * 2,5A \quad (2.2)$$

Es können somit jene in der folgende Tabelle (2.2) dargestellten Stromstärken via PWM kommuniziert werden.

Tabelle 2.2: Zusammenhang von Pulsweitenmodulation und Stromstärke bei der Kommunikation zwischen BEV und EVSE nach ISO:61521 [übernommen aus (Mültin, 2019)]

PWM	Stromstärke
97 %	80 A
95 %	77,5 A
90 %	65 A
85 %	51 A
80 %	48 A
70 %	42 A
60 %	36 A
50 %	30 A
40 %	24 A
30 %	18 A
25 %	15 A
16 %	9,6 A
10 %	6 A

2.2.2 Signalisierung der maximalen Belastung des Ladekabels über den Proximity Pilot-Kontakt

Der Typ 2 Stecker kann über den Proximity Pilot (PP) zusätzlich zwei weitere Funktionen erfüllen. Erstens wird im BEV eine Wegfahrsperrung aktiviert, sobald das Fahrzeug mit der Ladesäule verbunden ist. Aus diesem Grund wird dieser Kontakt auch *Plug Present* genannt. Zweitens wird die maximal mögliche Belastung des Ladekabels an die EVSE übermittelt. Dabei ist im Kabel ein Widerstand zwischen PP und *Protective Earth (PE)* verbaut, welcher mittels Widerstandsmessung sowohl im BEV als auch im EVSE erkannt wird. Lt. IEC 61851-1 sind folgende Widerstände möglich (Weemaes, 2019b):

Tabelle 2.3: Maximaler Ladestrom, begrenzt durch den Querschnitt des Ladekabels nach IEC 61851-1 [übernommen aus (Weemaes, 2019b)]

Widerstand	Querschnitt des Kabels	maximaler Ladestrom
1500Ω	1,5mm ²	13 A
680Ω	2,5mm ²	20 A
220Ω	4 – 6mm ²	32 A
100Ω	10 – 16mm ²	63 A

2.3 Lithium-Ionen-Industriebatterien

Wie in der Einleitung bereits erläutert, sind Lithium-Ionen-Batterien die am häufigsten verbaute Technologie in batterieelektrischen Fahrzeugen. Sie zählen zu den Industriebatterien und unterscheiden sich somit von Gerätebatterien und Fahrzeugbatterien. Als Fahrzeugbatterien werden in Österreich sog. Starterbatterien genannt (vgl. Batterieverordnung (BMLFUW, 2008)). Um Verwechslungen auszuschließen, spricht man von Antriebsbatterien oder Fahrzeug-Industriebatterien (engl. automotive). Es gibt eine Vielzahl an Variationen, wobei zu den häufigsten hierbei LFP [LiFePO_4], NMC [$\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{(1-x-y)}\text{O}_2$], LCO [LiCoO_2], LMO [LiMn_2O_4] und NCA [$\text{Li}(\text{Ni}_{(1-x-y)}\text{Co}_x\text{Al}_y)\text{O}_2$] Batterien zählen (Helbig u. a., 2018)(Qiao u. a., 2017). Diese Abkürzungen beschreiben jeweils die Zusammensetzung der Kathode, an welcher meist ein Aluminium-Leiter sitzt. Zwischen Kathode und Anode befindet sich der Separator (Plastik) und das Elektrolyt. Darauf folgt die Anode – welche fast immer aus Graphit besteht – und ein Kupfer-Leiter (vgl.: Abbildung 2.9).

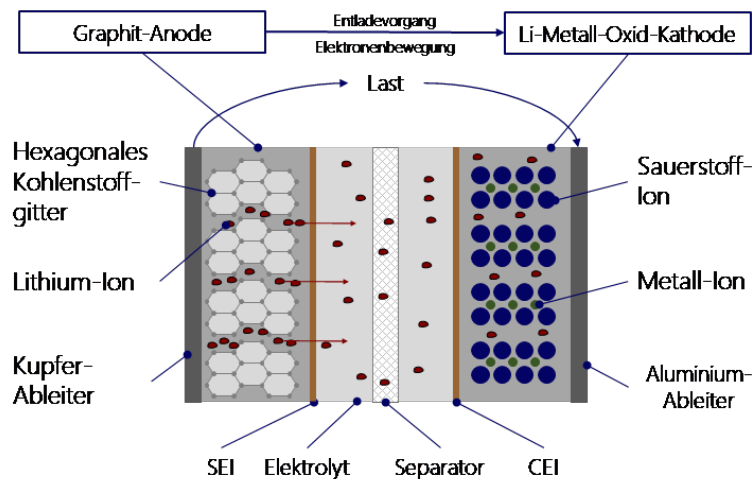


Abbildung 2.9: Schematischer Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle [Übernommen aus: (Hürter, 2020)]

Die genannten Batterietypen können zudem noch in Güteklassen unterteilt werden. Dazu wird der Massenanteil (Gewichtsprozent) hinzugefügt. So lässt sich beispielsweise der NMC-Akku je nach Anforderung in NMC-111, NMC-622 und NMC-911 unterscheiden. NMC-911 bedeutet z.B., dass die Kathode aus neun Teilen Nickel, einem Teil Mangan und einem Teil Kobalt besteht. Welche Zusammensetzung ein Batteriehersteller wählt, ergibt sich aus den Anforderungen an Preis, Sicherheit, Leistung, Energiedichte, Zyklenzahl und Ressourcenverfügbarkeit (Windisch-Kern u. a., 2021). So kann z.B. durch die Verwendung von weniger Kobalt der Preis gesenkt, durch Nickel die Energiedichte erhöht und durch mehr Mangan die Leistung erhöht werden (Windisch-Kern u. a.,

2021). Weiters können auch andere Komponenten – wie z.B. die Anode – spezifische Merkmale aufweisen. In Abbildung 2.10 ist ein Überblick über die eben genannten Technologien dargestellt. Die in der Abbildung ersichtlichen LTO Batterien finden jedoch keine Anwendungen als (Fahrzeug-) Industriebatterie. Die Wörter Batterie, Speicher, Akku und Akkumulator werden oftmals synonym gebraucht. In der wissenschaftlichen Fachliteratur wird bei einem nicht wiederaufladbaren chemischen Speicher von Primär-, bei einem aufladbaren chemischen Speicher von Sekundärbatterie gesprochen (Trueb, 1998).

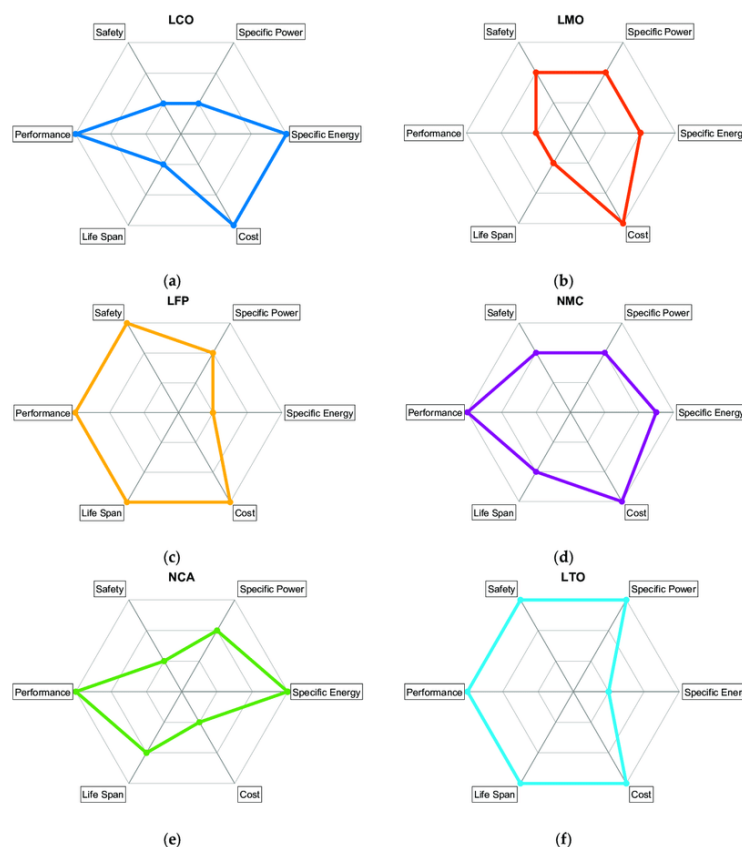


Abbildung 2.10: Überblick über gängige Lithium-Ionen-Technologien und ihre Vor- und Nachteile [Übernommen aus: (Saldaña u. a., 2019)].

In Abbildung 2.10 sind die am häufigsten verbreiteten Lithium-Ionen-Batterietypen dargestellt. Die angeführten Parameter wie Sicherheit, Spezifische Energie, Spezifische Leistung, Lebensdauer, Kosten und Leistungsfähigkeit sind ausschlaggebend und werden aber – wie erwähnt – von zusätzlichen Faktoren wie z.B. Ressourcenverfügbarkeit, Knowhow und auch Recyclingfähigkeit begleitet.

2.4 WEM, WAM und WAM+ Szenario des Umweltbundesamtes

Diese Arbeit baut auf den „Szenarien für Strom- und Fernwärmeaufbringung und Stromnachfrage im Hinblick auf Klimaziele 2030 und 2050“ der Österreichischen Energieagentur (Austrian Energy Agency, 2015) und des Umweltbundesamtes (Umweltbundesamt, 2015) auf. Diese Szenarien behandeln die Frage, wie die Energiewende konkret umgesetzt werden könnte und dienen weiters auch im Rahmen des Monitor Mechanismus' der Verordnung Nr. 525/2013/EG der Berichtspflicht an die Europäische Union (EU) (Austrian Energy Agency, 2015). Hierfür wurden drei grundlegende Szenarien entwickelt, welche sich hinsichtlich der Intensität ihrer Maßnahmen unterscheiden:

- a. „Szenario ‚with existing measures (WEM)‘: Dieses Szenario berücksichtigt bis zu einem bestimmten Zeitpunkt durchgeführte und verabschiedete („adopted and implemented“) politische und sonstige Maßnahmen“ (Austrian Energy Agency, 2015, S. 3).
- b. „Szenario ‚with additional measures (WAM)‘: Dieses Szenario berücksichtigt geplante politische und sonstige Maßnahmen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit durchgeführt werden. Das Szenario WAM beruht auf der Energiestrategie Österreich und dem Klimaschutzgesetz. Die Ziele der Energiestrategie (1100 PJ EEV, 34 % Erneuerbare, -16 % THG im Effort Sharing) werden im Szenario abgebildet“ (Austrian Energy Agency, 2015, S. 3).
- c. „Szenario ‚with additional measures – plus (WAM+)‘: Dieses Szenario umfasst Maßnahmen, die nach 2020 wirksam werden (mit Blick auf den Zielpfad 2050) und die notwendige Transformation der Stromerzeugung und gleichzeitig eine Begrenzung bzw. Reduktion des Energieverbrauchs bewirken“ (Austrian Energy Agency, 2015, S. 3).

Diese Veröffentlichung dient in weiterer Folge einerseits als Grundlage für die Abschätzung des elektrischen Energieverbrauchs und andererseits für die Abschätzung des Strommixes bis zum Jahr 2050.

Hierzu wurden folgende Modelle entwickelt bzw. verwendet:

- a. „IVT (Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der TU Graz)– Modelle NEMO und GEORG; Energieverbrauch und Emissionen des Sektors Verkehr (inkl. Offroad)“ (Umweltbundesamt, 2015, S. 16).
- b. „EEG (Energy Economics Group der TU Wien) – Energiepreise, Modell INVERT/EE-Lab; Kühlung, Raumwärme und Warmwasser inklusive Strombedarf für Haushalte und Dienstleistungen, Fernwärmebedarf“ (Umweltbundesamt, 2015, S. 16).
- c. „AEA (Austrian Energy Agency) – Strompreis für Haushalte und Stromimportpreis, Modell auf Basis von TIMES; Gesamtstromnachfrage und öffentliche Strom- und Fernwärmeaufbringung“ (Umweltbundesamt, 2015, S. 16).

- d. „Umweltbundesamt – Industrie, Landwirtschaft, Abfallaufkommen, alternative Kraftstoffe, Elektromobilität, industrielle Branchen und Eigenstromerzeuger, Verdichterstationen, Gesamtübersichten, Projektkoordination“ (Umweltbundesamt, 2015, S. 16).

Für die vorliegende Masterarbeit wurde das WAM+ Szenario gewählt, da die Pufferung der Fluktuationen aus erneuerbarer Energieerzeugung untersucht wird und in diesem Szenario Energieerzeugungsarten wie z.B. Erdgas (die dieser Fluktuation nicht unterliegen) ab 2040 nicht mehr erlaubt sind. Ein weiterer Entscheidungspunkt für das WAM+ Szenario ist der vollständige Wegfall von Im- und Exporten elektrischer Energie ab 2030. Auf die Ergebnisse dieses Szenarios wird in Abschnitt 5.4 näher eingegangen werden. Im WAM+ Szenario steigen die Zertifikatspreise für CO₂-Emissionen bis zu einem Preis von 162 €/t an. Die Ausbauziele von Solar- und Windkraft werden erreicht und ab 2030 erhöht. Somit sind 2050 8,7 GW Wind- und 20 GW Solarleistung installiert. Auf die tatsächliche Realisierbarkeit dieser Ziele wird in der vorliegenden Masterarbeit nicht näher eingegangen. Die Szenarien der Österreichischen Energieagentur umfassen zudem auch andere Sektoren wie Fernwärme, Verkehr und Industrie. Obwohl diese in Synthese mit der Stromerzeugung stehen – z.B. bei der Kraftwärmekopplung – wurden sie hierbei nicht näher betrachtet. Ein Aspekt dieses Berichts umfasst die Elektromobilität. In WAM+ werden Zulassungsszenarien für die Jahre 2020 bis 2050 entwickelt (WAM+ 2020 174.007 Fahrzeuge und WAM+ 2030 1.693.000 Fahrzeuge). Da jedoch zwischen PHEV und BEV nicht unterschieden wird, reicht diese Genauigkeit nicht aus. Somit ist es unerlässlich, eigene Berechnungen zu erstellen (vgl. Abschnitt 5.2).

Beurteilung der Szenarien des Umweltbundesamtes

Wie aussagekräftig die Szenarien (WEM, WAM und WAM+) letztlich sein werden, konnte auch im Jahr 2021 noch nicht vorhergesagt werden. Laut WAM Szenario sollte sich der energetische Endverbrauch Österreichs 2020 auf 1.050 PJ einpendeln. Der tatsächliche energetische Endverbrauch betrug – fast wie vorhergesagt – 1.053 PJ (Statistik Austria, 2021). Dies ist jedoch eine Folge der COVID-19 Pandemie, welche den Energieverbrauch um -8 % sinken lies (Umweltbundesamt, 2015). Dies ist auch ein entscheidender Punkt, weswegen hier von Szenarien und nicht von Prognosen ausgegangen werden muss, da technologische Entwicklungen, globale Krisen, ökologische und politische Veränderungen nicht vorhersehbar sind. In der vorliegenden Masterarbeit wurde ein ähnlicher Ansatz gewählt. Vor allem hinsichtlich der Zulassungszahlen von Fahrzeugen wurde ein so breiter Ansatz gewählt, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit eines der vorgestellten Szenarien auch eintreffen wird.

Kapitel 3

Ziel der Arbeit und konkrete Fragestellung

3.1 Ziel und Zweck der Arbeit

Wie bereits in der Einleitung näher erläutert, ist es eine der besonderen Herausforderungen unserer Zeit, den Energie- und Mobilitätssektor zu entkarbonisieren. Die Machbarkeit ist in beiden Sektoren umstritten, insbesondere in dem dafür vorgesehenen Zeitrahmen (2050). Die Grundidee dieser Arbeit beinhaltet eine Kombination beider Sektoren, um eine Symbiose zu bilden. In der wissenschaftlichen Fachliteratur spricht man hierbei von Sektorkopplung. Einerseits wird versucht die Fluktuationen des Verbrauchs an die Fluktuationen der Erzeugung anzupassen, andererseits kann im Mobilitätssektor auch überschüssige Energie zwischengespeichert werden. Die wichtigste Grundvoraussetzung ist, Szenarien zu entwickeln, welche transparent machen, wie viel elektrische Energie bereitgestellt und gebraucht wird und welche Speicherkapazität im Mobilitätssektor zur Verfügung steht. Dies ist durch den Ausbau erneuerbarer Energien und den Zulassungszahlen von Fahrzeugen, welche als Energiespeicher eine Lithium-Ionen-Industriebatterie verbaut haben, maßgeblich bedingt. Dieser Energiespeicher könnte in Zukunft einerseits für das Fahrzeug und andererseits für den Energiesektor zur Verfügung stehen. Um diese grundlegenden Überlegungen zu erarbeiten, müssen mit Unsicherheiten behaftete Szenarien erstellt werden, welche eine große Bandbreite an möglichen Entwicklungen abdecken. Ziel ist primär, Größenordnungen zu erarbeiten und Handlungsspielräume zu erörtern, welche es ermöglichen, die Vorgaben des Paris Agreements zu erfüllen.

Daraus ergeben sich die – in folgenden Abschnitt (3.2) formulierten – Forschungsfragen.

3.2 Konkrete Fragestellung

Um das Energiespeicherpotential von batterieelektrischen Fahrzeugen zum Ausgleich der Fluktuationen von erneuerbaren Energien durch bidirektionales Laden zu erörtern, werden folgende vier Forschungsfragen formuliert:

Forschungsfrage 1 (F1): Welches Energiespeicherpotenzial ist mit Ende des Jahres 2020 im österreichischen Bestand der – lt. StVO¹ zugelassenen – batterieelektrischen Fahrzeuge vorhanden?

Forschungsfrage 2 (F2): Welches Energiespeicherpotenzial ist mit Ende des Jahres 2030 im österreichischen Bestand lt. StVO zugelassenen batterieelektrischen Fahrzeuge vorhanden bei:

- a. 590.000 in Österreich zugelassenen batterieelektrischen Fahrzeugen (Positionspapier Wien Energie)?
- b. einem linearen Wachstum der in Österreich zugelassenen batterieelektrischen Fahrzeugen?
- c. einem exponentiellen Wachstum der in Österreich zugelassenen batterieelektrischen Fahrzeugen?

Dies erfolgt unter der Annahme von:

- i gleichbleibenden Batteriekapazitäten
- ii durchschnittlich kleineren Batteriekapazitäten
- iii durchschnittlich größeren Batteriekapazitäten

Forschungsfrage 3 (F3): Zu wie vielen Ladezyklen der batterieelektrischen Fahrzeuge kommt es pro Jahr und wie hoch müsste die Stromspeicherkapazität aller Fahrzeuge im hypothetischen Extremfall ausfallen, wenn im Jahr 2030 eine saisonale Speicherung angestrebt werden würde?

Forschungsfrage 4 (F4): Inwieweit kann dieses Energiespeicherpotenzial im Jahr 2030, 2040 und 2050 theoretisch die Fluktuationen von erneuerbaren Energien ausgleichen unter der Annahme, dass

- a. der/die Fahrzeughalter*in eine niedrige Bereitschaft (10 %) zeigt, das batterieelektrische Fahrzeug durch den Netzbetreiber gesteuert laden zu lassen und durch bidirektionales Laden Energie zu entnehmen, wenn dies dem Netzdienlich ist?

¹Straßenverkehrsordnung 1960 (StVO)

- b. der/die Fahrzeughalter*in eine mittlere (20 %) Bereitschaft zeigt, das batterieelektrische Fahrzeug durch den Netzbetreiber gesteuert laden zu lassen und durch bidirektionales Laden Energie zu entnehmen, wenn dies dem Netz dienlich ist?
- c. der/die Fahrzeughalter*in eine hohe (30 %) Bereitschaft zeigt, das batterieelektrische Fahrzeug durch den Netzbetreiber gesteuert laden zu lassen und durch bidirektionales Laden Energie zu entnehmen, wenn dies dem Netz dienlich ist?

Kapitel 4

Modellierung und Methodik der Datenauswertung

In dieser vorliegenden Masterarbeit wurde eine quantitative theoretische Herangehensweise gewählt. Im zweiten Kapitel wird zudem umfassend auf die qualitativen Grundlagen batterieelektrischer Fahrzeuge eingegangen. Hier werden besonders die Themenbereiche Ladeschnittstellen, elektrotechnische Grundlagen der Ladebetriebsarten, analoge Kommunikationsschnittstelle zwischen Ladesäule und Fahrzeug, Lithium-Ionen-Industriebatterien und WAM+ Szenario eingehend erörtert. Hierbei wurde vor allem auf Standardwerke der Energietechnik, Normen und fachspezifische Websites zurückgegriffen. Sofern Onlinequellen herangezogen wurden – insbesondere bei der Erhebung der Speicherkapazität der Fahrzeuge – wurde sorgfältig und umfassend auf die Plausibilität und Überprüfbarkeit der Angaben geachtet. Im Anschluss an die Erarbeitung der Grundlagen werden mit Hilfe quantitativer Datensätze nunmehr die – in Abschnitt 3.2 formulierten – Forschungsfragen beantwortet.

4.1 Modellierung und Methodik der ersten Forschungsfrage (F1)

Für die Beantwortung der ersten Forschungsfrage wird erörtert, wie viele konventionell angetriebene und batterieelektrische Fahrzeuge in Österreich zugelassen sind. Hierfür wurde ein Datensatz der Statistik Austria (Statistik Austria, 2021a) erworben, welcher ausführlich aufbereitet und mit fahrzeugspezifischen Merkmalen verknüpft wird. Somit konnte allen zugelassenen batterieelektrischen Fahrzeugtypen eine Speicherkapazität¹ zugeordnet werden und die Forschungsfrage 1 somit beantwortet werden.

¹Bzw. eine Speicherkapazität je nach Szenario. Siehe Abschnitt 5.1 für die genaue Beschreibung der Analyse.

4.2 Modellierung und Methodik der zweiten Forschungsfrage (F2)

Hierbei werden die Ergebnisse aus der Beantwortung der Forschungsfrage 1 um die Szenarien der zugelassenen batterieelektrischen Fahrzeuge in Österreich 2030 bzw. 2050 erweitert. Es wurden lineare und exponentielle Funktionen entwickelt, um mögliche zukünftige Entwicklungen zu beschreiben. Dadurch konnte Forschungsfrage 2 anhand dreier Wachstumsszenarien (linear S1, exponentiell S2 und linear S3) und vier Szenarien, welche die Speichergröße betreffen (Szenario Basis, Szenario Basis +, Szenario Basis ++ und Szenario Langstrecke), beantwortet werden.

4.3 Modellierung und Methodik der dritten Forschungsfrage (F3)

Für die Beantwortung der Forschungsfrage 3 werden die Datensätze des Austrian Power Grids (Austrian Power Grid, 2021b) (Austrian Power Grid, 2021a) aufbereitet, um Funktionen für jede Energieerzeugungsart zu entwickeln und diese in einem weiteren Arbeitsschritt mit dem WAM+ Szenario zu verknüpfen. Dadurch kann dargestellt werden, welcher Energiebedarf zu jeder Stunde des Jahres 2020 im österreichischen Netz vorhanden ist. Anhand dessen wird für das Jahr 2030 ein Szenario entwickelt. Somit wird die Forschungsfrage 3 beantwortet. Der Grundgedanke besteht darin, die Last und Erzeugung gegenüberzustellen, und eruieren zu können, wann idealerweise Strom aus batterieelektrischen Fahrzeugen ins Netz eingespeist bzw. aus dem Netz geladen werden sollte.

4.4 Modellierung und Methodik der vierten Forschungsfrage (F4)

Das zweite Kapitel und die Forschungsfragen 1 bis 3 bilden die qualitativen Grundlagen, um die vierte Forschungsfrage – welche zudem als Hauptfrage definiert ist – zu beantworten. Hierzu wurde ein Entscheidungsbaum erstellt, welcher definiert, wann das BEV ins Stromnetz entlädt und wann elektrische Energie aus dem Stromnetz entnommen wird. Es wurden mathematische Bedingungen definiert, welche nicht überschritten werden dürfen (z.B. maximale Speichergröße). Dieser Entscheidungsbaum wurde mit einer in sich verschachtelten MS Excel *WENN – DANN – FUNKTION* beschrieben und in weiterer Folge mit den Ergebnissen aus Forschungsfrage 3 verknüpft. Somit konnte ein Modell für die Jahre 2030, 2040 und 2050 erstellt werden, wo alle

zugelassenen batterieelektrischen Fahrzeuge immer dann einen Teil der gespeicherten elektrischen Energie abgeben, wenn diese im Netz benötigt wird und jeweils immer dann einen Teil laden, wenn mehr Energie erzeugt als benötigt wird. Die Ergebnisse werden in der Abdeckung der benötigten Energie in von Stunden im Bezug des gesamten Jahres dargestellt. Also jene Stunden mehr pro Jahr, in denen sich Österreich mit eigener Energie versorgen kann, als ohne Zwischenspeicherung in BEVs der Fall wäre.

Kapitel 5

Ergebnisse

5.1 Der Bestand batterieelektrischer Fahrzeuge in Österreich 2020

Insgesamt verfügen nur 2,7 % der in Österreich 2020 zugelassenen PKWs über keine Benzin oder Diesel betriebenen Antriebsformen (vgl. Abbildung: 5.1). Von diesen 2,7 % zählen 33 % zu reinen batterieelektrischen Fahrzeugen, 62 % lassen sich den Diesel/Benzin- Hybriden zuordnen. Weitere 5 % fallen unter die Kategorie Wasserstoffautos (45 Fahrzeuge), bivalent (Benzin/Flüssiggas/Erdgas) betriebene (3.308) und gasbetriebenen (2.753) Fahrzeuge (Statistik Austria, 2021b).

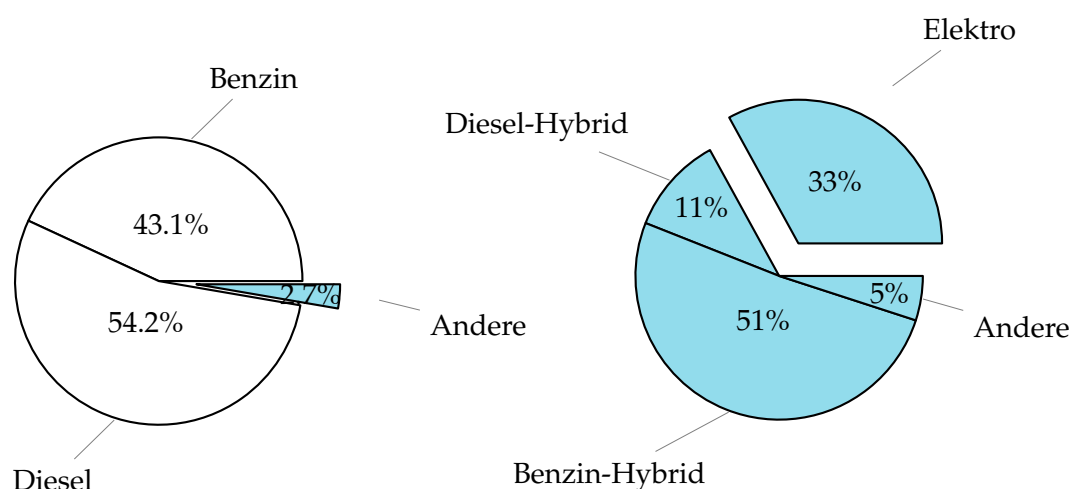


Abbildung 5.1: Personenkraftwagen Bestand in Österreich nach Antriebsform im Jahr 2020 [bearbeitet aus (Statistik Austria, 2021b)]

In Österreich waren Ende 2020 44.507 batterieelektrische Fahrzeuge zugelassen (Statistik Austria, 2021a). Die zugelassenen BEVs setzen sich aus Serienmodellen großer Fahrzeug-

hersteller, Elektroumbauten und Konzeptautos zusammen. Die Bestandsstatistik der Statistik Austria erfasst diesen Fahrzeugbestand jedoch undifferenziert. Da die Elektromobilität eine vergleichsweise junge Technologie darstellt (vgl. Abbildung 5.2), sind verhältnismäßig viele dieser Nicht-Serienfahrzeuge im österreichweiten Bestand vertreten. Bis zum Jahr 2010 stagnierte der Anteil an BEVs auf den österreichischen Straßen. Erst ab dem Jahr 2010 – hier gab es 353 zugelassene BEVs – stieg diese Anzahl kontinuierlich an (Statistik Austria, 2021b). Die allerersten zugelassenen Fahrzeuge wurden in den 1980er Jahren registriert (Statistik Austria, 2021b). In Abbildung 5.2 sind die Daten nicht bereinigt, es ist jedoch davon auszugehen, dass der Anteil an Nicht-Serienfahrzeugen in den Anfangsjahren tendenziell hoch lag.

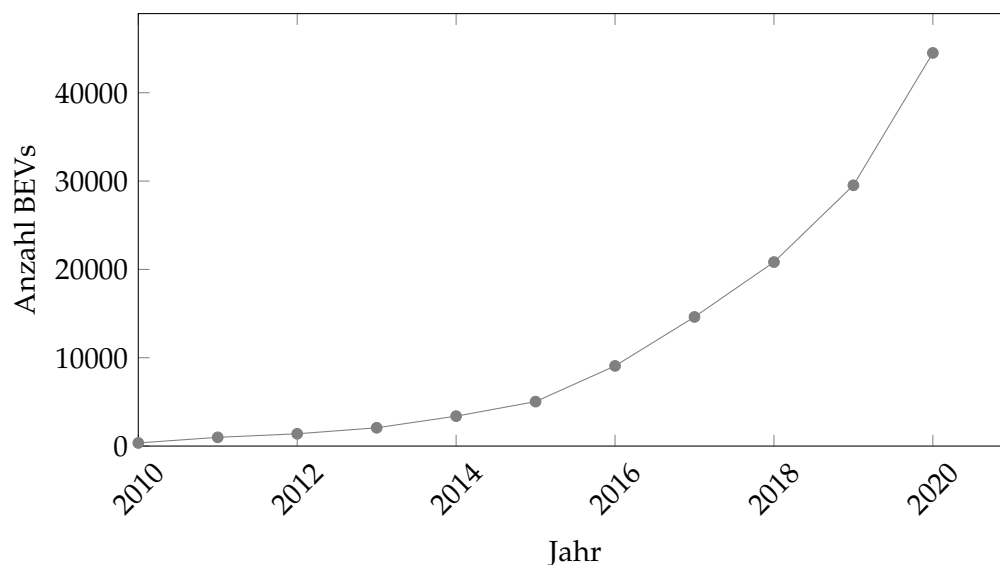


Abbildung 5.2: Entwicklung von BEVs in Österreich [bearbeitet aus (Statistik Austria, 2021b)]

Es ist zwar in vielen Fällen nachvollziehbar, über welche technischen Eigenschaften diese Privatumbauten oder Konzeptfahrzeuge verfügen, sie sind sie in den meisten Fällen für die Zukunft der E-Mobilität jedoch nicht repräsentativ. Aus diesem Grund wurde die Statistik nach folgenden Kriterien bereinigt:

Alle BEV, von denen weniger als drei Modelle in Österreich zugelassen sind, werden nicht erfasst. Ausgenommen sind Umbauten in höherer Stückzahl, z.B. der beliebte Elektroumbau des Citroën 2 CV zur *Elektroente*, welche jedoch auch nicht miteinbezogen wird. Andererseits werden Serienmodelle wie etwa der Polestar 2 oder der Audi E-Tron S Quattro, welche bis dato (Ende 2020¹) nur einmal zugelassen wurden, in die Statistik miteingerechnet. Nicht im Bestand inkludiert sind alle anderen Formen von alternativen Antrieben, in denen zusätzlich eine größere Batterie verbaut wird. Gemeint sind hier vor allem Wasserstoffautos und Hybridfahrzeuge. In der vorliegenden Masterarbeit

¹Im Jahr 2021 erhöhte sich die Zulassungszahl vieler Modelle deutlich

werden BEVs mit Range Extender auch zu den hybriden Fahrzeugen gezählt. Sie fallen zwar häufig – da der Range Extender oft als Zusatzoption angeboten wird – in die Statistik der Elektrofahrzeuge, sind jedoch streng genommen keine reinen BEVs.

Nach der Aufbereitung der Daten beläuft sich der Bestand auf 44.410 BEVs, 97 Fahrzeuge wurden nach den soeben genannten Kriterien aussortiert. In Österreich waren Ende

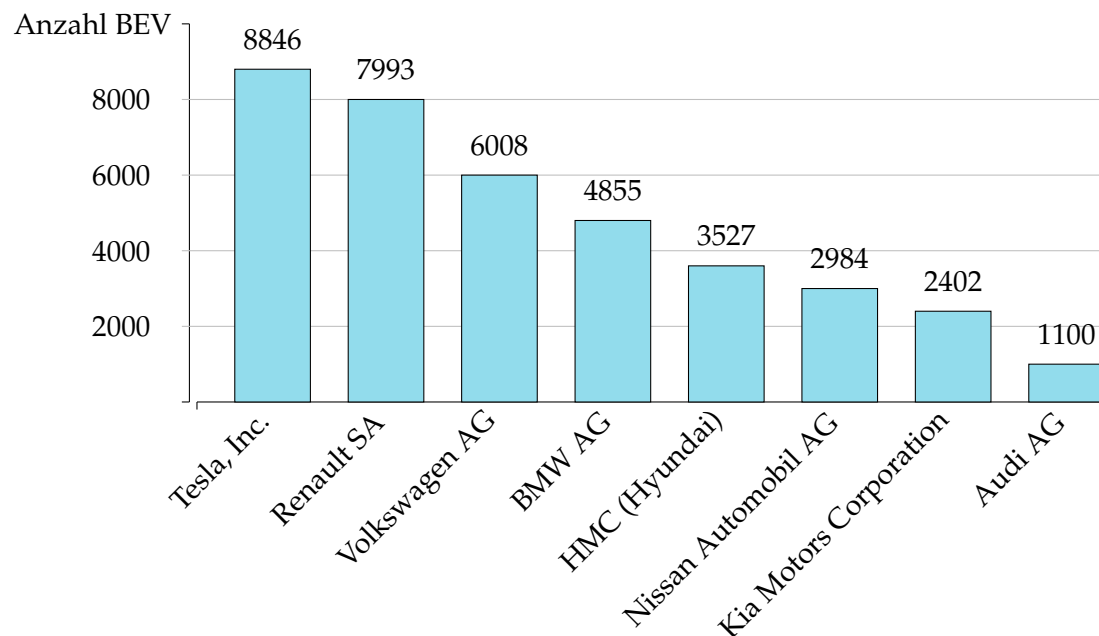


Abbildung 5.3: Häufigst zugelassene BEV nach Automobilmarke [bearbeitet aus (Statistik Austria, 2021a)]

des Jahres 2020 BEVs von 29 Fahrzeugmarken zugelassen. Die acht meist vertretenen Marken (siehe Abbildung 5.4) decken mit 37.715 Fahrzeugen 85 % des österreichischen Markts ab. Es ist zwischen Fahrzeugmarken und Automobilkonzernen zu unterscheiden, da oftmals mehrere Fahrzeugmarken in einer Konzerngruppe vorzufinden sind. Ein Beispiel dafür sind die Marken Kia und Hyundai. In der vorliegenden Masterarbeit wird nach Automobilmarken differenziert, da diese bei der Fahrzeugzulassung von Bedeutung sind. Tesla, Inc.² stellt mit 8846 zugelassenen BEVs die meisten Fahrzeuge. Das amerikanische Unternehmen produziert ausschließlich rein batterieelektrische Fahrzeuge. Das mit Abstand erfolgreichste Fahrzeugmodell – mit 7.829 zugelassenen BEVs – ist das Modell ZOE von Renault (siehe Abbildung 5.3). Dieses Modell hat eine Batteriegröße zwischen 22 und 52 kWh, wird jedoch mittlerweile nur noch in Versionen mit 41 kWh und 52 kWh angeboten (Renault, 2021). Bei etwa jedem fünften in Österreich zugelassenen BEV handelt es sich um das Modell ZOE des Automobilherstellers Renault. Wie in Abbildung 5.4 dargestellt, handelt es sich bei den zweit- und dritthäufigsten

²Automarken werden weiters unter den geläufigen Kurznamen genannt

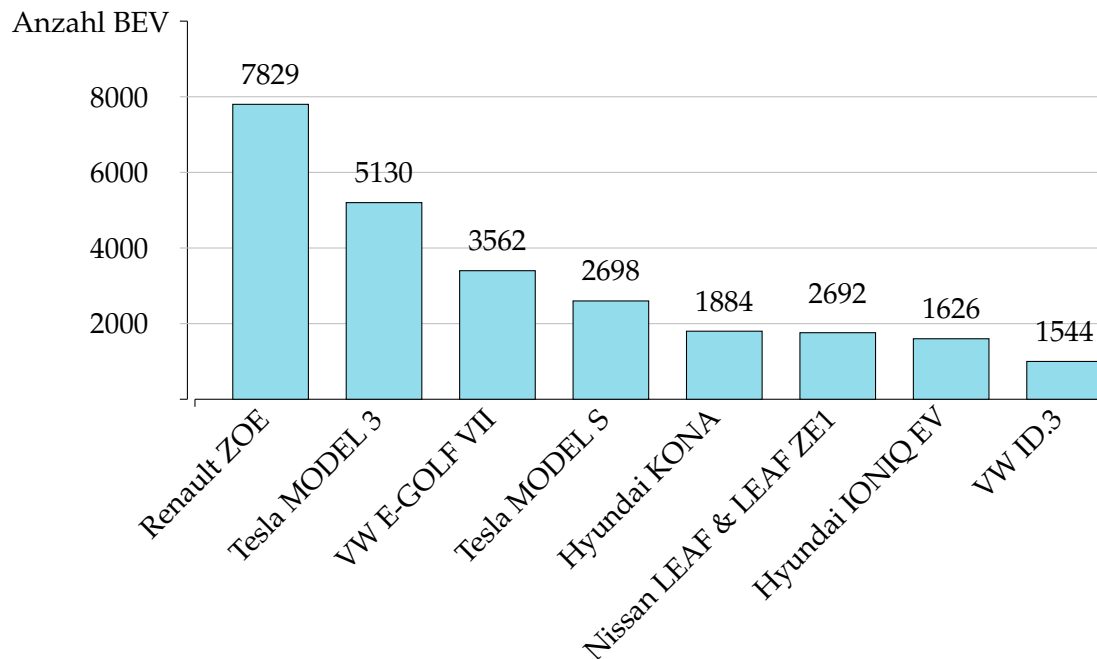


Abbildung 5.4: Häufigst in Österreich zugelassenes BEV nach Modell [bearbeitet aus (Statistik Austria, 2021a)]

zugelassenen BEVs um Modelle der Fahrzeughersteller Tesla und Volkswagen.

Die am häufigsten zugelassenen BEV-Modelle (vgl. Abbildung 5.4) repräsentieren 60,72 % der BEVs. Diese lassen sich in die Klasse der Kleinwagen, Kompaktklasse, Mittelklasse, Sport Utility Vehicle (SUV) und Oberklasse einordnen. Wie in Tabelle 5.1 ersichtlich, sind viele dieser Modellvarianten in verschiedenen Batteriegrößen verfügbar. Dadurch wurde die Recherche erheblich erschwert, da bei jedem Modell eine Vielzahl von möglichen Varianten zur Verfügung steht. Dies wurde insoweit gelöst, indem die Batteriegrößen primär von den Websites der Autohersteller entnommen wurden, teilweise wurden die Herstellerfirmen auch telefonisch kontaktiert. In einem zweiten Arbeitsschritt wurde dies mit den Daten von ÖAMTC bzw. ADAC verglichen und letztlich anhand einer Internetrecherche kontrolliert. Da für diese Art von Daten keine wissenschaftliche Fachliteratur zur Verfügung steht, musste die Qualität mittels mehrfacher Überprüfung verschiedener Quellen gewährleistet werden. Dabei ergeben sich zwei grundlegende Schwierigkeiten: die Angaben entsprechen in einigen Fällen – vor allem bei wenig etablierten Herstellern – keiner wissenschaftlichen Überprüfbarkeit und zweitens sind die Modellversionen nicht immer eindeutig dem angemeldeten BEVs zuzuordnen. Um diese Unsicherheiten miteinzubeziehen, werden im nachfolgenden Abschnitt Szenarien erstellt, welche eine gewisse Bandbreite abdecken.

Tabelle 5.1: Die am Häufigsten in Österreich zugelassenes BEV nach Modell und Batteriegröße
[erweitert aus (Statistik Austria, 2021a)]

Modell	Fahrzeugklasse	Batteriegröße [kWh]
Renault ZOE	Kleinwagen	41 / 52
Tesla Modell 3	Mittelklasse	52 / 58 / 75
VW E-GOLF VII	Kompaktklasse	35,8
Tesla MODEL S	Oberklasse	60 / 70 / 75 / 85 / 90 / 100
Hyundai KONA	SUV	64
Nissan LEAF	Kompaktklasse	24 / 30
Nissan LEAF ZE1	Kompaktklasse	40 / 62
Hyundai IONIQ EV	Kompaktklasse	28 / 38,3
VW ID.3	Kompaktklasse	48 / 62 / 82

5.2 Mobiler Speicherbestand in Österreich

Batterieelektrische Fahrzeugmodelle werden in den meisten Fällen in den verschiedensten Ausführungen angeboten. Ähnlich wie PKWs mit Verbrennungsmotor sind sie in verschiedenen Motorisierungen verfügbar. Zudem werden sie des Öfteren wie z.B. im Fall von Tesla mit einem, zwei, drei oder sogar vier Motoren ausgestattet (Tesla Motors Austria GmbH, 2021). Eine weitaus größere Bedeutung wird jedoch dem jeweiligen Energiespeicher beigemessen. Bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor ist dies z.B. der Benzin- bzw. Dieseltank, bei BEVs die Batterie. Die Größe des Speichers hat neben der Leistung des Antriebs eine signifikante Auswirkung auf die Reichweite des Fahrzeugs. Aus den Daten der Statistik Austria (2021a) können die Speichergrößen nicht abgeleitet werden. Auch sind diesem Datensatz keinerlei Informationen zu entnehmen, welche Unterversion einer Modellvariante zugelassen ist. Bei vielen Herstellern lässt sich die Größe der Batterie jedoch direkt vom Modellnamen ableiten, wie z.B. im Fall des BMW i3 (vgl. 5.2). Hier geht es um einen aus der Kapazitätsangabe im Modellnamen, sowie

Tabelle 5.2: In Österreich zugelassene Modellvarianten von BMW (Statistik Austria, 2021a)

Modellvariante	Anzahl	kWh	kWh	kWh
I3 EDRIVE BEV I01	584	22		
I3 EDRIVE BEV I01 MÜ	1346		33,2	
I3 EDRIVE 94AH I01	658		33,2	
I3 EDRIVE BEV I01 MÜ2	1358			42,2
I3S EDRIVE BEV I01	589			42,2
I3S EDRIVE 94AH I01	320		33,2	

aus der Generation (MÜ = Modellüberarbeitung) die Batteriegröße hervor. In vielen weiteren Fällen ist dies in ähnlicher Form der Fall. Bei manchen Herstellern – hier ist als Beispiel AUDI zu nennen (vgl. Tabelle 5.3) – können diese Informationen nicht aus der Zulassungsstatistik entnommen werden:

Tabelle 5.3: In Österreich zugelassene Modellvarianten von AUDI (Statistik Austria, 2021a)

Modellvariante	Anzahl	kWh	kWh
E-TRON SPORTBACK QUATTRO	218	71	95
E-TRON S SPORTBACK QUATTRO	4		95
E-TRON QUATTRO	877	71	95
E-TRON S QUATTRO	1	71	95

In Tabelle 5.3 ist ersichtlich, dass die Elektromodelle von AUDI in zwei Varianten angeboten werden. Eine mit 71 kWh und eine mit 95 kWh Brutto Energiespeicher. Um diese Ungenauigkeit bei der Erhebung miteinzubeziehen, wurden vier Szenarien

entwickelt. Beim Szenario *Basis* wird – wenn keine weiteren Informationen zur Verfügung stehen – angenommen, dass die BEVs in der Basisvariante zugelassen wurden. Bei der Basisvariante handelt es sich immer um die Fahrzeuge mit der geringsten Batteriegröße des jeweiligen Modells. Beim Szenario *Langstrecke* wird die Modellvariante mit dem größten Batteriespeicher miteinbezogen. Da es in zwei Fällen Modellvarianten mit einer Vielzahl von Batteriegrößen gibt, wurden zudem zusätzlich die beiden Varianten *Basis +* und *Basis ++* generiert. Gibt es vier Varianten, werden diese auf die vier Szenarien aufgeteilt. Bei drei Varianten wird die mittlere Speichergröße sowohl für das Szenario *Basis +* wie auch *Basis ++* herangezogen. Bei einer Vielzahl an Varianten werden die vier gängigsten Varianten in die Statistik aufgenommen. Diese Szenarien geben im Detail keinerlei Auskunft darüber, ob in einem Fahrzeug eine subjektiv große oder kleine Batterie verbaut ist. So ist z.B. das Modell von *EQ FORTWO COUPE EL -453-* mit 17,6 kWh in allen Szenarien vertreten, da es dieses Modell nur in einer Batterievariante gibt. Es ist jedoch naheliegend, dass ein BEV mit 17,6 kWh allgemein nicht als Langstreckenmodell klassifiziert werden würde. Es wird jeweils die Anzahl der zugelassenen Fahrzeuge mit dem verbauten Brutto Batteriespeicher multipliziert. Dies führt somit zur Beantwortung der Forschungsfrage 1:

Forschungsfrage 1 (F1): Welches Energiespeicherpotenzial ist mit Ende des Jahres 2020 im österreichischen Bestand der – lt. StVO zugelassenen – batterieelektrischen Fahrzeuge vorhanden?

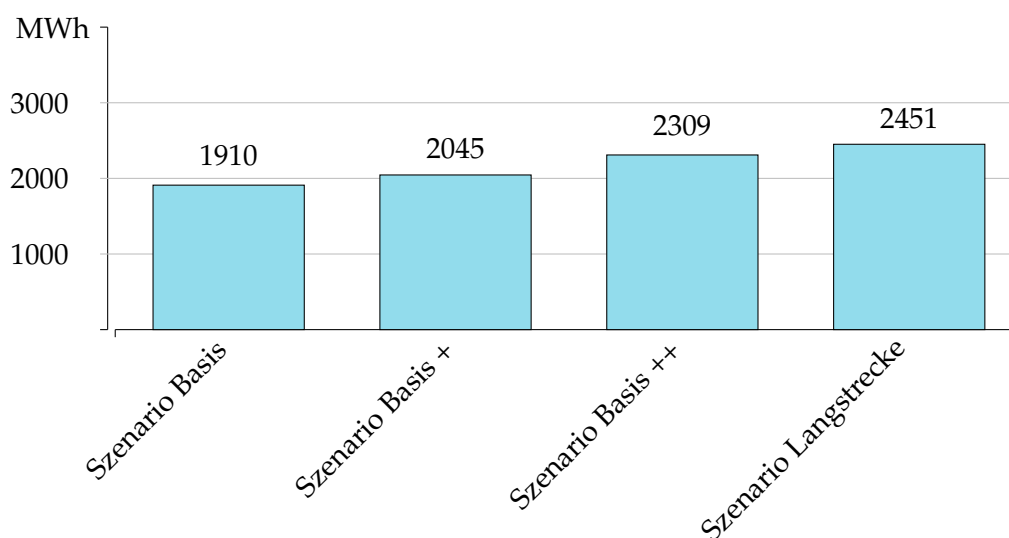


Abbildung 5.5: Kumulierte Speicherkapazität der in Österreich zugelassenen BEV [eigene Berechnung nach (Statistik Austria, 2021a)]

Die Abbildung 5.5 zeigt, dass in Österreich in 44.410 BEVs zwischen 1.910 MWh und

2.451 MWh an Energiespeicherkapazität im Bestand vorhanden sind. Das Szenario *Langstrecke* ist um 22 % größer, im Bezug zu Szenario *Basis* und 17 % bzw. 6,6 % größer zu Szenario *Basis +* und *Basis ++*.

5.3 Szenarien für den batterieelektrischen Fahrzeugbestand sowie dessen Speicherkapazität in Österreich 2030

Wie in Tabelle 5.4 ersichtlich, sind die PKW-Zulassungszahlen³ in den letzten Jahren in Österreich stetig angestiegen.

Tabelle 5.4: Fahrzeugbestand Österreichs von 2010 bis 2020 in Millionen PKWs (Statistik Austria, 2021a)

Jahr	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Menge	4,44	4,52	4,58	4,64	4,69	4,75	4,82	4,89	4,98	5,04	5,09

Durch die Elektrifizierung des Individualverkehrs ist davon auszugehen, dass sich der Gesamtbestand verändert. Es ist jedoch schwer abschätzbar, in welche Richtung diese Entwicklung gehen wird. Um die Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung des Fahrzeugbestands nicht zu vergrößern, wird in der vorliegenden Masterarbeit prinzipiell angenommen, dass im Jahr 2050 gleich viele batterieelektrische Fahrzeuge wie Fahrzeuge aller Antriebsarten Ende 2020 in Österreich zugelassen sind.

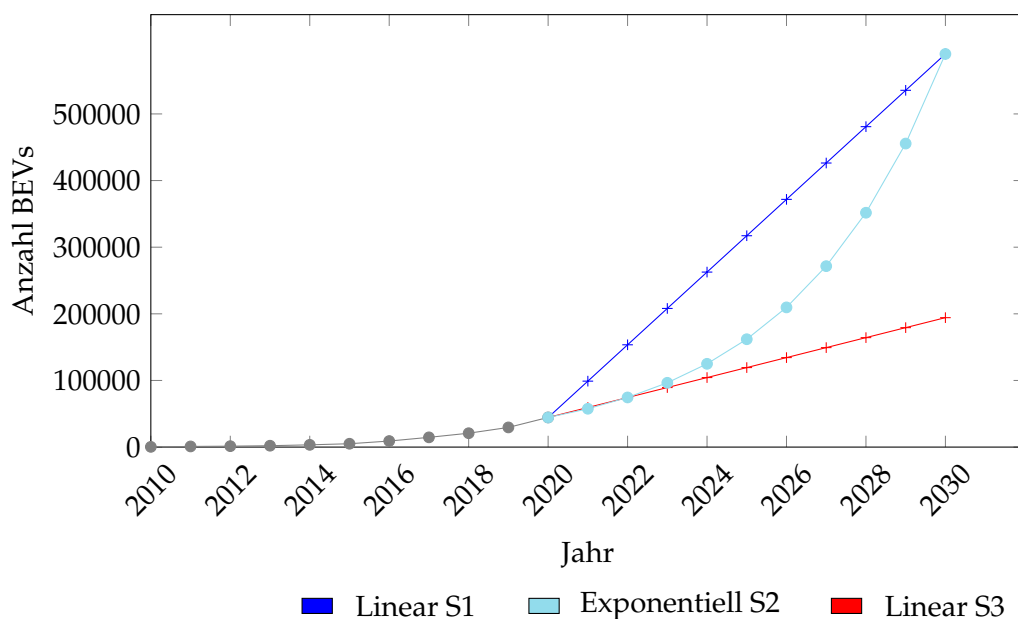


Abbildung 5.6: Entwicklung von BEVs in Österreich [bearbeitet aus (Statistik Austria, 2021b)]

Für die Anzahl an BEVs im Jahr 2030 wird das **Positionspapier der Wien Energie** (Wien Energie, 2021) herangezogen. Demnach wird für 2030 die Mindestanzahl von 590.000 BEVs benötigt, um den Individualverkehr bis 2050 zu dekarbonisieren. Die

³Personenkraftwagen (PKW)

Abbildung 5.6 zeigt in blauer Farbe ein lineares Wachstum (S1) welches die Vorgabe des Positionspapiers (Wien Energie, 2021) erreicht. Hierzu müssten jedes Jahr 54.559 neue BEVs zugelassen werden. Dies entspricht mehr als dem dreifachen⁴ der Neuzulassungen 2020. In der roten Farbe (S3) wird das lineare Wachstum beschrieben, wenn es zu keinerlei Steigerung des Zuwachses kommt. Hier werden jedes Jahr 14.984 zusätzliche BEVs zugelassen. Dies ergibt einen Bestand von 194.250 Fahrzeugen im Jahr 2030 oder knapp 40 %⁵ der angestrebten Menge. Der türkise Farbverlauf beschreibt ein exponentielles Wachstum bei welchem im Jahr 2030 ebenfalls 590.00 BEVs zugelassen werden. Um dieses Ziel zu erreichen, muss sich der Zuwachs jährlich um den Faktor 1,3⁶ erhöhen. Aus der Anzahl in Österreich zugelassener BEVs und der Gesamtspeicherkapazität (vgl. Abbildung 5.5) ergibt sich eine durchschnittliche Speicherkapazität über alle Fahrzeugmodelle.

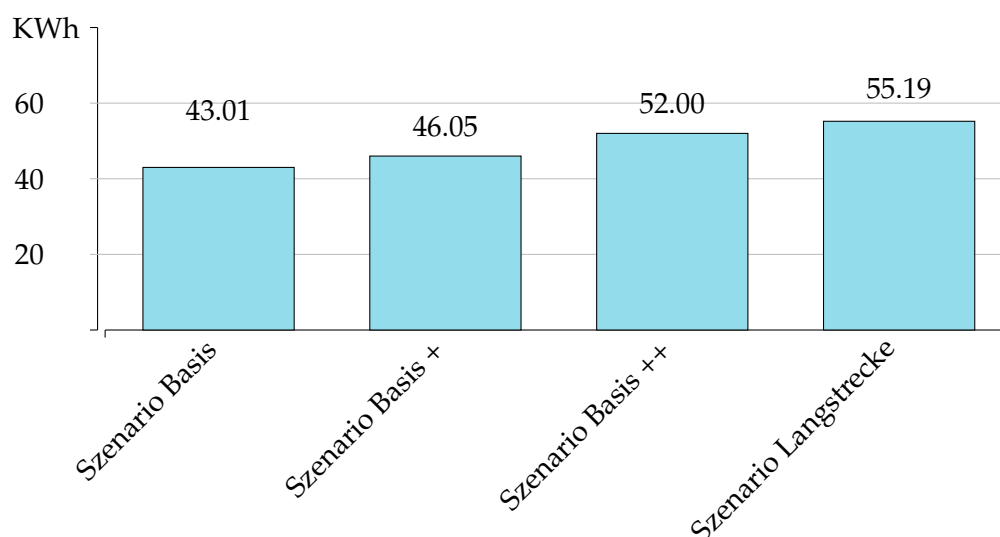


Abbildung 5.7: Durchschnittliche Akkukapazität je zugelassenem BEV [eigene Berechnung nach (Statistik Austria, 2021a)]

In Abbildung 5.7 ist erkennbar, dass sich diese durchschnittliche Speicherkapazität der in Österreich zugelassenen BEVs zwischen ungefähr 43 und 55 kWh befindet. Werden diese Größenordnungen z.B. mit Tabelle 5.3 verglichen, erhält man Kenntnis darüber, dass es sich bei dem überwiegenden Teil der Antriebsbatterien um vergleichsweise kleine Kapazitäten handelt. Es lässt sich zwar aus dem Datensatz der Statistik Austria (2021a) herauslesen, dass die Speichergrößen tendenziell ansteigen, jedoch kann auch hier aufgrund der geringen Durchdringung der Technologie keine Prognose für 2030 bzw. 2050 abgegeben werden. Es werden für das Jahr 2030 die Szenarien Basis, Basis+,

⁴genauer: 3,641

⁵genauer: 39,64 %

⁶genauer: 1,295

Basis++ und Langstrecke herangezogen und mit den Szenarien des Zuwachses der BEVs kombiniert (Tabelle 5.6). Somit lässt sich für jedes Jahr ein Gesamtspeicherbestand abschätzen. Durch die Kombination der Szenarien ergeben sich zwölf mögliche Gesamtspeichergrößen pro Jahr aufgrund derer ein allgemeines Lagebild abgegeben werden kann. Die Ausnahmen bilden hier die Jahre 2020 und 2030, in welchen vier bzw. acht verschiedene Gesamtspeichergrößen möglich sind⁷. Im Jahr 2011 gab es den höchsten Zuwachs an BEVs mit 180 %, jedoch waren damals österreichweit unter tausend BEVs zugelassen. In den Jahren von 2011 bis 2020 wurde ein jährliches Wachstum zwischen 40-60 % verzeichnet, wobei anzunehmen ist, dass sich dies u.a. auf äußere Umstände zurück führen lässt. So lässt sich erahnen, dass in diesem frühen Stadium der Technologieentwicklung ein neues Modell am Markt die Statistik im Prozentbereich beeinflusst. Ein Beweis dafür kann jedoch nicht aus der Datenlage erbracht werden. Ob das Angebot an BEVs die Nachfrage steigert oder ob die Nachfrage das Angebot an neuen Modellen bedingt, geht aus der Datenlage ebenfalls nicht hervor. Im ersten Halbjahr 2021 wurden um 219,4 % mehr BEVs zugelassen als im 1. Halbjahr 2020 (Statistik Austria, 2021c). Dies übersteigt sowohl die exponentielle S2-Kurve (Abbildung 5.6) mit 30 % als auch die Lineare S1-Wachstumskurve mit einem Wachstum zwischen 2020 und 2021 von 123 %. Die im Jahr 2050 5,09 Millionen zugelassenen BEVs sind aufgrund der Übersichtlichkeit nicht in Abbildung 5.6 abgebildet, werden aber in der Beantwortung der Forschungsfragen miteinbezogen. Im Szenario S2 (exponentiell) wird diese Anzahl bei weitem überschritten, das Szenario wird bei 5,09 Millionen BEVs begrenzt. Die anderen Szenarien erreichen diesen Wert nicht. Bei Szenario S1 sind 2040 1.135.590 und 2050 1.681.180 BEVs zugelassen. Das lineare Szenario S3, bei welchem keine Erhöhung der Steigerungsrate angenommen wird, kommt 2040 auf 342.150 und 2050 auf 491.020 Fahrzeuge. Somit ist erkennbar, dass die gewünschte Anzahl von Fahrzeugen im Jahr 2030 ohne deutliche Steigerung auch 2050 nicht erreicht werden kann. Zur Beantwortung vierten Forschungsfrage (F4) (siehe Abschnitt 5.4) werden trotzdem alle Szenarien berücksichtigt.

⁷In diesen Jahren sind den Szenarien S1 und S2 gleich viele BEVs zugelassen.

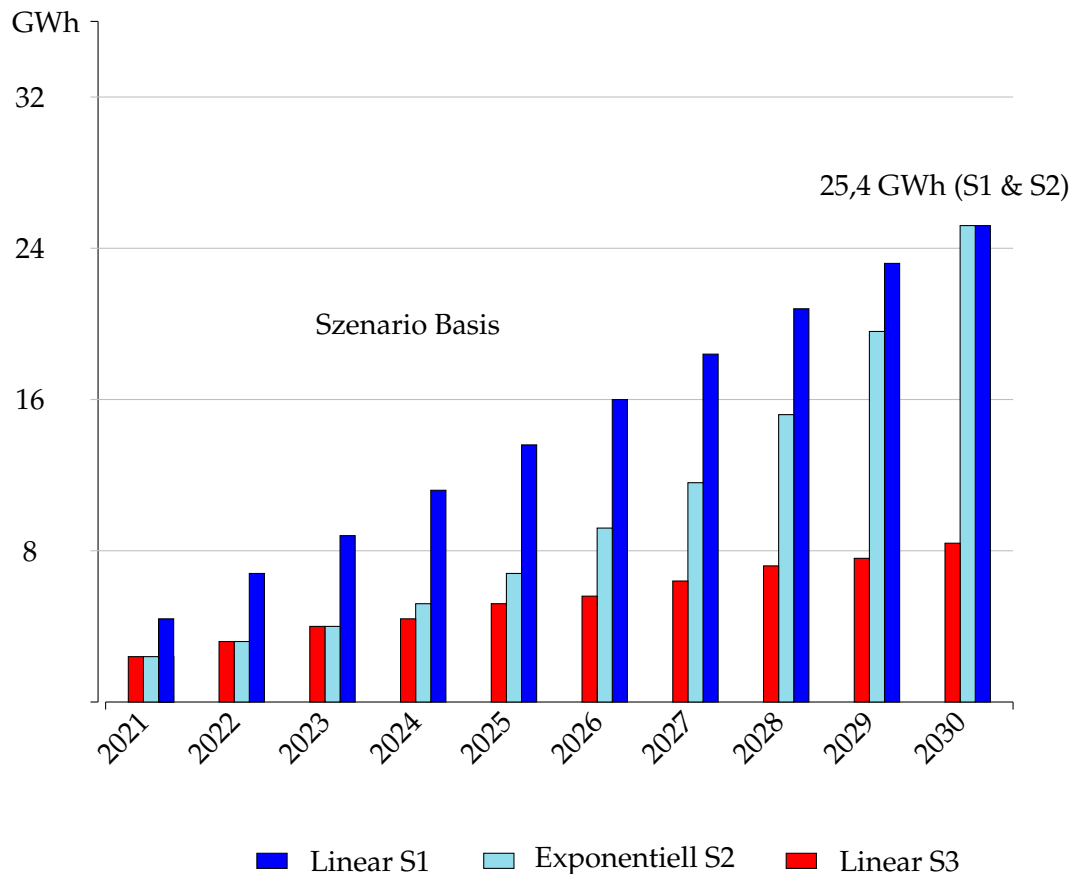


Abbildung 5.8: Speicherkapazität bis 2030 für Szenario Basis [eigene Berechnung]

Die Grafik 5.8 beschreibt die Speicherkapazität der in Österreich zugelassenen BEVs für das Szenario Basis. Das Szenario Basis beschreibt eine Zulassung von BEVs mit tendenziell kleineren Energiespeichern von durchschnittlich 43,01 kWh. Bei diesem Szenario wäre bei Einhaltung von S1 und S2 im Jahr 2030 eine Gesamtkapazität von 25,4 GWh vorhanden. Bei S3 – d.h. einem linearem Anstieg mit einem Zuwachs gleich wie in den Jahren 2019 und 2020 – würde die Speicherkapazität 8,3 GWh betragen.

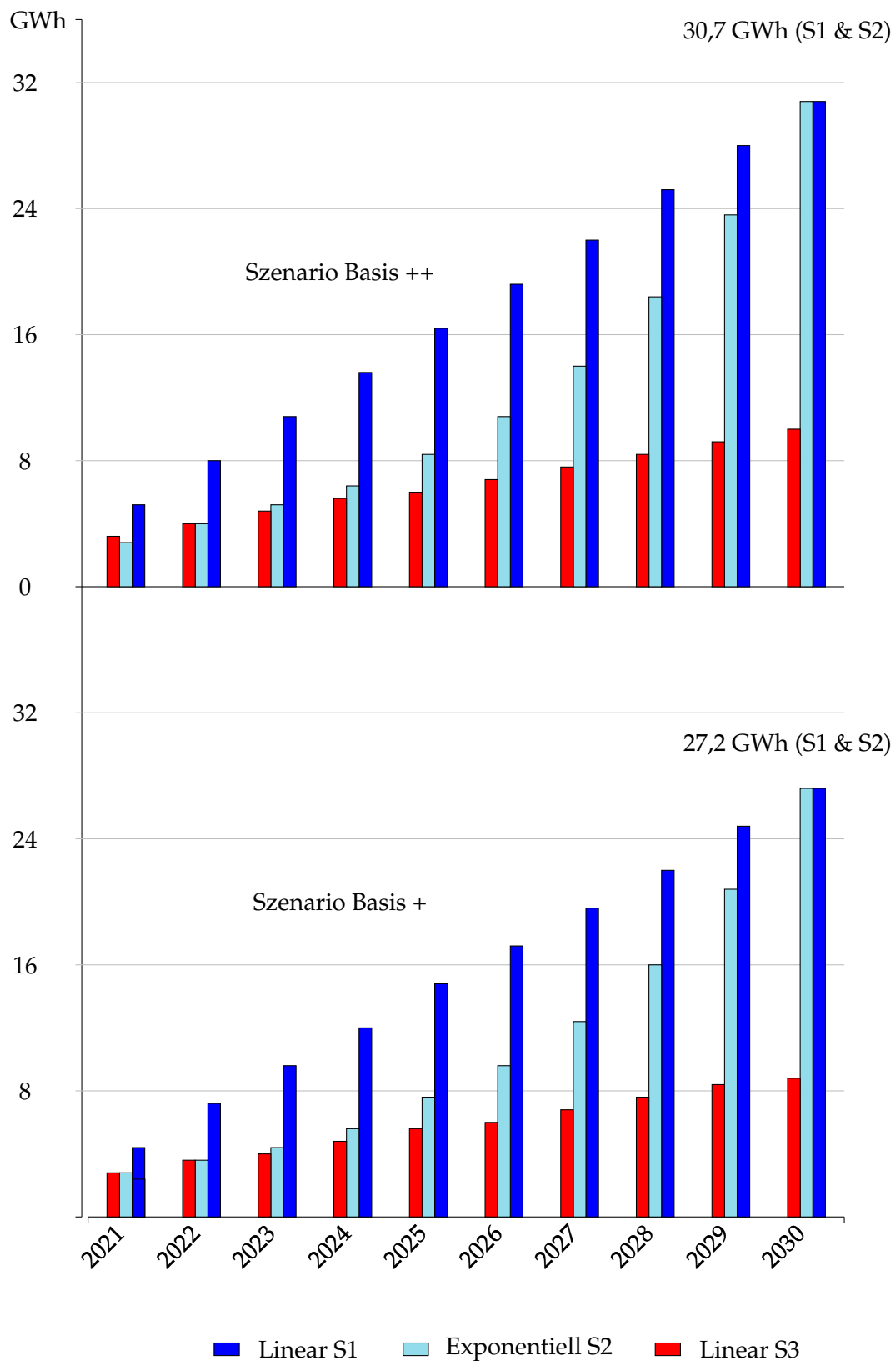


Abbildung 5.9: Speicherkapazität bis 2030 für Szenario Basis + und Szenario Basis ++ [eigene Berechnung]

In Abbildung 5.9 sind die Szenarien Basis + und Basis ++ dargestellt. Beide Szenarien stellen eine zukünftige mittlere Größe (zwischen dem Basis Modell und dem Langstrecken Modell) der Antriebsbatterien⁸ dar. Es ist erkennbar, dass der Unterschied zwischen Szenario Basis und Basis + in etwa gleich groß, wie der Abstand zwischen Szenario Basis + und Basis ++ (in etwa 3 GWh) ist. Beim Szenario Basis ++ der Abbildung ist der langsamere Anstieg der exponentiellen Kurve im Jahr 2021 erkennbar, welcher im Jahr 2022 bereits ausgeglichen wird. Beim Szenario Basis + ist dies – aufgrund der Rundung bei der Programmierung der Grafik – nicht ersichtlich. Der Unterschied beträgt jedoch 0,08 GWh.

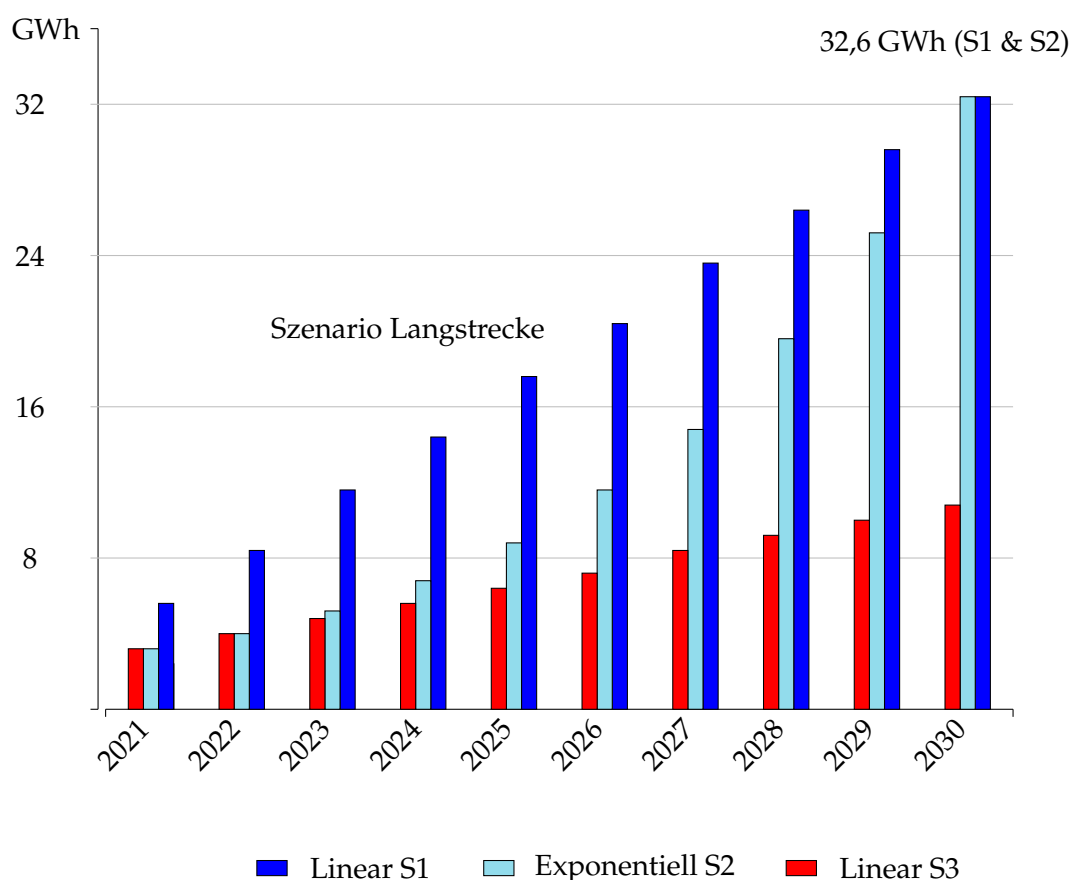


Abbildung 5.10: Speicherkapazität bis 2030 für Szenario Langstrecke [eigene Berechnung]

In Abbildung 5.10 wird das letzte Szenario veranschaulicht. Hier wird davon ausgegangen, dass durchschnittlich große Batterien verbaut werden. Für das Jahr 2030 bedeutet dies, dass 32,5 GWh Gesamtkapazität vorhanden sind (S1 & S2). Bei einem linearen Wachstum

⁸Nach AWG (2002) gehören sog. Starterbatterien (auch Lithiumstarterbatterien) zu den Fahrzeugbatterien und Antriebsbatterien zu den Industriebatterien. In dieser Arbeit sind immer Antriebsbatterien gemeint.

mit geringer Steigung (S3) stehen 10,67 GWh zur Verfügung, d.h. weniger als ein Drittel als in den beiden anderen Szenarien. Bei Szenario S2 und Langstrecke im Jahr 2050 (nicht in Grafik ersichtlich) errechnet sich eine Gesamtspeichergröße von 280,93 GWh. Somit konnte die zweite Forschungsfrage bezüglich des Energiespeicherpotenzials im Jahr 2030 beantwortet werden, welche hier noch einmal angeführt ist:

Forschungsfrage 2 (F2): Welches Energiespeicherpotenzial ist mit Ende des Jahres 2030 im österreichischen Bestand lt. StVO zugelassenen batterieelektrischen Fahrzeuge vorhanden bei:

- a. 590.000 in Österreich zugelassenen batterieelektrischen Fahrzeugen (Positionspapier Wien Energie)?
- b. einem linearen Wachstum der in Österreich zugelassenen batterieelektrischen Fahrzeugen?
- c. einem exponentiellen Wachstum der in Österreich zugelassenen batterieelektrischen Fahrzeugen?

Dies erfolgt unter der Annahme von:

- i gleichbleibenden Batteriekapazitäten
- ii durchschnittlich kleineren Batteriekapazitäten
- iii durchschnittlich größeren Batteriekapazitäten

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass in Österreich je nach Szenario im Jahr 2030 zwischen 8,31 GWh und 32,56 GWh vorhanden sein werden. Die Differenz ergibt sich daraus, ob die nötigen Ziele des Positionspapiers Wien Energie (2021) erreicht werden. Um dieses Ziel zu erreichen, muss sich entweder das lineare Wachstum jährlich auf 54.559 neu zugelassene Fahrzeuge erhöhen oder ein exponentielles Wachstum von rund 30 % Zuwachs pro Jahr eintreten. Der prinzipielle Unterschied liegt darin, dass beim exponentiellen Wachstum die Zuwachsrate anfangs dem jetzigen Wachstum ähnlich ist und sich ab etwa 2025 stark erhöht. Diese beiden Extremwerte ergeben sich aus den Annahmen ii) und iii) welche eine durchschnittlich kleinere Batteriekapazität bzw. eine durchschnittlich größere Batteriekapazität voraussetzen. Wird die Fragestellung auf das Szenario der durchschnittlich gleichbleibenden Batteriekapazitäten (i) angewendet, werden im Jahr 2030 zwischen 8,90 GWh und 27,17 GWh (Szenario Basis +) bzw. 30,68 GWh und 10,05 GWh (Szenario ++) vorhanden sein. Eine detaillierte Aufstellung aller

Kapazitäten zu jedem Jahr befinden sich grafisch in den Tabellen 5.8 bis 5.10 sowie numerisch im Anhang.

5.4 Ausgleichspotential mobiler Speicher der Fluktuationen erneuerbarer Energien

Um das Potential darzustellen, Fluktuationen aus erneuerbaren Energien auszugleichen, muss für das Jahr 2030 eine Prognose erstellt werden. Die hierfür betrachteten Fluktuationen für das Jahr 2020 ergeben sich aus der Differenz der Erzeugung und der Last. Teil der Erzeugung sind Wind, Solar, Biomasse, Gas, Kohle, Geothermie, Pumpspeicher, Lauf- und Schwellwasser, Speicher, und Müll (Austrian Power Grid, 2021a). Die Erzeugungsarten Öl und ‚sonstige Erneuerbare‘ haben im Jahr 2020 nicht in das Stromnetz eingespeist (Austrian Power Grid, 2021a). Bei genauerer Betrachtung der Daten lässt sich weiters auch erkennen, dass das letzte Kohlekraftwerk Österreichs am 31.03.2020 zwischen 23:30 und 23:45 Uhr vom Netz genommen wurde. Die Datensätze beinhalten klassische Speichertechnologien wie Pumpspeicherkraftwerke, diese werden nicht herausgerechnet, da mobile Speicher einen zusätzlichen Ausgleich schaffen sollen. Erkennbar ist, dass im Sommer prinzipiell ein Energieüberschuss vorhanden ist, welcher im Winter wiederum verloren geht. Dies wird in Abbildung 5.11 grafisch dargestellt.

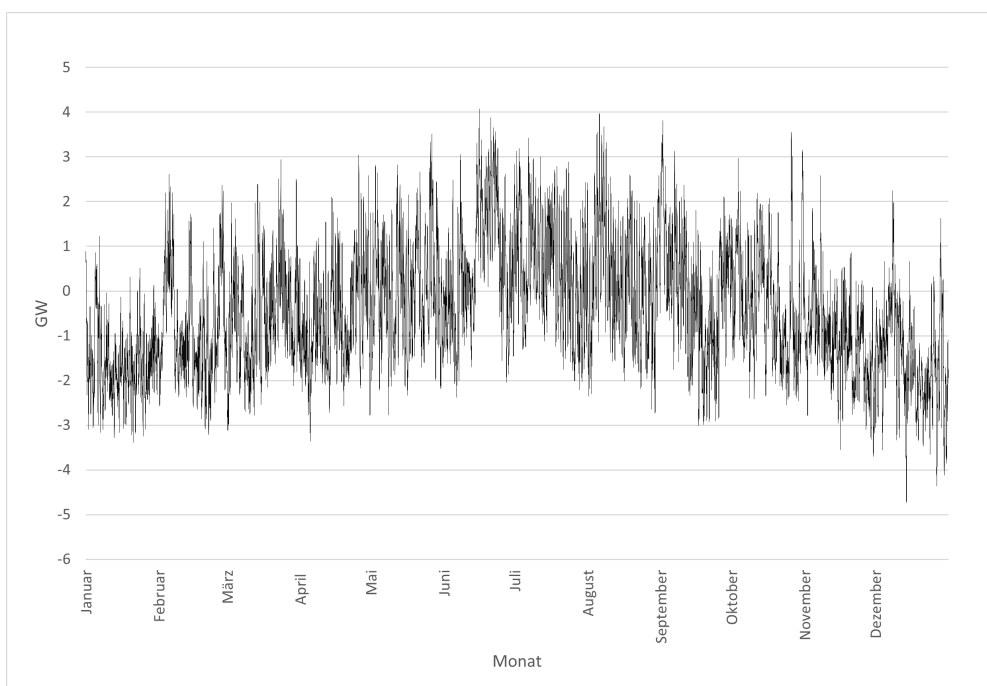


Abbildung 5.11: Differenz aus Erzeugung inkl. Speicher und Last in Österreich [Eigene Berechnung; Daten aus: (Austrian Power Grid, 2021b) (Austrian Power Grid, 2021a)]

Energie, welche in Österreich nicht erbracht bzw. verwendet werden kann, muss u.a. über Im- und Exporte ausgeglichen werden oder es kommt zu Abschaltungen

bei Kraftwerken⁹. Inwieweit die Differenz zwischen Erbringung und Verwendung zu jedem Zeitpunkt im Netz ausgeglichen wird, ist dem umfassenden Themenfeld Netzstabilität zuzuordnen und wird im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit nicht näher behandelt. Um eine Prognose für das Jahr 2030 zu erstellen, wird auf das WAM+ Szenario zurückgegriffen (Austrian Energy Agency, 2015). Eine nähere Darstellung dieses Szenarios ist in Abschnitt 2.4 zu finden.

Um die dritte Forschungsfrage

Forschungsfrage 3 (F3): Zu wie vielen Ladezyklen der batterieelektrischen Fahrzeuge kommt es pro Jahr und wie hoch müsste die Stromspeicherkapazität aller Fahrzeuge im hypothetischen Extremfall ausfallen, wenn im Jahr 2030 eine saisonale Speicherung angestrebt werden würde?

und in weiterer Folge auch die vierte Forschungsfrage beantworten zu können, muss der Speicherbedarf des Energiemarkts für die Jahre 2030, 2040 und 2050 berechnet werden. Hierfür müssen Datensätze aus der Energiewirtschaft (Austrian Power Grid, 2020) (Austrian Power Grid, 2021a) (Austrian Power Grid, 2021b) und dem Mobilitätssektor, mit dem WAM+ Szenario (Krutzler u. a., 2019) (Umweltbundesamt, 2015) (Austrian Energy Agency, 2015) verknüpft werden. Es wird zunächst für jede Energieerzeugungsart eine Funktion erstellt. An jenem Zeitpunkt, an dem im Jahr 2020 am meisten Leistung erbracht wurde, wird die Leistung für den Erzeugertyp $x=1$. Wird keine Leistung erbracht, entspricht dies $x=0$. Die elf Funktionen entsprechen den Fluktuationen aus dem Jahr 2020. Die meteorologischen Bedingungen sind in den Jahren davor und danach gänzlich unterschiedlich und natürlich auch in den Jahren 2030 und 2050. Da sich die meteorologischen Bedingungen und somit die Fluktuationen von erneuerbaren Energien nicht vorhersehen lassen und ein Durchschnittswert die Kurven abflachen würde, wird das Jahr 2020 als Basisjahr herangezogen. Dies ist in Abbildung 5.12 grafisch dargestellt. Anhand der Abbildung 5.12 erkennbar, dass ein (Erzeugungs-) Typ negative Werte beinhaltet. Hierbei handelt es sich um Pumpspeicherkraftwerke, welche in Österreich einen Teil der Fluktuationen ausgleichen. Links oben in der Abbildung 5.12 ist in roter Farbe (bei Ordinate 0,8) die Leistungseinspeisung des letzten österreichischen Kohlekraftwerks – dem Fernheizkraftwerk Mellach – zu erkennen. Dieses Kraftwerk wurde – wie bereits erwähnt – vom Netz genommen und auf Gas umgerüstet. Ansonsten lässt sich aus den numerischen und grafischen Daten auslesen, dass Solar und (Lauf- und Schwell-) Wasserkraft im Sommer und Windkraft im Winter mehr Leistung erbringen kann. Die Fluktuationen der anderen Erzeugertypen lassen sich nicht direkt auf meteorologische Bedingungen zurückführen.

⁹z.B. Drosselung von Windkraftanlagen

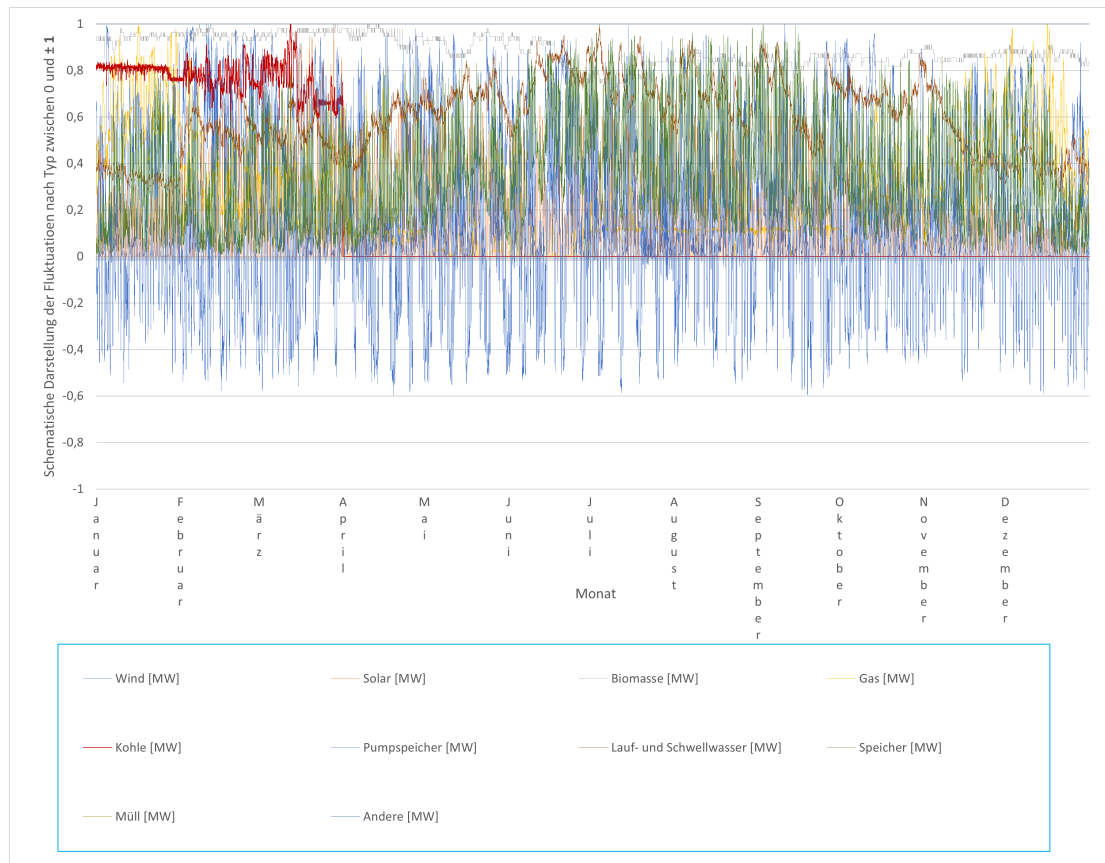


Abbildung 5.12: Schematische Darstellung der Funktionen der Stromerbringung nach Typ im Jahr 2020 [Eigene Berechnung; Daten aus: (Austrian Power Grid, 2021a)]

Das Szenario WAM + nach Krutzler u. a. (2019) (vgl. Austrian Energy Agency, 2015 und Umweltbundesamt, 2015) unterscheidet sich von den Datensätzen von Austrian Power Grid (2021b) dahingehend deutlich, dass hier versucht wird, alle Energieströme zu inkludieren. Bei den Daten von APG ist nur die elektrische Energie, die in das überregionale Übertragungsnetz Österreichs¹⁰ eingespeist wird, inkludiert. Um Funktionen der Fluktuationen von erneuerbaren Energien zu erstellen, reicht diese Genauigkeit jedoch aus.

¹⁰ausgenommen ein Teil Vorarlbergs

Tabelle 5.5: Stromaufbringung WAM+ in TJ [übernommen aus: (Austrian Energy Agency, 2015)]

Stromaufbringung WAM+ in TJ	2030	2040	2050
Unternehmenseigene Anlagen	29.399	22.654	20.275
Kohle-Kraftwerke + KWK	-	-	-
Öl-Kraftwerke + KWK	-	-	-
Erdgas-Kraftwerke + KWK	17.149	10.947	-
Abfall	4.012	3.611	3.009
Wasserkraft	149.578	149.578	149.578
Biomasse-KWK	6.377	6.377	6.152
Biogas	3.889	3.889	3.806
Geothermie	5	5	5
Photovoltaik	40.392	63.435	71.281
Wind	37.906	51.849	65.921
Importe	-	-	-
Total	288.708	312.345	320.027

Die Tabelle 5.5 zeigt aufgeteilt in Erzeugungsarten und Importe die Ergebnisse des WAM+ Szenarios. Hierbei wird die Erzeugungsart *Unternehmenseigene Anlagen* exkludiert, da diese nicht näher aufgeschlüsselt wird. Zudem werden alle auf Kohle oder Öl basierenden Energieträger nicht miteinbezogen, dies geht aus dem Szenario selbst hervor. Werden nun die Funktionen der Fluktuationen der erneuerbaren Energien (5.12) mit diesem Szenario kombiniert, lässt sich abschätzen, wie das WAM+ Szenario im Jahr 2030, 2040 und 2050 unter den meteorologischen Bedingungen von 2020 aussehen würde. Nach dem gleichen Schema kann bei der Last vorgegangen werden und die Differenz – das benötigte Speicherpotenzial – eruiert werden (vgl. Abbildung 5.13).

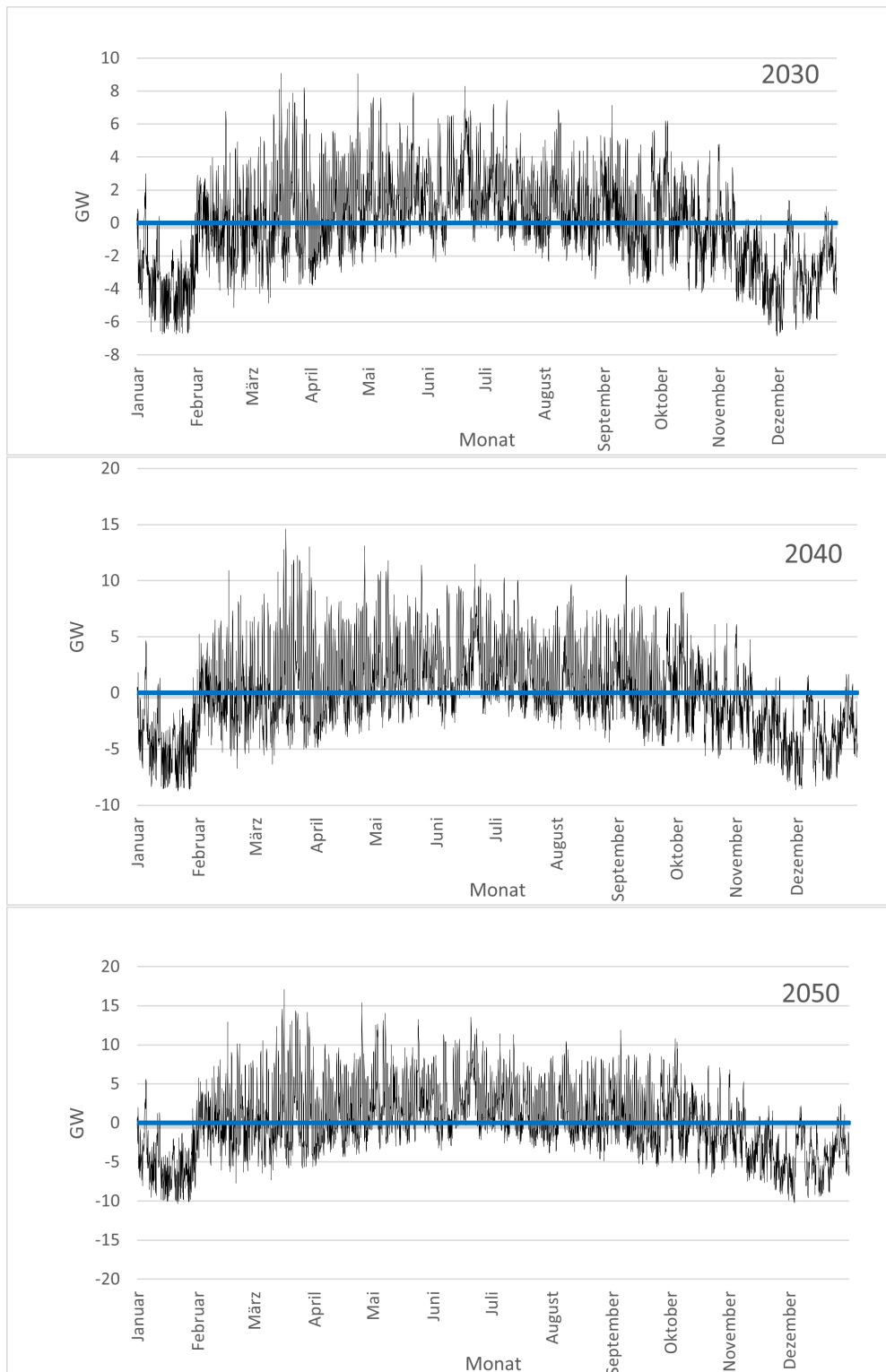


Abbildung 5.13: Differenz Erbringung und Last: Szenario 2030, Szenario 2040 und Szenario 2050
[eigene Berechnung]

Aus Abbildung 5.13 ist – wie bereits aus Abbildung 5.11 – abzulesen, dass in den Sommermonaten prinzipiell mehr elektrische Energie zur Verfügung steht als in den Wintermonaten. Wie im WAM+ Szenario wird exakt dieselbe Menge Energie pro Jahr erzeugt wie gebraucht und es kommt zu keinem Im- bzw. Export von elektrischer Energie. Am Nullpunkt (blaue Linie) ist jener Zustand gekennzeichnet, an welchem sich die Last und die Erbringung ausgleichen (Differenz= 0 MWh). Es gibt in jedem Monat Zeitpunkte an denen die Last die Erbringung übersteigt und es zu negativen Differenzen kommt. Allgemein sind diese Zustände in den Wintermonaten häufiger anzutreffen. Aus dem Szenario WAM+ wird ersichtlich, dass im Jahr 2050 sowohl der Stromverbrauch als auch die Stromerbringung höher ausfallen werden (vgl. Tabelle 5.5). Dies spiegelt sich in den höheren Differenzen der Abbildung 5.13 wieder. Die Differenz zwischen Last und Erbringung zeigt jene Zeitpunkte des Jahres, an denen entweder zu viel oder zu wenig elektrische Energie vorhanden ist. Dies sind ebenso jene Zeitpunkte, an denen Energie entweder exportiert bzw. importiert werden muss, oder **Speicher aus dem Sektor Mobilität ent- bzw. geladen** werden könnten. Diese Differenz ist bei allen Szenarien am 16.03. des betreffenden Jahres zwischen 12:00 und 13:00 Uhr mit 9,08 GW¹¹ (2030), 14,63 GW¹² (2040) und 17,12 GW¹³ (2050) am höchsten. Für die Beantwortung der Forschungsfrage 3 wird zunächst eruiert zu welchen Stunden es sinnvoll erscheint, dass die Fahrzeuge ge- oder entladen werden. Dies ergibt sich rechnerisch aus dem Umstand, ob mehr elektrische Energie zur Verfügung steht als gebraucht wird. In Abbildung

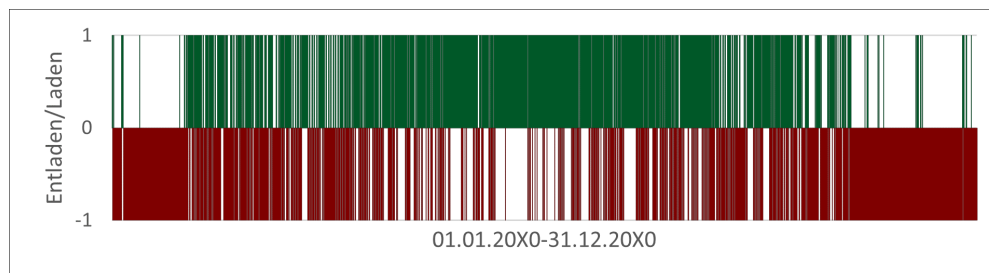


Abbildung 5.14: Ladezyklen der BEVs im Jahr 2030

5.14 ist die Differenz aus Last und Erbringung noch einmal schematisch dargestellt. Wobei $\nu = 1$ laden und $\nu = -1$ für entladen steht. Es ist – wie in den vorherigen Grafiken – ersichtlich, dass im Sommer tendenziell mehr (Lade)energie zur Verfügung steht. Für das Jahr 2030 ergibt dies 730 Ladezyklen. Als Ladezyklus ist hier nicht die vollständige Ladung oder Entladung gemeint, sondern jene Stunden, in denen das Vorzeichen von ν verändert werden. Kumuliert man die Differenz aus jeder Stunde über das gesamte Jahr, ergibt sich indirekt die Speicherkapazität welche benötigt werden

¹¹Erbringung 18,25 GW - Last 9,18 GW

¹²Erbringung 24,89 GW - Last 10,25 GW

¹³Erbringung 27,78 GW - Last 10,61 GW

würde, um die gesamten Fluktuationen der elektrischen Energieerzeugung in Österreich auszugleichen (vgl. Abbildung 5.15). Im Jahr 2030 würde diese Speicherkapazität in Österreich 2030 3.774,71 GWh betragen. In Abbildung 5.15 ist dies noch einmal grafisch dargestellt. Zusätzlich ist die benötigte Speicherkapazität bei einer monatlichen¹⁴ und wöchentlichen¹⁵ Gesamtspeicherung abgebildet. Es ist ersichtlich, dass es bei der

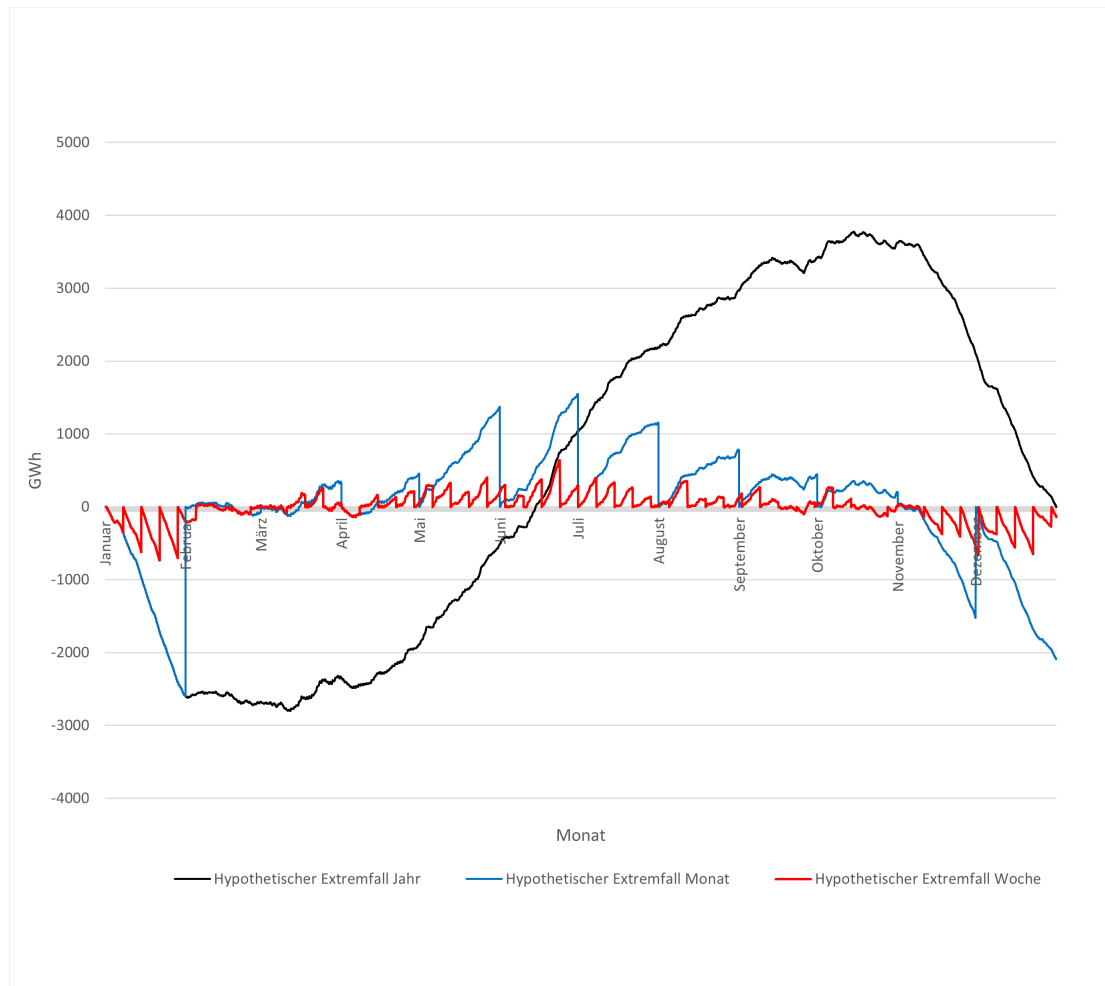


Abbildung 5.15: Wöchentlich, täglich und jährliche kumulierte Differenz zwischen Last und Erbringung [eigene Berechnung]

hypothetischen saisonalen Speicherung zu einem negativen Extremwert im Frühjahr und einem positiven Extremwert im Herbst (15.10.2020 04:00) kommt. Da der positive Extremwert deutlich höher ausfällt, ist dieses Maximum gleichzeitig auch die maximal notwendige Speicherkapazität. Somit konnte auch Forschungsfrage 3 elaboriert und beantwortet werden. Hierbei wird deutlich, dass es sich um eine gänzlich andere

¹⁴blau

¹⁵rot

Größenordnung handelt, als bei der Beantwortung der Forschungsfrage 1 (25,38 GWh) errechnet wurde. Die Extremwerte bei einer monatlichen Speicherung belaufen sich auf 2598,17 GWh und bei einer wöchentlichen Speicherung auf 736,55 GWh. Eine Analyse des Verhältnisses zwischen einer zusätzlichen Einheit an Speicherkapazität und der Deckung der Jahresstunden ist in Abbildung 5.17 im Abschnitt 5.4.2 zu finden.

Um die vierte Forschungsfrage zu beantworten,

Forschungsfrage 4 (F4): Inwieweit kann dieses Energiespeicherpotenzial im Jahr 2030, 2040 und 2050 theoretisch die Fluktuationen von erneuerbaren Energien ausgleichen unter der Annahme, dass

- a. der/die Fahrzeughalter*in eine niedrige Bereitschaft (10 %) zeigt, das batterieelektrische Fahrzeug durch den Netzbetreiber gesteuert laden zu lassen und durch bidirektionales Laden Energie zu entnehmen, wenn dies dem Netz dienlich ist?
- b. der/die Fahrzeughalter*in eine mittlere (20 %) Bereitschaft zeigt, das batterieelektrische Fahrzeug durch den Netzbetreiber gesteuert laden zu lassen und durch bidirektionales Laden Energie zu entnehmen, wenn dies dem Netz dienlich ist?
- c. der/die Fahrzeughalter*in eine hohe (30 %) Bereitschaft zeigt, das batterieelektrische Fahrzeug durch den Netzbetreiber gesteuert laden zu lassen und durch bidirektionales Laden Energie zu entnehmen, wenn dies dem Netz dienlich ist?

wurde zunächst ein Entscheidungsbaum erstellt und daraufhin anhand dessen – mittels MS Excel – die Fragestellung mathematisch gelöst. Bei dieser Fragestellung entscheidet der Netzbetreiber über das Lade- und Entladeverhalten eines Teils des Batteriespeichers aller Fahrzeuge. Die BEVs werden je nach Angebot und Nachfrage im Netz nicht nur geladen sondern auch wieder entladen. Nicht berücksichtigt wird das Ladeverhalten außerhalb dieser Steuerung, sowie der Stromverbrauch durch den Sektor Mobilität (Fahren des Fahrzeuges). Zudem ist der freigegebene Teil der Speicherkapazität für das Netz reserviert und kann nicht leer oder voll sein, es sei denn, er wurde über die Netzsteuerung ent- bzw. geladen. In der theoretischen Herangehensweise könnte der/die Fahrzeughalter*in also auch nicht darauf zurückgreifen, wenn dieser für die Mobilität gebraucht wird. Es wird davon ausgegangen, dass alle Fahrzeuge mit bidirektionaler kommunikationsfähiger Ladeinfrastruktur ausgestattet sind.

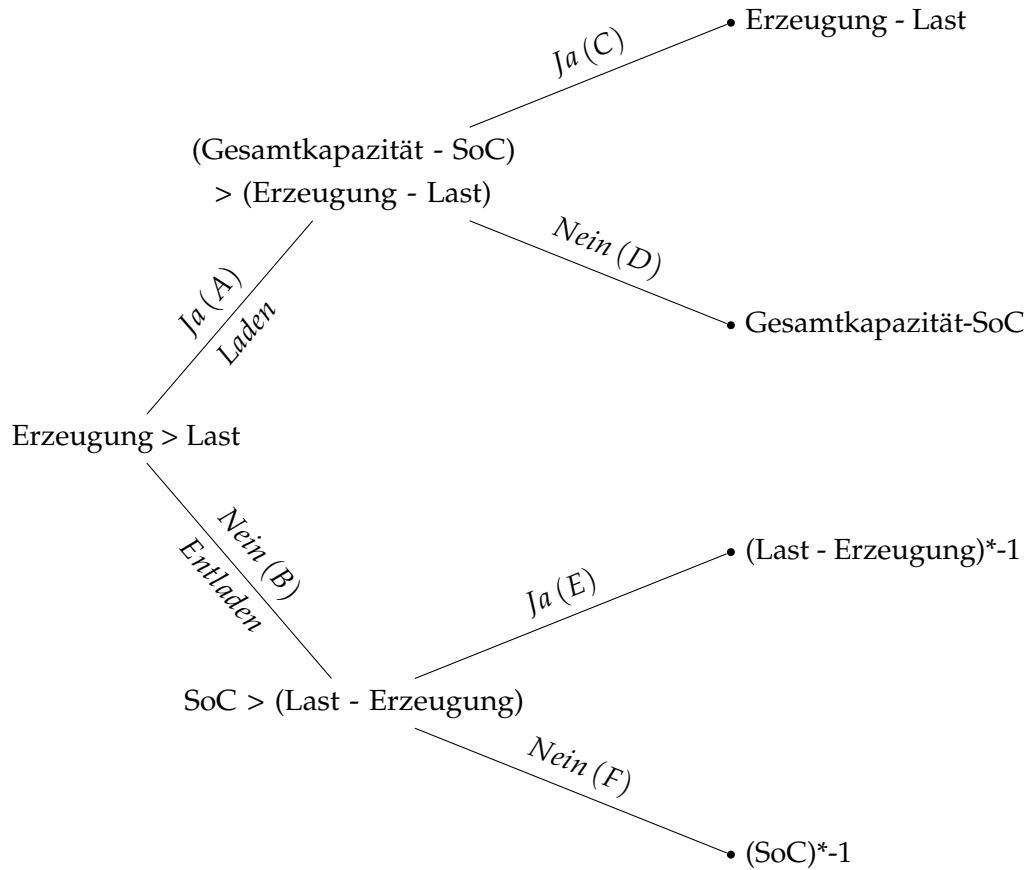


Abbildung 5.16: Entscheidungsbaum zur Berechnung der Forschungsfrage 4

In Abbildung 5.16 ist der Entscheidungsbaum dargestellt. Wie in Abbildung 5.16 erkennbar, wird zunächst eruiert ob zu einer Stunde mehr elektrische Energie zur Verfügung steht als tatsächlich gebraucht wird ($Erzeugung > Last$) und was geschehen muss wenn dies zutrifft bzw. nicht zutrifft:

$$WENN(E_{Erzeugung} > E_{Last}; A; B) \quad (5.1)$$

Dies entscheidet, ob nach dem ersten Knoten Weg A oder Weg B verwendet wird. Wird Weg A verwendet, wird geladen und im nächsten Knoten folgende Funktion angewendet:

$$WENN(E_{Speicher} - SoC_{t-1}) > (E_{Erzeugung,t} - E_{Last,t}); \quad (5.2)$$

dann

$$(E_{Erzeugung,t} - E_{Last,t}); (E_{Speicher} - SoC_{t-1}) \quad (5.3)$$

Dies besagt, wenn die Speicherkapazität aller BEVs – minus dem State of Charge (SoC)

der vorherigen Stunde – größer ist, als die aktuelle Erzeugung minus der aktuellen Last, dann wird die Differenz der Erzeugung und Last geladen (C), ansonsten wird die Differenz aus Speicher und SoC der vorherigen Stunde (D) geladen. Vereinfacht ausgedrückt wird eruiert, ob die Speicherkapazität groß genug ist um die gesamte überschüssige Energie zu laden. Wenn nicht, wird nur jene Energie geladen, die im Speicher *Platz* hat. Steht weniger Energie zur Verfügung als benötigt wird, wird Weg B eingeschlagen:

$$WENN(SoC_{t-1}) > (E_{Last,t} - E_{Erzeugung,t}); \quad (5.4)$$

dann

$$((E_{Last,t} - E_{Erzeugung,t}) * -1); (SoC_{t-1} * -1) \quad (5.5)$$

Hier wird vom Speicher aller BEVs zurück ins Netz gespeist. Ist der SoC der vorherigen Stunde größer als die aktuelle Last minus der aktuellen Erzeugung (E), wird die Differenz aus Last und Erzeugung aus dem Speicher entladen. Ist dies nicht der Fall (F), wird der Speicher entladen. In vielen Fällen kann die Restenergie aus dem Speicher nicht die gesamte Differenz aus Last und Erzeugung ausgleichen. Anders als bei Forschungsfrage 3 und Abbildung 5.15 wird hier bei allen Szenarien zu vielen Stunden die Batterie weder ent- noch geladen. Dies ist entweder der Fall, wenn der Speicher voll und ein Überschuss an Energie vorhanden ist oder wenn der Speicher leer ist und weiter weniger Energie zur Verfügung steht als benötigt wird. Theoretisch könnte auch zu einer Stunde genau so viel Energie zur Verfügung stehen wie verbraucht werden, dies ist jedoch aufgrund der hohen Genauigkeit der Berechnung statistisch eher unwahrscheinlich¹⁶. In der wissenschaftlichen Fachliteratur wird für das elektrische Laden und Entladen die Einheit Leistung (kW) verwendet. Es wurde eine Genauigkeit von 60 Minuten gewählt, sodass die Einheit Energie (kWh) gleichermaßen zutreffend ist. Die Szenarien unterscheiden sich hinsichtlich der Größe der zur Verfügung stehenden Speicherkapazität, welche sich aus der Menge der zur Verfügung stehenden BEVs, der GröÙer ihrer Batterien und der Bereitschaft der Fahrzeughalter*innen, diese Speicherkapazität zur Verfügung zu stellen, ergibt. Weiters ist zudem zu beachten, dass das Jahr 2020 ein Schaltjahr war und somit 8.784 anstatt den üblichen 8.760 Stunden hatte. Dies wurde für die Jahre 2030 und 2040 übernommen, was jedoch keinerlei signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse zeigt.

5.4.1 Ergebnisse der Forschungsfrage 4

In den folgenden Tabellen (5.6 bis 5.14) werden die Ergebnisse der Forschungsfrage 4 dargelegt. Die Annahmen sind, dass die Fahrzeughalter*innen eine niedrige, mittlere

¹⁶Ist in keinem Szenario der Fall

und hohe Bereitschaft zeigen, dem Netzbetreiber bzw. dem steuernden Stakeholder das Laden und Entladen des BEVs zu überlassen. Wie auch die Fluktuationen, kann die – in Zukunft aus allen Fahrzeugen kumulierte zur Verfügung stehende – Speichergröße nicht endgültig bestimmt werden. Die Speichergröße der BEVs ist bei allen Fahrzeughalter*innen individuell und steht in Abhängigkeit des Fahrverhaltens, des Ladeverhaltens und der technischen Gegebenheiten des Fahrzeugs. Es wird hier davon ausgegangen, dass ein gewisser Teil des Batteriespeichers dem Energiesektor (kostenpflichtig) zur Verfügung gestellt wird, welcher dann für die Mobilität gesperrt ist. In der vorliegenden Masterarbeit kann nicht erörtert werden, welche Fahrzeuge zu welchem Zeitpunkt zur Verfügung stehen werden. Im Durchschnitt werden Fahrzeuge 23 Stunden des Tages nicht gefahren (Berger, 2014), im Rahmen dieser Ausarbeitung wird vereinfacht davon ausgegangen, dass alle Fahrzeuge stets zur Verfügung stehen. Zudem werden keine elektrotechnischen Verluste berücksichtigt, sondern wird angenommen, dass 10 %, 20 % und 30 % des technischen SoC verfügbar sind. Unter technischer SoC ist hier die Bruttokapazität ohne Verluste zu verstehen. Steht ein BEV nicht zur Verfügung, wird dies von einem anderen kompensiert, sodass es letztlich zu einer bestimmten Gesamtspeichergröße (z.B. 10 % technischer SoC) kommt. Es muss zudem hier abermals erwähnt werden, dass es im Bereich Elektromobilität viele Verlustquellen gibt. Diese verringern die Akkukapazität und werden hierbei nicht weiter berücksichtigt. Die Ergebnisse werden so dargestellt, dass zuerst immer die Anzahl der Fahrzeuge genannt wird und in weiterer Folge, wieviele Stunden pro Jahr gedeckt werden können, wenn keine mobilen Speicher (BEVs) zur Verfügung stehen. Es zeigt sich somit, dass diese Deckung bis 2050 von 50,07 % auf 46,76 % deutlich abnimmt (vgl. Tabelle 5.6, 5.7, 5.8 und 5.12, 5.13, 5.14). Werden die Ergebnisse des WAM+ Szenarios betrachtet (vgl. Tabelle 5.5), ist diese Verringerung auf einen erhöhten Anteil von Wind und Solarenergie zurückzuführen. In Folge wird das Jahr, der zur Verfügung stehende SoC und der Zuwachs dargestellt und in die Szenarien Basis, Basis+, Basis++ und Langstrecke unterteilt. Diese Ergebnisse werden zudem weiters in die schon bekannten Szenarien Linear S1, Linear S3 und Exponentiell S2 gesplittet.

Tabelle 5.6: Ergebnisse der Fragestellung inwieweit BEVs die Fluktuationen von erneuerbaren Energien im Jahr 2030 in Österreich ausgleichen können, unter Berücksichtigung der Szenarien S1, S2 und S3, sowie Basis, Basis + Basis ++ und Langstrecke unter der Annahme, dass 10% des technischen SoCs zur Verfügung gestellt werden. Bei den Prozentangaben ist die Abdeckung der jährlichen Stunden dargestellt an denen die Erzeugung den Verbrauch inkl. Ausspeicherung übersteigt [eigene Berechnung].

Annahme	Anzahl BEVs	Deckung der Jahresstunden ¹³	
Ohne Speicher	590.000	50,07 %	
2030		10 % technischer SoC	Zuwachs
Basis			
Linear S1	590.000	58,04 %	7,97 %
Linear S3	193.280	54,10 %	4,03 %
Exponentiell S2	590.000	58,04 %	7,97 %
Basis+			
Linear S1	590.000	58,31 %	8,24 %
Linear S3	193.280	54,27 %	4,20 %
Exponentiell S2	590.000	58,31 %	8,24 %
Basis++			
Linear S1	590.000	58,83 %	8,77 %
Linear S3	193.280	54,58 %	4,51 %
Exponentiell S2	590.000	58,83 %	8,77 %
Langstrecke			
Linear S1	590.000	59,12 %	9,05 %
Linear S3	193.280	54,78 %	4,71 %
Exponentiell S2	590.000	59,12 %	9,05 %

In Tabelle 5.6 wird angenommen, dass 10 % des technischen SoC abgerufen werden können. Werden 0 % abgerufen, können 50,07 % der Jahresstunden gedeckt werden. Bei den Prozentangaben sind jene Stunden des Jahres gemeint, an denen die elektrische Energieerzeugung die Last bzw. den Verbrauch inklusive Ausspeicherung übersteigt. Dies erhöht sich um 7,98 % wenn sich die Speicherkapazitäten je BEV zu relativ kleinen Industriebatterien entwickeln (Szenario Basis) und 590.000 Fahrzeuge vorhanden sind. Bei einer durchschnittlich größeren Speicherkapazität, wie etwa in den Szenaren Basis++ oder Langstrecke, erhöht sich die Deckung um bis zu 9,05 % auf 59,12 %. Angesichts dessen, dass es sich hier um die Energieversorgung des gesamten Landes handelt, sind dies signifikante Verbesserungen der Abdeckung. Selbst bei kleinen Batteriegrößen

¹³Stunden des Jahres an denen die Last $\leq$ Erzeugung inkl. Ausspeicherung

(Szenario Basis) und wenn ein Drittel der Fahrzeuge zur Verfügung stehen (32,7 % von 590.000 sind 193.280¹⁷ BEVs) kann die Abdeckung um etwa vier Prozentpunkte erhöht werden.

Tabelle 5.7: Ergebnisse der Fragestellung inwieweit BEVs die Fluktuationen von erneuerbaren Energien im Jahr 2030 in Österreich ausgleichen können, unter Berücksichtigung der Szenarien S1, S2 und S3, sowie Basis, Basis + Basis ++ und Langstrecke unter der Annahme, dass 20 % des technischen SoCs zur Verfügung gestellt werden. Bei den Prozentangaben ist die Abdeckung der jährlichen Stunden dargestellt an denen die Erzeugung den Verbrauch inkl. Ausspeicherung übersteigt [eigene Berechnung].

Annahme	Anzahl BEVs	Deckung der Jahresstunden ¹³	
Ohne Speicher	-	50,07 %	
2030		20 % technischer SoC	Zuwachs
Basis			
Linear S1	590.000	61,45 %	11,38 %
Linear S3	193.280	56,38 %	6,31 %
Exponentiell S2	590.000	61,45 %	11,38 %
Basis+			
Linear S1	590.000	61,90 %	11,83 %
Linear S3	193.280	56,61 %	6,55 %
Exponentiell S2	590.000	61,90 %	11,83 %
Basis++			
Linear S1	590.000	62,52 %	12,45 %
Linear S3	193.280	57,09 %	7,02 %
Exponentiell S2	590.000	62,52 %	12,45 %
Langstrecke			
Linear S1	590.000	62,84 %	12,77 %
Linear S3	193.280	57,34 %	7,27 %
Exponentiell S2	590.000	62,84 %	12,77 %

In den Szenarien der Tabelle 5.7 können 20 % des SoCs abgerufen werden. Hier ergibt sich ein Zuwachs der Abdeckung der Jahresstunden zwischen 6,31 % und 12,77 %. Erkennbar ist, dass eine Erhöhung des abrufbaren SoCs je Fahrzeug um 10 % keine prozentual gleichwertige Erhöhung der Abdeckung der Jahresstunden ergibt. Im geringsten Szenario (Linear S3 und Basis) erhöht sich die Jahresstundendeckung um 6 %. In den Tabellen 5.6 bis 5.8 sind in den Szenarien 590.000 und 193.280 BEVs zugelassen. In den folgenden Tabellen – in denen die Ergebnisse der Szenarien für die

¹⁷Szenario Linear S3

Jahre 2040 und 2050 dargestellt sind – erhöht sich die Anzahl je Szenario.

Tabelle 5.8: Ergebnisse der Fragestellung inwieweit BEVs die Fluktuationen von erneuerbaren Energien im Jahr 2030 in Österreich ausgleichen können, unter Berücksichtigung der Szenarien S1, S2 und S3, sowie Basis, Basis + Basis ++ und Langstrecke unter der Annahme, dass 30 % des technischen SoCs zur Verfügung gestellt werden. Bei den Prozentangaben ist die Abdeckung der jährlichen Stunden dargestellt an denen die Erzeugung den Verbrauch inkl. Ausspeicherung übersteigt [eigene Berechnung].

Annahme	Anzahl BEVs	Deckung der Jahresstunden ¹³	
Ohne Speicher	-	50,07 %	0 %
2030		30 % technischer SoC	Zuwachs
Basis			
Linear S1	590.000	63,58 %	13,51 %
Linear S3	193.280	57,97 %	7,90 %
Exponentiell S2	590.000	63,58 %	13,51 %
Basis+			
Linear S1	590.000	64,06 %	13,99 %
Linear S3	193.280	58,27 %	8,20 %
Exponentiell S2	590.000	64,06 %	13,99 %
Basis++			
Linear S1	590.000	64,81 %	14,74 %
Linear S3	193.280	58,81 %	8,74 %
Exponentiell S2	590.000	64,81 %	14,74 %
Langstrecke			
Linear S1	590.000	65,30 %	15,23 %
Linear S3	193.280	59,07 %	9,01 %
Exponentiell S2	590.000	65,30 %	15,23 %

In Tabelle 5.8 wird von dem Fall ausgegangen, dass bis zu 30 % des technischen SoCs aller BEVs abrufbar sind. Hier erhöht sich der Zuwachs zwischen 7,90 % und 15,23 %. In diesen Szenarien für das Jahr 2030 wird den BEVs am meisten Energie entzogen. Bei dieser Definition des technischen SoCs handelt es sich um die Entnahme ohne Inklusion der Verluste, die eigentliche Entnahme der Energie stellt sich weitaus größer dar. Bei diesen Größenordnungen lässt sich zudem weiters die Frage ableiten, ob man über ein Drittel der Energie dem im BEV verbauten Akku entziehen sollte oder künftig kleinere Speicherkapazitäten in batterieelektrischen Fahrzeugen verbaut, um zusätzliche Kapazitäten der (netzgebundenen) stationären Energiespeicherung zur Verfügung zu stellen. . Der Unterschied zwischen den Szenarien Langstrecke und Basis beträgt auch ungefähr ein Drittel. Diese Fragestellung wird auch in der Diskussion im

sechsten Kapitel aufgegriffen.

Tabelle 5.9: Ergebnisse der Fragestellung inwieweit BEVs die Fluktuationen von erneuerbaren Energien im Jahr 2040 in Österreich ausgleichen können, unter Berücksichtigung der Szenarien S1, S2 und S3, sowie Basis, Basis + Basis ++ und Langstrecke unter der Annahme, dass 10 % des technischen SoCs zur Verfügung gestellt werden. Bei den Prozentangaben ist die Abdeckung der jährlichen Stunden dargestellt an denen die Erzeugung den Verbrauch inkl. Ausspeicherung übersteigt [eigene Berechnung].

Annahme	Anzahl BEVs	Deckung der Jahresstunden ¹³	
Ohne Speicher	-	46,56 %	
2040		10 % technischer SoC	Zuwachs
Basis			
Linear S1	1.135.590	56,16 %	9,60 %
Linear S3	342.150	51,24 %	4,68 %
Exponentiell S2	5.090.000	68,58 %	22,02 %
Basis+			
Linear S1	1.135.590	56,64 %	10,08 %
Linear S3	342.150	51,53 %	4,96 %
Exponentiell S2	5.090.000	69,13 %	22,56 %
Basis++			
Linear S1	1.135.590	57,25 %	10,69 %
Linear S3	342.150	51,89 %	5,33 %
Exponentiell S2	5.090.000	69,91 %	23,35 %
Langstrecke			
Linear S1	1.135.590	57,66 %	11,10 %
Linear S3	342.150	52,12 %	5,56 %
Exponentiell S2	5.090.000	70,31 %	23,75 %

In Tabelle 5.9 sind die Szenarien für das Jahr 2040 dargestellt. Es wird hierbei davon ausgegangen, dass zu diesem Zeitpunkt zwischen 342.150 und 5.090.000 BEVs in Österreich zugelassen sind. Durch die Veränderung in der Zusammensetzung der Energieerzeugungsarten sinkt die Jahresstundenabdeckung ohne Speicherung in BEVs deutlich auf 46,56 %. Dies lässt sich – wie in Tabelle 5.5 – angeführt, auf die Verringerung der Erdgas- und Abfallkraftwerke, sowie Biogas- und Biomassekraftwerke zurückführen. Bei einer Zulassungsmenge von 5.090.000 BEVs können bis zu 70,31 % der Jahresstunden gedeckt werden. Bei einem linearem Wachstum (S3) sind 2040 342.150 BEVs zugelassen. Werden in diesen durchschnittlich kleinere Speicher verbaut (Szenario S3 und Basis), kann mit 51,240893 % Deckung nur eine etwas bessere Jahresstundendeckung erreicht

werden als 2030 ohne mobile Speicher. Bei exponentiellem Wachstum wird bereits die maximale Menge an zugelassenen Fahrzeugen erreicht und beim Szenario Langstrecke werden 70,31 % der Jahresstunden abgedeckt.

Tabelle 5.10: Ergebnisse der Fragestellung inwieweit BEVs die Fluktuationen von erneuerbaren Energien im Jahr 2040 in Österreich ausgleichen können, unter Berücksichtigung der Szenarien S1, S2 und S3, sowie Basis, Basis + Basis ++ und Langstrecke unter der Annahme, dass 20 % des technischen SoCs zur Verfügung gestellt werden. Bei den Prozentangaben ist die Abdeckung der jährlichen Stunden dargestellt an denen die Erzeugung den Verbrauch inkl. Ausspeicherung übersteigt [eigene Berechnung].

Annahme	Anzahl BEVs	Deckung der Jahresstunden ¹³	
Ohne Speicher	-	46,56 %	
2040		20 % technischer SoC	Zuwachs
Basis			
Linear S1	1.135.590	60,99 %	14,42 %
Linear S3	342.150	53,73 %	7,17 %
Exponentiell S2	5.090.000	72,76 %	26,20 %
Basis+			
Linear S1	1.135.590	61,61 %	15,05 %
Linear S3	342.150	54,05 %	7,50 %
Exponentiell S2	5.090.000	73,04 %	26,48 %
Basis++			
Linear S1	1.135.590	62,77 %	16,21 %
Linear S3	342.150	54,72 %	8,16 %
Exponentiell S2	5.090.000	73,49 %	26,92 %
Langstrecke			
Linear S1	1.135.590	63,22 %	16,66 %
Linear S3	342.150	54,85 %	8,29 %
Exponentiell S2	5.090.000	73,68 %	27,12 %

In Tabelle 5.10 sind die Ergebnisse für das Jahr 2040 und einer mittleren Bereitschaft (20 %) den Speicher des Fahrzeugs zur Verfügung zu stellen, angeführt. Je nach Zulassungsszenario (S1, S2 und S3) können zwischen 53,73 % und 73,68 % der Jahresstunden abgedeckt werden. Es ist ersichtlich, dass im Szenario mit den größten Speichern und meisten Fahrzeugen (S2 und Langstrecke) die Jahresstundendeckung im Vergleich zu Tabelle 5.9 um 2 % erhöht werden kann. Dies erscheint bei der doppelten Entnahme des technischen SoCs (von 10 % auf 20 %) eher gering. Bei einem Vergleich der Ergebnisse der Forschungsfrage 4 (Tabelle 5.6 bis 5.14) wird ersichtlich, dass mit einer zunehmenden

kumulierten Speichergröße in den Fahrzeugen die Jahresstundenabdeckung nicht linear anwächst.

Tabelle 5.11: Ergebnisse der Fragestellung inwieweit BEVs die Fluktuationen von erneuerbaren Energien im Jahr 2040 in Österreich ausgleichen können, unter Berücksichtigung der Szenarien S1, S2 und S3, sowie Basis, Basis + Basis ++ und Langstrecke unter der Annahme, dass 30 % des technischen SoCs zur Verfügung gestellt werden. Bei den Prozentangaben ist die Abdeckung der jährlichen Stunden dargestellt an denen die Erzeugung den Verbrauch inkl. Ausspeicherung übersteigt [eigene Berechnung].

Annahme	Anzahl BEVs	Deckung der Jahresstunden ¹³	
Ohne Speicher	-	46,56 %	
2040		30 % technischer SoC	Zuwachs
Basis			
Linear S1	1.135.590	64,74 %	18,18 %
Linear S3	342.150	55,59 %	9,03 %
Exponentiell S2	5.090.000	74,17 %	27,61 %
Basis+			
Linear S1	1.135.590	65,45 %	18,89 %
Linear S3	342.150	56,03 %	9,47 %
Exponentiell S2	5.090.000	74,42 %	27,86 %
Basis++			
Linear S1	1.135.590	66,68 %	20,12 %
Linear S3	342.150	56,72 %	10,15 %
Exponentiell S2	5.090.000	74,89 %	28,32 %
Langstrecke			
Linear S1	1.135.590	67,26 %	20,70 %
Linear S3	342.150	57,08 %	10,52 %
Exponentiell S2	5.090.000	74,99 %	28,43 %

In Tabelle 5.11 sind die Szenarien mit den zweithöchsten Speicherpotenzialen dargestellt. Da im Szenario S2 die maximale Anzahl an zugelassenen BEVs in Österreich schon erreicht wird, ist hier das Szenario Langstrecke gemeinsam mit dem Szenario Langstrecke und S2 aus Tabelle 5.14 fast gleichauf. Das absolute Optimum ist zwar mit 75,16 % im Jahr 2050 zu finden, aufgrund der Unsicherheiten der Szenarien können beide Spitzenwerte jedoch als globale Optima gezählt werden.

Es kann also im besten Szenario (S2 und Langstrecke) mit einer Jahresstundendeckung von annähernd 75 % gerechnet werden, unter der Annahme, dass Fahrzeughalter*innen 30 % des technischen SoCs zur Verfügung stellen. Selbst wenn die lineare Wachstumsrate von 2020 (S3) nicht erhöht werden kann (342.150 BEVs) und sich

ein Trend zu kleineren Batterien in Fahrzeugen entwickelt (43,01 KWh), kann die Jahresstundendeckung um 11,202186 % erhöht werden.

Tabelle 5.12: Ergebnisse der Fragestellung inwieweit BEVs die Fluktuationen von erneuerbaren Energien im Jahr 2050 in Österreich ausgleichen können, unter Berücksichtigung der Szenarien S1, S2 und S3, sowie Basis, Basis + Basis ++ und Langstrecke unter der Annahme, dass 10 % des technischen SoCs zur Verfügung gestellt werden. Bei den Prozentangaben ist die Abdeckung der jährlichen Stunden dargestellt an denen die Erzeugung den Verbrauch inkl. Ausspeicherung übersteigt [eigene Berechnung].

Annahme	Anzahl BEVs	Deckung der Jahresstunden ¹³	
Ohne Speicher	-	46,76 %	
2050		10 % technischer SoC	Zuwachs
Basis			
Linear S1	1.681.180	57,64 %	10,88 %
Linear S3	491.020	52,15 %	5,40 %
Exponentiell S2	5.090.000	67,61 %	20,86 %
Basis+			
Linear S1	1.681.180	58,07 %	11,32 %
Linear S3	491.020	52,38 %	5,62 %
Exponentiell S2	5.090.000	68,29 %	21,54 %
Basis++			
Linear S1	1.681.180	59,02 %	12,26 %
Linear S3	491.020	52,73 %	5,98 %
Exponentiell S2	5.090.000	69,29 %	22,53 %
Langstrecke			
Linear S1	1.681.180	59,52 %	12,76 %
Linear S3	491.020	52,99 %	6,24 %
Exponentiell S2	5.090.000	69,71 %	22,95 %

In Tabelle 5.12 sind die Ergebnisse für das Jahr 2050 dargestellt. Der Deckungsgrad der Jahresstunden ohne mobile Speicherung sinkt im Vergleich zum Jahr 2040 um 0,01 % geringfügig ab. Diese Schwankungsbreite ist bei diesem Modell zu vernachlässigen, da für die Funktionserstellung der Fluktuationen nur ein Jahr herangezogen wurde. Die Ergebnisse liegen zwischen 52,15 % und 69,71 %. In den Szenarien S1 und S3 kommt es gegenüber dem Jahr 2040 zu einem Zuwachs von 148.870 bzw. 545.590 Fahrzeugen, dies ergibt am Beispiel Basis++ eine Jahresstundendeckung von 52,73 % bzw. 59,02 %.

Tabelle 5.13: Ergebnisse der Fragestellung inwieweit BEVs die Fluktuationen von erneuerbaren Energien im Jahr 2050 in Österreich ausgleichen können, unter Berücksichtigung der Szenarien S1, S2 und S3, sowie Basis, Basis + Basis ++ und Langstrecke unter der Annahme, dass 20 % des technischen SoCs zur Verfügung gestellt werden. Bei den Prozentangaben ist die Abdeckung der jährlichen Stunden dargestellt an denen die Erzeugung den Verbrauch inkl. Ausspeicherung übersteigt [eigene Berechnung]

Annahme	Anzahl BEVs	Deckung der Jahresstunden ¹³	
Ohne Speicher	-	46,76 %	
2050		20 % technischer SoC	
Basis			
Linear S1	1.681.180	63,48 %	16,72 %
Linear S3	491.020	54,85 %	8,10 %
Exponentiell S2	5.090.000	72,30 %	25,55 %
Basis+			
Linear S1	1.681.180	64,21 %	17,45 %
Linear S3	491.020	55,23 %	8,47 %
Exponentiell S2	5.090.000	72,75 %	25,99 %
Basis++			
Linear S1	1.681.180	65,38 %	18,62 %
Linear S3	491.020	55,77 %	9,02 %
Exponentiell S2	5.090.000	73,42 %	26,66 %
Langstrecke			
Linear S1	1.681.180	65,90 %	19,15 %
Linear S3	491.020	56,14 %	9,38 %
Exponentiell S2	5.090.000	73,66 %	26,90 %

In Tabelle 5.13 sind die Ergebnisse der Forschungsfrage 4 für das Jahr 2050, unter der Annahme, dass 20 % des technischen SoCs zur Verfügung gestellt werden, aufgelistet. Im Vergleich zu Tabelle 5.12 können hier deutliche Zuwächse verzeichnet werden. Im Falle des Szenarios Linear S3 – wo immerhin 491.020 BEVs zugelassen sind – ergibt sich eine Zuwachsrate von 8,09 %. Mit fast 27 % kann mit dem Szenario Langstrecke S2 ein deutlicher Zugewinn verzeichnet werden. Im Vergleich zum Jahr 2030 wird jedoch auch hier mit 46,76 % von einem niedrigeren Basiswert ausgehend gestartet.

Tabelle 5.14: Ergebnisse der Fragestellung inwieweit BEVs die Fluktuationen von erneuerbaren Energien im Jahr 2050 in Österreich ausgleichen können, unter Berücksichtigung der Szenarien S1, S2 und S3, sowie Basis, Basis + Basis ++ und Langstrecke unter der Annahme, dass 30 % des technischen SoCs zur Verfügung gestellt werden. Bei den Prozentangaben ist die Abdeckung der jährlichen Stunden dargestellt an denen die Erzeugung den Verbrauch inkl. Ausspeicherung übersteigt [eigene Berechnung].

Annahme	Anzahl BEVs	Deckung der Jahresstunden ¹³	
Ohne Speicher	-	46,76 %	
2050		30 % technischer SoC	
Basis			
Linear S1	1.681.180	67,54 %	20,79 %
Linear S3	491.020	56,91 %	10,16 %
Exponentiell S2	5.090.000	74,29 %	27,54 %
Basis+			
Linear S1	1.681.180	68,19 %	21,44 %
Linear S3	491.020	57,27 %	10,52 %
Exponentiell S2	5.090.000	74,58 %	27,82 %
Basis++			
Linear S1	1.681.180	69,13 %	22,37 %
Linear S3	491.020	57,97 %	11,21 %
Exponentiell S2	5.090.000	74,90 %	28,14 %
Langstrecke			
Linear S1	1.681.180	69,69 %	22,94 %
Linear S3	491.020	58,45 %	11,70 %
Exponentiell S2	5.090.000	75,16 %	28,40 %

In Tabelle 5.14 sind die Ergebnisse der letzten Szenarien der Forschungsfrage 4 dargestellt. Es wird davon ausgegangen, dass 30 % des technischen SoCs der zugelassenen Fahrzeuge zu Verfügung gestellt werden kann. Es sind je nach Szenario 491.020, 1.681.180 oder 5.090.000 batterieelektrische Fahrzeuge zugelassen. Diese haben je nach (Speichergrößen-) Szenario 43,01 kWh (Szenario Basis), 46,05 kWh (Szenario Basis +), 52,00 kWh (Szenario Basis ++) und 55,19 kWh (Szenario Langstrecke) Speicherkapazität. Wird davon ausgegangen, dass im Jahr 2050 die selbe Anzahl an Personenkraftwagen, nur mit batterieelektrischer Motorisierung vorhanden sind, können zwischen 74,29 % und 75,14 % der Jahresstunden abgedeckt werden. Bei diesen Szenarien ist wenig ausschlaggebend, wie groß die Speicherkapazitäten der einzelnen Fahrzeuge ist. Dies ist mit einer – bereits erwähnten – Abflachung der Deckungskurve der Jahresstunden zu erklären.

Die vierte Forschungsfrage konnte dahingehend beantwortet werden, dass die Auswirkungen auf die Deckung der Jahresstunden unter der Berücksichtigung von vielen Szenarien sowohl die Speichergröße als auch die Anzahl der zugelassenen Fahrzeuge betreffend, eruiert werden konnten. Es ist erkennbar, dass sowohl die Erhöhung der Bereitstellung des Speichers jedes einzelnen Fahrzeuges, als auch die Gesamtflottengröße (Anzahl der BEVs) positive Auswirkungen auf die Pufferung der Fluktuationen aus der Energieerzeugung hat. Unter den – in dieser Arbeit beschriebenen – Annahmen, ist das **Energiespeicherpotential von batterieelektrischen Fahrzeugen zum Ausgleich der Fluktuationen von erneuerbaren Energien durch bidirektionales Laden** mit einer **Zunahme von bis zu 28,41 % der Deckung der Stunden pro Jahr** anzugeben.

5.4.2 Verhältnis der Gesamtspeicherkapazität zu der Deckung der Jahresstunden

Wenn in ungefähr an 50 % der Stunden pro Jahr mehr Energie zur Verfügung steht als verbraucht wird und weitere 25 % der Stunden mittels Zwischenspeicherung in batterieelektrischen Fahrzeugen gedeckt werden können, müssen noch 25 % der Jahresstunden anderweitig abgedeckt werden. Wie in Abbildung 5.17 ersichtlich, steht die Deckung der Jahresstunden nicht in einem direkten Verhältnis zu den aufgebrauchten MWh an Speicherkapazität. Die – in der Dritten Forschungsfrage errechnete – hypothetische maximale Speicherkapazität für eine Woche (736,55 GWh) und ein Monat (2598,17 GWh) würde eine Jahresstundendeckung von etwa 80 % bzw. 86 % bewirken.

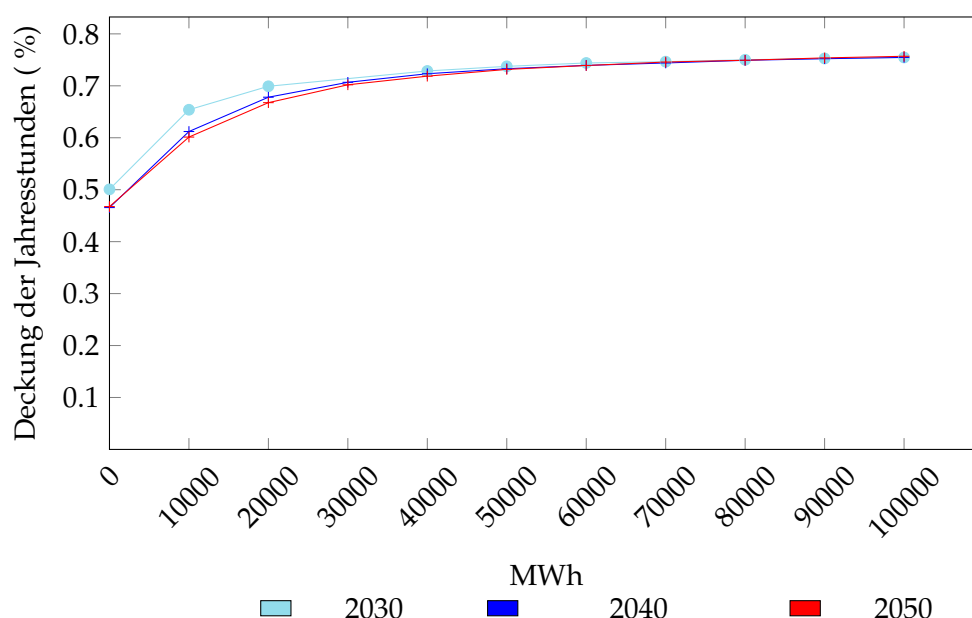


Abbildung 5.17: Gegenüberstellung der Gesamtspeicherkapazität (MWh) und der Deckung der Jahresstunden (%)

Die Grenzkosten je zusätzlicher Einheit an stündlicher Energiedeckung steigen mit zunehmender Speichergröße. Würde unter den – in dieser Arbeit angedachten Voraussetzungen – der gesamte Batteriespeicher der Fahrzeuge herangezogen werden, käme es bei Szenario S2 und Langstrecke zu einer Jahresstundenabdeckung von 77,42 %. Hierbei würden de facto alle *mobilen Speicher* als *stationäre Speicher* verwendet werden. Da die Fluktuationen der Energieerzeugung nicht umfassend prognostiziert werden können und die Grenzkosten der Deckung der Jahresstunden exponentiell ansteigen, kann eine ganzheitliche (saisonale) Speicherung unter wirtschaftlichen und technischen Bedingungen nicht erfolgen. In der wissenschaftlichen Fachliteratur wird aufgrund wirtschaftlichen und technischen Gegebenheiten – vor allem die hohe Zyklenfähigkeit von Lithium-Ionen-Batterien betreffend – keine saisonale Speicherung angedacht, da es hier nur zu einem Ladezyklus pro Jahr käme. Lithium-Ionen-Batterien können unter Idealbedingungen viele tausend Zyklen fahren, bevor sie den Großteil ihrer Speicherkapazität verlieren (Yang und Wang, 2018).

Kapitel 6

Diskussion

Die Ergebnisse der Forschungsfragen, welche anhand der erarbeiteten Grundlagen des zweiten Kapitels elaboriert werden konnten, wurden im fünften Kapitel detailliert dargelegt. Die Beantwortung der **ersten Forschungsfrage (F1)**¹ konnte trotz der Unsicherheit hinsichtlich der verbauten Speichergrößen innerhalb eines Fahrzeugmodells, mit einer Genauigkeit von $\pm 14, 15 \%$ erarbeitet werden. Die Ende 2020 zugelassenen batterieelektrischen Fahrzeuge haben eine Gesamtspeicherkapazität zwischen 1910 MWh und 2451 MWh verbaut (Vgl. Abbildung 5.5). Die Erhebung des Verhältnisses zwischen mobilen und stationären Energiespeichern in Österreich war nicht Teil dieser wissenschaftlichen Recherche, dies könnte jedoch in einer weiteren Studie erforscht werden. Obwohl hier kein Zukunftsszenario entwickelt werden musste, handelt es sich um einen hypothetischen Ansatz. Der überwiegende Teil der Fahrzeugmodelle besitzt nicht die Fähigkeit des bidirektionalen Ladens. Weiter konnte bei der Recherche – abgesehen von vagen Ankündigungen – in Österreich noch keine öffentliche Vehicle to Grid (V2G)-EVSE gefunden werden.

Für die **zweite Forschungsfrage (F2)**² wurden die Ergebnisse von F1 herangezogen und mit Szenarien möglicher zukünftiger Zulassungszahlen kombiniert. Die zwölf Ergebnisse liegen zwischen 8,31 GWh und 32,56 GWh. Die größte Herausforderung hierbei ist, abzuschätzen, wie viele BEVs im Jahr 2030 in Österreich zugelassen sein werden. Es wurden drei mögliche Szenarien entwickelt, zwei Szenarien in denen 2030 eine Anzahl von 590.000 Fahrzeugen zugelassen sind (Positionspapier Wien Energie, 2021) und ein Szenario bei dem es zu keiner größeren Zuwachsrate als zwischen 2019 und 2020 kommt. Da in der wissenschaftlichen Fachliteratur eine Vielzahl von Prognosen und Szenarien zu finden sind, sich jedoch aber nicht eruieren lässt, welche sich schlussendlich bewahrheiten werden, wurden die Szenarien so entwickelt, dass

¹Energiespeicherpotenzial 2020

²Energiespeicherpotenzial 2030

2050 in etwa 0,5 (491.020), 1,5 (1.681.180) und 5 (5.090.000) Millionen Fahrzeuge zugelassen sind. 5 Millionen entspricht dem ungefähren Stand an zugelassenen PKWs 2020, 0,5 Millionen entspricht in etwa 10 % dieser Menge (lineares Wachstum) und 1,5 Millionen können mit einem linearen Wachstum unter der Bedingung, dass im Jahr 2030 491.020 Fahrzeuge zugelassen sind, erreicht werden. Die Bandbreite wurde hier aufgrund der hohen Unsicherheiten bewusst groß gewählt.

Der nächste Abschnitt der Ergebnisse verbindet die Datensätze des Mobilitätssektors mit den Datensätzen der Energieerzeugung. Um die Fluktuationen für die Jahre 2030, 2040 und 2050 darzustellen, wurde ein stark vereinfachter Ansatz gewählt: Es wurden für jede Erzeugungsart die Einspeisedaten des Jahres 2020 herangezogen und ein Fluktuationsschema erstellt. Der Anteil der jeweiligen Erzeugungsart wurde daraufhin aus den WAM+ Szenario übernommen und mit dem Fluktuationsschema kombiniert. Es handelt sich hierbei nicht um Prognosen, wie hoch die Fluktuationen im Jahr 2030 ausfallen könnten. Es sind vielmehr Szenarien wie hoch die Fluktuationen im Jahr 2030 sein werden, wenn sie exakt dem Schema von 2020 entsprechen. Kleine Änderungen – wie z.B. eine hohe Solarenergieeinspeisung an einem Tag – können das Endergebnis signifikant verändern. Im Zuge dieser Masterarbeit wurde weiters überlegt, einen gemittelten Wert über mehrere Jahre heranzuziehen, dies hätte jedoch wiederum die Fluktuationen abgeflacht. Ebenfalls wurde auch eine Simulation der Fluktuationen oder die Auswahl eines Jahres mit besonders ungünstigen Wetterverhältnissen angedacht. Da die Datensätze für das Jahr 2020 die aktuellsten und gleichzeitig die, am nächsten zum Jahr 2030 liegenden waren, wurden diese zur Bearbeitung der Forschungsfragen herangezogen. Ein weiterer Punkt, welcher das Gesamtergebnis vermutlich beeinflussen könnte, ist der SoC der Speicher zu Jahresbeginn. In der Berechnung wird davon ausgegangen, dass diese für den Sektor Energie zur Verfügung stehende Speicherkapazität zu Beginn leer ist (SoC = 0 MWh). In der Analyse der Szenarien hatte dies jedoch keine signifikanten Auswirkungen, was damit zu erklären ist, dass die Gesamtspeichergröße limitiert ist. Ab einer hypothetischen Größenordnung von 3,77 TWh Speicherkapazität, konnten bei einem SoC ebenfalls von 3,77 TWh am 01.01.2030 die gesamten Fluktuationen ausgeglichen werden. Die **dritte Forschungsfrage (F3)**³ konnte dahingehend beantwortet werden, dass 730 mal von laden auf entladen bzw. entladen auf laden umgeschaltet wurde. In der wissenschaftlichen Fachliteratur ist unter Ladezyklus meist das vollständige Entleeren und wieder Befüllen eines Speichers gemeint. Dies ist auch hier in der Regel der Fall, es ist jedoch nicht erhoben, ob der Speicher immer zur Gänze ausgenutzt werden musste bzw. konnte. Der zweite Teil der Forschungsfrage hinsichtlich der saisonalen Speicherung konnte mit 3,77 TWh beantwortet werden. Das ist in der

³Ladezyklen und saisonale Speicherung

gleichen Größenordnung, jedoch mit 8 TWh, etwa doppelt so hoch auch in der wissenschaftlichen Fachliteratur zu finden (Nemec-Begluk, 2020). In der Fachliteratur (Nemec-Begluk, 2020) wurde ein anderer Ansatz gewählt. Es wurde auf das Projekt *Super-4-Micro-Grid* u.a. der TU Wien zurückgegriffen, wobei mit Hilfe meteorologischer Daten von mehreren Jahren (1994 - 2008) bis zum Jahr 2050 sechs Modelle entwickelt wurden (Boxleitner u. a., 2020). In dieser vorliegenden Masterarbeit wird das Fluktuationsschema des Jahres 2020 – unter Anpassung des Energiemixes des WAM+ Szenarios – herangezogen. Dieses – nur auf ein Jahr bezogene Fluktuationsschema – dürfte den niedrigeren hypothetischen Speicherbedarf erklären. Um die **vierte Forschungsfrage**⁴ und somit die Hauptfragestellung zu beantworten, wurden die bisherigen Ergebnisse bis zum Jahr 2050 erweitert, ein Entscheidungsbaum erstellt, welcher die Befüllung und Entleerung des Speichers simuliert, und auf alle Szenarien angewandt. Durch die Kombination von Speichergrößen der batterieelektrischen Fahrzeuge, Szenarien hinsichtlich der Zulassungszahlen und der zeitlichen Entwicklung konnten 108+3 Ergebnisse dargestellt werden. Die drei zusätzlichen Ergebnisse beschreiben den Zustand, wenn keine mobilen Speicher zur Verfügung stehen würden. Für das Jahr 2050 können somit je nach Szenario – welche in Tabelle 5.6 bis 5.14 dargestellt sind – zwischen 52,15 % und 75,12 % der Stunden im Jahr abgedeckt werden. Der Durchschnitt aller Szenarien des Jahres 2050 beträgt 69,39 % (Energiesektor + Mobilitätssektor).

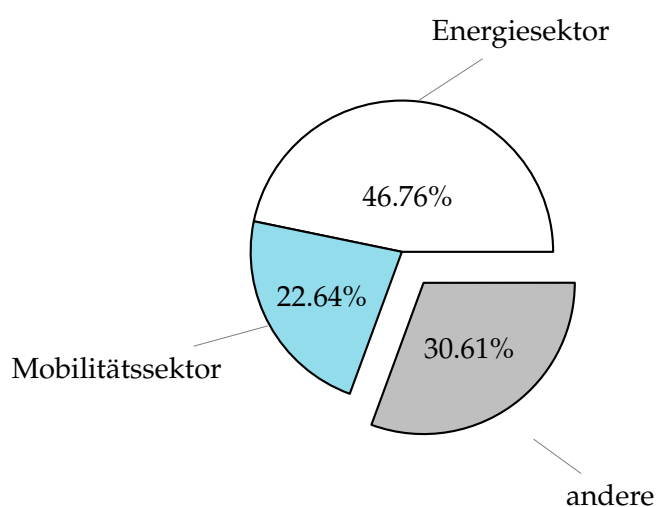


Abbildung 6.1: Stundenbeitrag zur Deckung der Energieversorgung im Jahr 2050 in Prozent [Eigene Berechnung].

In Tabelle 6.1 ist der Beitrag je Sektor der Deckung der Jahresstunden dargestellt. Etwa die Hälfte davon wird vom Energiesektor selbst ausgeglichen, etwas über ein Fünftel kann durch Zwischenspeicherung vom Sektor Mobilität beigetragen werden und ca. ein

⁴Energiespeicherpotenzial mobiler Speicher zum Ausgleich von Fluktuationen

Drittel muss über andere Wege ausgeglichen werden. Möglichkeiten hierzu wären den Verbrauch anzupassen, andere vor allem saisonale Speichertechnologien zu fördern oder auf Energieerzeugungsarten umzusteigen, die keinerlei Fluktuationen unterliegen (Spitzenlastkraftwerke).

Die vorliegende Masterarbeit ist auf einigen Hypothesen aufgebaut, welche aufgrund des Umfangs nicht näher beleuchtet werden konnten. Es wurde beispielsweise nicht näher erörtert, ob Fahrzeughalter*innen über die technischen, juristischen und ökonomischen Möglichkeiten verfügen werden, ihr Fahrzeug zur Zwischenspeicherung zur Verfügung zu stellen bzw. dies auch wollen. Auch wurde nicht auf die zukünftigen Besitzverhältnisse der Fahrzeughalter*innen eingegangen, möglicherweise werden in Zukunft BEVs tendenziell eher gemietet anstatt erworben. Über das WAM+ Szenario wurden gesellschaftliche, politische und technische Veränderungen in den kommenden Jahrzehnten nur indirekt berücksichtigt. Die durchschnittlichen Batteriegrößen von 43,01 kWh bis 55,19 kWh erscheinen eher gering, im alltäglichen Sprachgebrauch würde man bei einem BEV mit 55,19 kWh Industriebatterie nicht von einem *Langstrecken* Modell sprechen. Es ist davon auszugehen, dass sich die Batterien eher vergrößern (vgl. Kapitel 5.3), jedoch ist auch diese Annahme mit einer Reihe von Unsicherheiten behaftet.

Die vorliegende Masterarbeit versucht, eine Größenordnung der Sektorkoppelung zwischen Mobilität und Energieversorgung zu erarbeiten. Wie bereits angeführt, wird jedoch nur indirekt über das WAM+ Szenario auf den Energieverbrauch des Sektors Mobilität eingegangen, welcher durch Elektromobilität um 17 % erhöht wird (vgl. Kapitel 1). Unter der Annahme, dass alle batterieelektrischen Fahrzeuge täglich durchschnittlich 23 von 24 Stunden mit dem Stromnetz verbunden sind (vgl. Abschnitt 5.4.1 und Berger (2014)), können diese auch mit wenig Leistung über einen längeren Zeitraum geladen werden, wenn Energie zur Verfügung steht. Somit kann der Strombedarf zwar nicht an mehr Stunden im Jahr gedeckt werden, jedoch können die Spitzen, an denen zu viel Energie im Netz verfügbar ist, genutzt werden. Dies birgt wiederum ökonomische Vorteile für volatile Erzeugungsarten.

Kapitel 7

Schlussfolgerung und Ausblick

Um die Ziele des Paris Agreements und somit die de facto vollständigen Dekarbonisierung aller Sektoren zu erreichen, muss sich Österreich einem strukturellen Wandel unterziehen. Ein Teil dieses Wandels beinhaltet die Abkehr von fossilen Rohstoffen. Sowohl für den Energie- als auch den Mobilitätssektor birgt dies auch Herausforderungen, die im gesellschaftlichen Diskurs mitunter auch umstritten sind. Im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit konnte erarbeitet werden, dass zumindest für den Energiesektor die Kopplung beider Sektoren einen signifikanten Vorteil bringt. Unter den beschriebenen Annahmen kann im Jahr 2050 an 82 zusätzlichen Tagen¹ die Energieversorgung gewährleistet werden. Offensichtlich ist, dass eine Transformation des Mobilitätssektors nicht ohne die Transformation des Energiesektors gelingen kann. Am Ende der Recherche stellt sich zudem auch die Frage, ob die Transformation des Energiesektors ohne die Transformation des Mobilitätssektors möglich ist. Ist es sinnvoll, chemische Energiespeicher (Industriebatterien) zuerst in Fahrzeugen (mobile Speicher) zu verbauen und dann in der Folgeanwendung als stationäre Speicher zu nutzen? Oder sollte schon von Beginn an dieser Dual-Use-Ansatz sowohl in der Automobilbranche als auch im Netzausbau berücksichtigt werden? Diese Fragestellungen müssen schon zu Beginn des strukturellen Umbaus der Infrastruktur beantwortet werden. Dazu soll die vorliegende Masterarbeit einen Beitrag leisten.

¹22,64 %*365 Tage

Literaturverzeichnis

- ACEA (2010). *ACEA position and recommendations for the standardization of the charging of electrically chargeable vehicles*. Brüssel: Association des Constructeurs Européens d'Automobiles. URL: https://web.archive.org/web/20110706132407/http://www.acea.be/images/uploads/files/20100630_Standardisation_e-vehicles.pdf.
- (2011). *ACEA position and recommendations for the standardization of the charging of electrically chargeable vehicles*. Brüssel: Association des Constructeurs Européens d'Automobiles. URL: https://www.acea.be/uploads/publications/charging_20110511.pdf.
- Agora Verkehrswende (2019). *Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial*. Berlin: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung. URL: https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2018/Klimabilanz_von_Elektroautos/Agora-Verkehrswende_22_Klimabilanz-von-Elektroautos_WEB.pdf.
- Austrian Energy Agency (2015). *Szenarien für Strom- und Fernwärmeaufbringung und Stromnachfrage im Hinblick auf Klimaziele 2030 und 2050*. Wien: Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency. URL: https://www.energyagency.at/fileadmin/dam/pdf/publikationen/berichteBroschueren/Szenarien_fuer_Strom-_und_Fernwaermeaufbringung_und_Stromnachfrage_im_Hinblick_auf_Klimaziele_2030_und_2050.pdf.
- Austrian Power Grid (2020). *Markttransparenz: Erzeugung nach Typ*. Wien: Austrian Power Grid AG. URL: <https://www.apg.at/de/markt/Markttransparenz/erzeugung/Erzeugung-pro-Typ>.
- (2021a). *Erzeugung nach Typ Österreich*. Wien: Austrian Power Grid AG. URL: <https://www.apg.at/de/markt/Markttransparenz/erzeugung/ErzeugungproTyp>.
- (2021b). *Ist Last Österreich*. Wien: Austrian Power Grid AG. URL: <https://www.apg.at/de/markt/Markttransparenz/last/Ist-Last>.

- Berger, Roland (2014). *Shared Mobility: Im Schnitt stehen Autos 23 Stunden am Tag herum*. Hamburg: Presseportal.de. URL: <https://www.presseportal.de/pm/32053/2819936>.
- BMDV (2014). *ÖFFENTLICHE LADEINFRASTRUKTUR FÜR STÄDTE, KOMMUNEN UND VERSORGER*. Bonn: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). URL: <https://edocs.tib.eu/files/e01fn16/871334143.pdf>.
- BMDW (2020). *Das Übereinkommen von Paris*. Wien: Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort. URL: https://www.oesterreich.gv.at/themen/bauen_wohnen_und_umwelt/klimaschutz/1/Seite.1000325.html.
- BMLFUW (2008). *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über die Abfallvermeidung, Sammlung und Behandlung von Altbatterien und -akkumulatoren (Batterienverordnung)*. Das Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. URL: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20005815>.
- Böker, Andreas, Hartmuth Paerschke und Ekkehard Boggasch (2019). *Elektrotechnik für Gebäudetechnik und Maschinenbau*. 2. Aufl. 2019. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 9783658209704.
- Boxleitner, Martin u. a. (2020). *Super-4-Micro-Grid*. Wien: TU Wien, Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe. URL: https://www.ea.tuwien.ac.at/fileadmin/t/ea/projekte/super-4-micro-grid/Super-4-Micro-Grid_-_FFG-Nr._818954_-_Approbiertes_Endbericht.pdf.
- EV Europe (2020). *CCS – DC Combo Ladeeinlass Max 200Amp mit 3 Meter Kabel*. URL: <https://eveurope.eu/de/product/ccs-dc-combo-dc-ladeanschluss-max-200amp-mit-kabel/>.
- EVN AG (2018). *Unterwegs mit der Evn Strom-Tankkarte*. Maria Enzersdorf: EVN AG. URL: <https://www.evn.at/Privatkunden/E-Mobilitat/E-Mobilitaet/Unterwegs-laden.aspx>.
- Fucik, Jan und Georg Günsberg (2017). *Faktencheck E-Mobilität: Was das Elektroauto tatsächlich bringt*. Wien: Klima- und Energiefonds. URL: https://www.beoe.at/wp-content/uploads/2017/10/Faktencheck_Mob_2017_lang_web.pdf.
- Hans Wagner GmbH (o. D.). Amberg: Hans Wagner GmbH. URL: https://asset.rein.de/add/160267/c1/-/de/000621535DS01/DA_HAWA-1008230-Kaltgeraete-Anschlusskabel-Schwarz-2.00m.pdf.
- Helbig, Christoph u. a. (2018). „Supply risks associated with lithium-ion battery materials“. eng. In: *Journal of cleaner production* 172, S. 274–286. ISSN: 0959-6526.
- Hüer, Lucas u. a. (2019). „Text/Conference Paper“. In: *Biometrics Special Interest Group (BIOSIG), Proceedings of the International Conference of the*. ISSN: 1617-5468.

- Hürter, Benedikt (2020). *Technologiebriefing: Lithium-Schwefel-Batterie II/III - Technischer Hintergrund*. Aachen: Battery News. URL: <https://battery-news.de/index.php/2020/06/04/battery-news-de-technologiebriefing-lithium-schwefel-batterie-ii-iii-technischer-hintergrund/>.
- Jar, Ben, Neville Watson und Allan Miller (2016). „Rapid EV Chargers: Implementation of a Charger“. In.
- Kords, Martin (2020a). *Anzahl der Personenkraftwagen (Pkw) in Österreich von 1960 bis 2019*. Wien: Statista. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/150173/umfrage/bestand-an-pkw-in-oesterreich/>.
- (2020b). *Stromverbrauch in Österreich von 1920 bis 2018*. Wien: Statista. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/325788/umfrage/stromverbrauch-in-oesterreich/>.
- Krutzler, Thomas u. a. (2019). „Energy management scenarios with regard to climate targets 2030 and 2050 (energy scenarios)“. In: *Umweltbundesamt/Publikationen*. URL: <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/f53e94c3-b9c7-4b9e-9b2d-11209c7f2532>.
- Kurzweil, Peter und Otto K Dietlmeier (2018). *Elektrochemische Speicher: Superkondensatoren, Batterien, Elektrolyse-Wasserstoff, Rechtliche Rahmenbedingungen*. 2. Aufl. 2018. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 9783658218287.
- Linnemann, Marcel und Christoph Nagel (2020). *Elektromobilität und die Rolle der Energiewirtschaft: Rechte und Pflichten eines Ladesäulenbetreibers*. 1st 2020. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Mathoy, Arno (2008). *Definition and implementation of a global EV charging infrastructure*. Gams: BRUSA. URL: <https://web.archive.org/web/20120307041206/http://www.park-charge.ch/documents/EV-infrastruktur%20project.pdf>.
- Mennekes (2020). *CEE-Steckvorrichtungen für Nennbetriebsspannungen über 50 V*. Kirchundem: Mennekes. URL: <https://www.mennekes.de/wissen/normen-regulierungen/uhrzeitstellungen/>.
- Mültin, Marc (2019). *How KOSTAL Uses RISE V2G To Test ISO 15118 Onboard Charge Controllers*. Dublin: V2G Clarity Ltd. URL: <https://v2g-clarity.com/blog/how-kostal-uses-risev2g-to-test-iso15118-onboard-charge-controllers/>.
- Nationale Plattform Elektromobilität (2013). *Technischer Leitfaden Ladeinfrastruktur*. Berlin, S. 1–34. URL: <https://www.din.de/blob/97246/c0cbb8df0581d171e1dc7674941fe409/technischer-leitfaden-ladeinfrastruktur-data.pdf>.
- Nemec-Begluk, Sabina (2020). „Modellierung und Optimierung energieträgerübergreifender Energiesysteme und die zukünftige Bedeutung der Speicher- und Kopplungstechnologien“. Diss. Wien.

- Qiao, Qinyu u. a. (2017). „Cradle-to-gate greenhouse gas emissions of battery electric and internal combustion engine vehicles in China“. eng. In: *Applied energy* 204, S. 1399–1411. ISSN: 0306-2619.
- Renault (2021). *Reichweite, Batterie und Aufladen*. publisher: Renault Österreich. Wien. URL: <https://www.renault.at/elektrofahrzeuge/zoe/batterie-und-laden.html>.
- Republik Österreich Parlament (2016). *Nationalrat stimmt Ratifikation des Weltklimavertrags von Paris zu (PK-Nr. 840/2016)*. Wien: Republik Österreich Parlament. URL: https://www.parlament.gv.at/PAKT/PR/JAHR_2016/PK0840/index.shtml.
- Saldaña, Gaizka u. a. (2019). „Analysis of the Current Electric Battery Models for Electric Vehicle Simulation“. In: *Energies* 12, S. 2750. DOI: 10.3390/en12142750.
- Schüppel, Andreas (2014). „Wertigkeit von Windkraft, Photovoltaik und Spitzenlastkraftwerken als Teil des gesamten Elektrizitätssystems“. Diss. Graz: Technischen Universität Graz. URL: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/47/078/47078901.pdf?r=1&r=1.
- Stadler, Josef (2019). „Elektromobilität aus der Sicht der Verteilernetzbetreiber“. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 136.1, S. 83–85. ISSN: 1613-7620. DOI: 10.1007/s00502-019-0684-1. URL: <https://doi.org/10.1007/s00502-019-0684-1>.
- Statistik Austria (2021a). *Bestand 2020 Elektro-PKW nach Typen*. Wien: Statistik Austria.
- (2021b). *Kfz-Bestand 2020*. Wien: Statistik Austria.
- (2021c). *kfz-neuzulassungen von elektro-kfz im 1. Halbjahr 2021*. Wien: Statistik Austria.
- Swissolar (2016). *PV-Anlagen mit Batterien*. Zürich: Schweizerischer Fachverband für Sonnenenergie. URL: https://www.swissolar.ch/fileadmin/user_upload/161219_Merkblatt_pv_speicher_def.pdf.
- Tesla Motors Austria GmbH (2021). *Tesla Motors*. Wien: Tesla Motors Austria GmbH. URL: https://www.tesla.com/de_at/models.
- (2022). *Tesla Motors*. Wien: Tesla Motors Austria GmbH. URL: https://www.tesla.com/de_AT/support/non-tesla-supercharging.
- Töpler, Johannes und Jochen Lehmann (2017). *Wasserstoff und Brennstoffzelle : Technologien und Marktperspektiven*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage.. Esslingen. ISBN: 3-662-53360-X.
- Trueb, Lucien F (1998). *Batterien und Akkumulatoren : mobile Energiequellen für heute und morgen*. Berlin. ISBN: 3540629971.
- Umweltbundesamt (2015). *Energiewirtschaftliche Szenarien im Hinblick auf die Klimaziele 2030 und 2050 : Szenario WAM plus Synthesebericht 2015*. Report / Umweltbundesamt. Wien. ISBN: 9783990043462.

- (2019a). *Klimaschutzbericht: Klimaschutzbericht Analyse der Treibhausgas-Emissionen bis 2017*. Wien: Umweltbundesamt. URL: <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0702.pdf>.
- (2019b). *THG-Rechner: Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger*. Wien: Umweltbundesamt. URL: <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html>.
- United Nations (2014). *UNFCCC: Report of the Conference of the Parties on its nineteenth session, held in Warsaw from 11 to 23 November 2013*. Warschau: United Nation.
- Voltimum (2005). *Grundlagen Elektromotoren und deren Schaltung: Teil I*. Heidelberg. URL: <https://www.voltimum.de/artikel/grundlagen-elektromotoren-und-schaltung-2>.
- Weemaes, Guy (2019a). *Ladung und Ladestecker*. Hofgeismar. URL: <https://www.goingelectric.de/wiki/Ladung-und-Ladestecker/>.
- (2019b). *Typ2 Signalisierung und Steckercodierung*. Hofgeismar. URL: <https://www.goingelectric.de/wiki/Typ2-Signalisierung-und-Steckercodierung/>.
- Wien Energie (2021). *Elektromobilität Die Zukunft ist CO-neutral: Positionen*. Wien: Wien Energie. URL: <https://positionen.wienenergie.at/themen/mobilitaetswende/e-autos/>.
- Wikipedia (2022). *CHAdemo — Wikipedia, The Free Encyclopedia*. <http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=CHAdemo&oldid=218426839>. [Online; accessed 16-January-2022].
- Windisch-Kern, Stefan u. a. (2021). „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Herausforderungen und aktuelle Forschungsergebnisse“. In: *BHM. Berg- und hüttenmännische Monatshefte* 166.3, S. 150–156. ISSN: 0005-8912.
- Yang, Xiao-Guang und Chao-Yang Wang (2018). „Understanding the trilemma of fast charging, energy density and cycle life of lithium-ion batteries“. eng. In: *Journal of power sources* 402.C, S. 489–498. ISSN: 0378-7753.

Anhang [modifiziert aus Statistik Austria (2021)]

		Basis (kWh)	Mittel (kWh)	Groß (kWh)
Batterieelektrische Fahrzeuge				
AUDI	1100			
E-TRON SPORTBACK QUATTRO	218	71		95
E-TRON S SPORTBACK QUATTRO	4			95
E-TRON QUATTRO	877	71		95
E-TRON S QUATTRO	1	71		95
BMW	4855			
I3 EDRIVE BEV I01	584	22		
I3 EDRIVE BEV I01 MÜ	1346		33,2	
I3 EDRIVE 94AH I01	658		33,2	
I3 EDRIVE BEV I01 MÜ2	1358			42,2
I3S EDRIVE BEV I01	589			42,2
I3S EDRIVE 94AH I01	320		33,2	
CITROEN	565			
C1 ELEKTRO	4	12,8		
E-C4 EL	4	50		
C-ZERO EL	473	14,5		
SAXO ELEKTRO	50	14,4		
AX ELEKTRO	5	14,4		
BERLINGO ELEKTRO	5	16,2		
BERLINGO II ELEKTRO	3		22,5	
BERLINGO III ELEKTRO	3			50
SPACETOUREL EL	18	50		75
DS	20			
DS3 CROSSBACK EL	20	50		
FIAT	205			
500 ELEKTRO	167	23,8		
500 FA1 ELEKTRO	190	23,8		42
PANDA 34 EL	9	12,384		
FIORINO EL	6	18		
FORD	8			
FOCUS DYB HK ELEKTRIC	8	23		
HONDA	77			
HONDA E EL	77	35,5		
HYUNDAI	3527			
KONA EL	17	64		
IONIQ EV EL	1626	28		38,3
KONA EL	1884	64		
JAC	52			
IEV7S EL	52	40		
JAGUAR	466			
I-PACE EL	466	90		
KIA	2402			
E-SOUL EL	87	39,2		64
SOUL EV EL	792	27		64
E-NIRO EL	1523	39,2		64
MAZDA	364			
2 EL	3	20		

MX-30 DR EL	361	35,5	
MERCEDES	1008		
B ELECTRIC DRIVE -245-	547	28	
EQC 400 4MATIC EL -293-	260	80	
VITO BUS EL	69	41	100
EQV BUS EL	132		100
MG	177		
ZS EV EL	177	44,5	
MINI	265		
COOPER SE F56 EL	265	32,6	
MITSUBISHI	220		
I-MIEV EL	220	16	
NISSAN	2984		
NV 200 BUS EL	292	40	
LEAF EL	816	24	30
LEAF ZE1 EL	1776	40	62
LEAF EL	100	24	30
OPEL	358		
STROMOS EL	9	19,2	
AMPERA-E	19	60	
CORSA F EL	320	50	
ZAFIRA LIFE EL	10	50	75
PEUGEOT	842		
ION EL	243	14,5	
2008 II EL	196	50	
106 EL	49	17	
208 II EL	351	50	
PARTNER EL	3	22,5	
POLESTAR	1		
POLESTAR 2 EL	1	78	
PORSCHE	157		
TAYCAN TURBO EL	41	93,4	
TAYCAN TURBO S EL	37	93,4	
TAYCAN 4S EL	79	79,2	93,4
RENAULT	7993		
FLUENCE Z.E. EL	118	22	
KANGOO EL	4	33	
KANGOO II EL	3	33	
ZOE EL	7829	41	52
TWINGO III EL	39	22	
SEAT	542		
MII EL	542	32,3	
SKODA	221		
CITIGO EL	221	36,8	
SMART	940		
FORTWO COUPE EL	5	17,6	
EQ FORTWO COUPE EL -453-	304	17,6	
FORTWO ELECTRIC DRIVE	229	17,6	
FORTWO CABRIO EL DRIVE	64	17,6	
EQ FORTWO CABRIO EL -453-	175	17,6	
FORFOUR ELECTRIC DRIVE -453-	163	17,6	
SUZUKI	4		

STROMOS EL	4	19,2		
TESLA	8846			
ROADSTER EL	38	53		
MODEL 3 EL	147	52	58	75
MODEL X EL	980	75	90	100
MODEL S EL	2698	60	85	90
MODEL 3 EL	4983	52	58	75
THINK	36			
CITY EL	36	28,2		
VW	6008			
E-UP! EL	887	18,7	32,3	
GOLF EL	9	24,2	35,8	
E-GOLF VII EL	3562	35,8		
ID.3 EL	1544	48	62	82
POLO EL	6	45	58	77
Summe bereinigt:	44410			

Szenarien	Einheit	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
linear S1	Stk.	44410,00	98969,00	153528,00	208087,00	262646,00	317205,00	371764,00	426323,00	480882,00	535441,00	590000,00
	Stk.	44410,00	59297,00	74184,00	89071,00	103958,00	118845,00	133732,00	148619,00	163506,00	178393,00	193280,00
	Stk.	44410,00	57519,87	74499,79	96492,19	124976,76	161870,01	209654,18	271544,27	351704,37	455527,80	590000,00
Szenario Basis	linear S1	1910,51	4257,62	6604,73	8951,84	11298,96	13646,07	15993,18	18340,30	20687,41	23034,52	25381,63
	linear S2	1910,51	2550,94	3191,37	3831,81	4472,24	5112,68	5753,11	6393,55	7033,98	7674,42	8314,85
	exponentiell S3	1910,51	2474,49	3204,96	4151,07	5376,46	6963,60	9019,26	11681,76	15130,22	19596,68	25381,63
Szenario Basis +	linear S1	2045,13	4557,63	7070,13	9582,64	12095,14	14607,64	17120,14	19632,65	22145,15	24657,65	27170,15
	linear S2	2045,13	2730,69	3416,26	4101,82	4787,38	5472,94	6158,51	6844,07	7529,63	8215,20	8900,76
	exponentiell S3	2045,13	2648,85	3430,80	4443,57	5755,32	7454,29	9654,81	12504,91	16196,38	20977,56	27170,15
Szenario Basis ++	linear S1	2309,62	5147,05	7984,49	10821,92	13659,36	16496,79	19334,23	22171,66	25009,10	27846,54	30683,97
	linear S2	2309,62	3083,84	3858,07	4632,29	5406,52	6180,74	6954,96	7729,19	8503,41	9277,64	10051,86
	exponentiell S3	2309,62	2991,42	3874,49	5018,24	6499,63	8418,33	10903,43	14122,13	18290,99	23690,51	30683,97
Szenario Langstrecke	linear S1	2451,11	5462,38	8473,64	11484,91	14496,17	17507,44	20518,70	23529,97	26541,23	29552,50	32563,76
	linear S2	2451,11	3272,77	4094,42	4916,08	5737,73	6559,39	7381,05	8202,70	9024,36	9846,01	10667,67
	exponentiell S3	2451,11	3174,68	4111,85	5325,68	6897,82	8934,06	11571,40	14987,29	19411,55	25141,86	32563,76

Die Arbeit wurde mit $\text{\LaTeX}$ einem Softwarepaket des TEX Textsatzsystems und dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel verfasst.