

Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge: Bedarf, Kosten und Auswirkungen auf die Energieversorgung in Österreich bis 2030



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology



in Zusammenarbeit mit



Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge: Bedarf, Kosten und Auswirkungen auf die Energieversorgung in Österreich bis 2030

Autoren:

Dr. Werner **Tober**

Dipl.-Ing. Thomas **Bruckmüller**

Dipl.-Ing. Dominik **Fasthuber**

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung.....	1
2	Einleitung	2
3	Methodik.....	3
4	Entwicklung der PKW- und LNF-Flotte.....	5
4.1	Entwicklung der Neuzulassungen	5
4.2	Entwicklung des Bestands.....	7
4.3	Gesamtfahrleistung	8
5	Aufbau der Datenbasis und des Berechnungsmodells	9
5.1	Einteilung der Datenbasis.....	9
5.2	Aufbau des lokalen Berechnungsmodells.....	11
6	Energieverbrauch eines BEV	13
6.1	Durchschnittlicher Verbrauch nach Umgebungstemperatur	13
6.1.1	Energieverbrauch eines batterieelektrischen PKW	13
6.1.2	Energieverbrauch eines batterieelektrischen leichten Nutzfahrzeuges..	15
6.2	Temperaturverlauf nach Ort und Kalenderwoche.....	19
6.3	Berechnung des Verbrauchs nach Ort und Kalenderwoche.....	20
7	Mobilitätsverhalten.....	23
7.1	Mobilitätsdatenbasis	23
7.1.1	Mobilitätsverhalten der PKW-Nutzer	23
7.1.2	Mobilitätsverhalten der leichte Nutzfahrzeuge Nutzer	25
7.2	Ableitung eines Streckendatensatzes.....	27
7.2.1	Streckendatensatz der PKW-Nutzung	28
7.2.2	Streckendatensatz der LNF-Nutzung	30
8	Gleichzeitigkeit, Leistungsgang und Energiebedarf	33
8.1	Ladenutzungsverhalten	33
8.1.1	Nutzungsverteilung der Ladeleistungen.....	33
8.1.2	Anteil der Heimpladungen.....	36
8.2	Ladewirkungsgrad	38
8.3	Lokale Demographie und Bestand	38
8.4	Erstellung eines Ankunftszeitplans zur Berechnung der Gleichzeitigkeit	39
8.4.1	Erstellung eines Ankunftszeitplans der PKW-Nutzung.....	41
8.4.2	Erstellung eines Ankunftszeitplans der LNF-Nutzung	45
8.5	Berechnung der Gleichzeitigkeit und des Leistungsgangs	47
8.6	Ergebnisse für Gleichzeitigkeit und Leistungsgang	52
8.6.1	Leistungsgang im Jahr 2030	52
8.6.2	Kalenderwoche mit maximalem Leistungsgang im Jahr 2030	54

8.6.3	Kalenderwoche mit maximalem Leistungsgang bei 100 % BEV-Bestand	57
8.7	Energiebedarf durch Elektromobilität.....	59
9	Benötigte Anzahl an Ladestationen.....	61
9.1	Berechnung des Ladestellenbedarfs	61
9.2	Ergebnisse für den Ladestellenbedarf.....	65
9.2.1	Benötigte Anzahl an Ladestationen bis 2030.....	65
9.2.2	Benötigte Anzahl an Ladestationen bei 100 % BEV-Bestand	67
10	Grundlagen der Energieerzeugung und -verteilung.....	69
10.1	Struktur und Aufbau von Drehstromnetzen	69
10.2	Netztopologien	70
10.2.1	Niederspannungsnetze (NE-6/7).....	70
10.2.2	Mittelspannungsnetze (NE-4/5).....	72
10.3	Erhöhte Ladeleistungen und BEV-Bestand	73
10.4	Maximale Auslastung der Betriebsmittel.....	74
10.5	Spannungsproblematik.....	75
10.6	Power Quality	76
10.7	Mögliche Verbesserungsmaßnahmen durch Lademanagement	77
10.7.1	Verbrauchsorientierte Ladesteuerung.....	78
10.7.2	Netzorientierte Ladesteuerung.....	79
10.7.3	Erzeugungsorientierte Ladesteuerung	79
10.8	Mögliche Verbesserungsmaßnahmen an den Betriebsmitteln	79
10.8.1	Impedanzreduktion	80
10.8.2	Wirkleistungsreduktion.....	80
10.8.3	Blindleistungsmanipulation	80
10.8.4	Direkte Spannungsquellen.....	80
11	Auswirkungen auf das lokale Verteilernetz.....	81
11.1	Lokale Netzmodelle	81
11.1.1	Ländliches Netz	81
11.1.2	Kleinstädtisches Netz.....	83
11.1.3	Großstädtisches Netz	83
11.2	Lastfluss-Szenarien in repräsentativen Verteilnetzen.....	84
11.2.1	Ländliches Netz	85
11.2.2	Kleinstädtisches Netz.....	88
11.2.3	Großstädtisches Netz	90
12	Kosten	92
12.1	Errichtungskosten für eine Ladestelle.....	92
12.1.1	Heim Straßenrand.....	93
12.1.2	Heim Stellplatz	95

12.1.3 Ziel Straßenrand	96
12.1.4 Ziel Stellplatz.....	96
12.1.5 Gast Straßenrand	97
12.1.6 Gast Stellplatz.....	98
12.1.7 Autobahn	98
12.2 Kosten für Netzerweiterungsmaßnahmen	98
12.3 Ergebnisse für die Kosten von Ladeinfrastruktur	100
12.3.1 Errichtungskosten bis 2030.....	101
12.3.2 Errichtungskosten bei 100 % BEV-Bestand.....	103
13 Sensitivitätsanalyse	105
13.1 Segment-Shift und BEV-Fahrzeugentwicklung.....	105
13.1.1 Segment-Shift	105
13.1.2 Steigende Kapazität und Energiedichte von Batterien	107
13.1.3 Verbesserungen am Gesamtfahrzeug	110
13.1.4 Berechnung der Verbrauchsentwicklung	110
13.1.5 Ergebnis der Verbrauchsentwicklung.....	112
13.2 Variation des BEV-Verbrauchs.....	113
13.3 Variation der verwendeten Ladeleistung	114
13.4 Reduzierter Heimladungsanteil	116
13.5 Reduzierte Ausstattung des eigenen Stellplatzes mit Ladestellen	118
13.6 Verhältnis von Straßenrand- zu Stellplatz-Ladung bei Zielfahrten.....	119
13.7 Variation der Auslastung öffentlich zugänglicher Ladestellen.....	121
13.8 Best und Worst Case.....	122
14 Die wichtigsten Ergebnisse.....	125
14.1 BEV-Bestandsentwicklung bis 2030	125
14.2 Leistungsgang der Maximalwoche	126
14.3 Energiebedarf durch Elektromobilität.....	127
14.4 Benötigte Anzahl an Ladestellen	128
14.5 Auswirkungen auf das lokale Verteilernetz	130
14.6 Kosten	131
14.7 Ergebnisse im Best & Worst Case.....	133
15 Zusammenfassung.....	134
16 Anhang	137
16.1 Liste der verwendeten Temperturmessstellen (ZAMG)	137
16.2 Errichtungskosten für einzelne Ladestellen (exkl. USt.)	139
16.3 Vergleich mit anderen Untersuchungen	142
16.3.1 Feldtest in Seitenstetten, Niederösterreich	142
16.3.2 Studie zum zukünftigen Infrastrukturbedarf in Österreich	146
17 Literaturverzeichnis	150

1 Kurzfassung

Die derzeit noch niedrigen BEV-Bestände beim PKW und leichten Nutzfahrzeug (LNF) unterliegen aufgrund der stark zunehmenden Neuzulassungszahlen einem beachtlichen Wachstum. Daraus ergeben sich zahlreiche Fragen in Hinblick auf die erforderliche Ladeinfrastruktur, welche in dieser Studie bis 2030 untersucht werden. Zusätzlich werden die Auswirkungen höherer BEV-Bestände bis hin zu 100 % analysiert.

Ausgehend von der Bestandsentwicklung und dem detaillierten Mobilitätsverhalten der österreichischen PKW-Nutzer, werden der Leistungsgang sowie die Gleichzeitigkeit der Ladenutzung berechnet. Dabei werden unter anderem der Verbrauch und die Umgebungstemperatur berücksichtigt. Zusätzlich wird nach Ort (Bundesland/Stadt), Jahreszeit, Wochentag, Erwerbsstatus des Fahrers, Zweck der Fahrt sowie Fahrtziel differenziert. Der daraus resultierende Leistungsgang und die Gleichzeitigkeit liefern die benötigte Leistung, Energie und Anzahl der Ladestellen. Es werden die Auswirkungen auf das lokale Verteilernetz in verschiedenen Modellen (ländlich, klein- und großstädtisch) untersucht. Anschließend werden die Kosten für die Errichtung der benötigten Ladestellen abgeschätzt.

Bis 2030 wird ein BEV-Anteil am Gesamtbestand von 11 % beim PKW und 6,5 % beim LNF erwartet. Deren Ladevorgänge erzeugen eine Spitzenlast von 1,1 GW. Das entspricht 11 % der derzeitigen Spitzenlast. Der zusätzliche Energiebedarf im Jahr 2030 beträgt 2,2 TWh bzw. 3,2 % des derzeitigen Bedarfs. In den untersuchten Modellen für ländliche, klein- und großstädtische Verteilernetze zeigen sich bis 2030 hinsichtlich Betriebsmittelauslastung und Spannungsproblematik keine Probleme. Aufgrund langer Planungsphasen kann der Beginn eines Netzausbaus für höhere BEV-Bestände (über 2030 hinaus) bereits vor 2030 erforderlich sein. Die jeweiligen Grenzen der betrachteten Verteilernetze werden bei BEV-Bestandsanteilen PKW & LNF von 30 % & 18 % (ländlich), 56 % & 33 % (kleinstädtisch) bzw. 48 % & 28 % (großstädtisch) erwartet. Bis 2030 werden rund 860.000 Ladestellen benötigt, wobei die Mehrheit eine Leistung von 11 kW oder weniger aufweist. Dadurch ergeben sich bis 2030 Kosten in der Höhe von 6,1 Mrd. €, was 9.800 €/Fahrzeug entspricht. Die Mehrheit der Kosten entsteht dabei durch Ladestellen am Straßenrand, welche in der Regel nicht vom Fahrzeugbesitzer selbst errichtet werden können.

2 Einleitung

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs gewinnt zunehmend an Bedeutung. Neben dem wachsenden Hybridisierungsgrad rückt auch das vollelektrische bzw. batterieelektrische Fahrzeug (BEV) weiter in den Vordergrund. Es bietet die Vorteile der lokal emissionsfreien und geräuscharmen Fahrt, weswegen dieses zur Reduktion der Treibhausgas- und Schadstoffemissionen als besonders vielversprechend gilt.

Neben einer treibhausgas- und schadstoffarmen Energie- und Batterieerzeugung benötigen BEV die Möglichkeit, vielerorts, möglichst schnell und unkompliziert laden zu können. Die Bereitstellung der dafür benötigten Ladeinfrastruktur ist insbesondere bei höherer Verbreitung von BEV eine große Herausforderung. Der Bedarf an Ladestationen und die Auswirkungen auf das Verteilernetz sind aus heutiger Sicht schwierig vorherzusagen. Insbesondere die Kosten, die für den Ausbau von Stationen und Netzerweiterungen anfallen, werden derzeit nur grob abgeschätzt.

Die nachfolgende Arbeit soll die Aspekte der Ladeinfrastruktur untersuchen und in einer Szenarienrechnung bis 2030 beleuchten. Dabei soll der erwartete BEV-Bestand von PKW und leichten Nutzfahrzeugen (LNF) berücksichtigt werden. Des Weiteren soll die Anzahl und Leistung der benötigten Ladestellen ermittelt werden. Für den Netzbetreiber bzw. den Energieversorger ist die Gleichzeitigkeit der Ladestellennutzung bzw. der Leistungsgang (Leistungsverlauf) von großer Bedeutung, da die Stabilität des Netzes bzw. die Energieversorgung jederzeit (auch bei Spitzenlasten) gewährleistet sein muss. Der Leistungsgang ist daher eine wesentliche Größe, um die Auswirkungen des Ausbaus der Ladeinfrastruktur abschätzen zu können.

Aus diesem Grund werden die Auswirkungen auf das lokale Verteilernetz untersucht. Mit Hilfe verschiedener lokaler Netzmodelle für ein ländliches, klein- und großstädtisches Netz wird zusammen mit der zuvor ermittelten Nutzung der Ladestellen (Gleichzeitigkeit und Leistungsgang) die Belastung der lokalen Verteilernetze ermittelt. Dabei werden die Auswirkungen bis 2030 untersucht und der erwartete kritische BEV-Bestand (PKW und LNF) abgeleitet.

Abschließend werden die Kosten für die Errichtung von Ladeinfrastruktur, inkl. baulicher Maßnahmen und unter Berücksichtigung der gegebenenfalls erforderlichen Netzerweiterungen, abgeschätzt.

3 Methodik

Die Untersuchungen zur Ladeinfrastruktur sollen in dieser Arbeit am Beispiel Österreich erfolgen. Die methodische Vorgehensweise lässt sich dabei in vier Teilabschnitte gliedern. Zunächst muss eine **globale Betrachtung** (Betrachtung der gesamten PKW- und LNF-Flotte in Österreich) zur Ermittlung der BEV-Bestandsentwicklung sowie der Fahrleistung erfolgen. Die Betrachtung beschränkt sich auf PKW und LNF, da bei den schweren Nutzfahrzeugen aufgrund des hohen Energie- und Reichweitenbedarfs bis 2030 nur geringe BEV-Bestandszahlen zu erwarten sind. Des Weiteren werden nur reine BEV betrachtet.

In einem weiteren Schritt sollen die **lokalen Gegebenheiten** und Unterschiede, die sich in der Nutzung der Fahrzeuge ergeben, betrachtet werden. Dabei ist die Unterscheidung in die Bundesländer¹ und die größten Städte erforderlich, da das Mobilitätsverhalten hierbei stark voneinander abweichen kann. Des Weiteren sind Einflüsse von Demographie (Erwerbstätigkeit je nach Ort), Fahrtzweck, Jahreszeit, Wochentag und des Ladeverhaltens zu berücksichtigen. Zusätzlich soll der umgebungstemperaturabhängige Energieverbrauch, nach Ort und Kalenderwoche unterschieden, in die Berechnungen einfließen. Auf Basis dieser Parameter sollen die Gleichzeitigkeit der Ladestellennutzung sowie der Leistungsgang berechnet werden. Zur Hochrechnung des lokalen Mobilitätsverhaltens auf die gesamte PKW- und LNF-Flotte in Österreich soll die Gesamtfahrleistung aus dem globalen Modell dienen.

Die berechneten Leistungsdaten sollen anschließend in eine **Betrachtung des elektrischen Netzes** einfließen. Diese sollen in verschiedene lokale Netzmodelle, die die gegenwärtigen Verbrauchersituationen (z. B. Haushalte) abbilden, integriert werden. Damit sollen die Auswirkungen auf das Netz festgestellt werden, wobei insbesondere die kritische Netzbelastung bzw. der kritische BEV-Bestand bestimmt werden.

Die daraus resultierenden Ergebnisse sollen eine **Abschätzung der Kosten** der Ladeinfrastruktur ermöglichen. Hierbei ist neben dem Ausbau der Ladestellen die gegebenenfalls erforderliche Netzerweiterung zu berücksichtigen. Dabei sollen verschiedene Maßnahmen zur Behebung von Netzüberlastungen aufgezeigt werden.

¹ ohne die größten Städte: Wien, Graz, Linz, Salzburg, Innsbruck, Klagenfurt

Aus der beschriebenen Vorgehensweise lassen sich **vier Modelle** zur Bearbeitung des Themas bilden:

- Globales Modell
- Lokales Modell
- Netzmodell
- Kostenmodell

Eine schematische Darstellung der Modelle und deren Zusammenhänge sind in Abbildung 1 aufgezeigt.

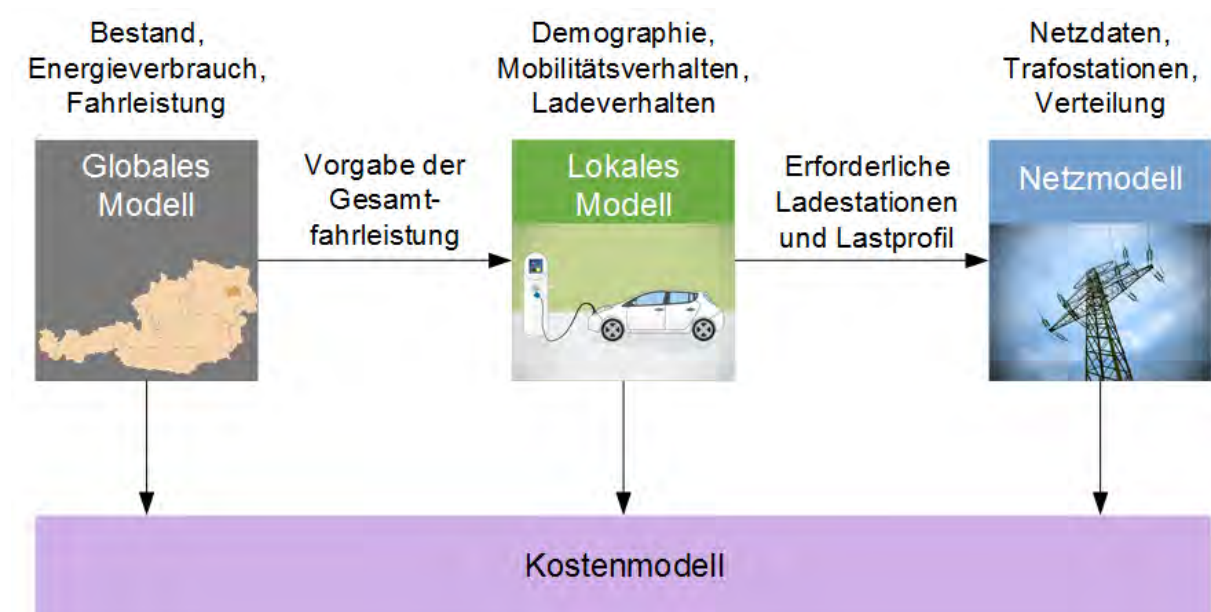


Abbildung 1 – Schematische Darstellung der Methodik und Unterteilung in 4 Modelle

4 Entwicklung der PKW- und LNF-Flotte

Für die Betrachtung der Ladeinfrastruktur sind die Anzahl der batterieelektrischen PKW und leichten Nutzfahrzeuge (BEV-Bestand) sowie deren Entwicklung maßgeblich. Des Weiteren ist die Gesamtfahrleistung eine wesentliche Eingangsgröße für den Energie- bzw. Ladebedarf. In diesem Kapitel werden die Eingangsparameter und Annahmen unter Betrachtung der österreichischen Flotte (globales Modell) gezeigt.

4.1 Entwicklung der Neuzulassungen

Für den Bedarf an Ladeinfrastruktur ist in erster Linie der Bestand an BEV wesentlich. In Tabelle 1 sind die Absolutwerte und die BEV-Anteile der Neuzulassungen und des Bestands von PKW und leichten Nutzfahrzeugen (LNF; Nutzfahrzeuge der Klasse 1) im Jahr 2017 eingetragen.

Tabelle 1 – Neuzulassungen und Bestand (absolut und in %) für PKW und LNF 2017

Jahr 2017	PKW abs.	PKW BEV %	LNF abs.	LNF BEV %
Neuzulassungen	353.320 [1]	1,5 [1]	40.174 [1]	0,6 [1], [2]
Bestand	4.898.578 [3]	0,3 [3]	403.984 [3]	0,4 [2], [3]

Aufgrund der sehr geringen Bestands- und Neuzulassungszahlen von BEV im Jahr 2017 ist der Bedarf an Ladeinfrastruktur derzeit ebenfalls gering. Zukünftig ist jedoch ein deutlicher Anstieg des BEV-Bestands, sowohl bei PKW als auch LNF, zu erwarten, weswegen auch der Bedarf an Ladestellen steigen wird. Um die zukünftigen BEV Bestandszahlen zu ermitteln, wurde das Programm PROVEM [4] verwendet. Dabei handelt es sich um ein Emissionsprognoseprogramm, das üblicherweise zur Emissionsberechnung der Fahrzeugflotte von Österreich und Deutschland verwendet wird (siehe auch [5] und [6]). Die Berechnung der Bestandsentwicklung ist ebenfalls in PROVEM integriert und wird in dieser Arbeit herangezogen. Eingangsparameter für die Berechnung der Bestandsentwicklung ist dabei eine Abschätzung der Entwicklung der Neuzulassungen bis 2030.

In Abbildung 2 sind die BEV-Anteile der Neuzulassungen von PKW und LNF aufgetragen. Der Ausgangswert 2017 entspricht den tatsächlichen Neuzulassungen im Jahr 2017. Für das Jahr 2018 konnten aufgrund des Publikationszeitpunktes keine endgültigen statistischen Daten verwendet werden. Die Prognose für 2018 wurde mit

der vorläufig veröffentlichten Statistik für 2018 (nach [7]) verglichen. Die Zahlenwerte decken sich dabei sehr gut. Ausgehend von der Prognose der Neuzulassungen wird mit einem in [4] eingebetteten Alterungs- und Ausscheidemodell der Flotte die Bestandsentwicklung berechnet.

Beim PKW wird erwartet, dass sich zukünftig neben anderen alternativen Antrieben und Kraftstoffen ein hoher Anteil an BEV-Neuzulassungen einstellen wird. In Hinblick auf die angekündigten Modelle großer Automobilhersteller ist das Wachstum anfangs etwas geringer und steigt dann mit der sukzessiven Markteinführung zahlreicher Modelle an. Im Jahr 2030 werden beim PKW 26 % BEV-Neuzulassungen in Österreich erwartet, was sich mit der Neuzulassungsprognose in [8] sehr gut deckt.

Beim LNF sind die Anwendungsgebiete sehr vielfältig und erfordern dabei hinsichtlich Antrieb eine entsprechende Flexibilität, z. B. in der Reichweite. Daher wird davon ausgegangen, dass sich gegenüber der PKW-Prognose vorerst andere alternative Antriebe und Kraftstoffe in den Vordergrund stellen und sich ein konservativeres Wachstum der BEV-Neuzulassungen ergibt. Bei den LNF werden im Jahr 2030 16 % BEV-Neuzulassungen erwartet.

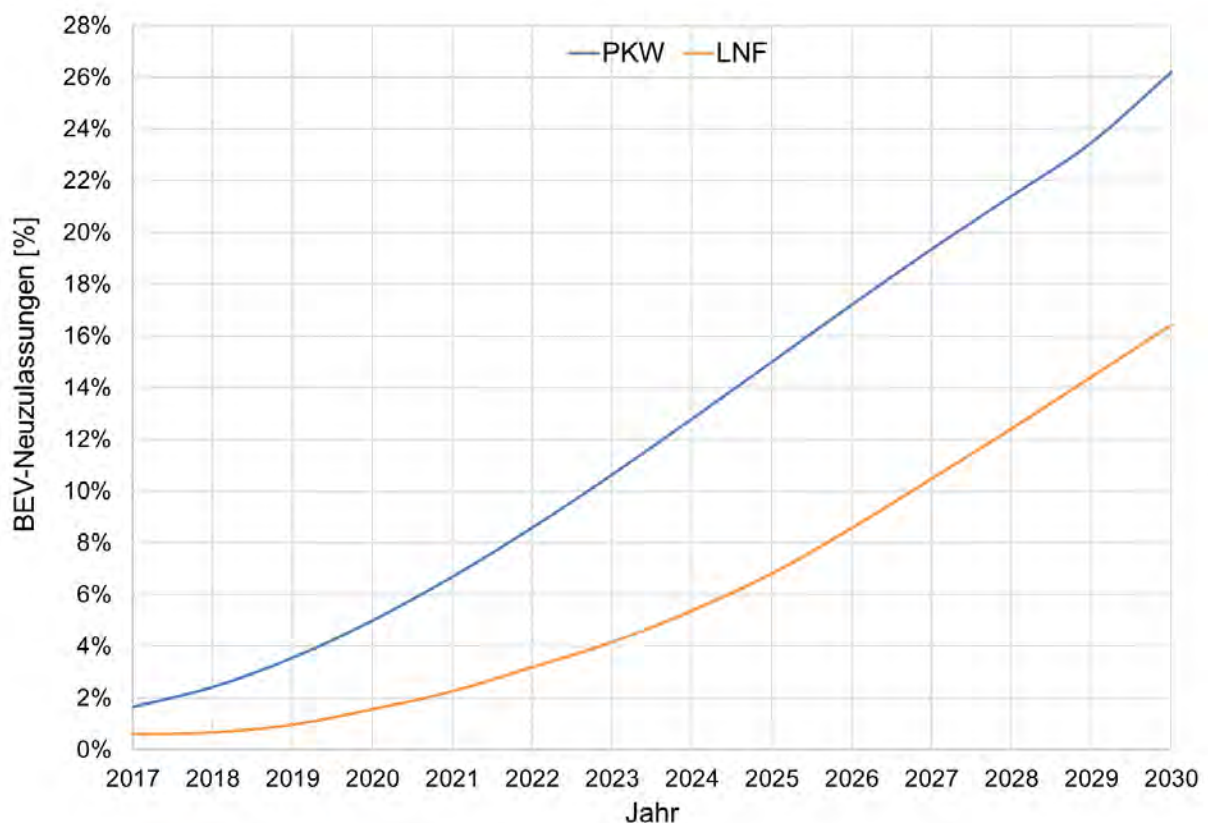


Abbildung 2 – Anteil an BEV an den PKW- und LNF-Neuzulassungen

4.2 Entwicklung des Bestands

Aus den erwarteten Entwicklungen der Neuzulassungen wird mittels [4] der BEV-Bestand berechnet. Das Ergebnis der Berechnungen ist als Anteil des Gesamtbestands (PKW bzw. LNF) in Abbildung 3 dargestellt. Die Bestandsprognose im Jahr 2018 stimmt sehr gut mit der vorläufigen Statistik 2018 (nach [9]) überein.

Es ist zu erkennen, dass der Bestand eine deutlich verzögerte Reaktion auf Änderungen der Neuzulassungsanteile aufweist. Dies ergibt sich aufgrund der zahlreichen bestehenden Fahrzeuge und deren Ausscheiderate. Der **BEV-Bestandsanteil bis 2030** ist beim **PKW (ca. 11 %)** deutlich höher als beim **LNF (ca. 6,5 %)**, jedoch sind beide Bestandsanteile gering. Es wird erwartet, dass die deutliche Mehrheit bis 2030 auf Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren fällt, wobei diese einen zunehmenden Grad an Elektrifizierung (Hybrid- & Plug-In-Antriebe) aufweisen werden.

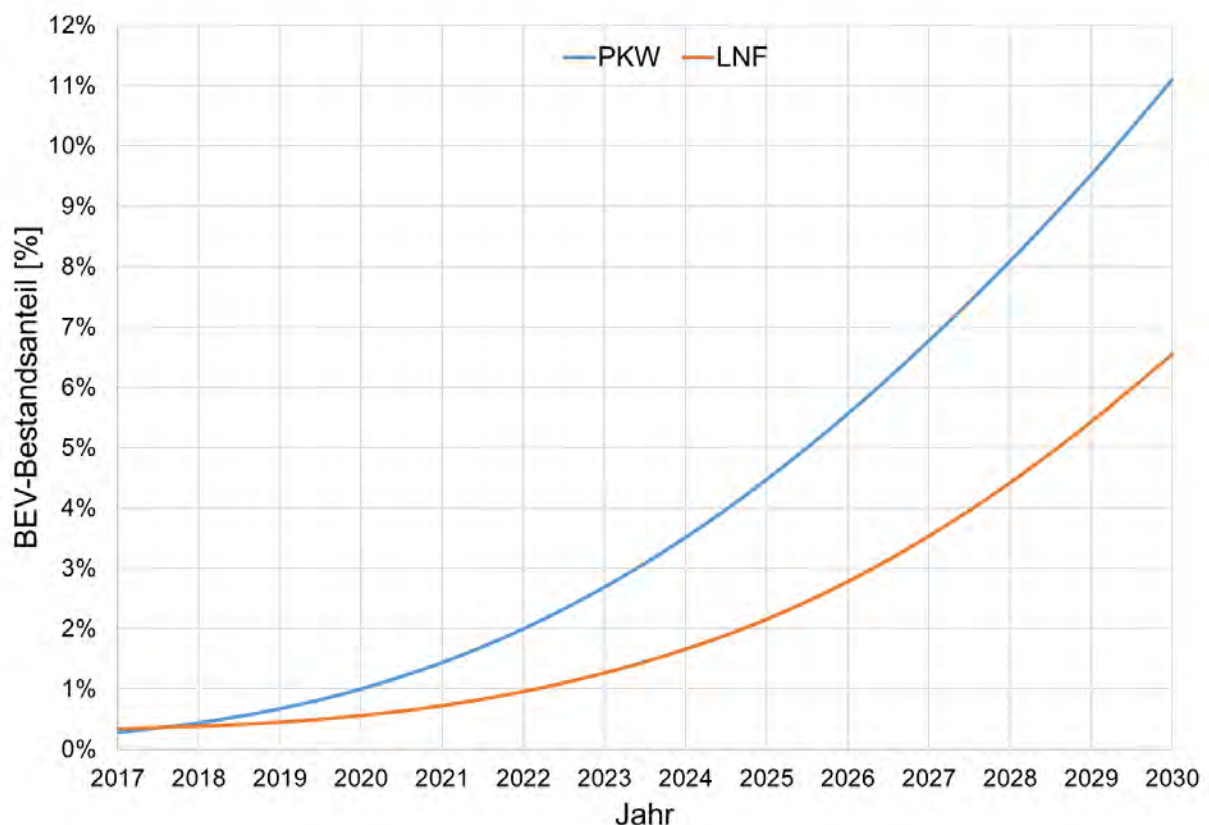


Abbildung 3 – Entwicklung des Bestandsanteils von BEV PKW und LNF

4.3 Gesamtfahrleistung

In [4] ist ein Modell zur Ermittlung der Gesamtfahrleistung der Flotte hinterlegt, wobei sehr detailliert in verschiedene Antriebsarten (z. B. Benzin und Diesel) sowie Abgasklassen (EURO und ältere) unterschieden wird.

Die aus [4] entnommene Gesamtfahrleistung der PKW-Flotte im Jahr 2017 beträgt rund 63 Mrd. km, was einer Jahresfahrleistung von ca. 12.900 km pro Fahrzeug entspricht. Beim LNF beträgt die Gesamtfahrleistung (nach [4]) im Jahr 2017 rund 7,5 Mrd. km bzw. die Jahresfahrleistung eines Fahrzeuges ca. 18.600 km.

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass sich das Nutzungsverhalten durch den Einsatz von BEV, sowohl zeitlich als auch bezüglich der Fahrleistung, bis 2030 nicht ändert. Damit wird sichergestellt, dass dem E-Fahrzeug keine Einschränkungen zugeordnet werden, was langfristig in Hinblick auf Praktikabilität, Komfort und Kundenakzeptanz erforderlich ist. Bezüglich der Fahrleistung bedeutet das, dass die Fahrleistung eines BEV in dieser Arbeit jener eines durchschnittlichen PKW bzw. LNF entspricht.

5 Aufbau der Datenbasis und des Berechnungsmodells

Das lokale Modell soll das Nutzungsverhalten der PKW- und LNF-Nutzer auf lokaler Ebene möglichst detailliert abbilden. Dabei wird insbesondere im Mobilitätsverhalten, der Demographie (Erwerbstätigkeit nach Ort), im Ladeverhalten und im Energieverbrauch nach den örtlichen Gegebenheiten differenziert. Die dabei angestrebte Tiefe der Abbildung soll lokale Auswertungen auf Stadt- oder Dorfebene ermöglichen, um in weiterer Folge den Bedarf an Ladestellen sowie die Auswirkungen auf das lokale Verteilernetz abzuschätzen. Aufgrund dieser Darstellungstiefe und der umfangreichen Datenbasis ist es zweckmäßig, die vorliegenden Daten in Kategorien einzuteilen, was nachfolgend gezeigt werden soll. Des Weiteren soll ein Überblick über den Aufbau des lokalen Berechnungsmodells geboten werden.

5.1 Einteilung der Datenbasis

Bevor die Berechnung in den nachfolgenden Kapiteln im Detail gezeigt wird, sollen zunächst die Kategorien vorgestellt werden, in die die Datenbasis eingeteilt wird. Diese sind in Abbildung 4 aufgelistet. Es wird in 6 Hauptkategorien (farblich gekennzeichnet) und in die jeweiligen Untergruppen differenziert. Die Wahl der Kategorien ergibt sich aufgrund der umfangreichen Datenbasis des PKW-Mobilitätsverhaltens (siehe Kapitel 7.1.1), welche in dieser Detailliertheit vorliegt und für die sich diese Einteilung als zweckmäßig erwiesen hat.

Der **Wohnort** einer Person, die eine Fahrt tätigt, wird in 8 Bundesländer und die 6 größten Städte unterschieden.

Die **Jahreszeiten** Österreichs werden den 52 Kalenderwochen (KW) eines Kalenderjahres folgendermaßen zugeordnet:

- KW 52 - KW 12: Winter
- KW 13 - KW 25: Frühling
- KW 26 - KW 38: Sommer
- KW 39 - KW 51: Herbst

Diese Einteilung ist notwendig, da einige Daten nach Jahreszeiten unterschieden werden, während manche Berechnungen auf Wochenebene stattfinden. Die

Kalenderwochen werden anhand der Jahreszeitenanfänge im Jahr 2017 festgelegt, wobei die Anzahl der Wochen für jede Jahreszeit gleich gesetzt wurde.

Der **Tag** spielt insbesondere im Mobilitätsverhalten eine große Rolle und wurde daher in Wochentage (Montag - Donnerstag), Freitag und Wochenendtage unterschieden.

Der **Personentyp** wurde entsprechend der Demographie (Erwerbstätigkeit nach Ort) in 4 Kategorien unterteilt, wobei die Kategorie Schüler alle Personen unter 15 Jahren sowie alle weiteren Schüler, Schülerinnen und Studierenden beinhaltet. Zu Erwerbspersonen werden Erwerbstätige und Arbeitslose gezählt. Die Kategorien Pensionierte und Sonstige beinhalten eben diese Personen.

Die Differenzierung nach **Zweck** erfolgt in 9 Unterpunkte. Der Zweck der Arbeit beschreibt grundsätzlich den Weg zur Arbeit oder zum öffentlichen Verkehrsmittel (P & R) bzw. jede Strecke, die primär das Ziel zur Erreichung des Arbeitsplatzes hat. Die dienstliche Fahrt unterscheidet sich vom Zweck der Arbeit dadurch, dass hier die Ausübung der Arbeit selbst gemeint ist, beispielsweise eine Dienstreise. Unter der Kategorie Bringen ist das Bringen oder Holen von Personen zu verstehen. Die restlichen Kategorien sind selbsterklärend.

Der **Zielort** ist wegen des Ortes der Aufladung wesentlich. Hier wird in 3 Punkte unterschieden. Heim bezeichnet den eigenen Stellplatz (Privat oder Mehrparteienhaus), Straßenrand etc., der den typischen Stellplatz bei oder in der Nähe des eigenen Heims darstellt. Das Ziel ist jeglicher Ort, der nicht der eigene Stellplatz ist, sich jedoch innerhalb des Wohnortes (Bundesland oder große Stadt) befindet. Unter Gast ist ein Zielort außerhalb des eigenen Wohnortes (Bundesland oder große Stadt) zu verstehen, was häufig auf Pendler zutrifft.

Wohnort	Jahreszeit	Tag	Personen- typ	Zweck	Zielort
Bgld.	Frühling	Wochentag	Schule	Arbeit	Heim
Ktn.	Sommer	Freitag	Erwerb	Dienst	Ziel
NÖ	Herbst	Wochenende	Pension	Schule	Gast
OÖ	Winter		Sonstige	Bringen	
Sbg.				Einkauf	
Stmk.				Erledigung	
T				Freizeit	
Vbg.				Besuch	
Wien				Sonstige	
Graz					
Linz					
Salzburg					
Innsbruck					
Klagenfurt					

Abbildung 4 – Kategorien im lokalen Modell

Die Unterscheidung in die gezeigten Kategorien findet statt, sofern die Datenlage eine Differenzierung erlaubt. Beim Mobilitätsverhalten der PKW-Nutzer ist eine detaillierte Kategorisierung aufgrund der Datenlage durchführbar. Beim LNF sind aufgrund der eingeschränkten Datenlage weniger Kategorien möglich (siehe Kapitel 7.1.2).

5.2 Aufbau des lokalen Berechnungsmodells

Eine vollständige Darstellung des lokalen Berechnungsmodells ist aufgrund dessen Komplexität nicht in übersichtlicher Form möglich. Es ist daher in Abbildung 5 eine auf die wichtigsten Berechnungsvorgänge reduzierte Darstellung zu sehen.

In einem ersten Schritt wird aus den verfügbaren Daten des Mobilitätsverhaltens (Kapitel 7.1) ein Streckendatensatz für PKW und LNF abgeleitet. Der Streckendatensatz stellt einen für diese Arbeit vorbereiteten Datensatz dar und beinhaltet jene Fahrtdaten, die für die weiteren Berechnungen sowie zur Unterteilung in die gezeigten Kategorien (Ankunftszeitpunkt, zurückgelegte Strecke, Wohnort etc.) erforderlich sind. Es werden nur Fahrten aus der Mobilitätsdatenbasis verwendet, die für die Betrachtung von BEV PKW & LNF relevant sind (keine anderen Verkehrsmittel, keine unvollständigen Daten). Die Ableitung des Streckendatensatzes ist in Kapitel 7.2 zu finden.

Aus dem Streckendatensatz wird anschließend der Ankunftszeitplan (Kapitel 8.4) erstellt. Jede der in Kapitel 5.1 gezeigten Kategorien erhält einen eigenen Ankunftszeitplan. Dieser stellt eine Art „Terminplan“ für einen Tag in Viertelstundenauflösung dar, in den alle Fahrten aus dem Streckendatensatz zur jeweiligen Ankunftszeit

eingetragen werden. Die Ankunftszeit entspricht in dieser Arbeit dem Ladebeginn und ist daher von großer Bedeutung für die Gleichzeitigkeit und den Leistungsgang. Dabei werden die zurückgelegte Strecke und die statistische Gewichtung eingetragen, die zur Berechnung der Ladezeit benötigt werden. Der Ankunftszeitplan hat den Zweck der Rechenzeitreduktion und der Vereinheitlichung des Datenformats von PKW & LNF.

Parallel dazu wird der Verbrauch nach Ort und Kalenderwoche berechnet, der zur Berechnung der Ladedauer benötigt wird. Dies erfolgt mit Hilfe des umgebungs-temperaturabhängigen Verbrauchs und mit verarbeiteten Temperaturdaten von Messstellen der ZAMG (siehe Kapitel 6).

Mit dem Ankunftszeitplan und dem Verbrauch werden die Ladezeiten der einzelnen Fahrten berechnet. Durch Überschneidung der einzelnen Ladevorgänge lässt sich die Gleichzeitigkeit der Ladung und daraus der Leistungsgang (Leistungsverlauf) für ein ganzes Jahr ermitteln. Diese Berechnung ist entsprechend der zuvor gezeigten Kategorien sehr umfangreich. Eine detaillierte Beschreibung ist in Kapitel 8 zu finden.

Aus den Berechnungen der Gleichzeitigkeit bzw. des Leistungsgangs resultiert zusätzlich die Gesamtfahrleistung (auf Basis des Mobilitätsverhaltens) für Österreich. Da sich die so ermittelte Gesamtfahrleistung aus dem lokalen Modell im Allgemeinen von der des globalen Modells (Flottenbetrachtung in Kapitel 4.3) unterscheidet, wird mit Hilfe eines Fahrleistungsfaktors das lokale Modell entsprechend angepasst.

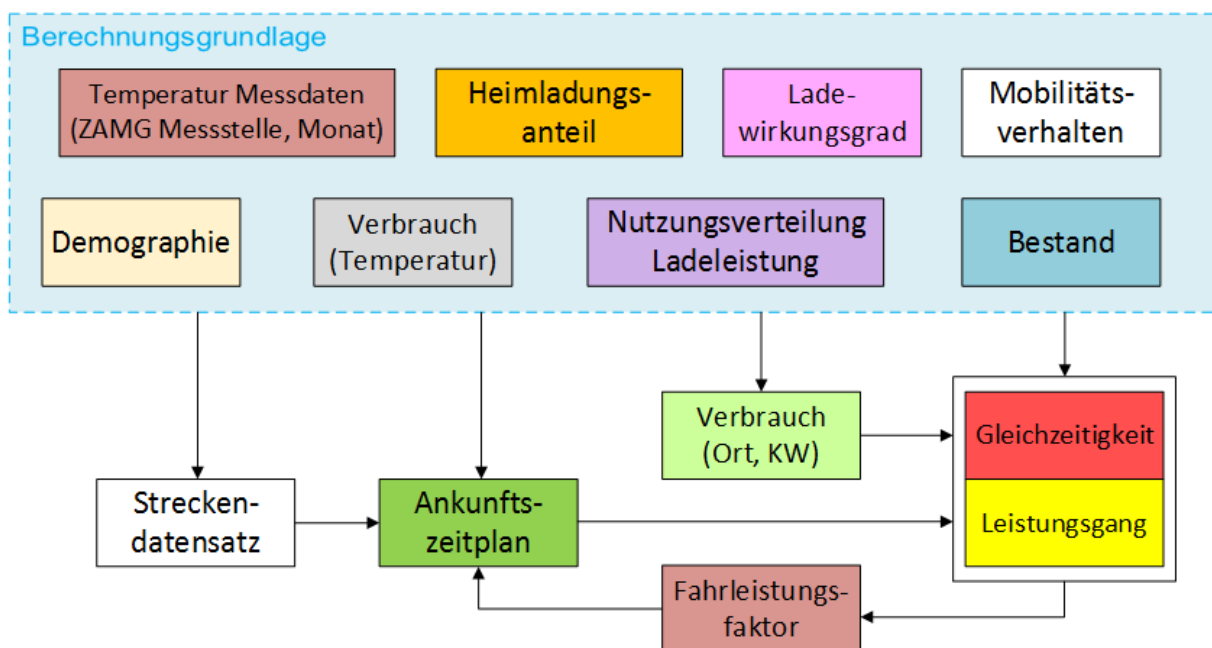


Abbildung 5 – Schema des lokalen Berechnungsmodells

6 Energieverbrauch eines BEV

Zur Berechnung des Leistungsgangs (Leistungsverlaufs) und der Gleichzeitigkeit (Anzahl gleichzeitig durchgeführter Ladungen) wird der Energieverbrauch eines BEV benötigt. Im nachfolgenden Kapitel sollen die Einflussgrößen, die lokalen Unterschiede des Verbrauchs (Umgebungstemperatur je nach Ort) und deren Berechnung gezeigt werden.

6.1 Durchschnittlicher Verbrauch nach Umgebungstemperatur

Der Energieverbrauch eines Fahrzeuges ist grundsätzlich stark von dem zu Grunde liegenden Fahrzyklus, der Fahrweise, den Eigenschaften des Fahrzeuges selbst, der Beladung sowie Umwelteinflüssen wie der Umgebungstemperatur und anderen Faktoren abhängig. Um die verbrauchte Energie am Ende einer Fahrt berechnen zu können, wird der durchschnittliche Energiebedarf eines BEV benötigt, wobei nach der Umgebungstemperatur unterschieden werden soll. Gerade bei tiefen Temperaturen, wie in den Wintermonaten, ist der Energiebedarf eines BEV wesentlich höher als bei milderen Temperaturen, beispielsweise im Frühling. Nachfolgend soll die Berechnungsgrundlage zur Ermittlung des Energieverbrauchs gezeigt werden.

6.1.1 Energieverbrauch eines batterieelektrischen PKW

In [10] wurden einige BEV einem Praxistest unterzogen. Dabei wurde im Eco-Test (Abbildung 6) [11], der einer moderaten Realfahrt entspricht, unter verschiedenen Steigungen und Temperaturen der Energieverbrauch der E-Fahrzeuge gemessen.

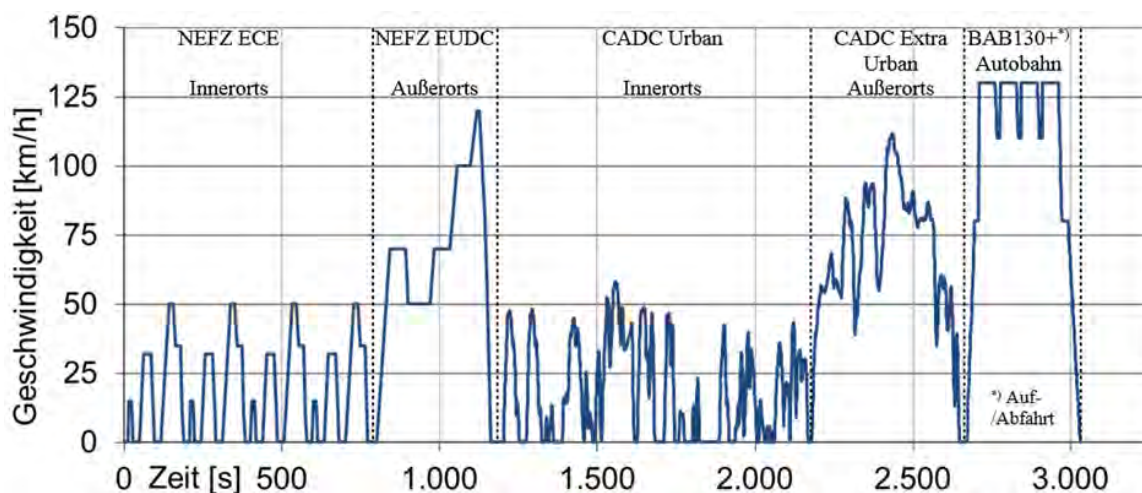


Abbildung 6 – Eco-Test Fahrzyklus zur Abbildung einer moderaten Realfahrt [11],
[eigene Darstellung]

Die Ergebnisse der Messungen sind über die vermessenen Fahrzeuge gemittelt und inkl. Ladewirkungsgrad in Abbildung 7 nach der Fahrsituation aufgelistet. Diese gemittelten Werte repräsentieren ein durchschnittliches BEV unter verschiedenen Realfahrsituationen sowie konstanten Geschwindigkeiten. Zusätzlich zum Eco-Test wurde auch ein Stopp-and-Go Zyklus gemessen. Es lässt sich erkennen, dass insbesondere hohe Geschwindigkeiten, und daher der Autobahnanteil, einen großen Einfluss auf den Energieverbrauch haben.

Ein weiterer großer Einflussparameter auf den Verbrauch ist die Umgebungstemperatur. Bei niedrigen Temperaturen sind sowohl die Fahrwiderstände, beispielsweise durch die erhöhte Luftdichte, als auch die Heizleistung zur Erwärmung des Innenraumes und gegebenenfalls auch der Batterie, erhöht, was einen signifikanten Einfluss auf den Energieverbrauch mit sich bringt [10]. Der temperaturabhängige Verbrauch im Eco-Test ist in Abbildung 8 aufgetragen. Die relative Verbrauchsänderung nach der Temperatur in [10] deckt sich mit den Ergebnissen aus [12] und [13]. Das Absolutniveau des Durchschnittsverbrauchs bei 20 °C liegt in [10] auf demselben Wert wie der Durchschnitt aus [14], [15] und [16]. Es werden daher für den PKW-Verbrauch nach der Temperatur die Werte aus [10] verwendet.

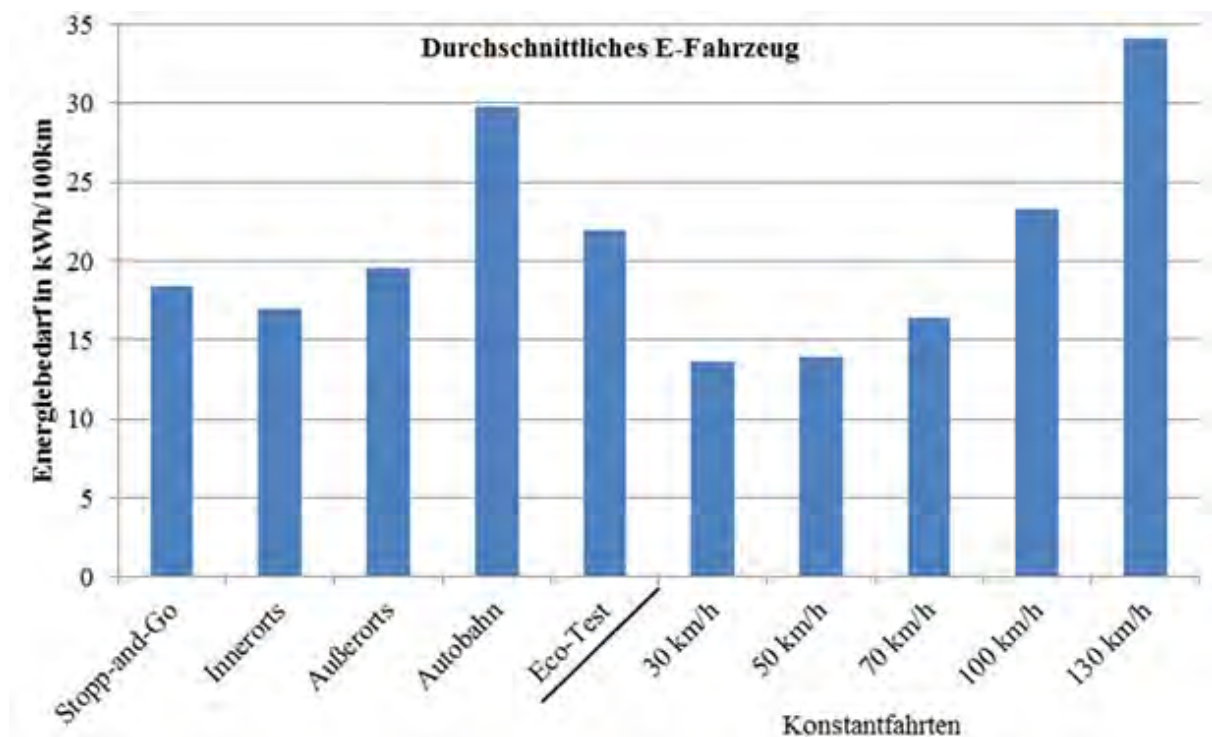


Abbildung 7 – Energiebedarf eines durchschnittlichen E-Fahrzeuges in Abhängigkeit von der Fahrsituation bei einer Fahrbahnneigung von +/-2 % und 20 °C Umgebungstemperatur (ohne Heizung und ohne Klimaanlage) [10]

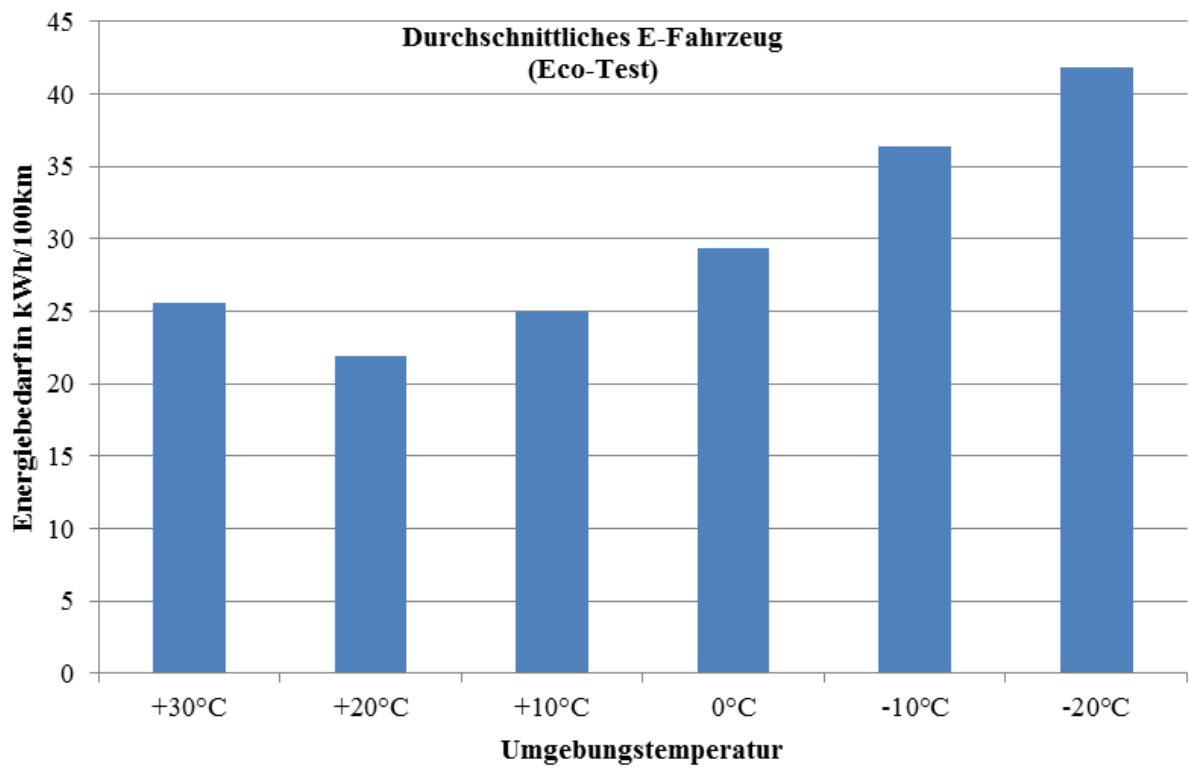


Abbildung 8 – Energiebedarf eines durchschnittlichen E-Fahrzeuges in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur im Eco-Test bei einer Fahrbahnneigung von +/-2 % inkl. Heizung bzw. Klimaanlage und Ladeverluste [10]

6.1.2 Energieverbrauch eines batterieelektrischen leichten Nutzfahrzeuges

Die Verbrauchswerte bei den leichten Nutzfahrzeugen (LNF) sind sehr stark von der Anwendung abhängig. Während ein Überlandtransporter mit gekühltem Laderaum einen erhöhten Energieverbrauch aufweist, wird dieser bei einem Paketdienst im städtischen Bereich ohne besondere Heizung und Kühlung niedriger liegen.

In [17] wurde der Energieverbrauch verschiedener alternativer Antriebskonzepte und Fahrzeugkategorien analysiert. Für das LNF wird ein mittlerer Verbrauch von 49 kWh/100km angegeben, wobei keine Heizung bzw. Klimatisierung oder temperaturabhängige Fahrwiderstände berücksichtigt wurden. Um die Verbräuche auch beim LNF nach Ort und Kalenderwoche (lokale und zeitliche Temperaturunterschiede) unterscheiden zu können, wird der temperaturabhängige Verbrauch benötigt. Dafür wird eine Fahrzeuglängsdynamik-Simulation des LNF bei verschiedenen Temperaturen durchgeführt.

Zur Berechnung wird dasselbe Fahrzeuglängsdynamik-Simulationsmodell (siehe Abbildung 9) wie bei der Sensitivitätsanalyse des PKW (siehe Kapitel 13.1.4) verwendet, jedoch mit anderen Fahrwiderstandswerten. Die Ermittlung der Fahrwiderstandsdaten des LNF erfolgt ausgehend von den Werten des PKW mit Hilfe von Fahrzeuglängsdynamik-Simulation und recherchierter Daten (siehe unten). Damit die Fahrwiderstände ermittelt werden können, wird der Verbrauch bei 20 °C (ohne Temperaturabhängigkeit) benötigt, welcher mit 49 kWh/100km nach [17] festgelegt wird. Als Fahrzyklus wird wie beim PKW der Eco-Test [11] verwendet.

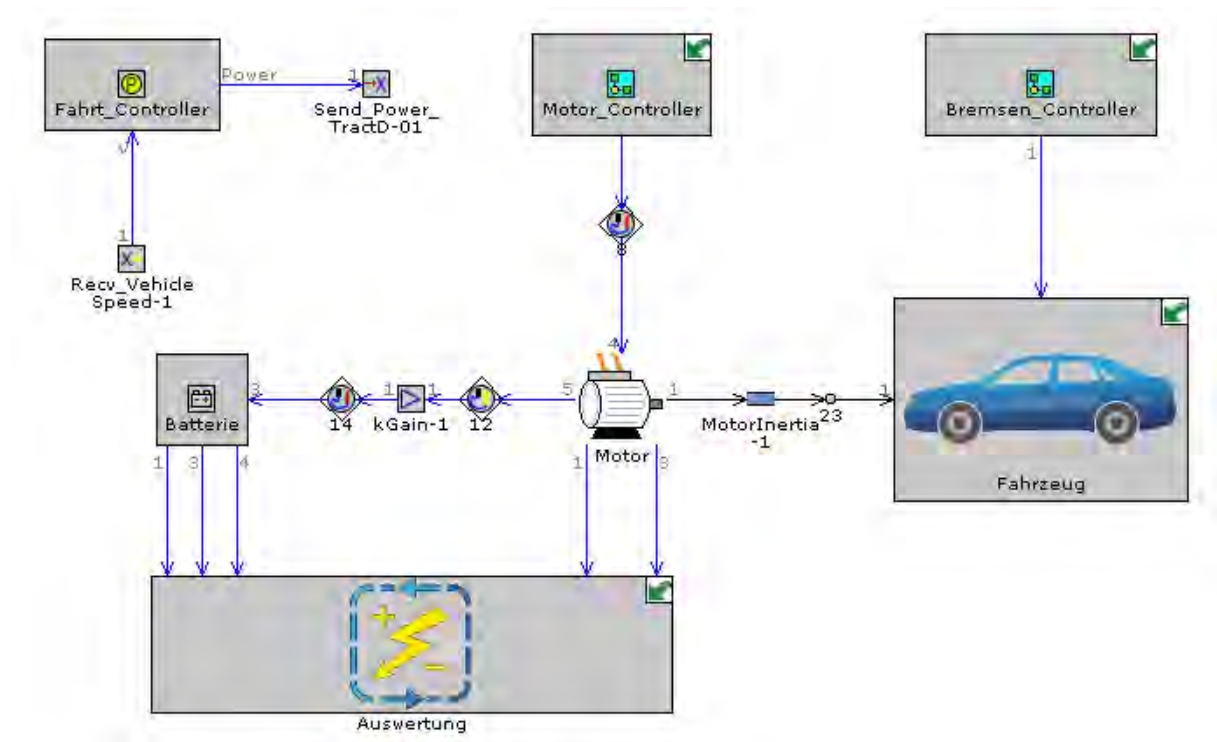


Abbildung 9 – Fahrzeuglängsdynamik-Simulationsmodell (Schema) in GT-Suite

Die weiteren benötigten Daten sind:

- Fahrzeuggesamtgewicht
- Rollwiderstandsbeiwert
- Projizierte angeströmte Fläche
- Luftwiderstandsbeiwert

Um den oben gezeigten Verbrauch aus [17] zu erzielen, wird mit dem Fahrzeuggewicht aus [17] (LNF BEV) gerechnet. Dieses beträgt 2.500 kg (leer) bis 3.500 kg (voll). Als mittlerer Beladungszustand wird 3.000 kg verwendet.

Für den Rollwiderstandsbeiwert wird aufgrund der Ähnlichkeit der Fahrzeugarten derselbe Wert für PKW und LNF verwendet. Dieser ergibt sich aus der Fahrzeuglängsdynamik-Simulation des PKW (Kapitel 13.1.4) zu 0,012.

Im Simulationsmodell wird für die projizierte angeströmte Fläche 4,7 m², berechnet aus den Abmessungen des Mercedes Sprinter (3,5 t, hohe Version) nach [18], gewählt.

Der Luftwiderstandsbeiwert c_w ergibt sich nun aus der Längsdynamik-Simulation, wobei der Verbrauch von 49 kWh/100km bei 3.000 kg (mittlere Beladung) erzielt werden soll. Das Ergebnis der Simulation ist der c_w -Wert von 0,332, was sich gut mit Literaturwerten, wie in [19], deckt.

Die Fahrwiderstandsdaten (bei 20 °C) sind daher:

- Fahrzeuggesamtgewicht: 2.500 - 3.000 - 3.500 kg (leer - mittel - voll)
- Rollwiderstandsbeiwert: 0,012
- Projizierte angeströmte Fläche: 4,7 m²
- Luftwiderstandsbeiwert: 0,332

Auf Basis dieser Werte erfolgt die Berechnung des Temperatureinflusses. Dabei werden sowohl die Luftdichte als auch der Rollwiderstandsbeiwert je nach Temperatur variiert.

Für die Luftdichte ist in GT-Suite eine temperaturabhängige Berechnung hinterlegt. Die Luftdichte nimmt mit abnehmender Temperatur zu, sodass ein höherer Luftwiderstand bei tiefen Temperaturen zu erwarten ist.

Der Rollwiderstandsbeiwert erhöht sich bei niedrigeren Temperaturen. Die Änderung kann gemäß ISO 28580 mit

$$f_{r25} = f_r \cdot [1 + K_t \cdot (t_u - 25)] \quad (1)$$

berechnet werden. Dabei ist f_r der Rollwiderstandsbeiwert je nach Umgebungstemperatur t_u (in °C). Mit K_t wird ein Faktor eingeführt, der den Anstieg der Kurve reguliert. Dieser ist nach ISO 28580 bei PKW-Reifen mit 0,008 zu wählen. Da in dieser Arbeit die Reifen von PKW und LNF als gleich betrachtet werden, ist der genannte Wert zu verwenden. Bei f_{r25} handelt es sich um den Rollwiderstand bei 25 °C, welcher sich in dieser Arbeit zu 0,0115 ergibt, um bei 20 °C die vorgegebenen 0,012 zu erzielen.

Die temperaturabhängigen Werte für Luftdichte und Rollwiderstandsbeiwert fließen in das zuvor gezeigte Längsdynamik-Modell ein. Dabei werden in 10 °C Schritten von -20 °C bis +30 °C jeweils 3 Simulationen (für die Beladungszustände leer, mittel, voll) durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulationen werden für jede Temperatur gemittelt (gleiche Gewichtung aller Beladungszustände).

Die Ergebnisse der Längsdynamik-Simulation berücksichtigen noch keinen Energiebedarf durch die Heizung/Kühlung bzw. das 12 Volt System (Gebläse). Für diese Verbraucher werden Werte aus [10] (von PKW) verwendet, wobei die Unterschiede zwischen PKW und LNF hierbei vernachlässigt werden.

Das Ergebnis der Simulationen inkl. Heizung/Kühlung (inkl. 12 Volt System) und unter Berücksichtigung des Ladewirkungsgrades von 84 % (siehe Kapitel 8.2) ist in Abbildung 10 zu sehen. Es ist ein ähnlicher Verlauf wie beim BEV PKW zu erkennen, jedoch ergibt sich bei 30 °C ein niedrigerer Verbrauch als bei 20 °C. Dies ist auf den höheren Einfluss der Fahrwiderstände im Vergleich zur Heizung/Kühlung beim LNF zurückzuführen. Die hier gezeigten Verbräuche werden zur Berechnung der Verbräuche nach Ort und KW für das LNF verwendet.

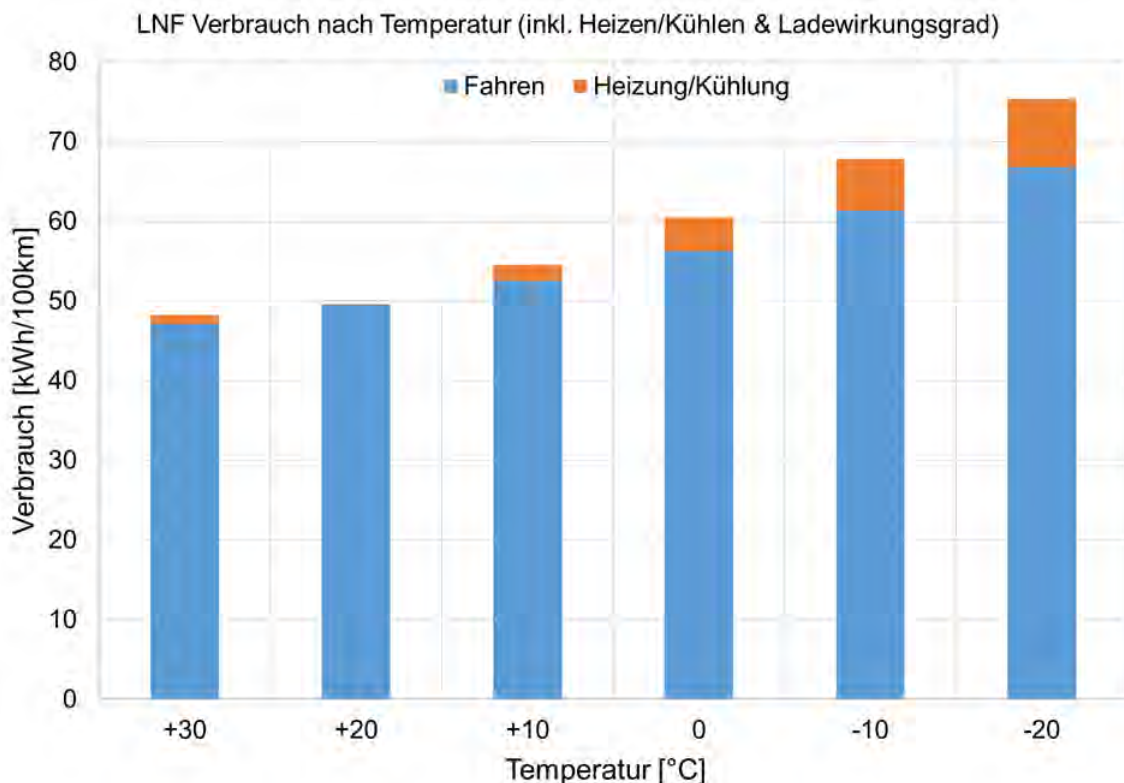


Abbildung 10 – Energiebedarf eines elektrischen leichten Nutzfahrzeuges (LNF) im Eco-Test inkl. Heizung/Kühlung (inkl. Gebläse) und Ladewirkungsgrad bei verschiedenen Umgebungstemperaturen

6.2 Temperaturverlauf nach Ort und Kalenderwoche

Für den Verbrauch spielen die lokalen Temperaturverhältnisse zum Zeitpunkt der Fahrt eine große Rolle. Um den Verbrauch möglichst realitätsnah abbilden zu können, muss daher die Temperatur nach Ort und nach Zeit (Woche bzw. Monat) berücksichtigt werden.

Die dafür benötigten Daten wurden von ca. 250 Messstellen der ZAMG bezogen und sind in [20] zu finden. Eine Liste der verwendeten Messstellen ist im Anhang 16.1 zu finden. In Tabelle 2 sind die Daten einer Messstelle (Bruckneudorf) auszugsweise dargestellt. Für die Berechnung wurden Daten aus dem Jahr 2016 verwendet.

Tabelle 2 – Auszug der Temperatur-Messdaten einer Messstelle für zwei Monate [20]

Station	Parameter	Jän,16	Feb,16
Bruckneudorf	Mittelwert der Lufttemperatur um 07 MEZ (°C)	-1,1	4,3
Bruckneudorf	Mittelwert der Lufttemperatur um 14 MEZ (°C)	1,8	8,2
Bruckneudorf	Mittelwert der Lufttemperatur um 19 MEZ (°C)	-0,1	6,5
Bruckneudorf	Mittelwert der Lufttemperatur (°C)	-0,3	5,9
Bruckneudorf	absolutes Maximum der Lufttemperatur (°C)	14,8	17,6
Bruckneudorf	absolutes Minimum der Lufttemperatur (°C)	-10,3	-1,7

Um einen durchschnittlichen Verbrauch berechnen zu können, müssen zunächst Temperaturen ausgewählt werden, die für die meisten Fahrten repräsentativ sind. Dies ist durch die Monatsauflösung der Daten zusätzlich erschwert, da tägliche und stündliche Schwankungen nicht abgebildet werden können.

Temperaturmaximum und -minimum treten nur zu jeweils einem Zeitpunkt im Monat auf, weswegen diese für die meisten Fahrten wenig repräsentativ sind. Der Monatsmittelwert beinhaltet zu gleichen Teilen auch Temperaturen zu Zeiten, bei denen kaum Fahrten auftreten, was für die Berechnung eines durchschnittlichen Verbrauchs suboptimal ist. Zur Verbrauchsermittlung sollten daher Temperaturen gewählt werden, bei denen die meisten Fahrten auftreten. In Kapitel 7.1.1 wird aus dem Mobilitätsverhalten österreichischer PKW-Fahrer (nach [21]) ein Streckendatensatz abgeleitet, der auch die Abfahrts- und Ankunftszeiten beinhaltet. In Abbildung 11 ist die Verteilung dieser Zeiten und deren Mittelwert (Mittel der Fahrt) zu sehen. Es ist zu erkennen, dass im Mittel rund 82 % der Fahrten zwischen 7 und 19

Uhr stattfinden. Die in Tabelle 2 gezeigten Uhrzeitmittelwerte der Temperaturen (7, 14 und 19 Uhr) sind daher für die meisten Fahrten repräsentativ, weswegen diese zur Ermittlung von 3 repräsentativen Verbräuchen (für die jeweilige Uhrzeit) verwendet werden.

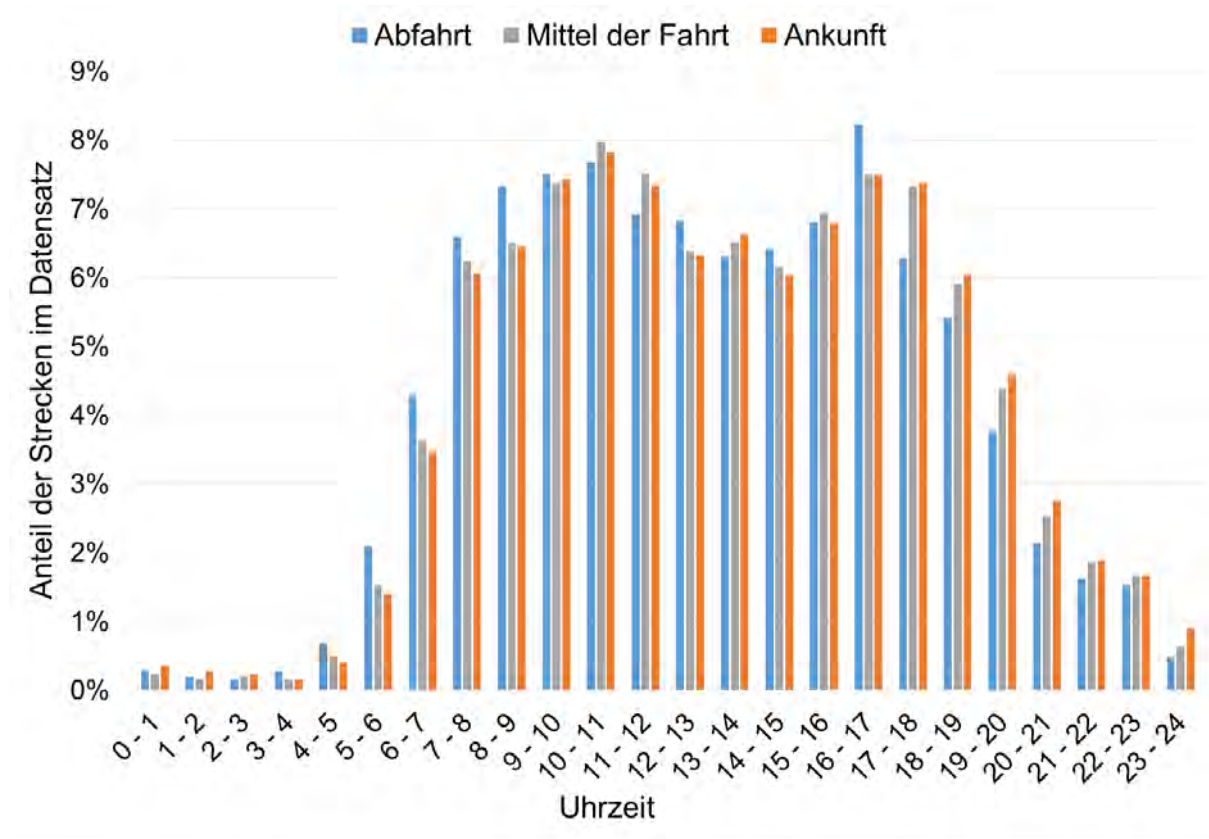


Abbildung 11 – Aufteilung der Abfahrts- und Ankunftszeiten sowie des Mittels der Fahrt

6.3 Berechnung des Verbrauchs nach Ort und Kalenderwoche

Wie bereits erwähnt, ist es zweckmäßig, den Energieverbrauch eines BEV nach Ort und Kalenderwoche (KW) zu unterscheiden. Diese Unterscheidung erfolgt zur Berücksichtigung der Umgebungstemperatur des jeweiligen Ortes.

In Abbildung 12 ist die Berechnung des Verbrauchs nach Ort und KW schematisch dargestellt. Als Eingangsparameter dienen die Berechnungsgrundlagen aus Kapitel 6.1 und Kapitel 6.2.

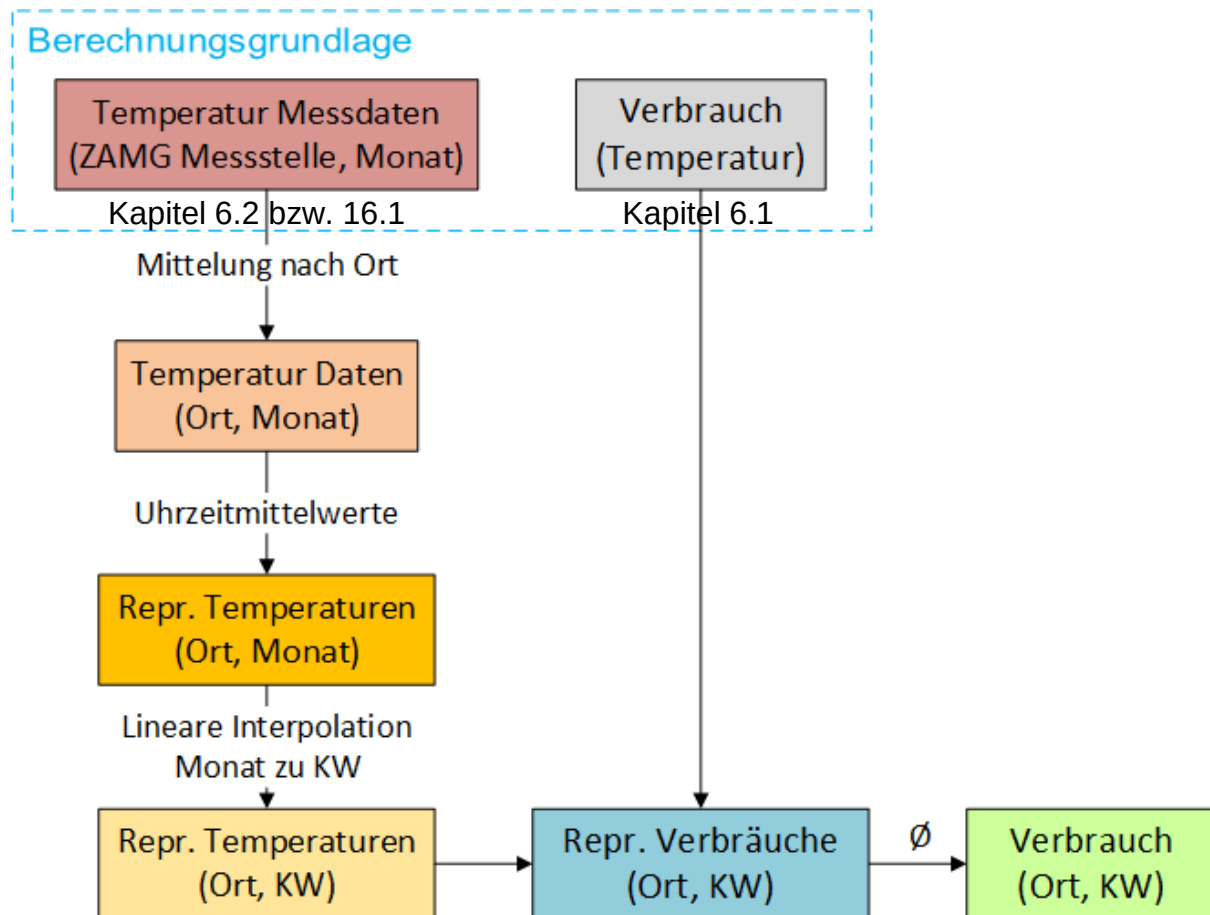


Abbildung 12 – Schema zur Verbrauchsermittlung nach Ort und KW

Ausgehend von den **Temperatur-Messdaten** der einzelnen Messstellen (ZAMG), die als Monatswerte angegeben sind, wird eine Mittelung der Messstellen nach Ort durchgeführt. So werden beispielsweise die Messstellen Kapfenberg, Bruck/Mur etc. (ausgenommen Stadt Graz) dem Ort Steiermark zugeordnet. Das Ergebnis sind die gemittelten **Temperaturdaten nach Ort und Monat**.

Die Uhrzeitmittelwerte je nach Ort und Monat bilden die 3 **repräsentativen Temperaturen**.

Von den Monatswerten der Temperaturen wurde zu Kalenderwochen interpoliert. Bei der **linearen Interpolation** wird der Temperaturwert (ZAMG) in der Mitte des Monats angesetzt und zum jeweils nächsten Monat kalenderwochenweise interpoliert. Das Ergebnis sind die 3 **repräsentativen Temperaturen** (7, 14, 19 Uhr Mittelwerte) abhängig von **Kalenderwoche und Ort**. Diese Temperaturen sind beispielhaft für Wien in Abbildung 13 zu sehen.

Mit Hilfe der **temperaturabhängigen Verbrauchswerte** aus Abbildung 8 in Kapitel 6.1.1 werden aus den repräsentativen Temperaturen 3 **repräsentative Verbräuche** berechnet. Abschließend werden diese gemittelt und somit ein **Durchschnittsverbrauch, abhängig von Kalenderwoche und Ort**, berechnet. Die Berechnung des Durchschnittsverbrauchs ist für PKW und LNF gleich. Das Ergebnis ist exemplarisch für PKW in Wien in Abbildung 13 aufgezeichnet.

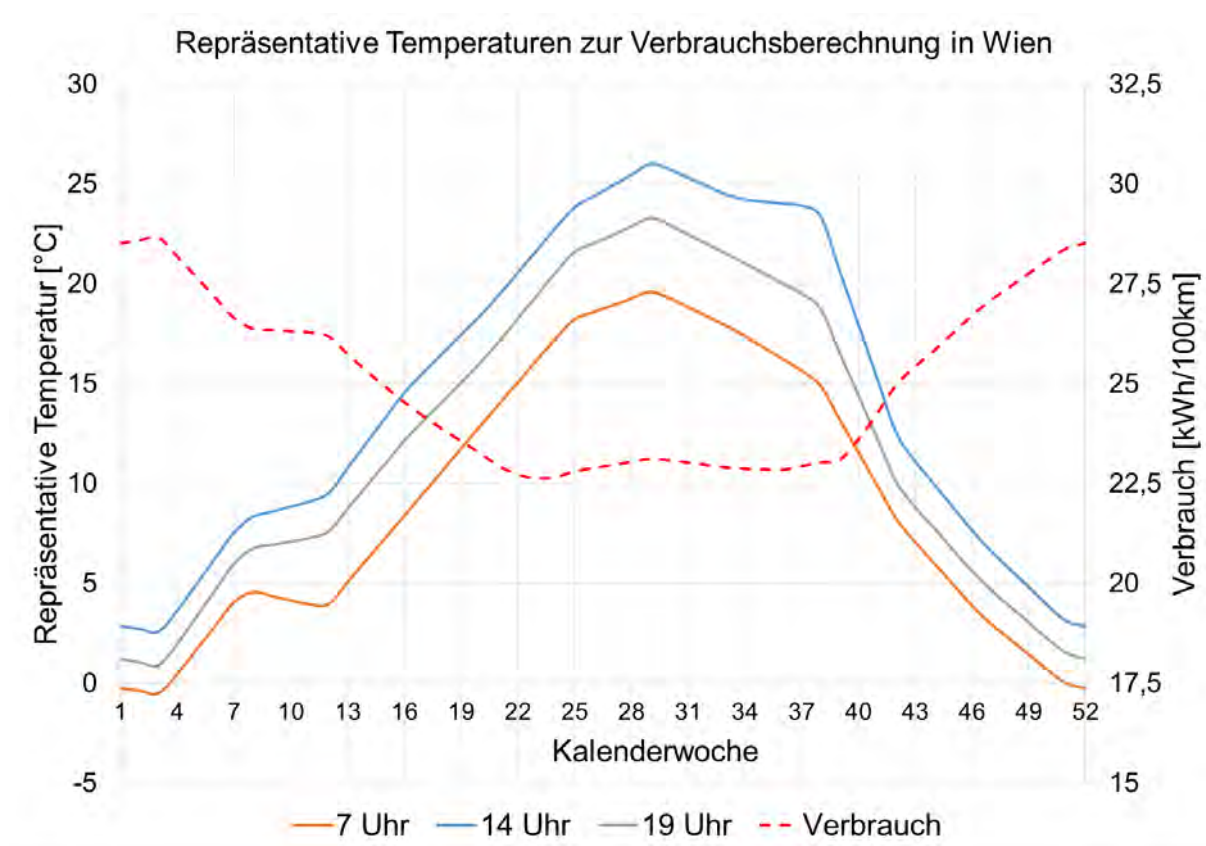


Abbildung 13 – Repräsentative Temperaturen und PKW-Verbrauch in Wien

7 Mobilitätsverhalten

Das zu Grunde liegende Mobilitätsverhalten ist für den Bedarf an Ladeinfrastruktur und die Auswirkungen auf das Netz entscheidend. Maßgeblich dafür sind unter anderem die lokalen Fahrleistungen sowie Ankunftszeit und -ort. In diesem Kapitel sollen die zu Grunde liegenden Daten des Mobilitätsverhaltens für PKW und LNF gezeigt werden.

7.1 Mobilitätsdatenbasis

Die Mobilitätsdatenbasis bildet die Grundlage für die Ermittlung der zurückgelegten Strecken und der Beginnzeiten der Ladevorgänge. Die Datengrundlage ist für PKW- und LNF-Nutzer unterschiedlich, weswegen diese in den nachfolgenden Kapiteln für die beiden Fahrzeugarten separat gezeigt werden soll.

7.1.1 Mobilitätsverhalten der PKW-Nutzer

Das Mobilitätsverhalten von PKW-Nutzern ist von dem Erwerbsstatus, dem Wohnort (städtisch/ländlich), dem Arbeitsort (Pendler) und der Jahreszeit abhängig. Es ist daher gerade hier notwendig, so detailliert wie möglich, entsprechend Abbildung 4 in Kapitel 5.1, zu differenzieren.

Basis des PKW-Mobilitätsverhaltens bildet eine detaillierte Erfassung nach [21], welche insgesamt ca. 200.000 Strecken (inkl. öffentlicher Verkehrsmittel) beinhaltet. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Rohdaten der Erfassung nach [21] verarbeitet bzw. ausgewertet, damit die Daten zur Berechnung des Leistungsgangs und der Gleichzeitigkeit der Ladung in der notwendigen Form vorliegen. Nachfolgend soll der Rohdatensatz in einem beispielhaften Auszug vorgestellt werden.

Tabelle 3 zeigt einen Auszug aus dem erwähnten Rohdatensatz. Die hier aufgelisteten Zahlen sind mit Hilfe separater Tabellen, Beschreibungen und Schemata, die dem Datensatz nach [21] beiliegen, zuzuordnen. Der in Tabelle 3 gezeigte Abschnitt kann wie folgt beschrieben werden:

Im Haushalt Nr. **4** wohnt eine Person **1**, die zum Stichtag **1** eine Strecke fährt. Der Haushalt befindet sich im Bundesland **3** (Niederösterreich) im Raumtyp **4** (peripherer Bezirk). Die Strecke wird in der Jahreszeit **3** (Herbst) am Wochentag **3** (Mittwoch) zurückgelegt.

Die Startzeit beträgt **450** (Minuten; entspricht 7:30 vormittags), wobei die Strecke im Bundesland **3** (NÖ) und Raumtyp **4** (peripherer Bezirk) und von **870** (zu Hause) startet.

Die Fahrt wird zum Zweck **10** (Arbeit bzw. Erreichen des Arbeitsplatzes) durchgeführt, wobei das Ziel Nr. **10** (die Arbeit oder die öffentliche Verkehrsanbindung zum Erreichen des Arbeitsplatzes) ist. Die Strecke wird mit dem Verkehrsmittel **1** (PKW) zurückgelegt. Die Ankunftszeit ist **535** (Minuten; entspricht 8:55 vormittags) im Zielbundesland **9** (Wien) mit dem Raumtyp **1** (Wien).

Die zurückgelegte Strecke ist **40** (km) lang und ist für einen Werktag zu **11,1262566** Anteilen repräsentativ (Hochrechnungs- bzw. Gewichtungsfaktor). Für Samstag und Sonntag ist diese Fahrt zu **0** bzw. **0** Anteilen repräsentativ (weil es sich um eine Fahrt an einem Wochentag handelt).

In einem separaten Datensatz sind die Personendaten aufgelistet. Aus diesem lässt sich entnehmen, dass die Person 1 im Haushalt 4 dem Erwerbstyp 2 (Erwerbstätigkeit) nachgeht. Dies ist insbesondere für Auswertungen des lokalen Modells für Orte mit abweichender Demographie (z. B. mehr Pensionisten als im Durchschnitt) wichtig, da sich hier ein anderes Mobilitätsverhalten (z. B. andere Ankunftszeiten) ergeben kann.

Tabelle 3 – Auszug einer Strecke aus dem Wegedatensatz nach [21]

hh_nr	pers_nr	perstag_stnr	hh_wohnbdl	hh_wohnraumtyp	perstag_zeit	perstag_tag
4	1	1	3	4	3	3
weg_startzeit		weg_startbdl		weg_starraumtyp		weg_quellzweck
450		3		4		870
weg_zielzweck	weg_zweck	weg_vm_pkwlenk	weg_zielzeit	weg_zielbdl	weg_zielraumtyp	
10	10	1	535	9	1	
weg_laenge		weg_hochrechnungs faktor_werktag		weg_hochrechnungs faktor_samstag		weg_hochrechnungs faktor_sonntag
40		11,1262566		0		0

Die Tiefe der in Tabelle 3 dargestellten Daten und deren große Anzahl (ca. 200.000) zeigen, dass eine Kategorisierung und Ordnung der Daten zweckmäßig ist. Es wird daher eine Einteilung gewählt, die sich an der gezeigten Datenbasis orientiert und aussagekräftige Auswertungen (z. B. Auswertungen nach Wohnort, Demographie,

Zweck der Fahrt, Ladeort) in einfacher Weise ermöglicht. Die daraus resultierende Kategorisierung ist bereits in Kapitel 5.1 (Abbildung 4) vorgestellt worden.

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass es sich bei der Mobilitätserfassung um eine stichprobenbasierte Erhebung handelt, weswegen die verwendeten Daten mit einem statistischen Fehler behaftet sind. Details dazu können in [21] nachgelesen werden.

7.1.2 Mobilitätsverhalten der leichte Nutzfahrzeuge Nutzer

Das Mobilitätsverhalten der LNF-Nutzer ist sehr stark von der Anwendung abhängig. Des Weiteren ist die Verfügbarkeit von Daten über die typischen Ankunftszeiten und zurückgelegten Strecken kaum gegeben. Es wurde auf Basis nachfolgender Überlegungen ein durchschnittliches Mobilitätsverhalten modelliert.

Es wird angenommen, dass LNF gewerblich betrieben werden und sich die Ankünfte in Stopps zu vier verschiedenen Zeiten, z. B. drei Zwischenstopps am Vormittag, zu Mittag oder am Nachmittag und einem Stopp am Abend (Ende) einteilen lassen. Diese Stopps entsprechen dem Beginn des Ladevorgangs und wurden mit Hilfe einer Gauß-Gleichverteilung um die jeweilige Uhrzeit angenommen (siehe Tabelle 4). Die dabei benötigte Standardabweichung wird mit einem Viertel des verwendeten Bereichs festgelegt.

Tabelle 4 – Annahmen zur Ermittlung der Ladezeiten von LNF

Stopp	Mittlere Uhrzeit	Standardabweichung	Verwendeter Bereich
Vormittag	9:30	15 min	9:00 - 10:00
Mittag	11:45	22,5 min	11:00 - 12:30
Nachmittag	14:00	15 min	13:30 - 14:30
Abend	17:30	60 min	15:30 - 19:30

Nicht jeder Stopp tritt an jedem Tag bzw. in gleichem Ausmaß auf. Viele LNF werden möglicherweise gar keinen Zwischenstopp einlegen oder niemals am Wochenende in Betrieb sein. Des Weiteren wird nicht bei jedem Stopp die gleiche zurückgelegte Strecke bzw. verbrauchte Energie geladen. Um verschiedene Betriebsweisen zu berücksichtigen, wird eine Aufteilung angenommen, die in Tabelle 5 zu sehen ist.

Es wird davon ausgegangen, dass an Wochentagen (Montag - Donnerstag) die meisten Ladevorgänge (65 %) ausschließlich abends und nur einmal täglich

stattfinden, da somit das Fahrzeug tagsüber ohne Unterbrechung in Betrieb sein kann. Der Ladevorgang erfolgt am Ende eines Tages (Abend). Für Fahrzeuge, die mehrmals täglich laden, wird ein geringerer Anteil, je nach Stoppaufteilung (z. B. Mittag/Abend), erwartet. An Freitagen wird davon ausgegangen, dass sich die Abendanteile in Richtung Mittag bzw. Nachmittag (Frühschluss) verschieben. Am Wochenende wird diese Verschiebung noch weiter in Richtung Mittag angenommen.

Zusätzlich wird die beim Stopp zurückgelegte Strecke (die nachgeladen wird) benötigt. Diese wird in Tabelle 5 als Prozentanteil der Tagesfahrleistung angegeben und ergibt sich für einzelne Stopps an einem Tag (z. B. nur abends) zu 100 %. Für mehrere Stopps pro Tag wird angenommen, dass bei in etwa gleicher Verteilung der Fahrtzeiten (Stopps Mittag/Abend bzw. Vormittag/Nachmittag) auch die zurückgelegte Strecke gleich aufgeteilt ist (50 / 50). Bei Vormittag/Abend überwiegt die Zeit nach dem ersten Stopp, weswegen auch die Streckenaufteilung in Richtung Abend verschoben und mit 30 / 70 gewählt wurde.

Tabelle 5 – Angenommene Aufteilung der Stopps und Strecken für LNF

Zeitpunkt des/ der Stopps	Anteil der LNF, die den/die jeweiligen Stopp(s) durchführen			Aufteilung der beim Stopp zurückgelegten Strecke (Tagesfahrleistung)
	Wochen- tag	Freitag	Wochen- endtag	
Abend	65 %	15 %	5 %	100
Vorm./Abend	5 %	5 %	0 %	30 / 70
Mittag/Abend	15 %	5 %	0 %	50 / 50
Vorm./Nachm.	15 %	10 %	5 %	50 / 50
Mittag	0 %	25 %	60 %	100
Nachmittag	0 %	40 %	30 %	100
Summe	100 %	100 %	100 %	---

Zusätzlich zur Aufteilung der Strecken und der Stopp-Zeitpunkte je nach Tag wird eine Verteilung benötigt, die angibt, wieviele LNF an welchem Tag im Einsatz sind, da dies je nach Wochentagstyp stark unterschiedlich sein kann. Es wird angenommen, dass an Wochentagen (Montag - Donnerstag) die meisten Fahrzeuge im Einsatz sind, weil es sich dabei um die typischen Arbeitstage handelt. An Freitagen wird davon ausgegangen, dass sich aufgrund des vermehrten Frühschlusses weniger Fahrten

ergeben. Da Wochenendtage überwiegend arbeitsfreie Tage sind, wird angenommen, dass nur ein sehr geringer Anteil an Fahrten am Wochenende durchgeführt wird.

Auf Basis dieser Überlegungen wird die Gewichtung folgendermaßen gewählt:

- Wochentage: Faktor 1
- Freitage: Faktor 0,8
- Wochenendtage: Faktor 0,1

Damit wird angenommen, dass, im Vergleich zu einem Wochentag, an einem Freitag 80 % der Fahrzeuge unterwegs sind und an einem Wochenendtag 10 %.

Die hier gezeigten Parameter und Annahmen führen zur Verteilung der Ankünfte nach Uhrzeit und Wochentag, welche in Abbildung 14 graphisch dargestellt ist.

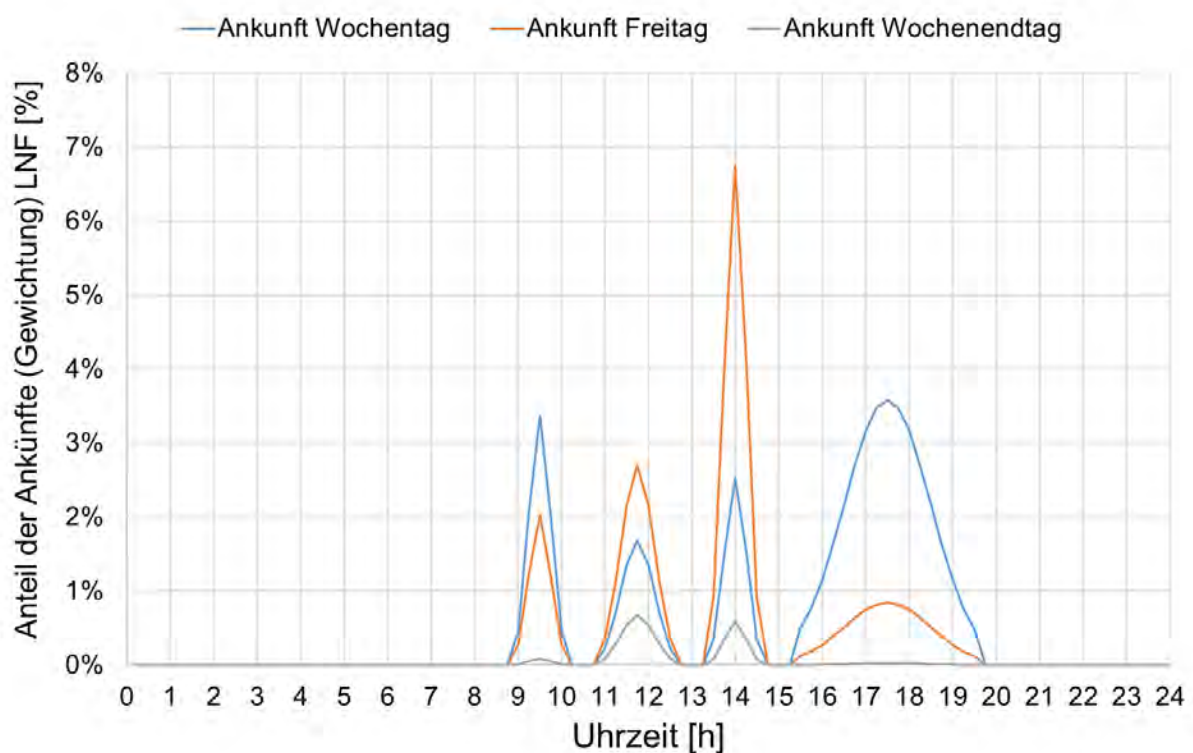


Abbildung 14 – Verteilung der Ankünfte von LNF nach Uhrzeit und Wochentag

7.2 Ableitung eines Streckendatensatzes

Das in Kapitel 7.1 beschriebene Mobilitätsverhalten von PKW und LNF beinhaltet sehr umfangreiche Daten und Informationen, die zur Berechnung der Gleichzeitigkeit und des Leistungsgangs zunächst aufbereitet und sortiert werden müssen. Es ist daher

zweckmäßig, aus dem zu Grunde liegenden Mobilitätsverhalten einen Streckendatensatz abzuleiten, der nur die benötigten Daten beinhaltet. Die Ableitung eines solchen Datensatzes soll nachfolgend beschrieben werden.

7.2.1 Streckendatensatz der PKW-Nutzung

Die in Kapitel 7.1.1 gezeigte Mobilitätsdatenbasis beinhaltet eine große Menge an Daten, die nicht für den Streckendatensatz zur Berechnung der Ladeinfrastruktur benötigt oder verwendet werden können. Es wird daher eine erste Bereinigung der Daten durchgeführt, um diese für die weiteren Berechnungen nutzbar zu machen. Zu diesem Zweck werden nachfolgende Kriterien definiert:

- Nur PKW-Fahrten (keine anderen Verkehrsmittel)
- Nur Lenker (keine Mitfahrer)
- Nur Datensätze, die vollständig sind hinsichtlich Ankunftszeit und Weglänge sowie der erläuterten Unterteilungskategorien

Durch diese Auswahl ergibt sich eine Datenbasis von ca. 93.000 Strecken, deren Weglängen in Abbildung 15 aufgetragen sind. Es ist zu erkennen, dass 94 % der Fahrten kürzer als 50 km sind. Größere Weglängen, die die derzeitigen Reichweiten von E-Fahrzeugen überschreiten, finden nur vereinzelt statt. Es ist zu erwarten, dass die Reichweiten von BEV in den nächsten Jahren signifikant ansteigen. Aus diesem Grund sinkt die Anzahl an Weglängen, die auch zukünftig nur mit Zwischenladung gefahren werden können, weiter ab. Nach [8] wird bis 2030 eine Reichweite von 500 km erwartet, weswegen die maximal verwendete Weglänge des Streckendatensatzes mit 500 km gewählt wird. Dadurch müssen in der weiteren Berechnung keine Zwischenladungen berechnet werden, die aus dem zu Grunde liegenden Mobilitätsverhalten nicht hervorgehen. Dies vereinfacht die Berechnungen deutlich, während die nicht berücksichtigten Strecken mit 0,04 % einen vernachlässigbaren Anteil darstellen.

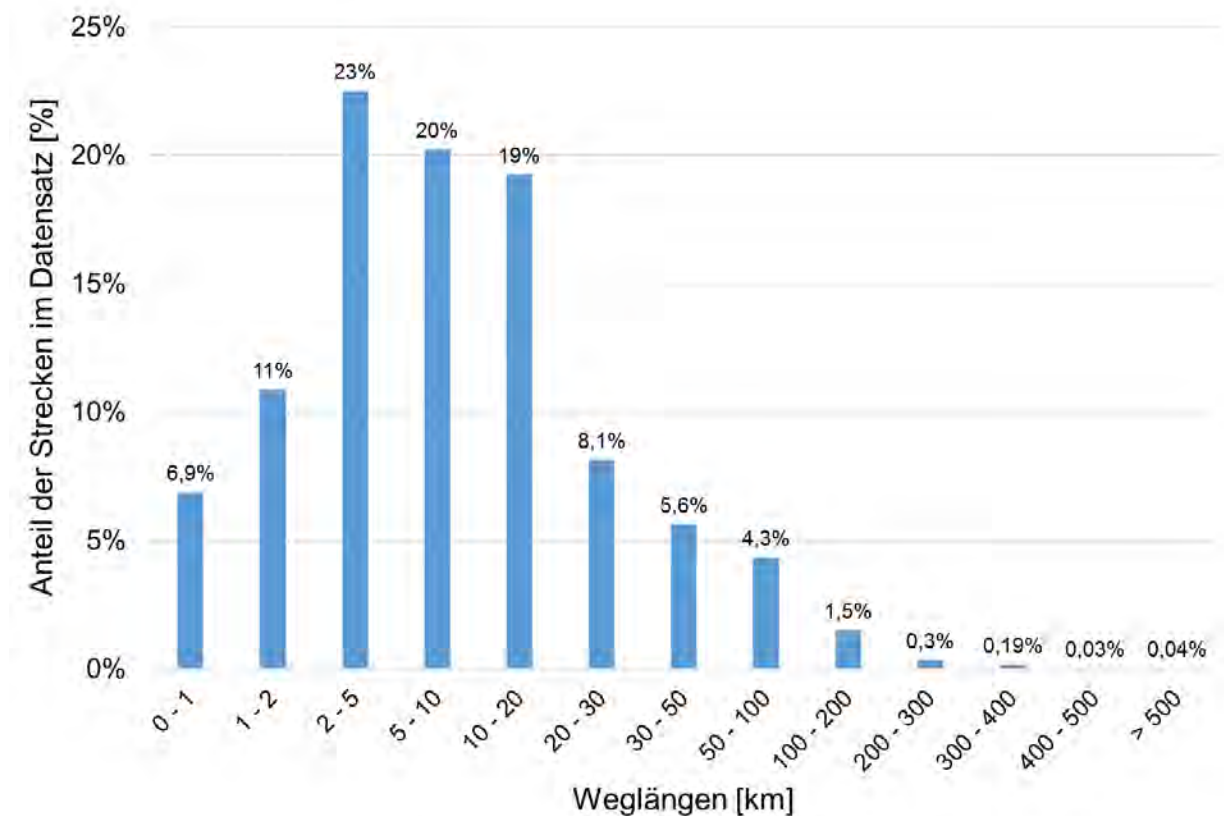


Abbildung 15 – Verteilung der Weglängen im Datensatz

Die Datenauswahl wird entsprechend der eingangs erwähnten Kategorien eingeteilt. In Abbildung 16 ist die Kategorisierung des Streckendatensatzes dargestellt. Diese wird bei allen weiteren Berechnungen durchgeführt. Ebenfalls zu sehen ist ein beispielhafter Verlauf für einen Dateneintrag. Dieser könnte folgendermaßen formuliert werden:

Eine niederösterreichische Person fährt im Winter, an einem Wochentag (Montag - Donnerstag), als Erwerbstätiger, zum Zweck der Arbeit an ein Ziel (z. B. Arbeitsplatz oder Bahnhof etc.) und kommt zu einem gewissen Zeitpunkt an, hat eine gewisse Strecke zurückgelegt, die eine entsprechende Gewichtung aufweist.

Unter Gewichtung wird in diesem Zusammenhang ein für die Hochrechnung benötigter Faktor verstanden, der den Stellenwert einer Strecke widerspiegelt. Verfügt eine Strecke über eine hohe Gewichtung, so kommt diese häufiger vor als andere mit niedrigerer Gewichtung.

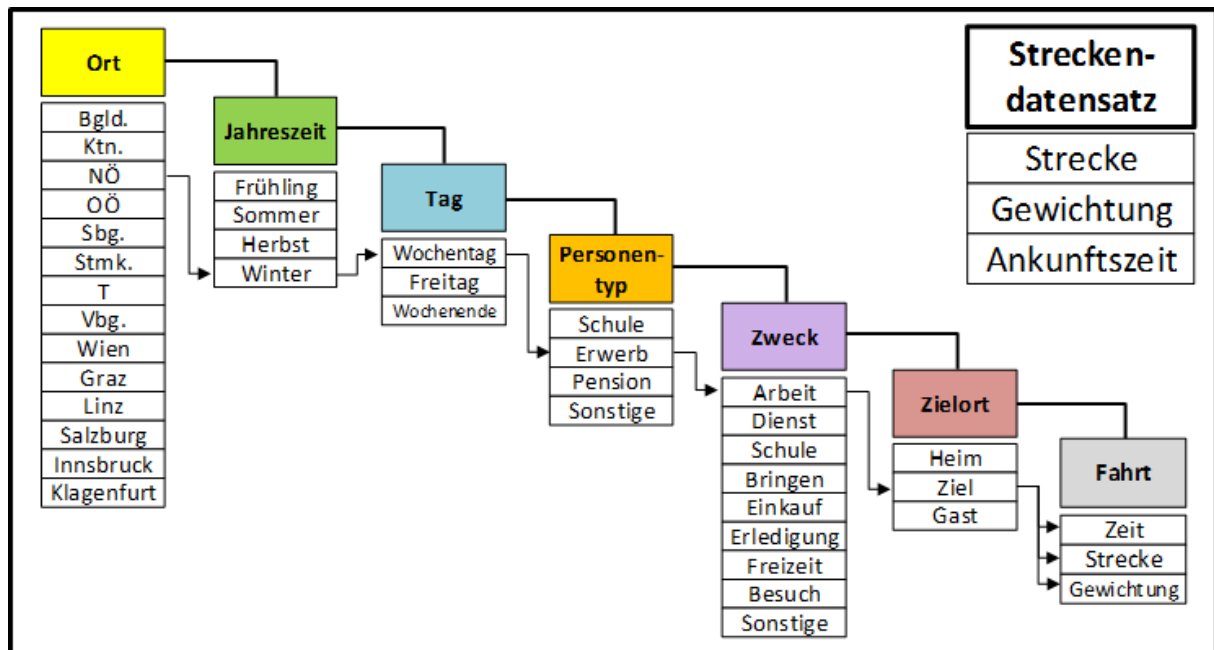


Abbildung 16 – Kategorisierung innerhalb des Streckendatensatzes des PKW

7.2.2 Streckendatensatz der LNF-Nutzung

Beim LNF erfolgt die Ableitung eines Streckendatensatzes nicht auf dieselbe Weise wie beim PKW, da das Mobilitätsverhalten in unterschiedlicher Form vorliegt. Es wird daher für das LNF eine vereinfachte Kategorisierung nach Abbildung 17 durchgeführt.

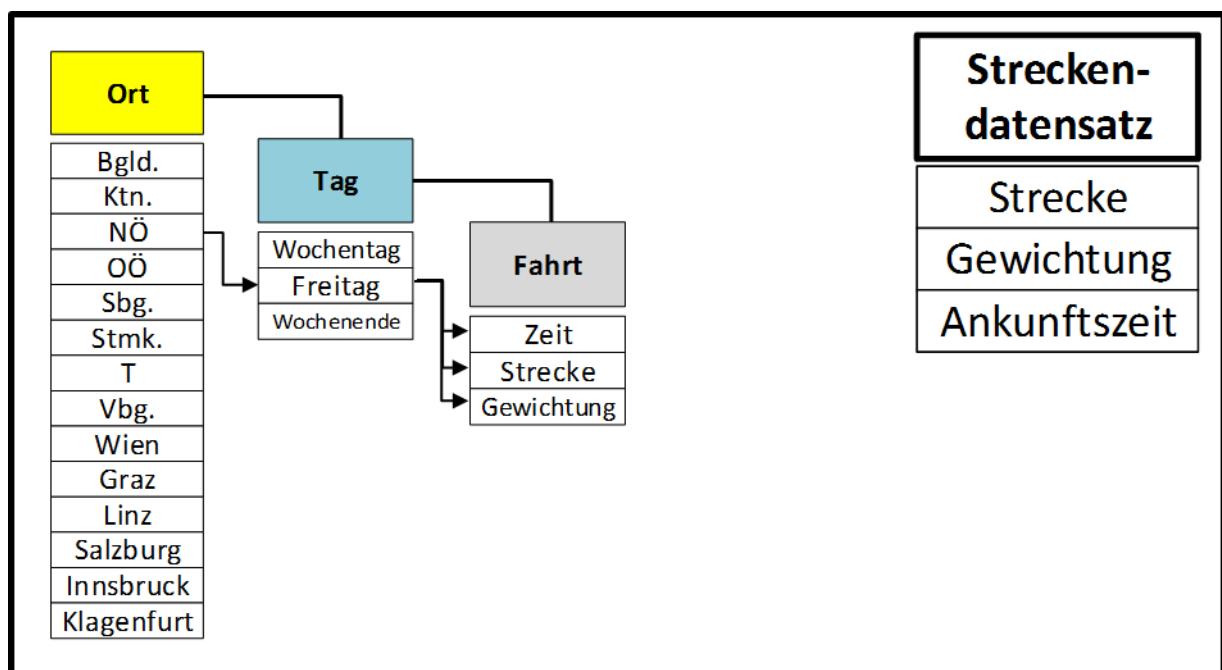


Abbildung 17 – Kategorisierung innerhalb des Streckendatensatzes des LNF

In Kapitel 7.1.2 wurde mit den gewählten Annahmen und Parametern eine Verteilung der Ankünfte erstellt. Zur Ableitung eines Streckendatensatzes wird zusätzlich die Verteilung der zurückgelegten Strecken benötigt. Dazu wird zunächst aus der Gesamtfahrleistung der LNF-Flotte (siehe Kapitel 4.3) die durchschnittliche wöchentliche Fahrleistung (52 Wochen im Jahr) eines einzelnen Fahrzeuges aus dem Gesamtbestand (siehe Kapitel 4.2) berechnet. Die durchschnittliche wöchentliche Fahrleistung wird entsprechend der in Kapitel 7.1.2 gezeigten Faktoren (Wochentage 100 %, Freitage 80 %, Wochenendtage 10 %) auf die einzelnen Tage aufgeteilt.

Da die Stopps zu unterschiedlichen Zeitpunkten und nach unterschiedlichen Fahrtstrecken durchgeführt werden (siehe Tabelle 5 in Kapitel 7.1.2), erfolgt eine weitere Aufteilung der Strecken. Die zurückgelegte Strecke, die bei jeder Ankunft nachgeladen werden muss, wird entsprechend der bereits erwähnten Faktoren aus Tabelle 5 aufgeteilt, ist jedoch nicht gleichverteilt. Dabei wird angenommen, dass die zurückgelegte Strecke nicht von der Ankunftszeit abhängig ist, was zu einem konstanten Verlauf führt. Das Ergebnis der Streckenaufteilung ist in Abbildung 18 dargestellt.

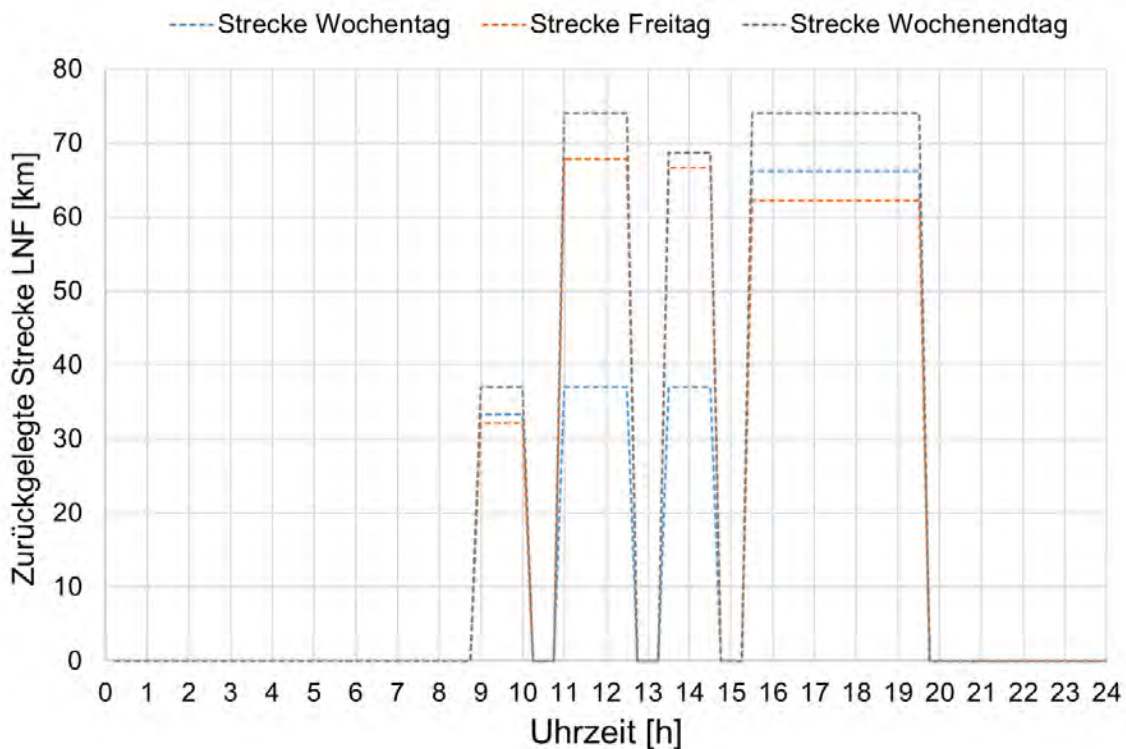


Abbildung 18 – Verteilung der zurückgelegten Strecken von LNF nach Uhrzeit und Wochentag

Für den Streckendatensatz werden die Ankünfte aus Kapitel 7.1.2 einer weiteren Aufteilung nach dem Ort unterzogen. Mit der Aufteilung nach dem Ort wird eine lokale Auswertung des Modells möglich, was insbesondere für die Berechnung der Auswirkungen auf das Netz erforderlich ist. Bei der örtlichen Aufteilung wird davon ausgegangen, dass die Anzahl der durchgeführten Fahrten mit dem lokalen LNF-Bestand direkt proportional zusammenhängt. Dadurch wird berücksichtigt, dass eine höhere Anzahl an LNF an einem Ort mehr Fahrten zurücklegen. Die detaillierten Bestände sind in [3] nach Bezirken und Bundesländern aufgelistet und wurden für das lokale Modell in die Unterpunkte der Kategorie Ort (siehe auch Abbildung 17) unterschieden. Die aufgeteilten Ankünfte (nach Wochentag) werden mit den lokalen Beständen skaliert, woraus sich die aufgeteilten Ankünfte nach Wochentag und Ort ergeben.

Aus den aufgeteilten Ankünften (nach Ort und Wochentag) und der Streckenaufteilung bildet sich der Streckendatensatz für LNF, der für die weiteren Berechnungen verwendet wird.

8 Gleichzeitigkeit, Leistungsgang und Energiebedarf

Die Gleichzeitigkeit der Ladung, das heißt die Anzahl der gleichzeitig stattfindenden Ladevorgänge, und der Leistungsgang (Leistungsverlauf über die Zeit) sind maßgebliche Größen für die Energieversorgung und den Ladestellenbedarf. Aus dem Mobilitätsverhalten und dem Energieverbrauch eines BEV lassen sich die Gleichzeitigkeit und der Leistungsgang berechnen. Aus dem Leistungsgang lässt sich zusätzlich der Energiebedarf ableiten. Dafür werden zusätzlich das Ladenutzungsverhalten (Verteilung verwendeter Ladeleistungen und Heimladungsanteil), der Ladewirkungsgrad sowie die lokale Demographie bzw. Bestand benötigt. In diesem Kapitel sollen diese zusätzlich benötigten Eingangsgrößen und die anschließende Berechnung gezeigt werden.

8.1 Ladenutzungsverhalten

Für das Ladenutzungsverhalten ist die Verteilung der verwendeten Ladeleistungen (2,3, 11, 22,... kW) und der Heimladungsanteil (je nach Zweck der Fahrt) charakteristisch. In den nachfolgenden Kapiteln sollen diese beiden Parameter vorgestellt werden.

8.1.1 Nutzungsverteilung der Ladeleistungen

Die vom Nutzer verwendete Ladeleistung ist einerseits für die benötigten Ladestellen (erforderliche Ladeleistung und Anzahl) maßgeblich, andererseits hat diese einen großen Einfluss auf die Lastspitzen im Netz und die Gleichzeitigkeit. Dabei erzeugen höhere Ladeleistungen direkt höhere Lasten im Netz, jedoch aufgrund der niedrigeren Ladedauer für kürzere Zeit, wodurch sich die Gleichzeitigkeit (Anzahl der gleichzeitig ladenden Nutzer) und daher die Netzbelastung wiederum reduziert. Die Gleichzeitigkeit ist zusätzlich für die benötigte Anzahl an Ladestellen maßgeblich. Es ist daher notwendig, die Nutzungsverteilung der verschiedenen Ladeleistungen in das Modell einfließen zu lassen.

Da derzeit nur eine sehr niedrige Anzahl an BEV existiert, kann aus dem gegenwärtigen Ladeverhalten nicht auf ein zukünftiges, typisches Ladeverhalten geschlossen werden. Es soll daher in Anlehnung an die möglichen Ladeleistungen (Stecker und Absicherungen) und der damit nachgeladenen Reichweite (je nach Ladedauer) ein mögliches Nutzungsverhalten erstellt werden.

In Tabelle 6 sind die derzeit bzw. in naher Zukunft verfügbaren typischen Ladeleistungen aufgelistet. Zusätzlich ist die nachgeladene Reichweite je nach Ladeleistung und Ladedauer angeführt.

Es lässt sich erkennen, dass geringe Ladeleistungen nur über große Ladedauern sinnvoll sind. Diese eignen sicher daher beispielsweise zur Aufladung über Nacht am Heimstellplatz. Höhere Ladeleistungen werden bei Ladestationen benötigt, die nur sehr kurz verwendet werden, beispielsweise an einem Supermarktparkplatz. Am Zielort ist daher eine höhere Ladeleistung erforderlich. Eine Ladestation an einer Autobahnraststation benötigt dabei die höchsten Ladeleistungen, da davon auszugehen ist, dass eine hohe Reichweite in kurzer Zeit benötigt wird.

Tabelle 6 – Nachgeladene Reichweite in [km] nach Ladeleistung und Ladedauer

Ladeleistung Ladedauer	2,3 [22]	11 [22]	22 [22]	44 [22]	50 [22]	100 [22]	175 [23]	350 [23]	kW
15 Minuten	2,3	11	22	44	50	100	175	350	km
1 Stunde	9,2	44	88	16	200	400	700	1.400	km
5 Stunden	46	220	440	880	1.000	2.000	3.500	7.000	km
Angenommener Verbrauch inkl. Ladewirkungsgrad: 25 kWh/100km [10]									

Es ist daher notwendig, dass beim PKW zwischen einer Ladung am Heimstellplatz (PKW Heim) und an einem anderen Ort (PKW Ziel) unterschieden wird. Beim LNF wird aus Gründen der betrieblichen Abläufe stets von einer Ladung am Stellplatz des Unternehmens (LNF Heim) ausgegangen.

Neben der nachgeladenen Reichweite fließen nachfolgende Aspekte in die Erstellung der Nutzungsverteilung ein.

Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass für kurze Strecken (< 50 km), welche nach Abbildung 15 in Kapitel 7.2.1 mit 94 % am häufigsten auftreten, nur niedrige Ladeleistungen (11 kW oder weniger) benötigt werden. Höhere Ladeleistungen (22 - 50 kW) werden nur benötigt, wenn höhere Reichweiten bzw. eine schnelle Weiterfahrt erforderlich sind. Es wird erwartet, dass höhere Ladeleistungen (22 - 50 kW) zusätzlich verwendet werden, wenn diese zufällig am Ladeort verfügbar sind (Opportunity Charging) oder kostengünstig angeboten werden (z. B. für Kunden am Geschäftsparkplatz). Sehr hohe Ladeleistungen (100 - 350 kW) werden in dieser Arbeit gesondert

betrachtet und fließen nicht in die Nutzungsverteilung ein. Hierbei wird angenommen, dass diese lediglich für Langstrecken notwendig sind, welche einen sehr geringen Anteil ausmachen (siehe Abbildung 15 in Kapitel 7.2.1). Des Weiteren können solche Ladestationen im lokalen Verteilernetz ohne weitere Maßnahmen (siehe Kapitel 10.2) in der Regel nicht integriert werden, weswegen ebenfalls eine gesonderte Betrachtung erfolgen muss.

Beim Ladeort **PKW Heim** wird erwartet, dass 2,3 kW und 11 kW im typischen Haushalt – ein typischer österreichischer Haushaltsanschluss hat 11 kW – einfach verfügbar sind. 22 kW sind machbar, aber mit einem Mehraufwand verbunden (siehe Kapitel 12.1.2). Höhere Ladeleistungen sind am eigenen Stellplatz mit einem großen Aufwand verbunden (siehe Kapitel 12.1.2), daher wird erwartet, dass diese eher selten sind, weswegen sie am PKW-Heimstellplatz vernachlässigt werden.

Beim Ladeort **PKW Ziel** liegt die Überlegung zu Grunde, dass aufgrund der einfachen Verfügbarkeit von 2,3 kW (z. B. beim Besuch von Personen) auch am Zielort ein geringer Nutzungsanteil auf diese Leistungsklasse entfällt. Ein höherer Anteil von 2,3 kW Ladestellen wird nicht erwartet, da sich bei kurzen Aufenthalten am Zielort kaum Reichweite nachladen lässt und die Kosten für höhere Ladeleistungen im öffentlichen Bereich nur marginal höher sind (siehe Kapitel 12.1.3 und Kapitel 12.1.4). Aufgrund der schnelleren Aufladung bei 11 kW und 22 kW und der einfachen Verfügbarkeit (im Vergleich zu noch höheren Ladeleistungen) wird erwartet, dass die Mehrheit der Zielladestellen über 11 kW und 22 kW verfügen wird. Höhere Ladeleistungen mit 44 kW und 50 kW sind im öffentlichen Raum bei eigenen Schnellladepunkten zu erwarten, jedoch aus Kostengründen weniger als 11 kW und 22 kW.

LNF Heim: Hier wird eine ähnliche Verteilung wie beim Ladeort PKW Heim zu Grunde gelegt, jedoch mit der Annahme, dass es in einem Betrieb wahrscheinlicher ist, dass höhere Ladeleistungen als 2,3 kW verfügbar sind. 11 kW und 22 kW sind für Unternehmen oftmals einfacher verfügbar als für Privathaushalte und für die Sicherstellung des betrieblichen Ablaufs zu bevorzugen.

Eine Unterscheidung der Nutzungsverteilung der Ladeleistungen nach Ort (oder zumindest städtisch/ländlich) wurde im Rahmen der Studie nicht durchgeführt, da diesbezüglich keine belastbaren Daten vorliegen bzw. Annahmen getroffen werden können.

In Abbildung 19 ist die aus den angeführten Überlegungen resultierende, erwartete Nutzungsverteilung der Ladeleistungen aufgetragen. Dabei handelt es sich um die verwendeten Ladeleistungen (Nutzungsverteilung), nicht aber um die Anzahl an Ladestellen. Die Nutzungsverteilung fließt in die Berechnung der Gleichzeitigkeit (in Kapitel 8.5) ein, welche zur Berechnung der benötigten Ladestellen (in Kapitel 9) verwendet wird.

In Abbildung 19 ist zu sehen, dass die niedrigen Ladeleistungen deutlich überwiegen, was den zuvor gezeigten Überlegungen entspricht. Höchste Ladeleistungen werden wie erwähnt als Einzelevents unter gesonderten Bedingungen (eigener Anschluss an den Trafo oder ggf. eigener Trafo oder Pufferspeicher) berücksichtigt.

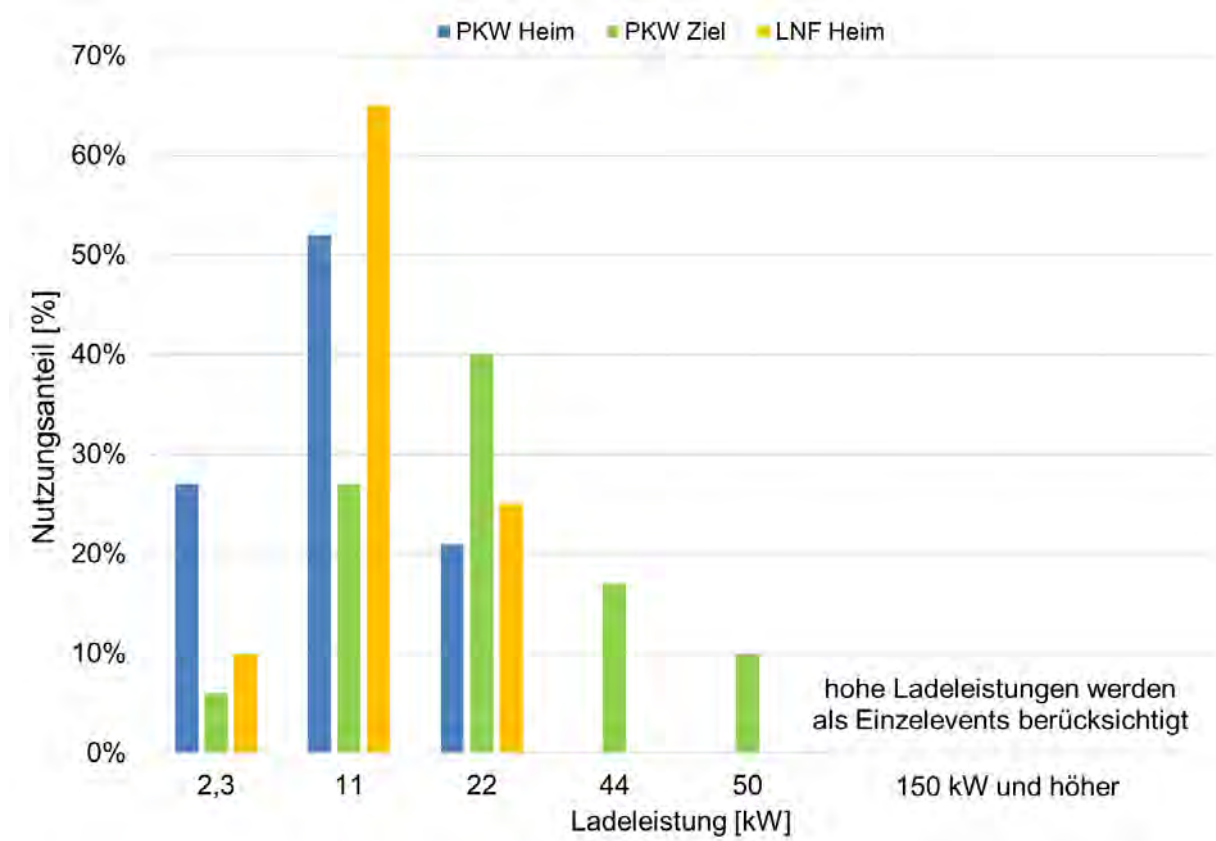


Abbildung 19 – Angenommene Nutzungsverteilung der Ladeleistungen nach Ort

8.1.2 Anteil der Heimladungen

Zusätzlich zur Aufteilung der Ladeleistungen wird der **Anteil an Ladevorgängen am Heimstellplatz** bzw. am Zielort benötigt. Es liegen derzeit keine verwendbaren Untersuchungen vor, die auf die grundsätzliche Höhe des Heimladungsanteils

schließen lassen. Feldversuche und Modellregionen können den Heimladungsanteil aufgrund ihrer örtlichen Einschränkung nur begrenzt wiedergeben. Es werden daher, mangels solider Daten, Annahmen für die Heimladungsanteile nach Tabelle 7 getroffen.

Dahinter steht die Überlegung, dass E-Mobilität gerade den Vorteil bietet, nicht an eine Tankstelle fahren zu müssen, sondern dass die Energie am eigenen Stellplatz bezogen werden kann, vorausgesetzt die Verfügbarkeit ist gegeben (z. B. Garage im Privathaushalt). Zusätzlich ist zu erwarten, dass die alltäglichen Ladedauern auch in Zukunft weit über den Betankungszeiten von Kraftstoff liegen. Aus diesem Grund wird angenommen, dass der Heimladungsanteil deutlich überwiegen wird, wobei der Zweck der Fahrt zusätzlich einen Einfluss hat (nicht an jedem Zielort eines Zweckes wird eine Ladung erfolgen können). Weitere Unterscheidungen nach Personentyp und Wohnort wären auch hier wiederum möglich, wurden aber mangels verfügbarer Daten bzw. der Möglichkeit, diesbezüglich seriöse Annahmen treffen zu können, nicht durchgeführt.

Auf Basis dieser Überlegungen wurde grundsätzlich ein Heimladungsanteil von 75 % angenommen. Für das Bringen und Sonstiges wird ein höherer Anteil von 95 % erwartet, da davon ausgegangen wird, dass hier nur eine sehr geringe Anzahl an Ladungen am Zielort durchgeführt wird.

Tabelle 7 – Angenommene Heimladungsanteile nach Fahrtzweck

Zweck der Fahrt	Heimladungsanteil [%]
Arbeit	75
Dienst	75
Schule	75
Bringen	95
Einkauf	75
Erledigung	75
Freizeit	75
Besuch	75
Sonstige	95

Zusätzlich zu den hier angenommenen Heimladungsanteilen wird in Kapitel 13.4 eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss einer anderen Annahme der Heimladungsanteile zu zeigen.

8.2 Ladewirkungsgrad

Unter Ladewirkungsgrad wird in dieser Arbeit der Wirkungsgrad der gesamten Kette vom netzseitigen Eingang (Wallbox oder Steckdose) bis vor die Batterie verstanden. Dies beinhaltet sowohl die Energiewandlung (Inverter, Ladegerät) als auch sonstige Verluste, wie Leitungsverluste, Nebenverbraucher (z. B. Batteriemanagement) im Fahrzeug und gegebenenfalls bei der Ladestation. Es handelt sich daher um das Verhältnis zwischen der in die Batterie eingebrachten und dem Stromnetz entnommenen Energie. Die Umwandlungsverluste der Batteriezelle sind darin nicht enthalten.

Die in Kapitel 6.1.1 gezeigten Verbrauchswerte beinhalten grundsätzlich die gemessenen Ladeverluste, jedoch nur für die dabei verwendete Ladeleistung. Die Ladung wurde in den Messungen nach [10] mit einer Schuko-Steckdose (2,3 - 2,8 kW) durchgeführt. Im Durchschnitt beträgt der Ladewirkungsgrad ca. 84 % (nach [10] und [eigene Berechnungen]), was wegen der oben erwähnten zusätzlichen Verluste deutlich niedriger ist als der in [10] ebenfalls erwähnte Ladegerätwirkungsgrad.

Aufgrund der teilweise stark variierenden Ladewirkungsgrade, je nach Kombination von Ladestation und Fahrzeug, kann kein allgemein gültiger Ladewirkungsgrad für jede Ladeleistung formuliert werden. Es existieren zwar Angaben zu Ladewirkungsgraden für höhere Ladeleistungen (z. B. von Schnellladestationen), jedoch werden dabei die erwähnten zusätzlichen Verluste (Nebenverbraucher, Leitungsverluste etc.) nicht berücksichtigt, weswegen solche Angaben für die Berechnung unbrauchbar sind. Es wird daher angenommen, dass der Wirkungsgrad für alle Ladeleistungen gleich ist und 84 % beträgt. Der beim LNF verwendete Verbrauch nach [17] (siehe Kapitel 6.1.2) beinhaltet einen angenommenen Ladewirkungsgrad von 85 %, was sich sehr gut mit den Messungen aus [10] deckt. Aufgrund der Ähnlichkeit von PKW und LNF, und unter Berücksichtigung der Streuung von Ladegeräten und Fahrzeugen, wird für beide Fahrzeuge derselbe Wirkungsgrad von 84 % (nach [10]) verwendet.

8.3 Lokale Demographie und Bestand

Zur Unterscheidung der lokalen Gegebenheiten bei der PKW-Nutzung ist die Demographie des jeweiligen Ortes notwendig. In [24] ist die Aufteilung der österreichischen Bevölkerung nach Erwerbsstatus und Bundesland für 2015 zu finden.

Mit dem Gesamtbevölkerungsstand Anfang 2017, in der Höhe von 8.772.865 (nach [25]), wurden die Zahlenwerte der erwähnten Aufteilung aus 2015 auf das Jahr 2017 hochskaliert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 beispielhaft für Wien dargestellt.

Tabelle 8 – Bevölkerung nach Erwerbsstatus in Wien im Jahr 2015 und 2017

Ort: Wien	Schule	Erwerb	Pension	Sonstige
2015 [24]	357.134	937.672	349.262	184.059
2017*	361.342	948.721	353.378	186.228
*berechnet				

Wie bereits in Kapitel 7.2.2 erläutert, ist bei den LNF eine Aufteilung der Ankünfte nach dem örtlichen Bestand (nach [3]) notwendig, da dies eine lokale Unterscheidung ermöglicht. Die Aufteilung ist bereits im Streckendatensatz erfolgt und daher an dieser Stelle nicht nochmals notwendig.

8.4 Erstellung eines Ankunftszeitplans zur Berechnung der Gleichzeitigkeit

Zur Berechnung der Gleichzeitigkeit wird zunächst ein Ankunftszeitplan erstellt. Dabei handelt es sich um eine kompakte Auflistung der Ankünfte und der zurückgelegten Strecken. Der Ankunftszeitplan wird aus dem Streckendatensatz (Mobilitätsverhalten) erstellt und enthält die Uhrzeit (Ankunftszeit) in Viertelstundenauflösung, die Gewichtung (Hochrechnungsfaktor aus dem Mobilitätsverhalten) und die zurückgelegte Strecke zum jeweiligen Zeitpunkt. Es handelt sich demnach um eine Art „Kalender“, dessen Format in Tabelle 9 zu sehen ist. Ziel dieser Neuordnung der Mobilitätsdaten ist die Verarbeitung der unterschiedlichen Streckendatensätze von PKW und LNF in dasselbe Format sowie die Reduktion des Berechnungsaufwandes und somit der Rechenzeit.

Wie bereits erwähnt ist die Gewichtung (Hochrechnungsfaktor) ein Maß für die Auftrittswahrscheinlichkeit einer Fahrt bzw. deren Daten (Ankunftszeit, zurückgelegte Strecke). Die Gewichtung repräsentiert daher den Anteil der jeweiligen Fahrt am gesamten Mobilitätsverhalten. Wird die Gewichtung aller Fahrten gleichermaßen skaliert, so erreicht diese bei entsprechender Wahl der Skalierung die absolute Anzahl der durchgeführten Fahrten. Aus diesem Grund kann die Gewichtung auch als die

Anzahl der gleichzeitig ankommenden Fahrzeuge zu einer bestimmten Uhrzeit, einem bestimmten Ort und mit einer bestimmten zurückgelegten Strecke interpretiert werden. Die Ankunftszeit und der Beginn der Ladung werden in dieser Arbeit als gleich betrachtet. Somit stellt die Gewichtung ein Maß für die gleichzeitig ladenden Fahrzeuge zu einer bestimmten Uhrzeit dar und ist daher für die Berechnung der Gleichzeitigkeit wesentlich. Die entsprechende Wahl der Skalierung wird durch den Fahrleistungsfaktor (siehe Kapitel 8.5) erzielt.

Der Ankunftszeitplan beinhaltet daher die Gewichtung g_i zum Zeitpunkt t_i und die dabei zurückgelegte Strecke s_i , welche aus dem Streckendatensatz (Mobilitätsverhalten, siehe Kapitel 7) abgeleitet und eingetragen werden. Diese Eintragung wird in den nachfolgenden beiden Unterkapiteln für PKW und LNF getrennt erläutert.

Tabelle 9 – Aufbau des Ankunftszeitplans zur Berechnung des Leistungsgangs

Uhrzeit* [min]	Gewichtung	Strecke [km]
15	g_1	s_1
30	g_2	s_2
...	...	...
t_i	g_i	s_i
$t_i + 15$	g_{i+1}	s_{i+1}
$t_i + 30$	g_{i+2}	s_{i+2}
...	...	...
1.440**	g_{96}	s_{96}
*Uhrzeitangabe beschreibt Bereich (z. B. 30 [min] bedeutet von 0:15 - 0:30 Uhr)		
**1.440 min = 24 h		

Die Erstellung des Ankunftszeitplans zur Berechnung des Leistungsganges für ein Kalenderjahr hat vor allem den Grund der Reduktion von Rechenleistung und somit Rechenzeit. Dabei werden Strecken, die zur selben Uhrzeit (innerhalb der 15 Minuten Auflösung) auftreten, gemittelt und die Gewichte addiert (siehe weiter unten). Dadurch wird der gesamte Streckendatensatz auf eine Tabelle der jeweiligen Kategorie (Ort, Jahreszeit, Wochentag etc.) reduziert, was eine Vereinfachung darstellt und die Rechenzeit signifikant verbessert. Des Weiteren erfolgt im Ankunftszeitplan die Aufteilung der Strecken für die Heim- und Zielladung.

Da das gesamte Mobilitätsverhalten einer Kategorie (Ort, Jahreszeit, Wochentag etc.) in jeweils einen Ankunftszeitplan eingetragen wird, kann diese für die Berechnung des Leistungsgangs eines gesamten Kalenderjahres (in der jeweiligen Kategorie) immer wieder verwendet werden. Beispielsweise kann 52 Mal (4 Wochentage pro Woche, 13 Wochen pro Jahreszeit) derselbe Ankunftszeitplan für Wochentage im Frühling, im Burgenland, zum Zweck des Einkaufens durch einen Erwerbstätigen, usw. verwendet werden anstatt jede einzelne Strecke dieser Kategorien aus dem Mobilitätsverhalten in einem ganzen Kalenderjahr der entsprechenden Uhrzeit und den entsprechenden Tagen zuzuordnen.

Des Weiteren bleiben die Ankunftszeitpläne bei Änderungen von Parametern zur Berechnung der Ladedauer (Verbrauch, Demographie eines Ortes etc.) unverändert, was bei einer einzelnen Zuordnung aller Strecken in ein Kalenderjahr nicht der Fall wäre. Zusätzlich werden die Zeitreihen für PKW und LNF zwar in unterschiedlicher Art und Weise erstellt, jedoch weist das Ergebnis das gleiche Format auf. Dadurch wird es möglich, für beide Fahrzeugarten dieselben weiteren Berechnungsabschnitte zu verwenden, was das Programm deutlich vereinfacht.

Die Verwendung eines Ankunftszeitplans führt demnach zu einem deutlichen Effizienzgewinn und einer Reduktion der Reichenzeit sowie einer übersichtlichen Darstellung.

8.4.1 Erstellung eines Ankunftszeitplans der PKW-Nutzung

Der in Kapitel 7.2.1 erstellte Streckendatensatz, der schematisch in Abbildung 16 dargestellt ist, wird zur Erstellung des Ankunftszeitplans verwendet. In Abbildung 20 ist die Vorgehensweise zur Erstellung des Ankunftszeitplans schematisch dargestellt.

Zu Beginn findet sich der erwähnte Streckendatensatz wieder. Dieser wird in einem ersten Schritt in teilweise oder nur Heim- bzw. teilweise Zielladung² unterteilt. Diese Einteilung erfolgt unter Berücksichtigung des in Tabelle 7, Kapitel 8.1.2, angenommenen Heimladungsanteils, je nach Zweck. Die Heimladungsanteile wirken sich auf die Gewichtungen aus, da diese im Wesentlichen die Anzahl der Fahrten und somit die Anzahl der (Heim- und Ziel-) Ladungen repräsentieren.

² Die zurückgelegte Strecke wird vollständig am Zielort geladen (erster Teil), der Rückweg vom Zielort zum Heimort wird vollständig am Heimort geladen (zweiter Teil), d. h. teilweise Zielladung.

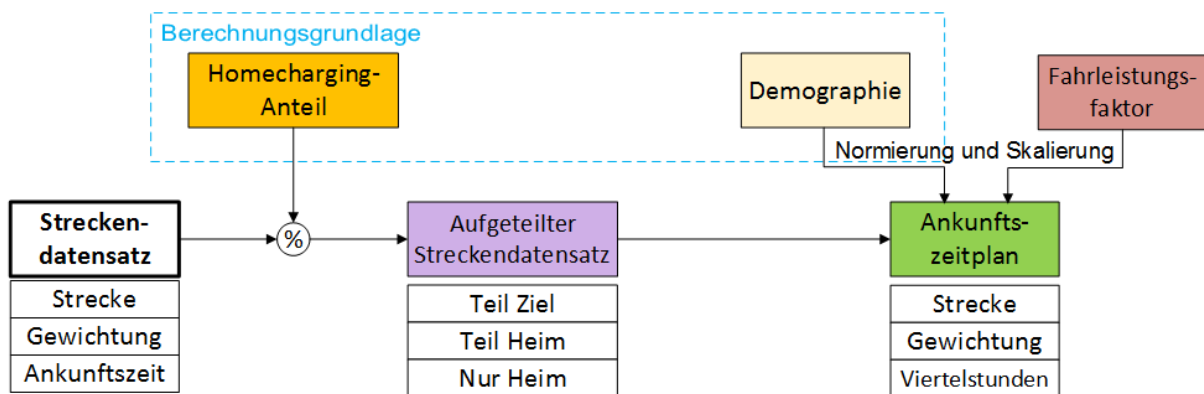


Abbildung 20 – Schema zur Aufteilung in Heim- und Zielladung und zur Erstellung eines Ankunftszeitplans für PKW

Zunächst werden dem Streckendatensatz die Strecken für die Ziel- und Heimfahrt entnommen, wobei folgende Kriterien festgelegt wurden:

1. Die Aufteilung nach Heim- und Zielladung erfolgt nur, wenn die Ziel- und Heimfahrt im Datensatz hintereinander vorliegen, was am häufigsten zutrifft. Nur in diesem Fall sind Heim- und Zielfahrt im Datensatz nachvollziehbar miteinander verknüpft.
2. Liegt nur die Heimfahrt vor, was auch eine Ziel- und Heimfahrt sein kann, bei der fälschlicherweise (in der Erhebung) keine Unterscheidung getroffen wurde, wird diese vollständig der Heimladung zugeordnet.
3. Liegt nur die Zielfahrt vor, was selten der Fall ist, weil in [21] diesbezüglich eine weitest mögliche Korrektur durchgeführt wurde, wird diese vollständig der Zielladung zugeordnet.
4. Liegt eine Verkettung von zwei oder mehr Fahrten vor, die alle eine Zielfahrt sind (sehr selten), werden der Einfachheit halber alle bis auf die letzte Zielfahrt der Zielladung zugeordnet. Die letzte Zielfahrt kann entweder die letzte Fahrt im Datensatz sein oder es folgt danach eine Heimfahrt. Im ersteren Fall wird das 3. Kriterium verwendet, im letzteren Fall das 1. Kriterium.

Den hier aufgelisteten Kriterien liegt die Annahme zu Grunde, dass nach jeder abgeschlossenen Fahrt (unter Berücksichtigung des Heimladungsanteils) eine Ladung erfolgt. Zusätzlich werden unvollständige Daten der Einfachheit halber dem jeweiligen Ladeort zugeordnet. Des Weiteren werden viele verkettete Zielfahrten (bis auf die letzte) dem Ziel zugeordnet, was ebenso eine Vereinfachung darstellt.

Die Fälle der vollständigen Zuordnung einer Fahrt zur Heim- oder Zielladung sind trivial und erfordern keine besonderen Berechnungen. Hier werden die Gewichtung und die Strecke unverändert dem jeweiligen Ladeort zugeordnet. Das erste Kriterium, bei dem in Heim- und Zielladung aufgeteilt wird, erfordert eine entsprechende Berechnung, die nachfolgend an zwei Fahrten 1 und 2 (Heim und Ziel) erläutert werden soll.

Datenbasis:

- Fahrt 1: von Heim nach Ziel, Ankunftszeit t_1 , Strecke s_1 , Gewichtung g_1
- Fahrt 2: von Ziel nach Heim, Ankunftszeit t_2 , Strecke s_2 , Gewichtung g_2
- Heimladungsanteil beider Fahrten $H = 0 \div 1$ (zwischen 0 und 100 %)

In einem ersten Schritt werden die Fahren in 3 Teile unterteilt:

- Ladung **komplett** am **Heim-Ort**

$$s_{H,k} = s_1 + s_2 \quad (2)$$

$$g_{H,k} = g_1 \cdot H \quad (3)$$

- Ladung **teilweise** am **Ziel-Ort**

$$s_{Z,t} = s_1 \quad (4)$$

$$g_{Z,t} = g_1 \cdot (1 - H) \quad (5)$$

- Ladung **teilweise** am **Heim-Ort**

$$s_{H,t} = s_2 \quad (6)$$

$$g_{H,t} = g_2 \cdot (1 - H) \quad (7)$$

Da die beiden Fahrten (Heim und Ziel) Hin- und Retourfahrten sind und daher dieselbe Gewichtung (gleiche Auftrittswahrscheinlichkeit) haben müssen, gilt

$$g_1 = g_2 \quad (8)$$

Im zweiten Schritt werden die 3 Teile in 3 Gruppen, Heim, Ziel und Gast, aufsummiert.

Die Zielladung entspricht einfach der bereits berechneten teilweisen Ladung am Ziel-Ort, jedoch unter der Berücksichtigung, dass sich der Ziel-Ort innerhalb des Wohnortes (Bundesland oder Stadt, nicht aber Bezirk oder Dorf) befindet. Diese wird errechnet durch

$$s_{Z,t} = s_1 \quad (9)$$

$$g_{Z,t} = g_1 \cdot (1 - H) \quad (10)$$

Die Gruppe Gast beinhaltet Ladevorgänge durch Personen, deren Wohnort nicht mit dem Ziel-Ort (Bundesland oder Stadt) übereinstimmt. Dies sind an Wochentagen typischerweise Pendler oder am Wochenende z. B. Besucher. Diese Gruppe wird gesondert betrachtet. Einem Ort werden alle Gast-Fahrten, die von Personen anderer Wohnorte (=Gast) getätigt werden und den besagten Ort zum Ziel haben, entsprechend der Aufteilung Heim/Ziel, zugeordnet und mit

$$s_{G,t} = s_1 \quad (11)$$

$$g_{G,t} = g_1 \cdot (1 - H) \quad (12)$$

berechnet.

Nachdem alle Streckendaten entsprechend der Kriterien aufgeteilt oder vollständig einem Ort zugeordnet wurden, werden diese in den Ankunftszeitplan (je einen für Heim, Ziel und Gast) eingetragen. Die Eintragung in den Ankunftszeitplan erfolgt dermaßen, dass zum Zeitpunkt t_i ³ die Weglänge s_i und die Gewichtung g_i mit Hilfe von

$$s_i = \frac{\sum_n s_n \cdot g_n}{\sum_n g_n}, \quad (13)$$

$$g_i = \sum_n g_n \quad (14)$$

berechnet werden, wobei s_n und g_n die Weglängen bzw. Gewichtungen der einzelnen (aufgeteilten) Strecken aus dem Streckendatensatz zum Zeitpunkt t_i sind.

Die Kategorisierung, Mittelung und Eintragung der Strecken in Ankunftszeitpläne führt zu einer signifikanten Reduktion der Rechenzeit der weiteren Berechnungsvorgänge. Dabei kann es durch die Mittelung zu einer Vernachlässigung von unterschiedlichen Weglängen kommen. Aufgrund der zahlreichen Unterkategorien (siehe Kapitel 5.1) ergeben sich insgesamt 18.144 Ankunftszeitpläne (Produkt der Unterkategorien) mit je 96 Zeilen (Viertelstunden³ eines Tages). Bei 93.000 Streckendaten (siehe Kapitel 7.2.1) ergibt sich somit eine Wahrscheinlichkeit von 5 %, dass eine Mittelung nach Gleichung 13 stattfindet. Mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % wird daher überhaupt keine Mittelung durchgeführt und es findet keine Vernachlässigung statt.

³ Die Ankunftszeiten werden innerhalb einer 15 Minuten Auflösung aufgerundet und eingetragen

Abschließend werden die Gewichtungen der Ankunftszeitpläne mit der Demographie des jeweiligen Ortes **normiert** und mit einem **Fahrleistungsfaktor** multipliziert.

Die **Normierung** nach der Demographie erfolgt dermaßen, dass die Ankunftszeitpläne der Erwerbstätigen durch die Anzahl der Erwerbstätigen an diesem Ort dividiert wird, die Ankunftszeitpläne der Schüler durch die Anzahl der Schüler usw. (Daten aus Kapitel 8.3). Bei den Ankunftszeitplänen der Gast-Ladungen wird durch die Gesamtbevölkerung des Orts dividiert, da angenommen wird, dass die Einwohnerzahl eines Ortes eher auf die Pendler/Besucher Rückschlüsse zulässt, als die Demographie innerhalb des besuchten Ortes.

Diese Normierung hat den Zweck, für spätere Auswertungen die Möglichkeit zu haben, auf Abweichungen der Demographie innerhalb eines Ortes einzugehen. Beispielsweise könnte ein Dorf in einem Bundesland von der durchschnittlichen Demographie des Bundeslands abweichen. Durch die Normierung und die spätere Berücksichtigung der Demographie werden lokale Auswertungen für solche Sonderfälle möglich. Für Gesamtauswertungen wird die jeweilige Demographie des Ortes (Bundesland, Stadt) erneut mit der Gewichtung multipliziert und wodurch sich der Ankunftszeitplan wieder in seiner ursprünglichen Form (vor der Normierung) ergibt.

Der **Fahrleistungsfaktor** wird verwendet, um die Anzahl der tatsächlich getätigten Fahrten zu ermitteln. Da die Datengrundlage auf einer Mobilitätserhebung basiert, deren Gesamtfahrleistung von der in Kapitel 4.3 gezeigten Fahrleistung abweicht, wird mit Hilfe dieses Faktors auf die in dieser Arbeit verwendete Fahrleistung hochgerechnet. Die Ermittlung erfolgt nach der Gesamtauswertung für ganz Österreich (Gesamtbestand) und wird in Kapitel 8.5 erläutert.

8.4.2 Erstellung eines Ankunftszeitplans der LNF-Nutzung

Der Streckendatensatz für LNF, welcher in Kapitel 7.2.2 abgeleitet wurde, hat bereits die Form eines Ankunftszeitplans und kann daher direkt als solcher verwendet werden. Dieser muss lediglich der finalen Normierung und Skalierung unterzogen werden. Das Schema zur Erstellung des Ankunftszeitplans für LNF ist in Abbildung 21 zu finden.

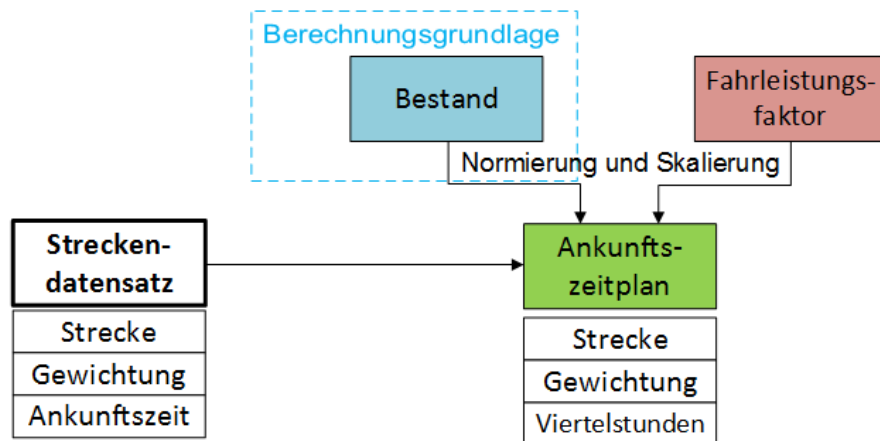


Abbildung 21 – Schema zur Erstellung eines Ankunftszeitplans für LNF

Die Gewichtungen (Hochrechnungsfaktoren), die beim PKW durch die Mobilitätsdatenbasis gegeben sind, werden beim LNF durch die prozentuelle Verteilung der Ankünfte dargestellt. Die Verteilung der Ankünfte repräsentiert ebenso wie die Gewichtungen eine Auftrittswahrscheinlichkeit. Die Verwendung dieser Prozentwerte (der Ankunfts-aufteilung) als Gewichtungsfaktoren ist daher gleichwertig. Durch die Skalierung und Normierung werden diese Gewichtungen, wie beim PKW, zur absoluten Anzahl der Fahrten.

Die Normierung des Ankunftsplans erfolgt, um weitere lokale Auswertungen zu ermöglichen. Beim LNF wird die Normierung nicht mit der Demographie durchgeführt (LNF-Nutzung hängt nicht vom Personentyp des Nutzers ab), sondern mit dem lokalen LNF-Bestand. Dieser wird, wie in Kapitel 7.2.2, aus [3] entnommen.

Die abschließende Skalierung des Ankunftsplans erfolgt durch den Fahrleistungsfaktor, welcher in Kapitel 8.5 vorgestellt wird. Diese Skalierung wird durchgeführt, um die Gesamtfahrleistung, die aus dem Mobilitätsverhalten resultiert, an die in dieser Arbeit verwendete Fahrleistung der Flotte anzupassen.

Das Ergebnis sind Ankunftspläne für LNF, die nach Ort und Wochentag unterschieden sind und denselben Aufbau haben, wie die Ankunftspläne des PKW. Sie beinhalten die Uhrzeit in Viertelstunden-Auflösung und die Anzahl der Ankünfte (Gewichtungen) sowie die bis dahin zurückgelegte Strecke.

8.5 Berechnung der Gleichzeitigkeit und des Leistungsgangs

Da die Ankunftszeitpläne für PKW und LNF dieselbe Form haben, ist die Berechnung ab hier für beide Fahrzeugarten gleich. Das Berechnungsschema ist in Abbildung 22 zu sehen. Ausgehend von den Ankunftszeitplänen wird die Ladung der Fahrzeuge berechnet und für ein Kalenderjahr in Viertelstunden-Auflösung aufsummiert. Das Ergebnis ist die Gleichzeitigkeit der Ladestellennutzung und der Leistungsgang. Die nachfolgenden Berechnungen sind ebenfalls nach allen Kategorien aus Abbildung 4 in Kapitel 5.1 unterschieden.

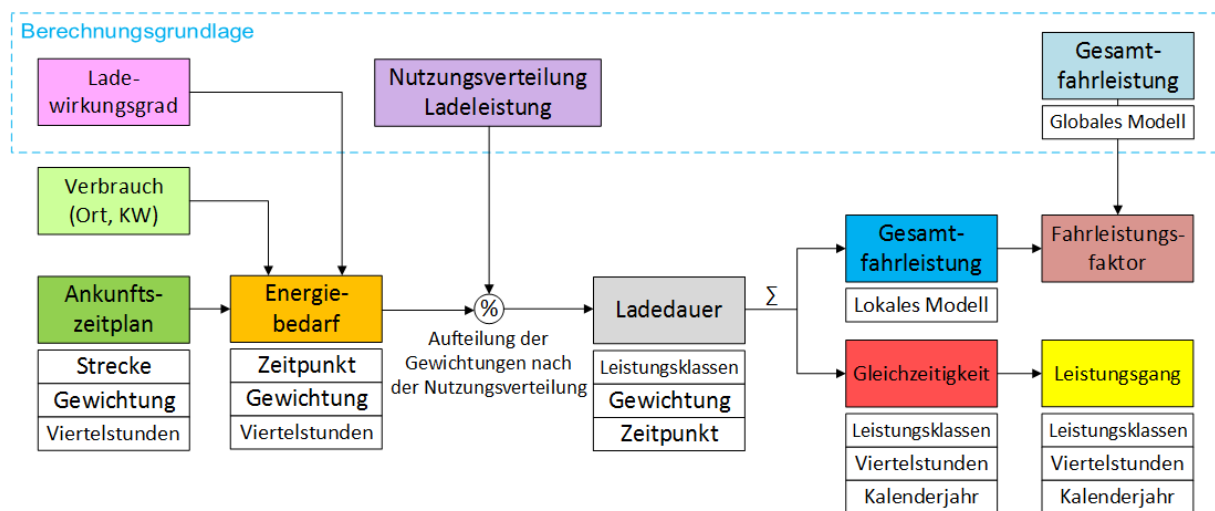


Abbildung 22 – Schema zur Berechnung der Gleichzeitigkeit der Ladestellennutzung und des Leistungsgangs nach Ladeleistungsklassen

Die nachfolgende Beschreibung erfolgt für einen beliebigen Zeitpunkt aus dem Ankunftszeitplan. Alle anderen Zeitpunkte werden in gleicher Weise berechnet und am Ende zeitlich korrekt aufsummiert.

Zunächst wird der nachzuladende Energiebedarf E_L der zurückgelegten Strecke mit

$$E_L = s_i \cdot b \quad (15)$$

berechnet. Dabei ist s_i die zurückgelegte Strecke aus der Zeile i (Zeitpunkt t_i) des Ankunftszeitplans (siehe Kapitel 8.4). Die Berechnung erfolgt mit Hilfe des Verbrauchs b nach Ort und Kalenderwoche (KW) aus Kapitel 6.3.

Der berechnete Energiebedarf wird nun entsprechend der verfügbaren Ladeleistungen (siehe Kapitel 8.1.1) verschieden weiterverwendet. Von diesem Punkt an wird

zusätzlich in den festgelegten Leistungsklassen von 2,3 - 50 kW (L1 - L5 genannt) unterschieden. Ausgehend vom Energiebedarf E_L wird für alle Ladeleistungen P_L die Ladezeit t_L mit

$$t_L(P_L) = \frac{E_L}{P_L \cdot f_{\eta L}(P_L)} \quad (16)$$

berechnet. $f_{\eta L}$ beschreibt dabei einen Faktor, um den der Ladewirkungsgrad je nach Ladeleistung P_L von den erwähnten 84 % nach Kapitel 8.2 abweicht. In dieser Arbeit wird der Wirkungsgrad nicht nach der Ladeleistung unterschieden. Es gilt daher in dieser Arbeit

$$f_{\eta L} = 1. \quad (17)$$

Je nach Ladeleistung ergeben sich 5 verschiedene Ladezeiten, mit denen separat weitergerechnet wird. Die nachfolgende Beschreibung erfolgt für eine Ladeleistung.

Die Ladezeit wird zunächst auf Viertelstunden abgerundet, da die Auflösung darauf beschränkt ist. Die dadurch entfallende Ladezeit, in Folge als Restladedauer $t_{L,Rest}$ bezeichnet, berechnet sich mit Hilfe der Modulo-Funktion (Rest-Berechnung)

$$t_{L,Rest}(P_L) = t_L(P_L) \bmod (15 \text{ min}). \quad (18)$$

Die Restladedauer $t_{L,Rest}$ wird nach der abgerundeten Ladedauer angeordnet, was nach der Berechnung der Gewichtungen gezeigt wird (siehe weiter unten).

Durch diese Berechnung der Ladezeiten wird vernachlässigt, dass der Verlauf der Ladeleistung nicht über den gesamten Ladevorgang konstant ist.

Nachdem die Ladedauern für die einzelnen Ladeleistungen berechnet wurden, muss die Nutzungsverteilung der Ladeleistungen berücksichtigt werden. Dafür wird die Gewichtung (Hochrechnungsfaktor) der Strecke entsprechend der Nutzungsanteile aus Abbildung 19 (Kapitel 8.1.1) aufgeteilt. Dies erfolgt mit Hilfe von

$$g_k(P_L) = g_i \cdot A_L(P_L), \quad (19)$$

wobei g_i die Gewichtung der jeweiligen Strecke aus dem Ankunftszeitplan und A_L der Nutzungsanteil aus Abbildung 19 (Kapitel 8.1.1) abhängig von der Ladeleistung P_L ist. Das Ergebnis ist die von der Ladeleistung abhängige, aufgeteilte Gewichtung $g_k(P_L)$.

Die berechnete Gewichtung g_k wird nun in eine Jahresauflistung (Struktur siehe Tabelle 10) eingetragen. Diese Jahresauflistung beinhaltet Zeilen für 52 Wochen mit 7 Tagen und 24 x 4 Viertelstunden. Die insgesamt 34.944 Zeilen repräsentieren daher

die Zeit in Viertelstundenauflösung für ein ganzes Kalenderjahr. In den Spalten werden die aufgeteilten Gewichtungen der einzelnen Leistungsklassen L1 - L5 eingetragen und zusätzlich die zurückgelegte Gesamtstrecke für weitere Auswertungszwecke.

Die Eintragung der Gewichtungen $g_k(P_L)$ erfolgt so, dass der Beginn der Ladung und die berechnete Ladedauer (je nach Ladeleistung) berücksichtigt werden. Dazu wird die Gewichtung g_k in die zugehörige Spalte (je nach Ladeleistung P_L) eingetragen. Die Zeile wird durch den Ankunftszeitpunkt t_A festgelegt. Ausgehend von der Zeile des Ankunftszeitpunkts wird die Gewichtung in so viele nachfolgende Zeilen eingetragen, wie die zuvor berechnete Ladezeit t_L (ganze Viertelstunden) einnimmt.

Nach der Eintragung der Gewichtungen für die ganzen Viertelstunden, die durch Abrundung ermittelt wurden, wird in die nachfolgende Zeile die um die Restladedauer reduzierte Gewichtung eingetragen. Diese berechnet sich mit

$$g_{k,R}(P_L) = \frac{t_{L,Rest}(P_L)}{15 \text{ min}} \cdot g(P_L) , \quad (20)$$

was einer Mittelung der Gleichzeitigkeit über die restliche Ladedauer gleich kommt. Dadurch wird im Rahmen der Viertelstundenauflösung eine Vereinfachung für die Ladeleistung und die Gleichzeitigkeit getroffen, jedoch ergibt sich im Integral über das ganze Jahr, z. B. für den Energiebedarf, kein Fehler.

Die somit eingetragenen Gewichtungen stellen die zu einem gewissen Zeitpunkt (je nach Zeile) gleichzeitig ladenden Fahrzeuge (Ladeleistung je nach Spalte) dar, das heißt die Gleichzeitigkeit.

Die zurückgelegte Strecke der Fahrt wird ebenfalls in die Jahresauflistung eingetragen. Dies ist notwendig, um die Gesamtfahrleistung basierend auf dem Mobilitätsverhalten zu berechnen. Die zurückgelegte Gesamtstrecke s_k berechnet sich mit Hilfe von

$$s_k = s_i \cdot g_i . \quad (21)$$

Dabei ist s_i die Strecke einer Fahrt (für die bereits die Ladedauern bzw. die Gleichzeitigkeit berechnet wurden) und g_i die Gewichtung, was der Anzahl der Fahrten entspricht. Für die gesamte zurückgelegte Strecke s_k müssen diese Parameter daher multipliziert werden, um alle Fahrten dieser Art zu berücksichtigen. Die Eintragung der Gesamtstrecke s_k in die Jahresauflistung erfolgt, im Gegensatz zu den Gewichtungen, nur zum Zeitpunkt der Ankunft t_A (Ladebeginn), da für die Ermittlung der

Gesamtfahrleistung die zurückgelegte Strecke nur einmal gezählt werden muss und nicht mit so vielen Einträgen wie der Ladevorgang benötigt.

Tabelle 10 – Eintragung der aufgeteilten Gewichtungen in eine Jahresauflistung

Zeit t [min]	Gleichzeitigkeit Leistungsklasse L	Gesamtstrecke s [km]
...	...	...
$t_A - 15$	0	0
t_A	g_k^*	s_k
$t_A + 15$	g_k^*	0
...	g_k^*	0
$t_A + t_L^{**}$	g_k^*	0
$t_A + t_L + 15$	$g_{k,R}^*$	0
$t_A + t_L + 30$	0	0
...	...	...
* $g_k = g_k(P_L, t)$, zum Zweck der Übersichtlichkeit entfallen		
** Auf Viertelstunden gerundeter Wert		

Die hier gezeigte Eintragung in die Jahresauflistung erfolgte für eine einzelne Fahrt aus dem Ankunftszeitplan. Alle weiteren Fahrten aus dem Ankunftszeitplan werden genauso berechnet und die Eintragung in die Jahresauflistung erfolgt durch Addition zu den vorherigen Eintragungen mit Hilfe von

$$g(P_L, t) = \sum_k g_k(P_L, t), \quad (22)$$

$$s(t) = \sum_k s_k(t), \quad (23)$$

wobei $g(P_L, t)$ die **Gleichzeitigkeit aller Ladungen** und $s(t)$ die **Länge aller Strecken** bezeichnet. Damit wird zu jeder Ladung, die sich aus dem Ankunftszeitplan ergibt, die Gleichzeitigkeit zur richtigen Zeit und mit der richtigen Dauer eingetragen. Bei Überschneidung mehrerer gleichzeitiger Ladungen (durch mehrere Strecken) erfolgt die Aufsummierung nach Gleichung 22 und 23, was einer Erhöhung der Gleichzeitigkeit zum jeweiligen Zeitpunkt entspricht.

Multipliziert man die Gleichzeitigkeit $g(P_L, t)$ mit der zugehörigen Ladeleistung P_L , erhält man den Leistungsverlauf bzw. **Leistungsgang** $P(P_L, t)$, der durch Ladungen der Leistungsklasse P_L erzeugt wird. Die Summe der Leistungsgänge aller Leistungsklassen ergibt den **Gesamtleistungsgang** $P(t)$, welcher den von der Zeit abhängigen Leistungsbedarf aller Ladevorgänge darstellt. Dieser ist in Kapitel 8.6 zu sehen.

Summiert man alle eingetragenen Strecken $s(t)$ (für alle Unterkategorien) auf, ergibt sich aus dem lokalen Modell die Gesamtfahrleistung für ein Jahr. Diese resultiert aus dem verarbeiteten Mobilitätsverhalten und muss auf die Gesamtfahrleistung des globalen Modells abgestimmt werden. In einer Schleife (siehe Abbildung 5, Kapitel 5.2) wird mit Hilfe eines Fahrleistungsfaktors die Fahrleistung des lokalen Modells entsprechend angepasst. Dieser **Fahrleistungsfaktor** berechnet sich durch

$$\text{Fahrleistungsfaktor} = \frac{\text{Globale Gesamtfahrleistung}}{\text{Lokale Gesamtfahrleistung}} \quad (24)$$

und wird im Ankunftszeitplan mit den Gewichtungen multipliziert. Dies erfolgt, weil die Gewichtungen die Anzahl der Fahrten darstellen und nur diese sich erhöhen kann (Hochrechnung der Mobilitätsenerhebung auf die Flotte), nicht aber die Strecke der Einzelfahrt, da die Distanz zwischen zwei Orten festgelegt ist. Diese Anpassung muss nur nach dem ersten Berechnungsdurchlauf durchgeführt werden, da das Modell hinsichtlich Gewichtungen linear ist und somit die Skalierung mit dem Fahrleistungsfaktor bereits nach dem ersten Schritt ein korrekt angepasstes Ergebnis liefert.

Die Resultate der gezeigten Berechnung sind aus dem Mobilitätsverhalten abgeleitet und zeigen daher den infrastrukturellen Bedarf für 100 % BEV-Anteil auf. Für niedrigere BEV-Bestände müssen die Ergebnisse (Leistungsgang, Gleichzeitigkeit, Energiebedarf etc.) entsprechend skaliert werden.

Das Berechnungsmodell wurde in MATLAB umgesetzt, was lokale Auswertungen oder Neuberechnungen mit anderen Eingangsparametern ermöglicht. Die Auswertungsmöglichkeiten können von einer einfachen Gesamtauswertung von Österreich bis hin zur Betrachtung des lokalen Verteilernetzes für eine Siedlung in einem bestimmten Ort (Bundesland) mit einer bestimmten Einwohnerzahl reichen. Auch die Demographie der Siedlung, die vom Ort abweichen kann, kann im Modell angepasst werden. Dadurch ist es möglich, das Modell an die lokalen Verhältnisse anzupassen und individuelle Auswertungen durchzuführen.

Die Ergebnisse, die sich daraus erzielen lassen, sind der öffentliche und private Ladestellenbedarf, der Energiebedarf, der Leistungsgang und die Gleichzeitigkeit, die in weiterer Folge die Abschätzung der Auswirkungen auf das lokale Verteilernetz ermöglichen. Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass es sich um ein für den jeweiligen Ort durchschnittliches Mobilitätsverhalten mit durchschnittlichen Eingangsgrößen (Temperatur etc.) handelt.

8.6 Ergebnisse für Gleichzeitigkeit und Leistungsgang

Die Gleichzeitigkeit und der Leistungsgang sind wichtige Ergebnisse dieser Arbeit. Ersteres ist für den Energieversorger bzw. die Netzbetreiber von Interesse, während letzteres für den Ausbau der Ladeinfrastruktur von großer Bedeutung ist. Das lokale Modell ermöglicht in diesen Punkten sehr detaillierte lokale Auswertungen oder auch eine Gesamtbetrachtung für Österreich. In diesem Kapitel sollen verschiedene Auswertungen für den Leistungsgang bzw. die Gleichzeitigkeit gezeigt werden.

8.6.1 Leistungsgang im Jahr 2030

In Abbildung 23 ist der kumulierte Leistungsgang für ganz Österreich für PKW und LNF im Jahr 2030 (für einen BEV-Anteil von 11 % PKW und 6,5 % LNF) zu sehen.

Es ist zu erkennen, dass der Leistungsgang 4 diskrete Bereiche aufweist, die auf das unterschiedliche Mobilitätsverhalten in den einzelnen Jahreszeiten zurückzuführen sind. Diese Bereiche könnten grundsätzlich an ihren Rändern geglättet werden, um einen besseren Übergang zueinander zu schaffen, jedoch führt jede Art der Glättung zu einer Reduktion der Spitzenleistungen. Gerade diese Spitzenlasten sind aber wesentlich, damit die Grenzen des Verteilernetzes bzw. der Energieversorgung ermittelt werden können. Um daher eine unzulässige Glättung der Lastspitzen zu vermeiden, wurde auf eine Abrundung dieser vier diskreten Bereiche verzichtet.

Neben den Jahreszeiten (Mobilitätsverhalten) ist der Temperatureinfluss des Verbrauchs im Leistungsgang wiederzufinden. So ist die Leistung in den kälteren Jahreszeiten höher als in den wärmeren. Das Maximum tritt in KW 3 auf und beträgt **1.090 MW**, was ca. **10,8 % des Maximums des Lastprofils von Österreich** in KW 3 im Jahr 2018 entspricht. Das Lastprofil von Österreich für KW 3 im Jahr 2018 kann Abbildung 24 entnommen werden. Die KW 3 soll daher im nächsten Kapitel detaillierter betrachtet werden.

Es ist anzumerken, dass in Abbildung 23 Ladevorgänge mit höherer Leistung (> 50 kW) nicht berücksichtigt wurden. Diese werden nur als Einzelfall betrachtet, da sie in der Regel eine eigene Anbindung an das Netz benötigen.

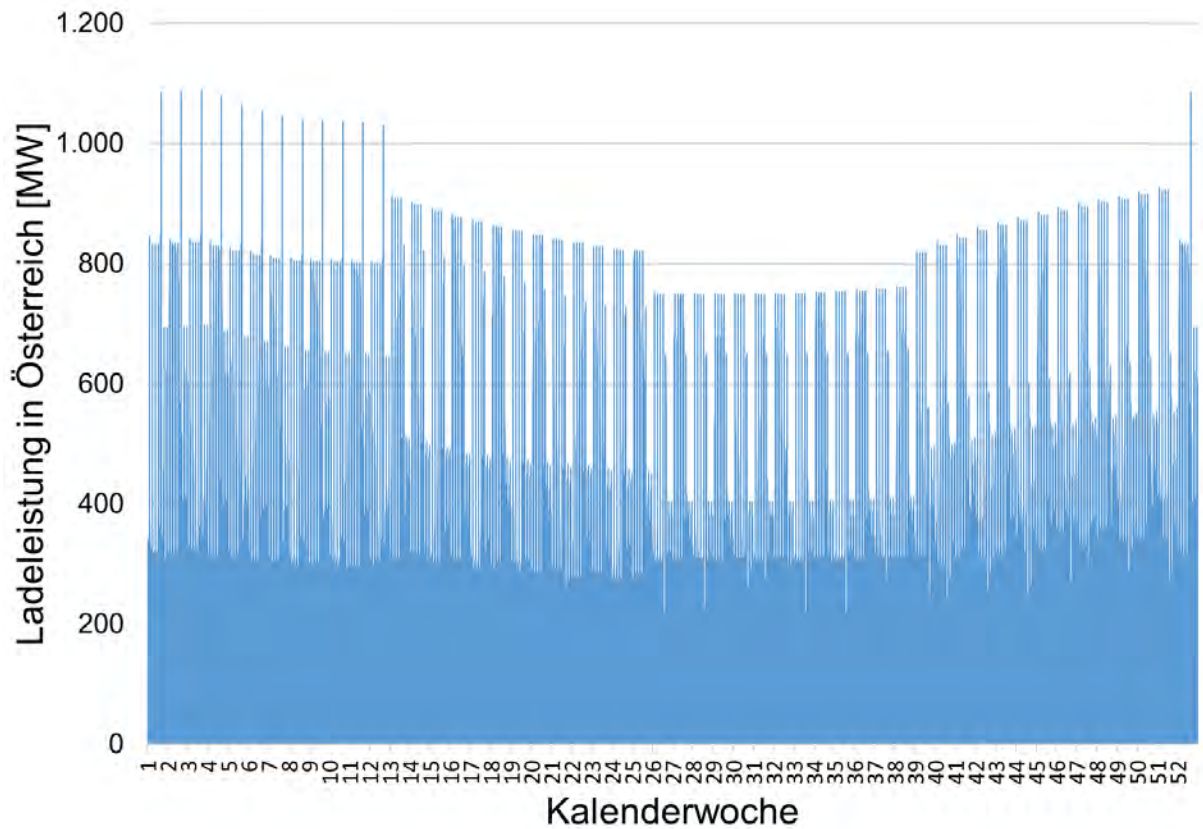


Abbildung 23 – Kumulierter Leistungsgang in Österreich im Jahr 2030

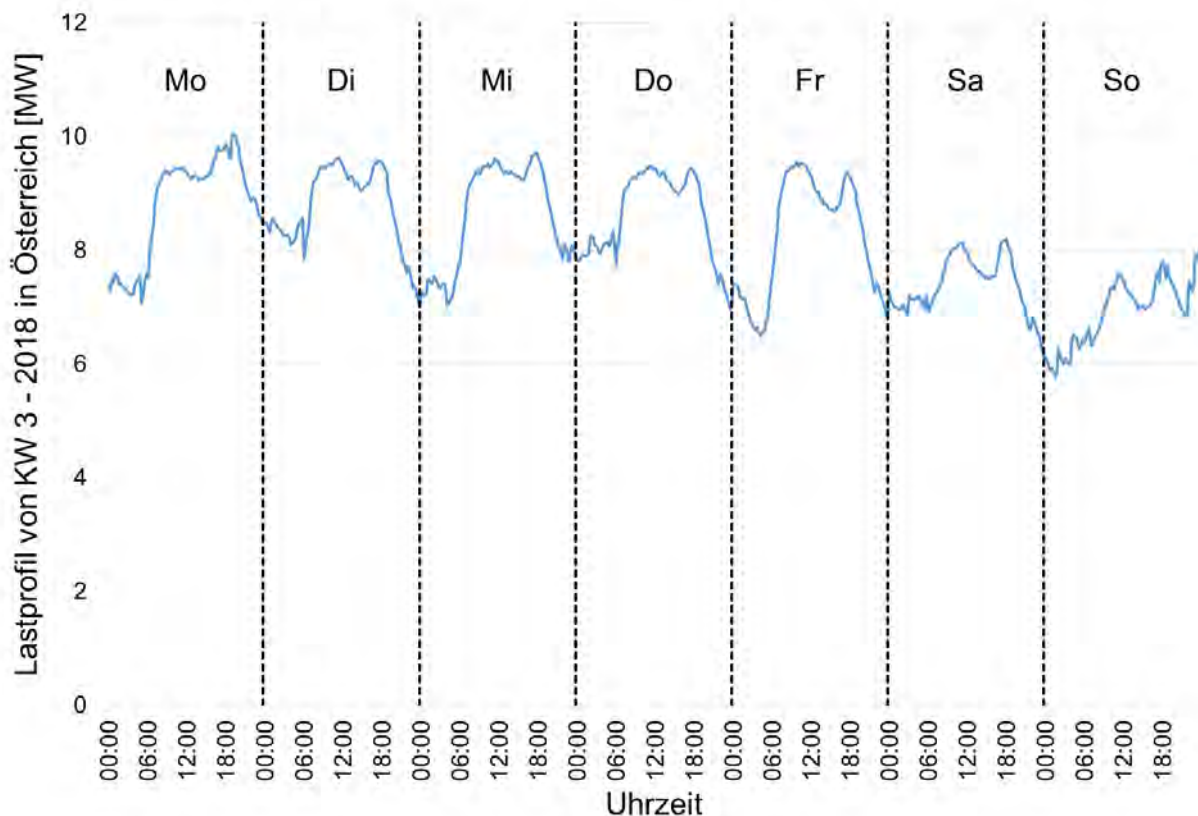


Abbildung 24 – Lastprofil von KW 3 - 2018 in Österreich [26], [eigene Darstellung]

8.6.2 Kalenderwoche mit maximalem Leistungsgang im Jahr 2030

Wie bereits erwähnt, tritt die Maximalleistung in der KW 3 auf. In den nachfolgenden Abbildungen ist der Leistungsgang der KW 3 unterschieden nach dem Ladeort (Abbildung 25 und Abbildung 26) bzw. der Ladeleistung (Abbildung 27 und Abbildung 28), jeweils kumuliert bzw. aufgeteilt dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die maximale Leistung an einem Freitagabend auftritt. Das lokale Modell erlaubt aufgrund der aufwendigen Unterscheidungsstruktur eine einfache Suche nach der Ursache für diese Spitze. In Abbildung 26 ist zu erkennen, dass es zu diesem Zeitpunkt zu einer erhöhten Ladeleistung am Ziel kommt. In Abbildung 28 bestätigt sich dies durch den erhöhten Anteil an Schnellladungen (44 kW und 50 kW). Mit dieser Information konnte in einer einfachen Rückverfolgung im lokalen Modell festgestellt werden, dass dies aus den Mobilitätsdaten herrührt. Diese geben an, dass es am Freitagabend zu einer erhöhten Anzahl an Fahrten kommt, die von Erwerbstätigen zum Zweck der Freizeit durchgeführt werden und deren Ankunftszeiten in dasselbe Fenster fallen. Diese Zielfahrten führen aufgrund der hohen Anzahl und Ladeleistung zu einer Spitze.

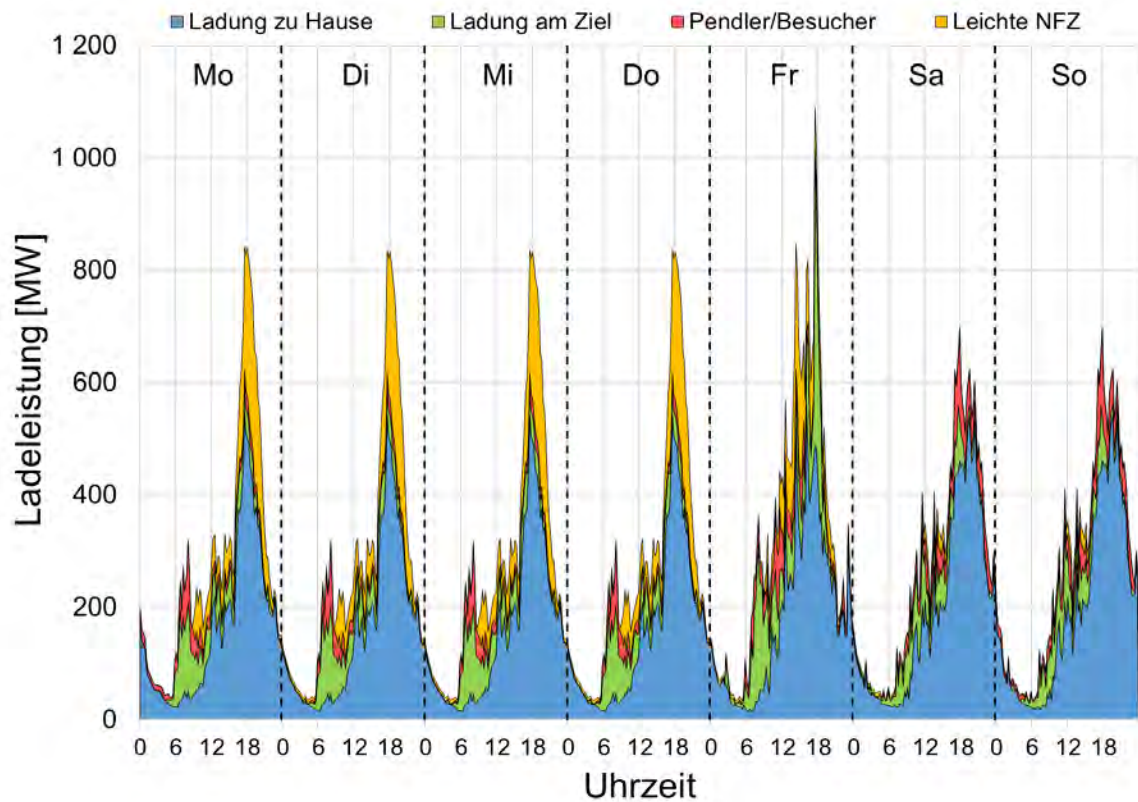


Abbildung 25 – Kumulierter Leistungsgang der Maximalwoche (KW 3) in Österreich im Jahr 2030 unterschieden nach Nutzung

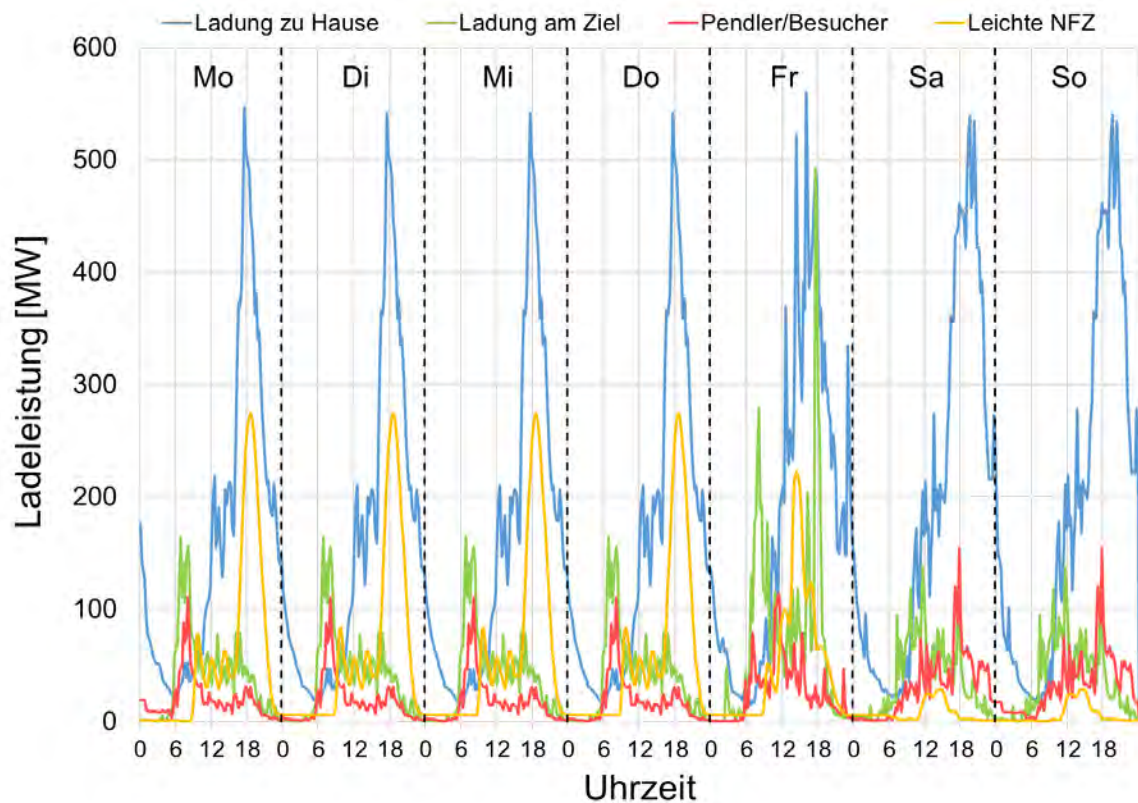


Abbildung 26 – Aufgeteilter Leistungsgang der Maximalwoche (KW 3) in Österreich im Jahr 2030 unterschieden nach Nutzung

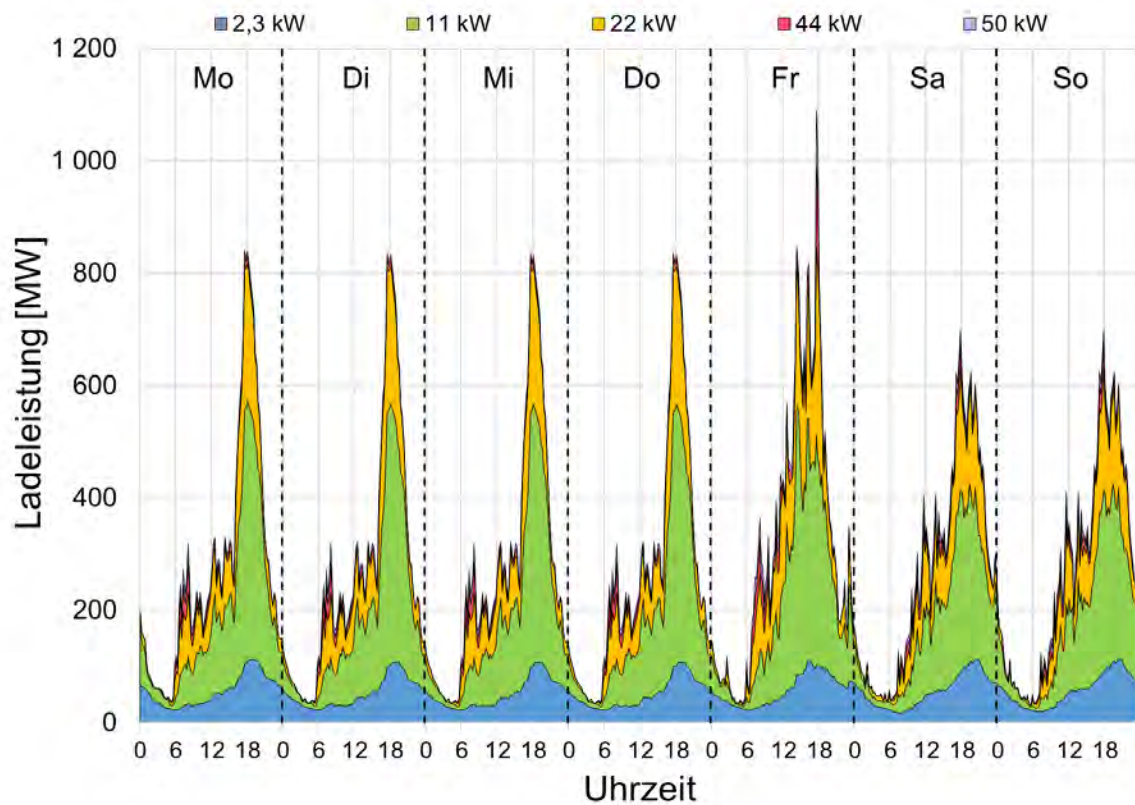


Abbildung 27 – Kumulierter Leistungsgang der Maximalwoche (KW 3) in Österreich im Jahr 2030 unterschieden nach Ladeleistungsklasse

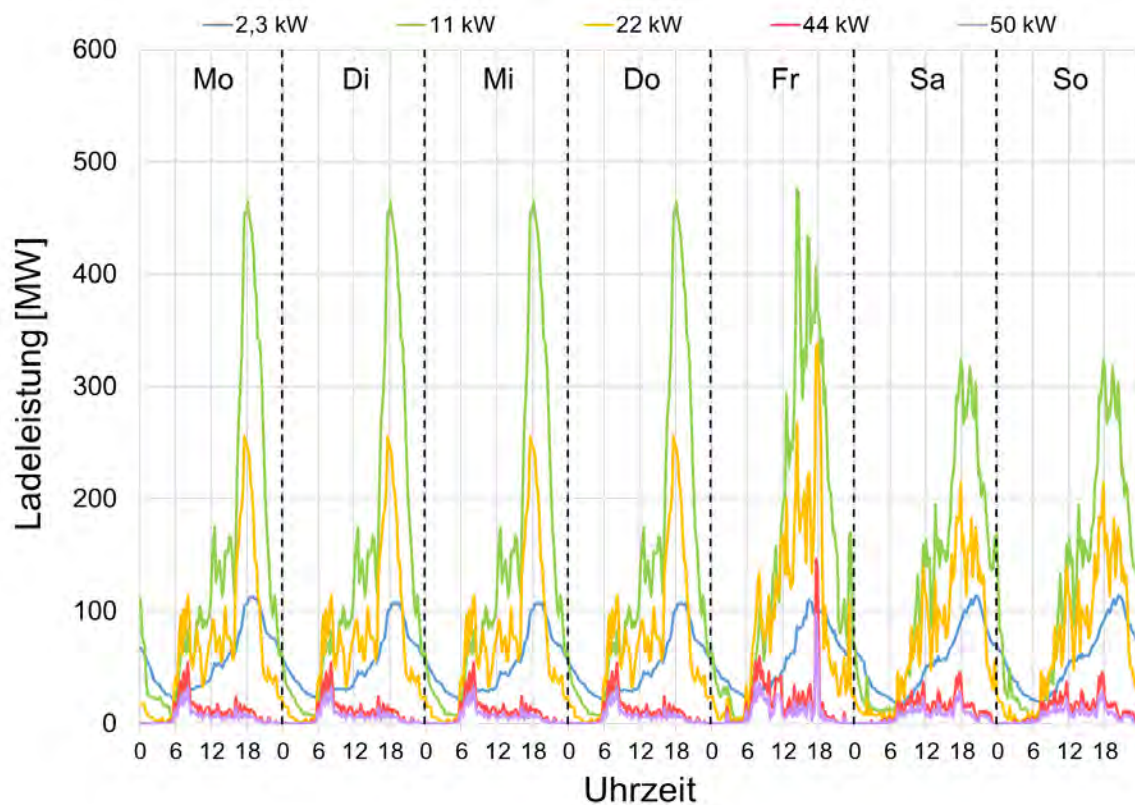


Abbildung 28 – Aufgeteilter Leistungsgang der Maximalwoche (KW 3) in Österreich im Jahr 2030 unterschieden nach Ladeleistungsklasse

8.6.3 Kalenderwoche mit maximalem Leistungsgang bei 100 % BEV-Bestand

Für 100 % BEV-Bestandsanteil (auf Basis des Bestands im Jahr 2017) ergibt sich der Leistungsgang entsprechend Abbildung 29, Abbildung 30, Abbildung 31 und Abbildung 32.

Es ist zu erkennen, dass der Einfluss der LNF im Vergleich zum Jahr 2030 gestiegen ist, da die BEV-Bestandsanteile nun gleich sind. In der Bestandsentwicklung bis 2030 (siehe Abbildung 3) ist der BEV-Anteil beim LNF deutlich unter dem PKW. Obwohl die LNF wesentlich weniger in ihrer Anzahl sind, haben sie doch einen signifikanten Anteil am Gesamtleistungsgang. Grund dafür ist einerseits der erhöhte Verbrauch und daher die erhöhte Ladezeit, was in einer erhöhten Gleichzeitigkeit resultiert. Andererseits sind LNF wesentlich häufiger im Einsatz als PKW, was neben einer höheren Fahrleistung auch in einer höheren Anzahl an Fahrten und somit einer erhöhten Gleichzeitigkeit resultiert.

Das Maximum tritt wieder an einem Freitag in der KW 3 auf und beträgt 9,37 GW, was rund 93 % des Maximums des Lastprofils von Österreich in KW 3 - 2018 entspricht.

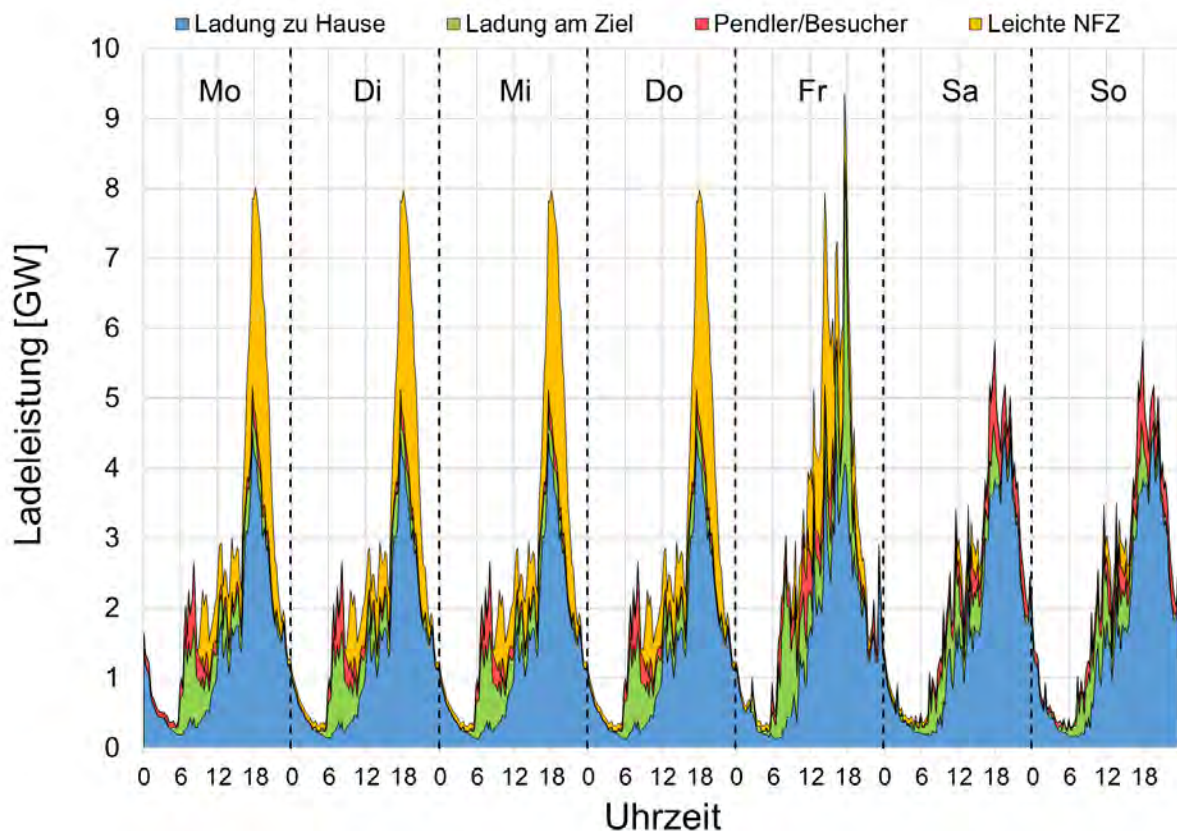


Abbildung 29 – Kumulierter Leistungsgang der Maximalwoche (KW 3) in Österreich bei 100 % BEV-Bestand unterschieden nach Nutzung

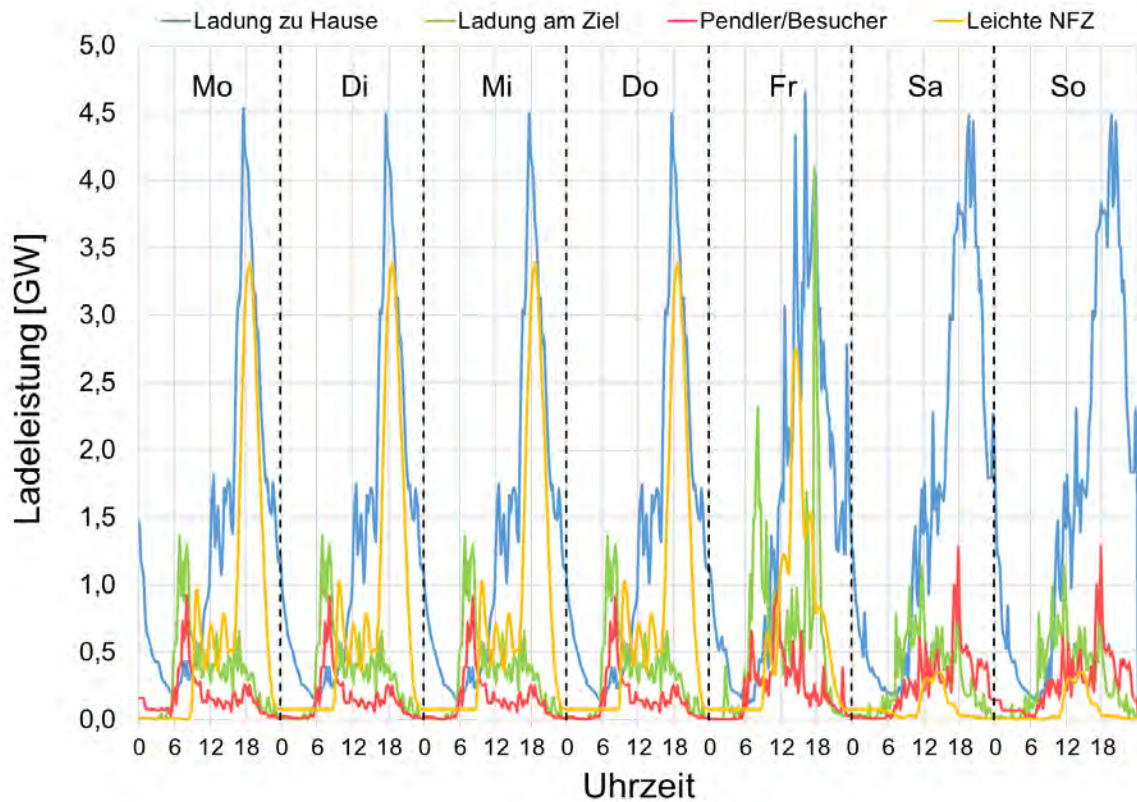


Abbildung 30 – Aufgeteilter Leistungsgang der Maximalwoche (KW 3) in Österreich bei 100 % BEV-Bestand unterschieden nach Nutzung

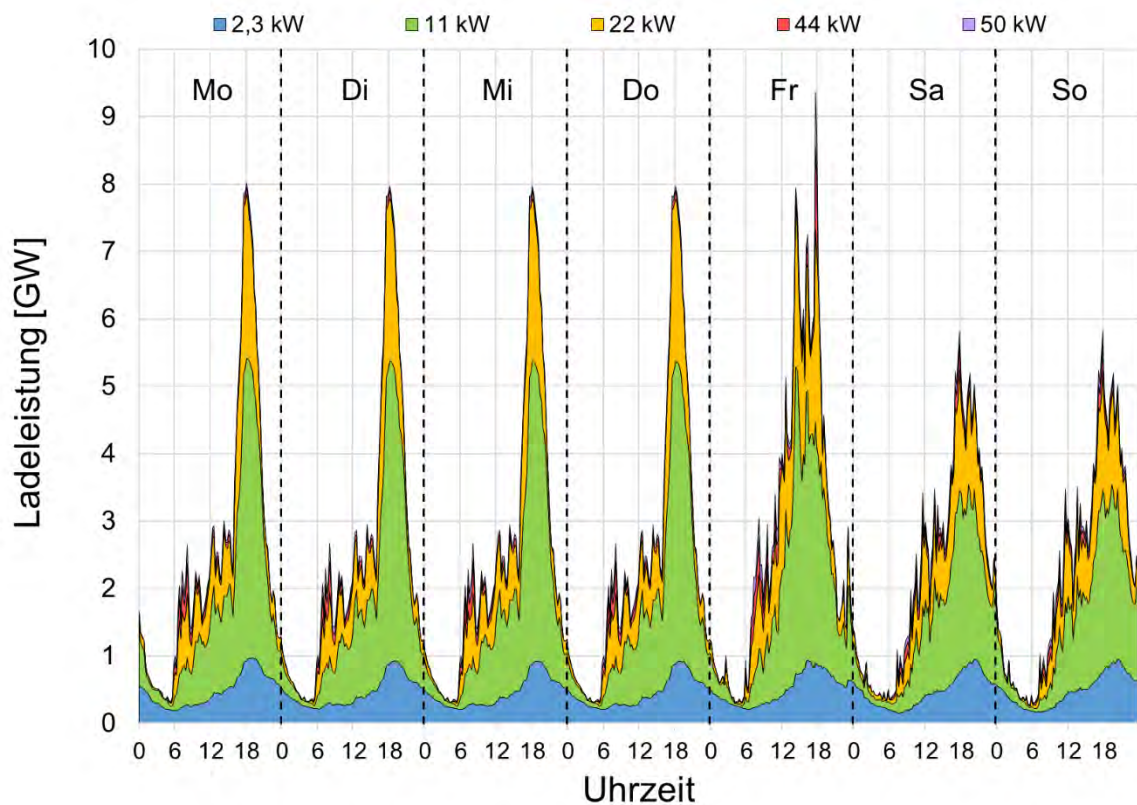


Abbildung 31 – Kumulierter Leistungsgang der Maximalwoche (KW 3) in Österreich bei 100 % BEV-Bestand unterschieden nach Ladeleistungsklasse

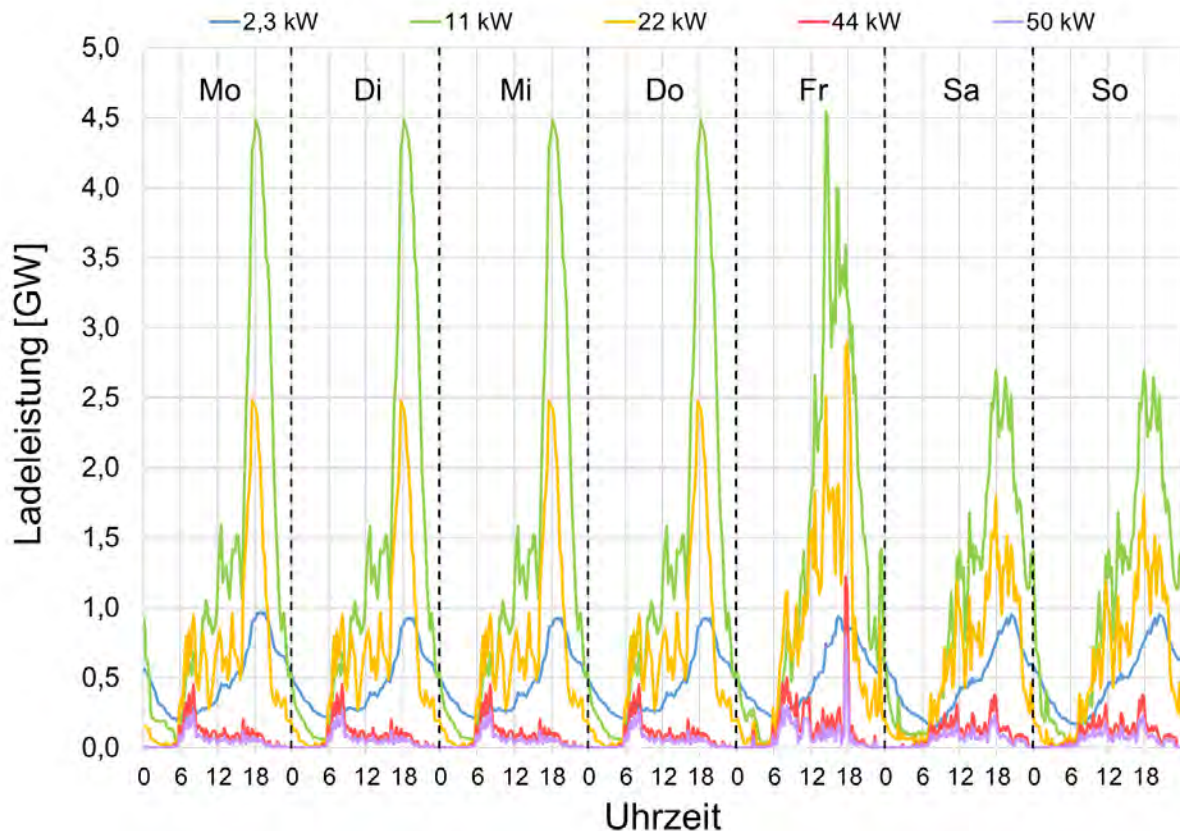


Abbildung 32 – Aufgeteilter Leistungsgang der Maximalwoche (KW 3) in Österreich bei 100 % BEV-Bestand unterschieden nach Ladeleistungsklasse

8.7 Energiebedarf durch Elektromobilität

Durch den höheren Anteil an BEV kommt es zu einem steigenden elektrischen Energiebedarf. Dieser Energiebedarf muss im Idealfall durch regenerative Quellen gedeckt werden, was in Hinblick auf die sehr ambitionierten Treibhausgasreduktionsziele des Energiesektors bis 2030 eine zusätzliche Schwierigkeit darstellt.

Aus dem lokalen Modell kann mit Hilfe des Leistungsgangs durch einfache Integration der Energiebedarf eines Jahres berechnet werden. Zusätzlich muss der BEV-Bestand berücksichtigt werden. Der daraus berechnete jährliche Energiebedarf durch BEV in Österreich ist in [Abbildung 33](#) zu sehen. **Im Jahr 2030 beträgt der Verbrauch durch Elektromobilität (PKW & LNF) ca. 2,23 TWh.** Der Inlandsstromverbrauch in Österreich im Jahr 2016 beträgt nach [27] rund 70,7 TWh. Daraus folgt, dass es **bis 2030 zu einer Zunahme des Strombedarfs von 3,2 %** kommt. Bei 100 % BEV (auf Basis des heutigen Bestands) beträgt der Energieverbrauch durch BEV (PKW & LNF) 19,8 TWh, was einem Mehrbedarf von 28 % entspricht.

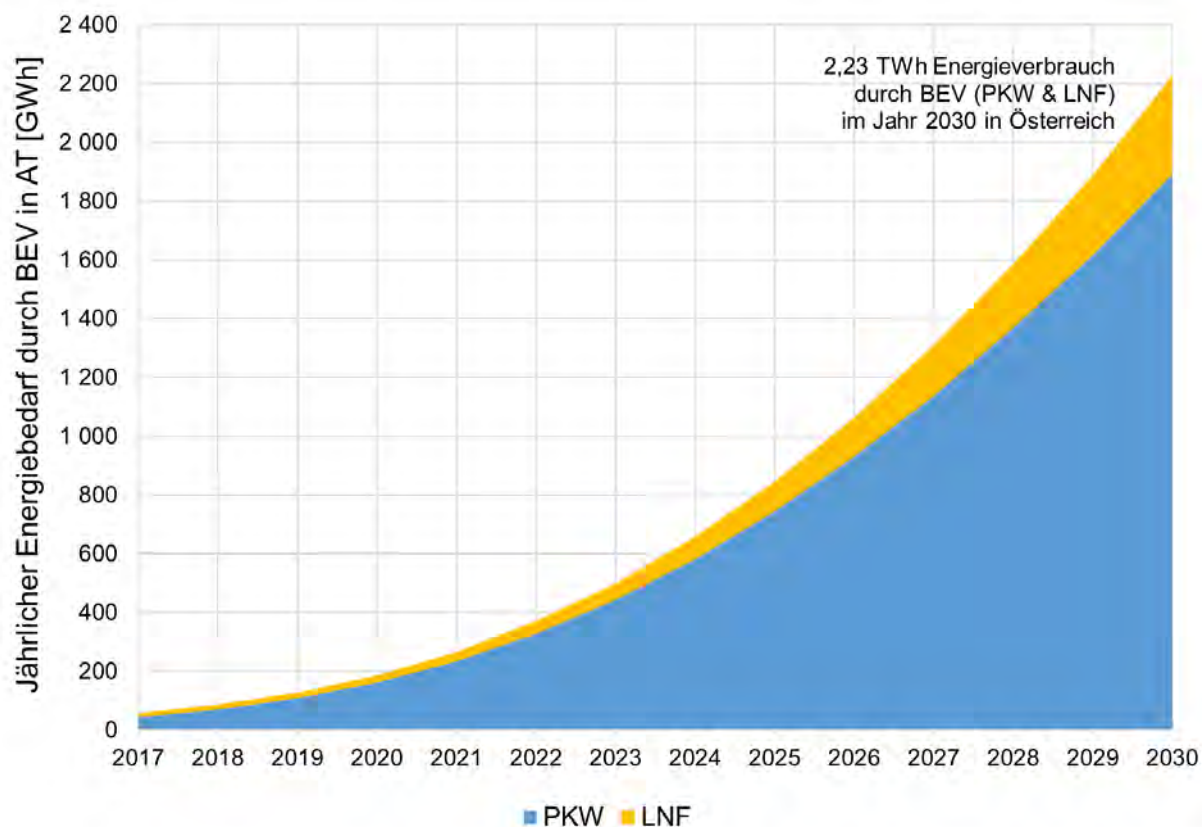


Abbildung 33 – Jährlicher Energiebedarf durch BEV (PKW & LNF) in Österreich

9 Benötigte Anzahl an Ladestationen

Die benötigte Anzahl an Ladestellen ist neben der Information über den zukünftigen Ladestellbedarf vor allem für die Kosten zur Errichtung von Ladeinfrastruktur relevant. Nachfolgend soll die Berechnung der benötigten Ladestellen gezeigt werden.

9.1 Berechnung des Ladestellenbedarfs

Der Ladestellenbedarf wird je nach Fahrtziel unterschiedlich ermittelt. Des Weiteren wird bezüglich des Parkplatztyps (Straßenrand oder Stellplatz/Garage) unterschieden.

Bei den Heimpladestellen wird angenommen, dass jedes zugelassene Fahrzeug grundsätzlich mindestens eine Heimpladestelle benötigt. Bei den Ziel- und Gastladestellen wird die im lokalen Modell errechnete Gleichzeitigkeit verwendet. Dabei wird jeweils das Maximum der Gleichzeitigkeit für jede Ladeleistung, nach Ort unterschieden, verwendet. Die Summe der Maxima aller Ladeleistungen und Ladeorte ergibt mehr Ladestellen als tatsächlich gleichzeitig benutzt werden, da die Maxima zu unterschiedlichen Zeitpunkten auftreten können. Für den Bedarf an Ladestellen wird jedoch das Maximum jeder Ladeleistung und jedes Ladeortes benötigt, da dies die Anzahl darstellt, die mindestens errichtet werden muss, auch wenn nicht alle Ladestellen aller Ladeorte zur gleichen Zeit benutzt werden.

Die Unterscheidung, ob es sich bei einem Heimstellplatz um den Straßenrand (Parkstreifen) oder um einen Stellplatz (Garage, Parkplatz etc.) handelt, wird mit Hilfe der zur Verfügung stehenden eigenen Stellplätze abgeschätzt. Der Begriff „Stellplatz/Garage“ beinhaltet sowohl öffentlich zugängliche Parkgaragen bzw. Parkplätze als auch den eigenen Stellplatz im Mehrparteienhaus und dergleichen.

Die Anzahl der eigenen Stellplätze ist als Prozentsatz der Hauptsitzwohnungen nach [28] in Tabelle 11 zu sehen. Die absolute Anzahl an eigenen Stellplätzen ist durch einfaches Ausmultiplizieren zu ermitteln, wobei für >2 Plätze in dieser Arbeit mit 3 Plätzen gerechnet wird (keine Angabe über die genaue Anzahl für >2 vorhanden), was eine Vereinfachung darstellt. Daraus ergibt sich die Anzahl der eigenen Stellplätze, die mit einer Ladestation ausgestattet werden können.

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass bei 100 % der Stellplätze eine Ladestelle montiert wird. Durch diese Annahme ergibt sich die absolute Mindestanzahl

an benötigten Ladestationen für die Heimladung am Straßenrand und dadurch ein Minimum an Kosten (Ladestationen am Straßenrand verursachen höhere Kosten). Der Einfluss dieser Annahme wird in einer Sensitivitätsanalyse in Kapitel 13.5 untersucht.

Tabelle 11 – Garagen und Autoabstellplätze nach Bundesland [28]

Bundesland	Wohnungen [1.000]	0 Plätze [%]	1 Platz [%]	2 Plätze [%]	>2 Plätze [%]
Burgenland	123,8	15,6	38,9	29,1	16,4
Kärnten	251,3	18,9	36,0	25,8	19,4
Niederösterreich	716,4	20,7	39,2	24,8	15,3
Oberösterreich	627,8	22,2	36,7	22,7	18,5
Salzburg	237,5	21,6	39,3	21,5	17,7
Steiermark	540,8	25,2	34,6	22,8	17,4
Tirol	322,4	20,9	36,2	19,1	23,9
Vorarlberg	165,1	14,6	38,1	19,8	27,5
Wien	904,8	75,0	21,2	3,0	0,8

Subtrahiert man die Anzahl der Stellplätze vom Bestand (jedes Bundeslands), ergibt sich daraus die Anzahl der Fahrzeuge, die keinen eigenen Stellplatz und somit keine eigene Ladestelle haben bzw. haben können. Diese Anzahl entspricht der mindestens erforderlichen Zahl an Heimladestellen am Straßenrand je nach Bundesland.

Da in [28] keine Ausweisung der großen Städte vorhanden ist, wird für alle großen Städte der Anteil, der sich für Wien ergibt, verwendet. Bei den Ländern wurde der Anteil der großen Städte entsprechend abgezogen, um die Werte der Bundesländer ohne große Städte zu ermitteln.

Für die Verteilung der Ladeleistungen bei den benötigten Heimladestellen wurde die Aufteilung entsprechend Abbildung 19 in Kapitel 8.1.1 verwendet, welche die Nutzung der Ladestellen nach Ladeleistung wiedergibt. Dies ist unter der Annahme zulässig, dass bei allen Heimladungen am eigenen Stellplatz immer die installierte Leistung verwendet wird. Zusätzlich wird davon ausgegangen, dass bei Heimladungen am Straßenrand nach der vollendeten Ladung die Ladestelle nicht freigegeben wird, wodurch die Ladestelle weiterhin besetzt ist. Dadurch verhält sich die Heimladestelle am Straßenrand hinsichtlich Nutzungsverteilung wie eine Ladestelle am eigenen

Stellplatz, wodurch die Verwendung der Nutzungsverteilung der Heimpladeleistung zulässig ist.

Bei den Ziel- und Gastladestellen werden die Maxima der Gleichzeitigkeit verwendet. Die Aufteilung in Straßenrand und Stellplatz/Garage wird mit jeweils 50 % festgelegt. Dabei wird mangels besserer Daten die vereinfachte Annahme getroffen, dass sich die Ladestellen der Zielfahrten gleich auf Straßenrand und Stellplatz/Garage aufteilen. In einer Sensitivitätsanalyse in Kapitel 13.6 wird der Einfluss dieser Annahme untersucht.

Bei den LNF wird angenommen, dass jedes Fahrzeug eine eigene Ladestation benötigt. Daher ist die Anzahl der Stationen gleich dem Bestand. Die Verteilung der Ladeleistungen wurde ebenfalls mit Abbildung 19 in Kapitel 8.1 und nach denselben Überlegungen wie beim PKW (Heim) durchgeführt.

Die Anzahl, die nun berechnet wurde, ist die Anzahl der mindestens benötigten Ladestationen. Da kaum mit einer perfekten Verteilung aller Fahrzeuge auf die jeweilige Ladestation (für den jeweiligen Zweck am jeweiligen Zielort) zu rechnen ist, werden sogenannte **Auslastungsfaktoren** festgelegt, die mit den mindestens benötigten Ladestationen multipliziert werden und zur praktisch benötigten Anzahl führen sollen.

Sind die Auslastungsfaktoren gleich 1, wird zum jeweils ungünstigsten Zeitpunkt eine perfekte Verteilung aller Fahrzeuge auf alle verfügbaren Ladestationen (für den jeweiligen Zweck am jeweiligen Ziel) erzielt. Dabei ergibt sich ein Verhältnis von Ladestationen zu BEV-Bestand von 1,2 (siehe auch Sensitivitätsanalyse in Kapitel 13.7). In der Praxis wird keine perfekte Verteilung eintreten, wodurch es bei einem Auslastungsfaktor von 1 (1,2-fache des BEV-Bestands) zu einem Mangel an einem Ort und einem Überschuss an einem anderen Ort kommt. Da in dieser Arbeit festgelegt wird, dass sich durch E-Mobilität keinerlei Einschränkungen ergeben sollen, und somit auch kein Mangel an Ladestationen, müssen die Auslastungsfaktoren (bis auf Heim-Stellplatz und LNF) über 1 und somit das Verhältnis von Ladestationen zu BEV-Bestand über 1,2 liegen.

In [29] wird die Anzahl an Ladestellen (inkl. privater Ladestellen), die zur Durchsetzung von E-Mobilität benötigt wird, mit dem 1,1 - 1,3 fachen des BEV-Bestands angegeben. In [30] wird dieser Wert mit 1,25 - 1,50 angegeben. In beiden Fällen wird jedoch nicht auf die lokale Verteilung der Ladestellen innerhalb eines Orts eingegangen. Ohne Berücksichtigung der lokalen Verteilung sollte das Verhältnis zum BEV-Bestand, wie

bereits erwähnt, bei 1,2 liegen. Andernfalls kommt es selbst bei einer perfekten Verteilung zu einem Ladestellenmangel an manchen Orten zu ungünstigen Zeitpunkten.

In Anlehnung an [30] und die oben genannten Überlegungen hinsichtlich lokaler Verteilung werden die Auslastungsfaktoren in dieser Arbeit so gewählt, dass sich ein Verhältnis zwischen den verfügbaren Ladestationen und dem BEV-Bestand von 1,38 (in 2030) ergibt. Dies entspricht dem Mittelwert aus [30]. Die dafür benötigten Auslastungsfaktoren sind:

- PKW Heim Straßenrand: 1,5
- PKW Heim Stellplatz: 1
- PKW Ziel Straßenrand: 1,5
- PKW Ziel Stellplatz: 1,5
- PKW Gast Straßenrand: 1,5
- PKW Gast Stellplatz: 1,5
- LNF: 1

Da es sich bei diesen Faktoren um eine direkte Einflussgröße auf die Kosten handelt, soll in Kapitel 13.7 eine Sensitivitätsanalyse zur Ermittlung dieses Einflusses durchgeführt werden.

Da die berechnete Anzahl an Ladestationen aus dem lokalen Modell durch das Mobilitätsverhalten von ganz Österreich abgeleitet wurde, gilt diese für 100 % BEV-Bestand. Eine Reduktion auf niedrigere Bestände, wie beispielsweise im Jahr 2030, erfolgt durch einfache Skalierung der Anzahl an Ladestationen mit dem gewünschten BEV-Bestandsanteil. Dabei wird angenommen, dass die Nutzung der Stationen mit dem BEV-Bestand linear einhergeht.

Die Abschätzung der benötigten Hochleistungsladestationen erfolgt anhand der von ASFINAG geplanten 150 kW Ladestellen entlang der Autobahnen. Nach [31] sollen bis Ende 2018 insgesamt 23 Ladestandorte am Autobahnnetz errichtet werden, was im Schnitt ein Standort pro 100 km ist. An diesen Standorten werden nach [32] jeweils 7 Ladepunkte entstehen, wovon eine 150 kW Ladeleistung bietet.

Da der Heimladungsanteil für LNF mit 100 % angenommen wurde, ergibt sich, dass nur PKW eine Schnellladung auf der Autobahn durchführen. Werden die 23 Ladestellen ins Verhältnis zum PKW BEV-Bestand 2018 gesetzt, ergibt sich die Anzahl

der Schnellladestationen pro Fahrzeug. In Ermangelung entsprechender Hochrechnungen wird die Annahme getroffen, dass die Anzahl der 150 kW Ladestellen pro Fahrzeug konstant ist. Damit lässt sich, zusammen mit dem BEV-Bestand 2030, der Bedarf an Schnellladestellen mit 150 kW abschätzen. Eine belastbare Abschätzung der Anzahl an Ladestellen >150 kW war zum Zeitpunkt der Publikation nicht möglich.

9.2 Ergebnisse für den Ladestellenbedarf

Aus dem vorangegangenen Kapitel lässt sich die benötigte Anzahl an Ladestellen ableiten, die in weiterer Folge zu den Errichtungskosten führen. In diesem Kapitel soll die Anzahl der benötigten Ladestationen auszugsweise gezeigt werden.

9.2.1 Benötigte Anzahl an Ladestationen bis 2030

Bis 2030 ergibt sich ein BEV-Bestandsanteil von 11 % für den PKW und 6,5 % für das LNF. Mit diesen Werten ergibt sich eine benötigte Anzahl an Ladestellen je nach Ladeleistung, welche in Abbildung 34 für Wien und für Gesamt Österreich dargestellt ist. Es ist zu erkennen, dass eine dominierende Anzahl an 11 kW Ladestellen benötigt wird. Dies rührt von der angenommenen Verteilung der Ladeleistungen her. Für Schnellladestationen mit 150 kW ergibt sich ein Anteil von 0,07 %.

Eine weitere Unterteilungsmöglichkeit bietet die Einteilung in Heim, Ziel und Gast sowie die Unterscheidung in Straßenrand und Stellplatz (eigene Garage, Parkplatz, P&R etc.). In Abbildung 35 sind die Zahlenwerte für diese Auswertung eingetragen. Es ist zu erkennen, dass die meisten Ladestellen am Heimstellplatz benötigt werden, was auf den hoch angesetzten Ausstattungsgrad (100 %) der eigenen Stellplätze mit Ladestellen zurückzuführen ist. Trotzdem werden 25 % der Heimpladestellen am Straßenrand benötigt. Daraus lässt sich schließen, dass selbst bei Vollaussattung aller eigenen Stellplätze, zusammen mit den Ziel/Gast-Straßenrand-Ladestellen, **29 % der benötigten Ladestationen** in der Regel **nicht vom Fahrzeugnutzer selbst errichtet** werden können, sondern durch zuständige **öffentliche Institutionen oder Ladestellenbetreiber errichtet werden müssen**.

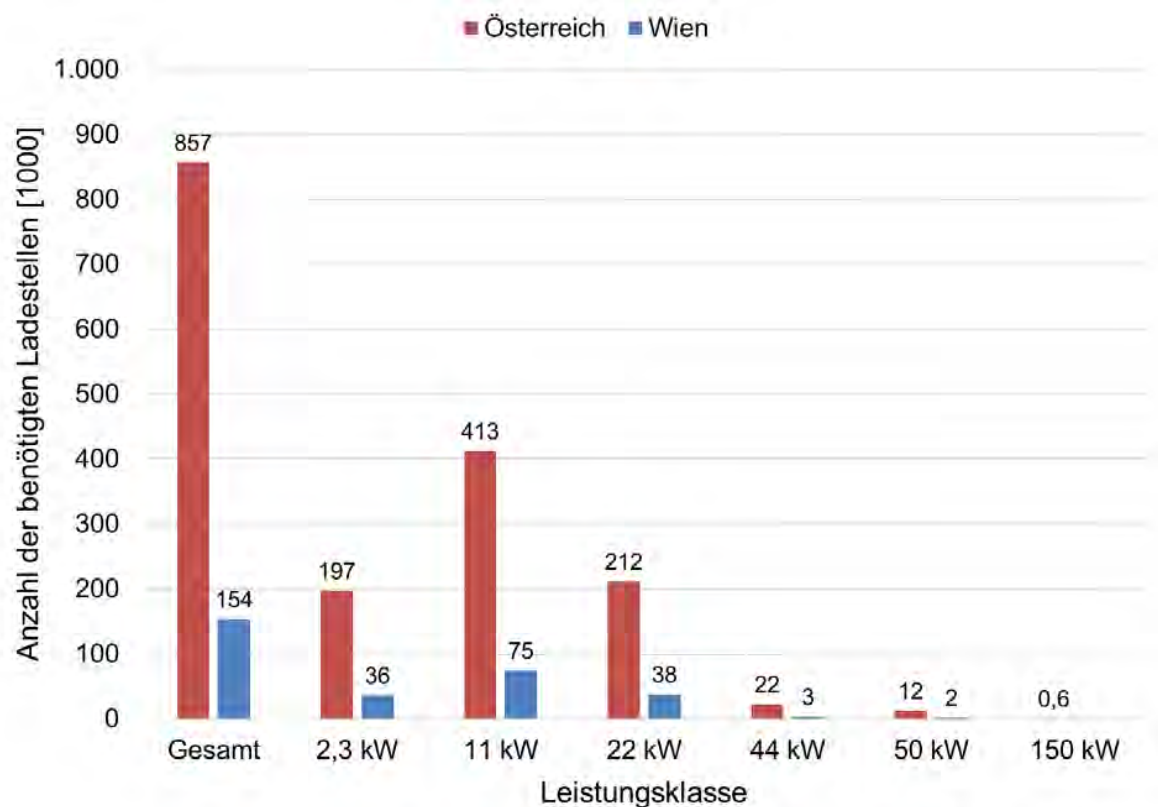


Abbildung 34 – Benötigte Anzahl an Ladestationen nach Ladeleistung für Wien und Gesamt Österreich bis 2030

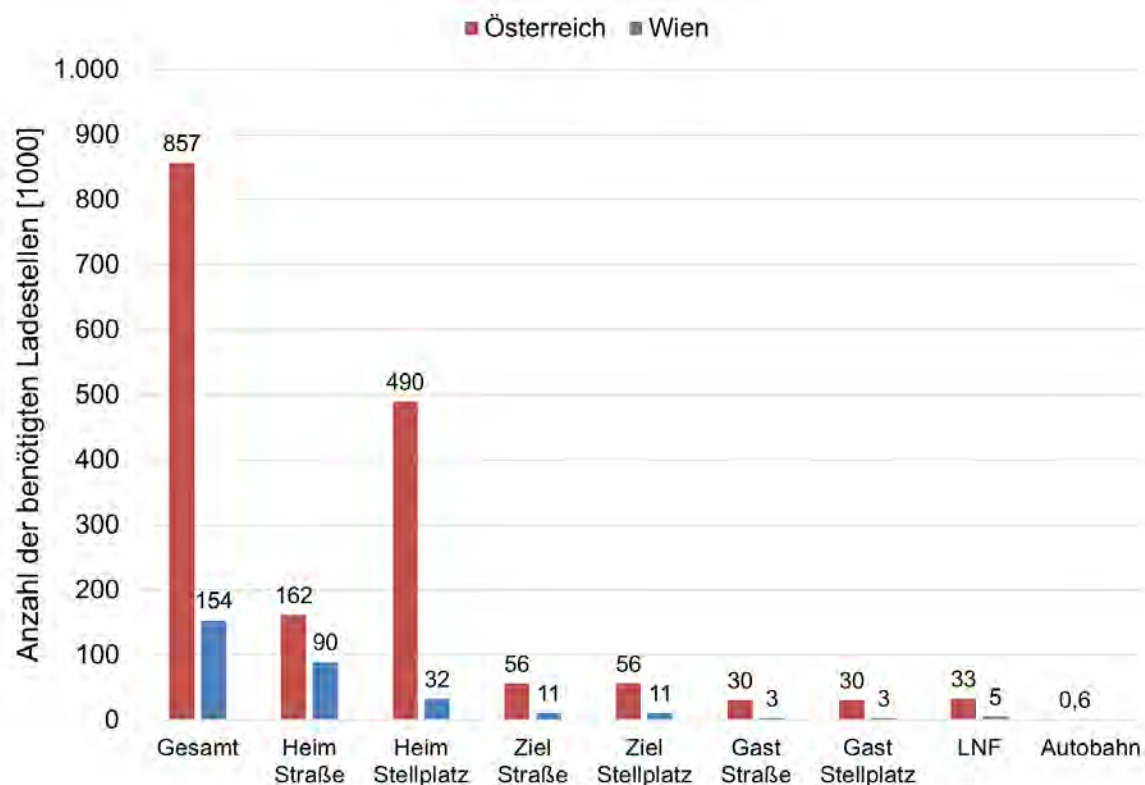


Abbildung 35 – Benötigte Anzahl an Ladestationen nach Ladeort für Wien und Österreich bis 2030

9.2.2 Benötigte Anzahl an Ladestationen bei 100 % BEV-Bestand

Bei 100 % BEV auf Basis des PKW- und LNF-Bestandes im Jahr 2017 ergibt sich erwartungsgemäß eine wesentlich höhere Anzahl an benötigten Ladestationen. Entsprechend der beiden zuvor gezeigten Diagramme sind auch Abbildung 36 und Abbildung 37 dargestellt. Der Trend ist aufgrund der Skalierung mit dem BEV-Bestandsanteil ähnlich.

In diesen Abbildungen ist gut erkennbar, dass die Gesamtanzahl der benötigten **Ladestellen um den Faktor 1,38 höher ist als der Gesamtbestand** der PKW und LNF im Jahr 2017. **Eine Schnellladestation mit 150 kW steht für ca. 960 PKW zur Verfügung.**

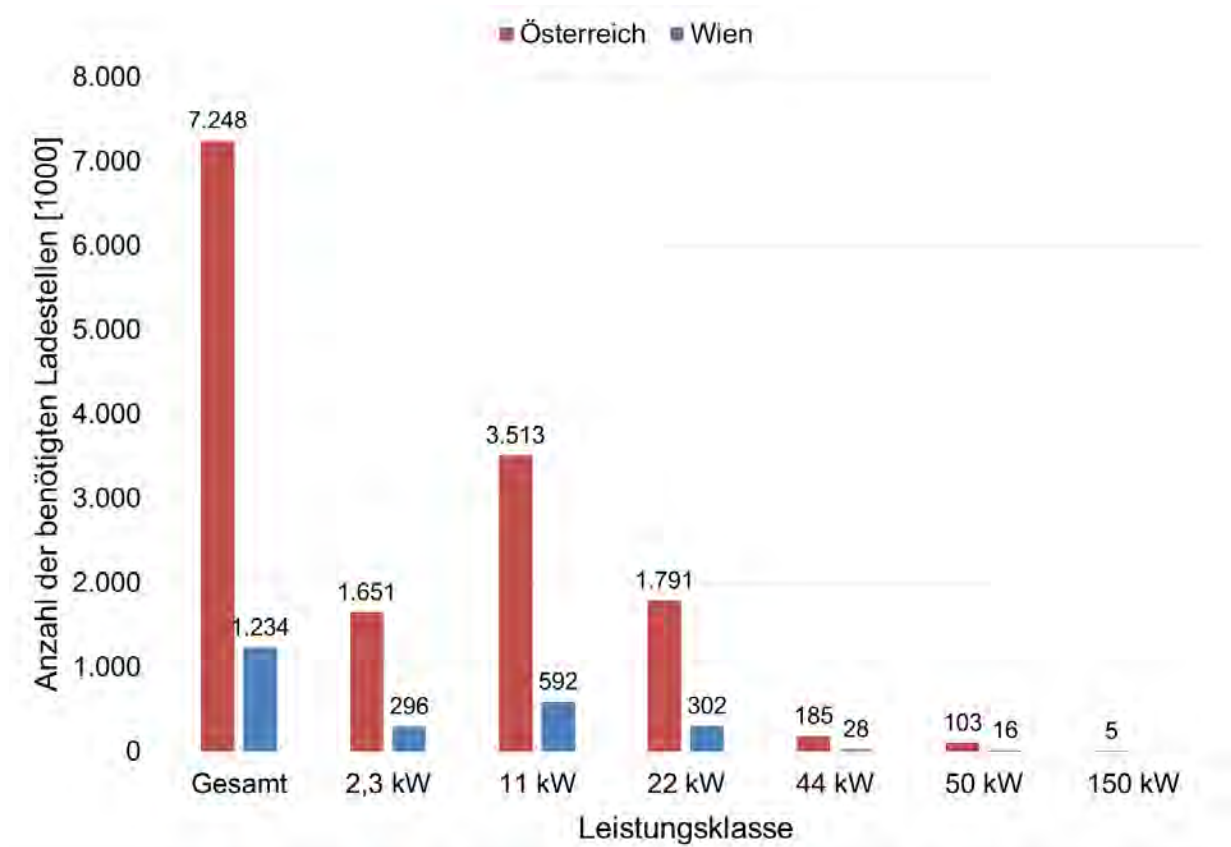


Abbildung 36 – Benötigte Anzahl an Ladestationen nach Ladeleistung für Wien und Gesamt Österreich bei 100 % BEV Bestand

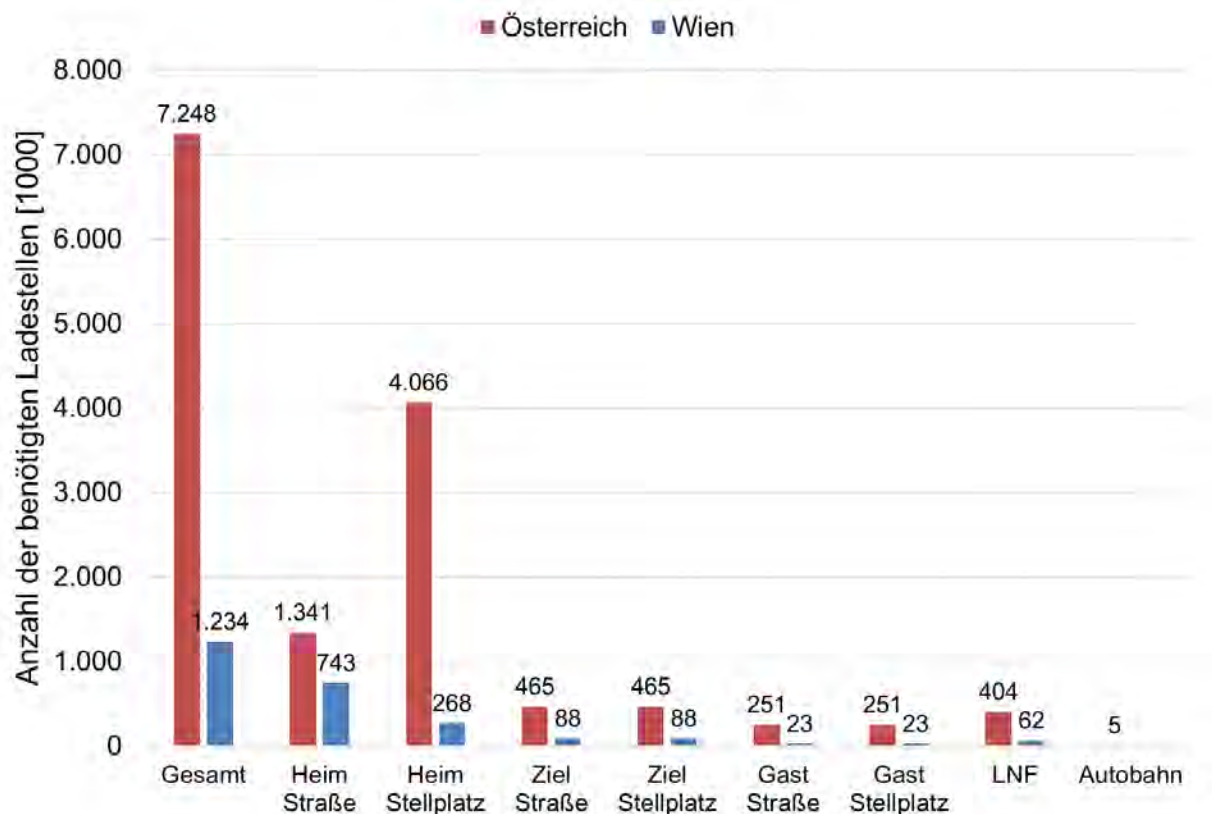


Abbildung 37 – Benötigte Anzahl an Ladestationen nach Ladeort für Wien und Österreich bei 100 % BEV Bestand

10 Grundlagen der Energieerzeugung und -verteilung

Neben der österreichweiten Betrachtung der Gleichzeitigkeit und des Leistungsgangs sollen die Auswirkungen auf das lokale Verteilernetz untersucht werden. Dazu sind einige Grundlagen bzw. Grundbegriffe im Bereich der Energieerzeugung und deren Verteilung im elektrischen Netz notwendig. Dieses Kapitel soll die benötigten Grundlagen erläutern. Damit wird sichergestellt, dass auch nicht ausgebildete Energietechniker die Grundzüge der Energieverteilung einschätzen können. Darüber hinaus sollen die generellen Herausforderungen bei einem erhöhten Bestand von Elektrofahrzeugen bzw. das Laden mit hohen Ladeleistungen betrachtet werden. Weiters werden Gegenmaßnahmen vorgestellt, um einen sicheren Netzbetrieb zu gewährleisten. Letztlich werden die zu untersuchenden Netzmodelle vorgestellt.

10.1 Struktur und Aufbau von Drehstromnetzen

Für einen effizienten Betrieb elektrischer Netze ist eine Aufteilung des Netzes in verschiedene Netzebenen (NE) notwendig. So wird durch ein hohes Spannungsniveau und kleine Ströme eine verlustarme Übertragung über weite Entfernungen ermöglicht. Für die Verteilung und den Anschluss an die Haushalte wird auf eine vergleichsweise geringe Spannung transformiert, um eine vernünftige Handhabung (bezüglich Isolation, Schutzeinrichtungen und Gefahr für den Menschen) zu ermöglichen.

Abbildung 38 zeigt hierzu eine vereinfachte Darstellung der im europäischen Raum üblichen Stromnetzstruktur. Daraus lässt sich der grundlegende Aufbau des elektrischen Netzes erkennen. Ausgangslage ist die großindustrielle Erzeugung der elektrischen Energie (Punkt 1) und deren Kopplung über einen Blocktransformator (Punkt 2) mit dem Übertragungsnetz (Punkt 3). Zusammen bilden diese Einheiten die Netzebene 1 (NE-1). In dieser Ebene befinden sich beispielsweise Wasserkraftwerke, Atomkraftwerke aber auch Kohle- und Gaskraftwerke. Die Übertragung findet auf einem Spannungsniveau von 220 kV bzw. 380 kV in der sogenannten Höchstspannungsebene statt. Über die NE-2 wird mit Hilfe eines Netztransformators (Punkt 4) eine Verbindung zu überregionalen Verteilnetzen auf der NE-3 hergestellt. In diesen Verteilnetzen befinden sich die Großindustrie (Punkt 5) sowie mittlere Kraftwerke und auch die Anbindung an das Bahnstromnetz. Es wird von einer 110 kV Hochspannungsebene gesprochen. In der NE-4 wird in einer Umspannstation (Punkt 6) die Kopplung über Transformatoren mit der NE-5 erreicht. In diesem regionalen

Verteilnetz befinden sich die Kleinindustrie und das Gewerbe. Diese sogenannte Mittelspannungs(MS)-Ebene wird zwischen 1 kV und 35 kV betrieben. Schließlich wird auf der NE-6 über einen Ortsnetztransformator (ONT) (Punkt 8) die Niederspannung(NS)-Ebene (auch NE-7 genannt) versorgt. In dieser Ebene werden über den Verteilerkasten (Punkt 9) die einzelnen Haushaltskunden (Punkt 10) angespeist und mit einer Spannung von 230 V/400 V versorgt. In dieser Ebene können sich auch kleinere dezentrale Erzeuger wie Photovoltaik (PV)- und Windanlagen befinden, welche in das vorgelagerte Netz zurückspeisen können.

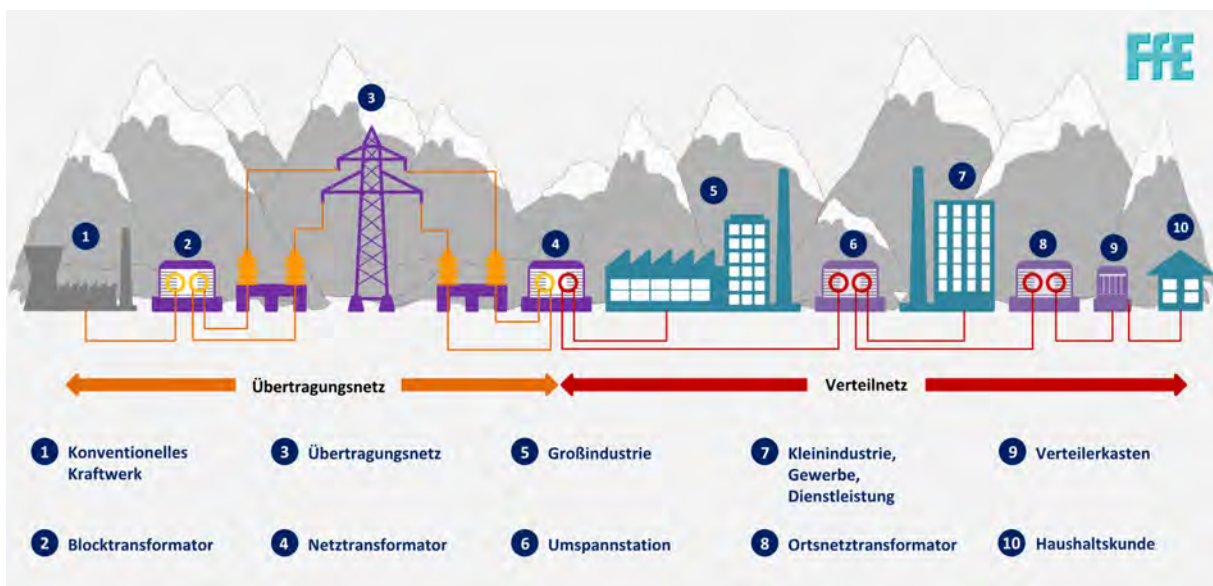


Abbildung 38 – Eine vereinfachte Darstellung der Struktur des Stromnetzes und dessen beteiligte Komponenten nach [33]

10.2 Netztopologien

Wie bereits ausgeführt, haben sich im elektrischen Netz verschiedene Spannungsebenen entwickelt. Neben diesen genormten Spannungen nach [34] finden sich zahlreiche Sonderformen vor allem in Industrienetzen wieder. Nachfolgend werden die Netztopologien für einen wirtschaftlichen Betrieb in den für die Elektromobilität relevanten (öffentlichen) Nieder- und Mittelspannungsnetzen nach [35] näher beschrieben.

10.2.1 Niederspannungsnetze (NE-6/7)

Die größte Verbrauchsgruppe der elektrischen Lasten besteht aus Niederspannungsgeräten, welche ihre Energie aus den Niederspannungsnetzen (NE-7) beziehen. Diese werden dabei über Ortsnetztransformatoren (NE-6), auch Netzstationen genannt, vom

übergeordneten Mittelspannungsnetz (NE-5) gespeist. Die Bemessungsleistungen (Nennleistungen) der Transformatoren betragen häufig 250 kVA, 400 kVA oder 630 kVA. Die Netze sind als Vierleitersysteme aufgebaut, um den Anschluss einphasiger Verbraucher zu ermöglichen. Je nach Lastdichte, welche die Summe aller Lasten auf einer gewissen Fläche repräsentiert, wird zwischen Strahlennetz, Ringnetz und Maschennetz unterschieden. Abbildung 39 stellt die Netzformen grafisch dar.

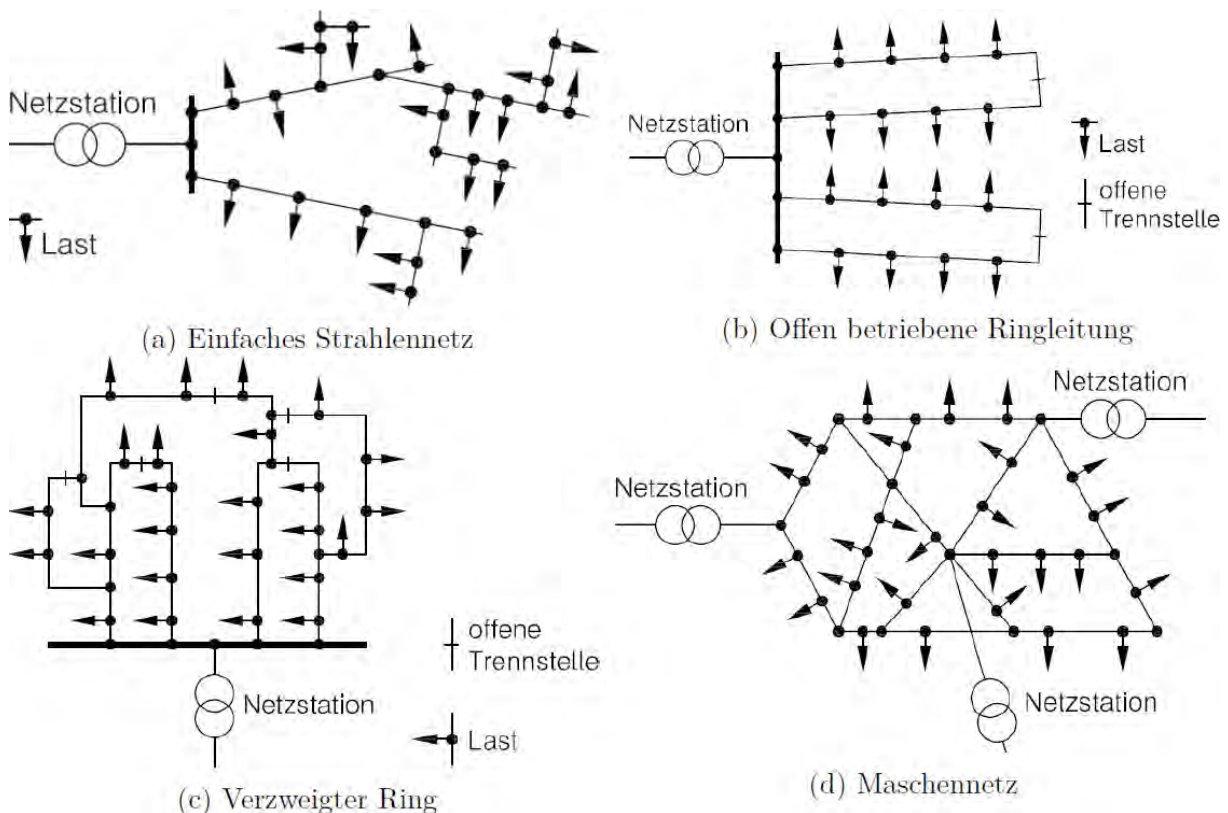


Abbildung 39 – Netztopologien in Niederspannungsnetzen nach [35]

In ländlichen Gegenden ist die Lastdichte relativ gering, weshalb Strahlennetze (Abbildung 39 a) bevorzugt werden. Diese Netzform besteht aus einer Vielzahl von Abzweigen, die von einer gemeinsamen Netzstation versorgt werden. Nachteilig sind hier der erhöhte Spannungsabfall bei großen Lasten und die erhöhte Ausfallwahrscheinlichkeit bei einfachen Unterbrechungen, vor allem bei Ausfall der Netzstation selbst. Für ländliche Gebiete und niedrige Lastdichten werden Freileitungen bevorzugt. In dichteren sowie städtischen Netzgebieten werden aber vermehrt Kabel⁴ bevorzugt.

⁴ Wenn nicht anders angegeben, wird in der Energietechnik bei einer Kabelverlegung immer von einer Verlegung unter der Erde ausgegangen. Im Gegensatz dazu werden Freileitungen unisoliert (als Isolation dient lediglich die Umgebungsluft) frei hängend auf Mastträgern aufgehängt.

Bei Verlegung von Kabeln wird häufig der Gehsteig als Kabelschacht genutzt. Hierzu bietet es sich an, das Netz als Ringleitung auszubilden (Abbildung 39 b). In der Mitte des Ringes werden diese Netze meist offen betrieben, womit wiederum Strahlennetze vorliegen. Im Fehlerfall können Trennstellen freigeschaltet und durch Schließen der offenen Trennstelle der Betrieb des restlichen fehlerfreien Netzes gewährleistet werden. Mit steigendem Vermaschungsgrad und zunehmender Anzahl an Einspeisern steigt die sogenannte Eigensicherheit weiter an. Für Netze, die vermascht betrieben werden und mehrfache Einspeiser aufweisen, wird der Begriff Maschennetz verwendet (Abbildung 39 d).

10.2.2 Mittelspannungsnetze (NE-4/5)

Mittelspannungsnetze (NE-5) werden über Umspannwerke (NE-4) bzw. Umspannstationen aus dem überlagerten Hochspannungsnetz (NE-3) gespeist. Die Bemessungsleistung dieser einzelnen Stationen liegt üblicherweise zwischen 20 MVA und 50 MVA. Das MS-Netz hat die Aufgabe, die elektrische Energie über die Ortsnetztransformatoren (NE-6) bzw. Netzstationen in die unterlagerten Niederspannungsnetze (NE-7) zu übertragen. Je nach Lastdichte wird auch hier die Nennspannung angepasst (meist 10 kV bis 30 kV). Als Übertragungsmittel werden in Städten, aber auch im ländlichen Bereich vermehrt Kabel verwendet.

Ein typischer Aufbau ist in Abbildung 40 zu sehen. Wie auch in einem Niederspannungsnetz üblich, werden die einzelnen Ringe mithilfe von Trennstellen offen betrieben. Anstelle der einzelnen Verbraucher werden im MS-Netz die Netzstationen versorgt. Jede Ringleitung für sich speist 5 bis 10 Stationen. Tritt ein Fehler auf einer Leitung auf, so kann durch Freischalten des fehlerbehafteten Zweiges und schließen der Trennstelle der Betrieb weitergeführt werden. Liegt der Fehler in der Netzstation, so sind davon nur die Verbraucher im Niederspannungsnetz betroffen. Eine Kupplung der Umspannstationen untereinander durch mehrere Mittelspannungsleitungen führt zu einer größeren Betriebssicherheit. Eine zu hohe Vermaschung wird jedoch versucht zu vermeiden, um Kurzschlussströme beherrschen zu können. Im Regelfall ist nur eine Einspeisung vorhanden.

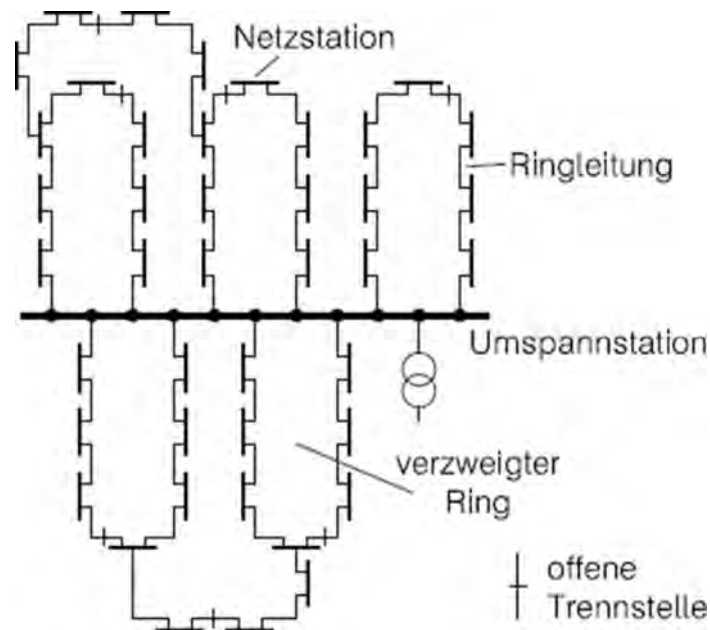


Abbildung 40 – Mittelspannungsnetz aus strahlenförmig betriebenen Ringleitungen nach [35]

10.3 Erhöhte Ladeleistungen und BEV-Bestand

Die Begrifflichkeiten zum Thema Ladeleistung sind immer wieder in Diskussion und finden in der Standardisierung keine klaren Benennungen. Bei Ladeleistungen über 120 kW wird jedoch im Moment von einer HPC-Technologie (High Power Charging) bzw. von einem „ultraschnellen“ Ladevorgang gesprochen. Basis dafür ist, zumindest in Europa, der CCS-Ladestecker aus [Abbildung 41](#), welcher ergänzt durch eine intelligente aktive Kühlung Ladeleistungen bis zu 500 kW ermöglicht. Um die Leitungsströme zu begrenzen, wird die Ladespannung auf bis zu 900 V angehoben. Als Kühlmittel wird ein laut Hersteller umwelt- und wartungsfreundliches Wasser-Glykol-Gemisch eingesetzt. Mit Hilfe von integrierten Temperatursensoren wird die Wärmeentwicklung laufend überwacht, wodurch die Kühlleistung bedarfsgerecht reguliert werden kann [36].



Abbildung 41 – Ein (HPC-) CCS-Stecker nach [36]

10.4 Maximale Auslastung der Betriebsmittel

Um eine unzulässige Erwärmung der Übertragungsmittel, insbesondere Kabel, Freileitungsseile und Transformatoren sicherzustellen, sind die zulässigen Strombelastbarkeiten unbedingt einzuhalten. Zusätzlich ist zu beachten, dass die Belastbarkeiten stark von der Art der Verlegung abhängig sind (Verlegung in Luft oder im Erdreich). Im Allgemeinen kann bei Freileitungen davon ausgegangen werden, dass die Leiterquerschnitte für die errechneten Spannungsdifferenzen auch einer gegebenen Leitererwärmung standhalten. Dieser Umstand muss allerdings nachgeprüft werden. In Kabelnetzen und bei kurzen Leitungen kann der erforderliche Leiterquerschnitt durch die Strombelastbarkeit vorgegeben werden [37].

Die Betriebsstromstärke I_B der angeschlossenen Stromverbrauchseinrichtung berechnet sich laut [38] zu

$$I_B = \frac{P}{U * \cos(\varphi) * \sqrt{3}}. \quad (25)$$

Transient thermische Analysen zeigen das mögliche Potential in den Übertragungskapazitäten heutiger Stromleitungen auf. Im Gegensatz zur klassischen stationären Berechnung wirken dabei thermische Trägheiten der Materialien. Diese weiterführende thermische Modellierung vergrößert den derzeitigen Horizont der

klassischen Betriebsführung elektrischer Netze und ermöglicht gewisse kurzzeitige Stromüberlastungen infolge von Ladevorgängen.

10.5 Spannungsproblematik

Im Idealzustand herrscht im gesamten elektrischen Energieversorgungsnetz in den jeweiligen Netzebenen an jeder Stelle die gleiche Spannung. Aufgrund der anfallenden Teilspannungen an den Leitungswiderständen ist dies aber nicht realisierbar. Gegenüber der Einspeisespannung treten im Regelfall Spannungsabsenkungen im Netz auf. Bei Leerlauf oder kapazitiver Belastung können jedoch auch Spannungsüberhöhungen auftreten.

Die Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen sind in [39] definiert. Für die Netznennspannung $U_N = 230 \text{ V}$ gilt dabei eine Einhaltung von 95 % der 10-Minuten-Mittelwerte im Bereich von $U_{eff} = U_N \pm 10 \%$. Spannungsschwankungen treten im Allgemeinen durch Änderungen in der Last- bzw. Erzeugungssituation auf. Der Spannungsabfall errechnet sich näherungsweise nach [38] zu

$$\Delta U \leq \frac{I_B * \sqrt{3} * l * \cos(\varphi)}{\gamma * A} . \quad (26)$$

Dabei wird der in der Leitung auftretende Spannungsabfall ΔU annähernd über den Betriebsstrom I_B , den Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$, die Länge der Leistungsstrecke l , den spezifischen Leitwert γ und den Querschnitt A des Leiters errechnet.

Dezentrale Energiequellen, wie z. B. Photovoltaikanlagen oder stationäre Batteriespeicher, verursachen Spannungsdrehungen in entgegengesetzter Richtung und somit Spannungserhöhungen. Treten an einem Netzknoten sowohl ein erhöhter Verbrauch als auch Erzeugung gleichzeitig auf, so kann die resultierende Belastung mittels Differenzbildung ermittelt werden und es können sich Kompensationseffekte ergeben [35].

Auftretende Spannungsdifferenzen lassen sich durch Transformatoren mit unter Last schaltbaren Stufenschaltern in gewissen Grenzen (Spannungsband) einregeln. Dabei wird für die Eingangsspannung des zu speisenden Netzes eine meist etwas höhere Nennspannung U_N gewählt, damit bei einer Spannungsabsenkung eine höhere Bandbreite gewährleistet werden kann [37].

Prinzipiell lassen sich für die Beeinflussung der Spannungshaltung vier Maßnahmen identifizieren: [40]

1. Impedanzreduktion
2. Wirkleistungsreduktion
3. Blindleistungsmanipulation
4. Beeinflussung durch direkte Spannungsquellen

10.6 Power Quality

Unter dem Begriff der Power Quality versteht ein Energieversorgungsunternehmen das Einhalten von Qualitätsstandards für Spannung und Frequenz nach der EN 50160 [39]. Die Netzfrequenz beträgt in Europa 50 Hz und wird durch ein Ungleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch beeinflusst. Im Verbundbetrieb kann dieser Wert als nahezu konstant angenommen werden, da dieser Wert durch übergeordnete Regelungen innerhalb seiner Grenzwerte gehalten wird (+/- 0,5 Hz in der NE-7).

Die Spannungsqualität hängt von folgenden Faktoren ab:

- Effektivwert der Knotenspannung
- Spannungseinbrüche
- Flicker
- Spannungsunsymmetrie
- Oberschwingungsgehalt
- Transiente Überspannungen

Diese Kriterien werden maßgeblich von dem Verhalten der angeschlossenen Lasten (z. B. Haushaltslasten, Ladegeräte von BEV etc.) am Verknüpfungspunkt bestimmt. Diese Faktoren können daher nur durch eine detaillierte Modellierung bzw. Messung nachgebildet werden. Der Effektivwert der Knotenspannung und die Bestimmung der Einhaltung des Grenzwertes von $U_{eff} = U_N \pm 10 \%$ kann allerdings mit Hilfe einer Lastflussrechnung, wie sie in dieser Studie durchgeführt wurde, ermittelt werden.

10.7 Mögliche Verbesserungsmaßnahmen durch Lademanagement

Je nach Auslegung des (vorhandenen) Verteilnetzes wird es, vor allem bei erhöhten Ladeleistungen, zukünftig notwendig sein, ein entsprechendes Lademanagement in den Ladeinfrastruktureinrichtungen umzusetzen. Dadurch soll ein sicherer Betrieb der einzelnen Komponenten (Kabel, Leitungen, Transformatoren etc.) und ein Schutz vor Überbeanspruchung gewährleistet werden. Für die Beeinflussung des Ladeprozesses der Fahrzeugbatterie können im Wesentlichen zwei Parameter aktiv beeinflusst werden:

- Die Steuerung der Ladeleistung und
- Die Steuerung des zeitlichen Ladevorganges (Start, Dauer, Ende).

Die Ladevorgänge können auf Basis externer Parameter beeinflusst werden. Neben den einzelnen Ladesteuerungsvarianten, welche in Abbildung 42 dargestellt sind, ist vor allem die Übertragung dieser gesteuerten Signale bzw. die erforderliche Hardware für eine Laststeuerung ein wichtiges Kriterium im Betrieb. Eine klassische Variante eines einfach umgesetzten Lastmanagements ist dabei die Tonfrequenzrundsteuerung (TFR)⁵, welche als Laststeuerung bei Ladevorgängen in der Elektromobilität dienen könnte. Ebenso wäre eine funkbasierte Umsetzung (über Langwellensender oder auch Mobilfunk) einer Laststeuerung denkbar. Zukünftig werden aber vor allem Smart-Meter mit ihren Funktionalitäten eine Option der Steuerung von Lasten ermöglichen.

Die größten Herausforderungen liegen meist nicht explizit in der Wahl des Steuermechanismus, sondern in der Umsetzung in Bezug auf Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT)-Fragen. Neben dem gesteuerten Laden sei an dieser Stelle nochmals auf das zusätzliche gesteuerte Entladen des Fahrzeuges (Vehicle to Grid – V2G) hingewiesen. Nachfolgende Ausführungen sollen die erwähnten Möglichkeiten des Lademanagements nach [41], [42] und [43] im Detail beleuchten.

⁵ Diese Technologie wird vor allem zur Laststeuerung von Straßenbeleuchtungen oder Elektrowarmwasserboilern verwendet.

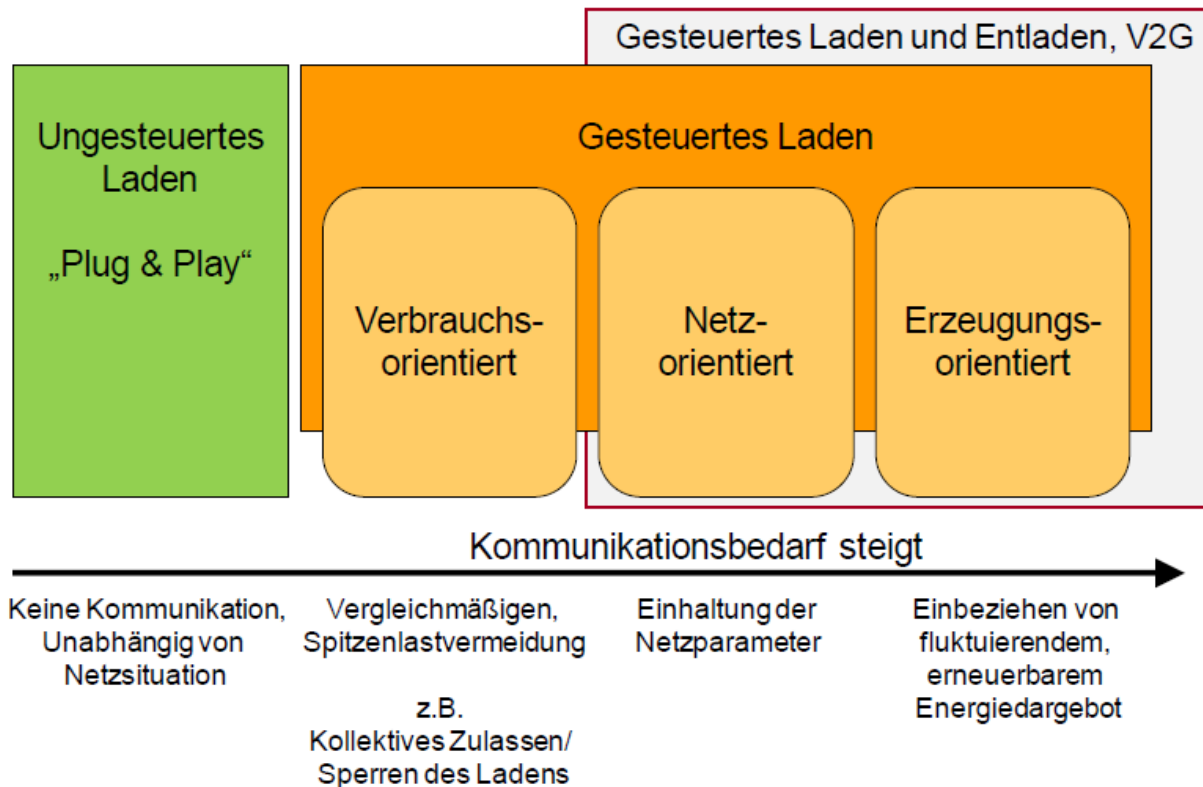


Abbildung 42 – Vergleich von unterschiedlichen Ladestrategien und deren Kommunikationsbedarf nach [41]

10.7.1 Verbrauchsorientierte Ladesteuerung

Die einfachste Form des Lademanagements ist das verbrauchsorientierte Lastmanagement. Dabei wird anhand eines festgelegten Maximalwertes die Ladeleistung begrenzt (Glättung der Lastspitzen). So ist es beispielsweise möglich, an einer Ladeinfrastruktureinheit mehrere Ladepunkte zur Verfügung zu stellen, ohne dabei den dafür ausgelegten maximalen Anschlussleistungswert zu überschreiten. Als Nachteil bei dieser Variante ergibt sich der daraus resultierende längere Aufenthalt an der Ladestation, wenn auf die verfügbare maximale Ladeleistung mehrere Ladungen aufgeteilt werden. Mit Hilfe von „intelligenten“ Erweiterungen kann aber auch das Lastmanagement dahingehend erweitert werden, dass gewisse Teilnehmer priorisiert behandelt werden und somit höhere Ladeleistungen bereitgestellt bekommen als jene Teilnehmer, die zeitlich flexibler sind. Diese Umsetzungsvarianten werden im Moment vor allem im öffentlichen Bereich erprobt und umgesetzt. Im privaten bzw. halböffentlichen Bereich ist ein einfaches Lastmanagement meist ausreichend, um einen Betrieb zu ermöglichen.

10.7.2 Netzorientierte Ladesteuerung

Bei einer netzorientierten Ladesteuerung werden Netzparameter, wie die aktuellen Spannungsverhältnisse oder die Komponentenauslastung, überwacht und in den Ladeprozess einbezogen. Dadurch lässt sich beispielsweise eine spannungsabhängige Blindleistungsbeeinflussung (Q(U)-Regelung⁶) oder auch eine spannungsabhängige Wirkleistungsbeeinflussung (P(U)-Regelung) umsetzen. Um einen erhöhten BEV-Bestandsanteil in einem ländlichen Netzabschnitt zu ermöglichen, wurde zu diesem Zweck in Seitenstetten (Niederösterreich) ein sechswöchiger Feldversuch im Jahr 2017 durchgeführt [44]. Dieser Feldversuch, bei dem eine P(U)-Regelung zur Anwendung kam, lieferte bereits positive Ergebnisse bei der Umsetzung dieser Regelvariante. Ein Vergleich zwischen dem Feldtest in Seitenstetten und dieser Studie ist in Kapitel 16.3.1 zu finden.

10.7.3 Erzeugungsorientierte Ladesteuerung

Wird der Ladevorgang bezüglich des momentan zur Verfügung stehenden Dargebots⁷ an (erneuerbaren) Energien ausgerichtet, so kann von einem erzeugungsorientierten Ladevorgang gesprochen werden. Dabei steht die optimale Nutzung der lokalen volatilen Energiequellen im Vordergrund. Um den Eigenverbrauch beispielsweise in einem Einfamilienhaushalt zu erhöhen, ist eine Kombination mit einer Erzeugungseinheit (z. B. einer PV-Anlage) denkbar. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, dieses Verhalten auch über einen sich verändernden Stromtarif abzubilden. Die Möglichkeiten der Bepreisung reichen dabei von fixen Tarifen zu unterschiedlichen Zeiten (z. B. Tag- sowie Nachttarif) bis zu Tarifmodellen, welche an die aktuellen Strombörsenpreise angelehnt sind.

10.8 Mögliche Verbesserungsmaßnahmen an den Betriebsmitteln

Nachfolgend werden Maßnahmen beschrieben, welche zur Einhaltung der Betriebsmittelgrenzen herangezogen werden können. Dabei können zum einen bauliche Maßnahmen oder auch zum anderen betriebliche Maßnahmen angewendet werden.

⁶ Q(U)-Regelungen sind bei PV-Anlagen bereits üblich

⁷ Die einer Anlage zur Verfügung stehende (Wasser-, Luft-, Sonnen- etc.) Menge

10.8.1 Impedanzreduktion

In Gleichung 27 ist der Ohm'sche Widerstand bzw. die Impedanz R als Produkt der Länge l , mit dem spezifischen Widerstand ρ der Leitung, geteilt durch die Querschnittsfläche A definiert. Ziel der Impedanzreduktion ist die Verringerung der wirksamen Netz- bzw. Transformatorimpedanz durch Einbau paralleler Leitungen, Verwendung von größeren Querschnitten, Vermaschung von Netzabschnitten, zusätzliche Ortsnetzstationen oder die Verwendung einer größeren Transformatorbaureihe (Transformatortausch).

$$R = \frac{\rho * l}{A} \quad (27)$$

10.8.2 Wirkleistungsreduktion

Die Wirkleistungsreduktion zielt in gleicher Weise auf die Reduktion des Spannungsabfalls längs der Netzbetriebsmittel ab. Zur Absenkung der zu übertragenden Leistung können Speicherlösungen, Last- bzw. Einspeisemanagement aber auch Peak Shaving (Senken von Leistungsspitzen) verwendet werden.

10.8.3 Blindleistungsmanipulation

Mit Hilfe der Blindleistungsmanipulation werden die Länge des komplexen Spannungsfalls beeinflusst sowie die Drehung der Phasenlage verursacht. Ein induktiver Blindleistungsbezug wirkt dabei spannungssenkend, ein kapazitiver Bezug spannungshebend (im Verbraucherzählpfeilsystem). Die Manipulation gelingt dabei über Kompensationsanlagen bestehend aus Kapazitäten, Drosseln und Leistungselektronik sowie aus Erzeugungsanlagen mit Q(U)-Regelung bzw. umrichterbasierten Speichern.

10.8.4 Direkte Spannungsquellen

Als direkte Spannungsquellen werden Netzkomponenten bezeichnet, welche durch eine Zusatzspannung direkt das Spannungsniveau beeinflussen. Diese können im Verteilnetz zum einen Längsregler (Betrag der Spannung wird beeinflusst) sein, im Übertragungsnetz aber auch Quer- oder Schrägregler (zusätzliche Manipulation der Phase möglich).

11 Auswirkungen auf das lokale Verteilernetz

In den nächsten beiden Unterabschnitten werden zum einen die betrachteten Netze näher diskutiert und vorgestellt. Zum anderen werden die Ergebnisse der Lastflussberechnungen aufgearbeitet und deren Auswirkungen auf das lokale Verteilernetz analysiert.

11.1 Lokale Netzmodelle

Die folgend beschriebenen Netze weisen typische Strukturen, welche bereits im Kapitel 10.2 ausgearbeitet wurden, auf. Es handelt sich dabei um einen ländlichen, einen kleinstädtischen und einen großstädtischen Netzabschnitt. Die Netze entsprechen Bestandsnetzen, die teilweise bei Neuinstallationen heute nicht mehr gebräuchliche Betriebsmittel beinhalten. Die Lebensdauer der Komponenten liegt teilweise weit über 40 Jahre. So wurde bei einer Analyse von 49 Netzbetreibern in [45] beispielsweise festgestellt, dass zwei Drittel der Transformatoren jünger und ca. ein Drittel älter als 30 Jahre sind. Dadurch wurde in den Analysen sichergestellt, dass eine realistische Bewertung für den Bestand zu erreichen, da neu zu errichtende Netzabschnitte je nach Planungsansatz von sich aus höhere Reservekapazitäten mit sich bringen.

11.1.1 Ländliches Netz

Bei dem repräsentativen ländlichen Netzabschnitt (Abbildung 43) handelt es sich um ein kleines Verteilernetz mit 59 Wohneinheiten (WE). Der Ortsnetztransformator, welcher das 20 kV MS-Netz mit dem 0,4 kV NS-Netz koppelt, ist als 160 kVA Transformator der Schaltgruppe⁸ YZN5 mit einer bezogenen Kurzschlussspannung⁹ u_k von 4,04 % ausgeführt. Diese Schaltgruppe ist vor allem aufgrund ihrer sekundären

⁸ Als Schaltgruppe wird in der Energietechnik die Verschaltungsmöglichkeit zwischen Ober- (erster Buchstabe) und Unterspannungsseite (zweiter Buchstabe) bezeichnet. Mögliche Varianten sind die Dreieckschaltung (D), die Sternschaltung (Y) und die Zickzackschaltung (Z). Die Zahl gibt die Phasenverschiebung zwischen den beiden Systemen als Vielfache von 30° an. Ein „N“ gibt weiters an, ob der Sternpunkt einer Schaltung ausgeführt ist oder nicht.

⁹ Die Kurzschlussspannung ist jene Spannung, welche an der Primärwicklung des Transformators gemessen wird, wenn bei kurzgeschlossenener Sekundärwicklung Nennstrom fließt. Der Wert soll bei Verteilernetztransformatoren möglichst klein sein, damit die Kupferverluste möglichst gering gehalten werden und die Spannungshaltung auf der Sekundärseite auch bei hoher Belastung gewährleistet werden kann.

Zickzackschaltung¹⁰ bei stark unsymmetrischer Belastung geeignet. Diese unsymmetrischen Belastungen treten vor allem in Niederspannungsverteilnetzen aufgrund der häufigen einphasigen Verbraucher auf.

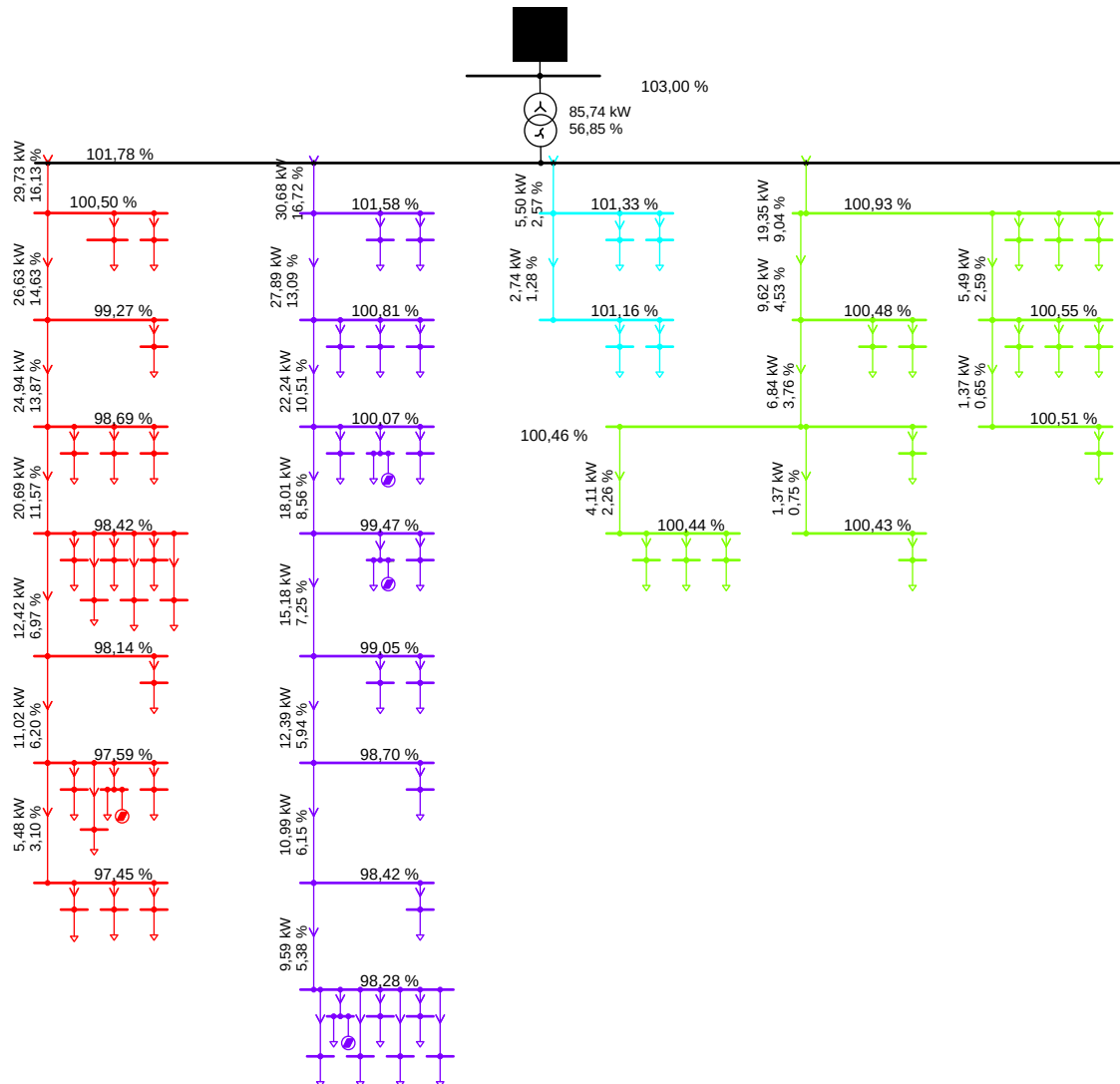


Abbildung 43 – Ländliches Ausgangsnetz [eigene Darstellung]

¹⁰ Bei der Zickzackschaltung werden die Wicklungen in zwei gleiche Wicklungsteile geteilt und auf zwei Schenkel verteilt. So wird eine mögliche unsymmetrische Belastung auf der Sekundärseite auf die Außenleiter der Primärseite besser verteilt. Dieser Vorteil geht allerdings mit einem erhöhten Herstellungs- und Materialaufwand einher.

11.1.2 Kleinstädtisches Netz

Als kleinstädtischer Netzabschnitt (Abbildung 44) wurde ein kleines Verteilnetz mit 87 Wohneinheiten ausgewählt. Bei dem Ortsnetztransformator, welcher das 20 kV MS-Netz mit dem 0,4 kV NS-Netz koppelt, handelt es sich um einen 400 kVA Transformator der Schaltgruppe DYN5 mit einer bezogenen Kurzschlussspannung u_k von 3,7 %. Diese Schaltgruppe ist gut für große Leistungen und Schiefast geeignet. Der ausgeführte sekundärseitige Neutralleiter ist voll belastbar.

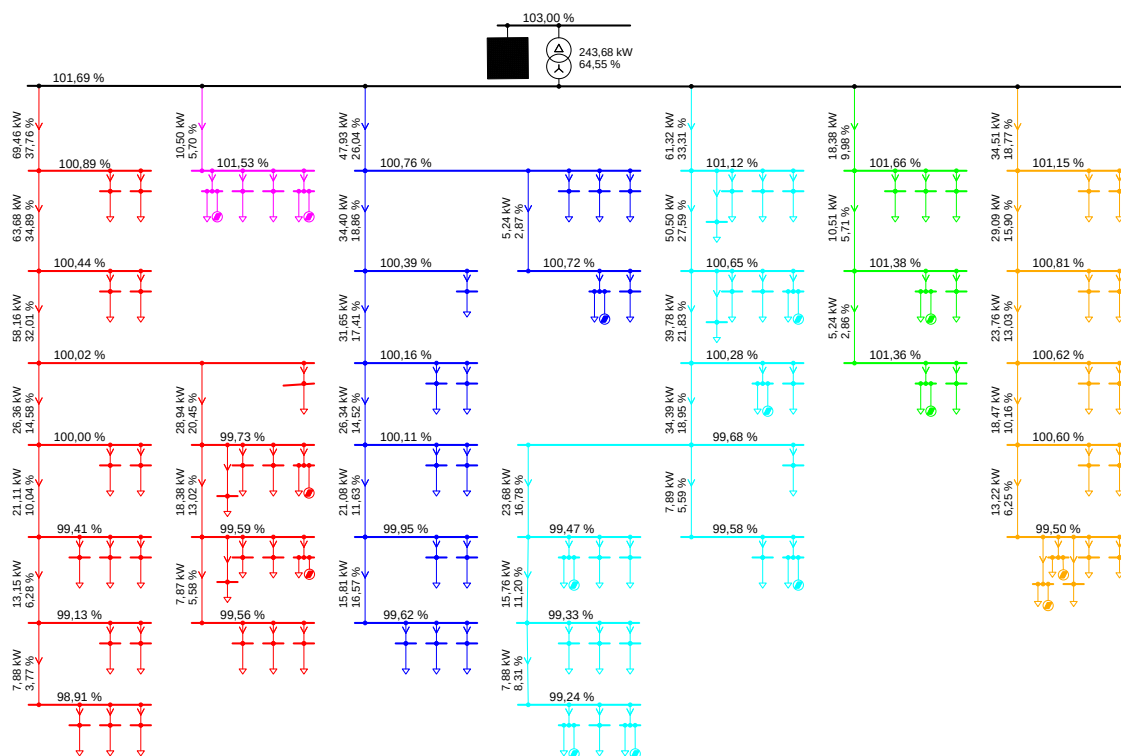


Abbildung 44 – Kleinstädtisches Ausgangsnetz [eigene Darstellung]

11.1.3 Großstädtisches Netz

Als großstädtischer Netzabschnitt (Abbildung 45) wurde ein Verteilnetz mit 168 Wohneinheiten ausgewählt. Bei dem Ortsnetztransformator, welcher das 20 kV MS-Netz mit dem 0,4 kV NS-Netz koppelt, handelt es sich um einen 630 kVA Transformator der Schaltgruppe DYN5 mit einer bezogenen Kurzschlussspannung u_k von 4,0 %. Diese Schaltgruppe ist gut für große Leistungen und Schiefast geeignet. Der ausgeführte sekundärseitige Neutralleiter ist voll belastbar.

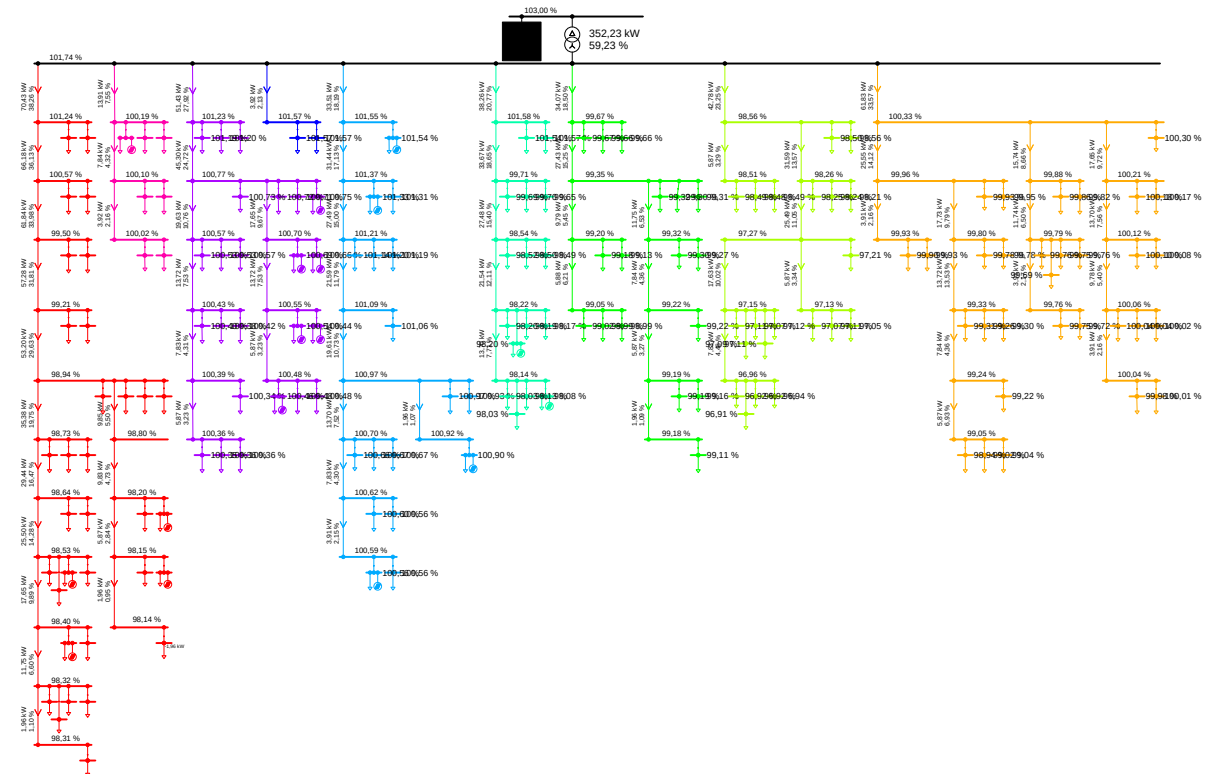


Abbildung 45 – Großstädtisches Ausgangsnetz [eigene Darstellung]

11.2 Lastfluss-Szenarien in repräsentativen Verteilnetzen

Es werden drei bereits beschriebene Verteilnetztypen untersucht, welche auf real existierenden Netzabschnitten basieren. Die Unterschiede belaufen sich vor allem auf deren Dichte an Lasten sowie der Verlegeart der Betriebsmittel (Kabel oder Freileitung). Die Betriebsmittel werden mit Parametern für die Berechnungen hinterlegt und nachfolgend angeführt. Die Werte für die Belastungen der Haushalte werden aufgrund realer Leistungsmessungen aus dem Jahr 2016 hinterlegt. Zusätzlich wird diesem fiktiv aufgeteilten Lastgang (Messung entspricht dem Summenlastgang am Transformator), je nach errechnetem BEV-Bestand, ein Wert für die entsprechend der Ladestation auftretenden Ladeleistung überlagert. In den Untersuchungen wird bei einphasiger Ladung (16 A Leitungsabsicherung) die Leistung auf 2,3 kW (10 A) beschränkt, da eine einphasige Leitung nicht auf Dauerbelastung mit 16 A für mehrere Stunden ausgelegt ist. Den Ladevorgängen wird zusätzlich ein Leistungsfaktor von $\cos(\varphi) = 0,95 \text{ kap.}$ im Verbraucherbezugspfeilsystem unterstellt. Für die Wohneinheiten wird eine mittlere Bewohneranzahl von 2,2 Einwohnern (durchschnittliche Haushaltsgröße nach [46]) hinterlegt, welche sich somit auf die Gleichzeitigkeit bei den Ladevorgängen auswirkt. Ladestationen mit einer Anschlussleistung von mehr als

50 kW werden dabei nicht berücksichtigt, da diese üblicherweise in einer höheren Netzebene integriert werden.

Der Fokus der Analysen wird dabei auf eine mögliche Überlastung der Betriebsmittel gelegt, da diese durch physikalische (thermische) Parameter beschränkt sind und eine Überlastung zu Beschädigung oder Versagen der Betriebsmittel führen kann. Anhand der maximal auftretenden Belastungswerte kann eine Abschätzung getroffen werden, inwieweit sich die thermischen Grenzwerte im elektrischen Netz einhalten lassen. Ein weiteres Kriterium, das nicht direkt zum Versagen führt, jedoch für Energieversorger von großer Bedeutung ist, betrifft Power Quality. In dieser Arbeit werden mit den bereits erwähnten Belastungswerten und hinterlegten Betriebsparametern die auftretenden (stationären) Spannungswerte der einzelnen Netzknoten bestimmt. Dadurch können Grenzwertverletzungen nach der EN 50160 aufgezeigt werden. Weitere Kriterien hinsichtlich Power Quality sind stark von den tatsächlichen Gegebenheiten im Netz abhängig und können daher sehr unterschiedlich sein. Die dafür erforderlichen Praxisuntersuchungen sind Gegenstand von derzeit laufenden Forschungsprojekten.

11.2.1 Ländliches Netz

11.2.1.1 Auswirkungen bis 2030

Bei einem BEV-Bestandsanteil von 11 % BEV bei PKW und 6,5 % BEV bei den LNF für das **Jahr 2030** ergibt sich ein Bedarf von 8 Ladepunkten. **Unter den genannten Annahmen zeigen sich hinsichtlich Betriebsmittelauslastung und Spannungsproblematik keine Probleme**, selbst bei ungesteuerten Ladevorgängen.

11.2.1.2 Grenzszenarien – Erreichung der netzseitigen Grenzen

Bei einem BEV-Bestandsanteil von knapp 30 % BEV bei PKW und über 18 % bei LNF (11 Ladepunkte im Netzmodell vorhanden) zeigen sich zwar keine Spannungsbandverletzungen, jedoch ist hier eine grenzwertig hohe Auslastung des Transformators feststellbar (99,79 %). Da es sich hierbei um eine statische Betrachtung handelt, muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass diese Maximalbelastung nur kurzzeitig auftreten könnte und diese Belastung von den Verteilnetzbetreibern in Kauf

genommen werden, da die Betriebsmittel kurzzeitig überlastet betrieben werden können¹¹.

11.2.1.3 Grenzszenarien – Prognose für 100 % BEV-Bestand

Bei einer vollständigen Substituierung des konventionellen Fahrzeugbestandes (PKW & LNF) durch Elektromobilität ergibt sich aufgrund der bereits erwähnten Berechnungen für das Mobilitätsverhalten ein gewisser Leistungsbedarf, verursacht durch die Ladevorgänge im Netz. Diese müssen auch weiterhin gedeckt werden, da in den Untersuchungen angenommen wurde, dass sich keine Änderung des Mobilitätsverhaltens gegenüber der Ausgangssituation ergeben wird. Mit Hilfe der Maximalwerte der benötigten Ladeleistung wurde die notwendige Ladeinfrastruktur bei 100 % BEV-Bestand ermittelt und deren Werte für die Ladeleistung in den Lastflussberechnungen hinterlegt. Eine stochastische Verteilung der Ladepunkte zeigt hierzu Abbildung 46.

Bei 100 % BEV-Bestand werden 25 Ladestationen benötigt, um die erforderlichen Ladevorgänge abzudecken. Es handelt sich dabei um einen Ladepunkt mit 50 kW, einen Ladepunkt mit 44 kW, 4 Ladepunkte mit 22 kW, 10 Ladepunkte mit 11 kW und 9 Ladepunkte mit 3,7 kW maximaler Ladeleistung.

¹¹ Transformatoren können im Normalbetrieb mit bis zu 1,3-fachen Nennstrom betrieben werden. Im Störungsbetrieb je nach Dauer sogar bis zum doppelten Nennstrom.

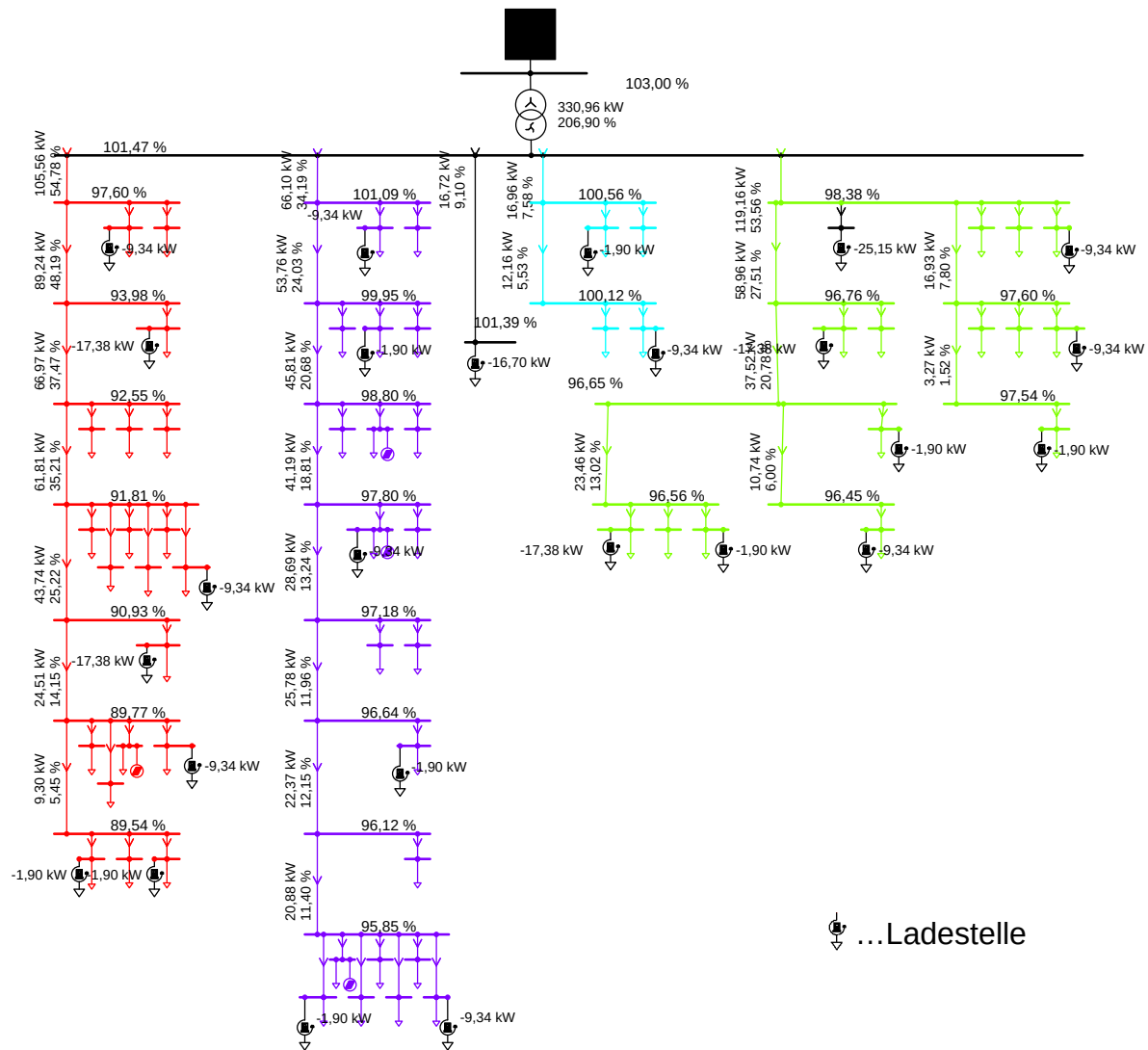


Abbildung 46 – Ländliches Netz mit zufällig verteilten Ladestationen zur Erfüllung von 100 % BEV-Bestand

Wird die Lastsituation nach einem Lastfluss im Netz untersucht, so lässt sich eine Grenzwertverletzung am Ende des ersten Abganges in der Spannung feststellen. Konkret treten hierbei Spannungen $< 90\%$ der Referenzspannung von 230 V/400 V auf. Zusätzlich lässt sich eine deutliche Überlastung des Ortsnetz-transformators mit einem Wert von 206 % feststellen. Ein Transformatortausch auf die nächst höhere Leistungsebene (z. B. auf einen 400 kVA Transformator) könnte unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten (Baukörper) einen sicheren Betrieb ermöglichen.

11.2.2 Kleinstädtisches Netz

11.2.2.1 Auswirkungen bis 2030

Bei einem BEV-Bestandsanteil von 11 % BEV bei PKW und 6,5 % BEV bei LNF für das **Jahr 2030** ergibt sich ein Bedarf von 8 Ladepunkten. **Unter den genannten Annahmen zeigen sich hinsichtlich Betriebsmittelauslastung und Spannungsproblematik keine Probleme**, selbst bei ungesteuerten Ladevorgängen.

11.2.2.2 Grenzszenarien – Erreichung der netzseitigen Grenzen

Bei einem BEV-Bestandsanteil von knapp 56 % BEV bei PKW und über 33 % bei LNF (19 Ladepunkte im Netz vorhanden) wird die Belastungsgrenze des Transformators (100,36 %) erreicht. Dieser Betrieb kann jedoch, sofern die Dauer der Belastung nur kurzzeitig auftritt, für längere Zeit aufrecht gehalten werden.

11.2.2.3 Grenzszenarien – Prognose für 100 % BEV-Bestand

Bei einer vollständigen Substituierung des konventionellen Fahrzeugbestandes durch Elektromobilität im Netzabschnitt ergibt sich aufgrund der bereits erwähnten Berechnungen für das Mobilitätsverhalten wiederum ein gewisser Leistungsbedarf, verursacht durch die Ladevorgänge im Netz. Mit Hilfe der Maximalwerte der benötigten Ladeleistung wurde die notwendige Ladeinfrastruktur bei 100 % BEV-Bestand ermittelt und deren Werte für die Ladeleistung in den Lastflussberechnungen hinterlegt (Abbildung 47).

Bei einem BEV-Bestand von 100 % werden 27 Ladestationen benötigt, um die erforderlichen Ladevorgänge abzudecken. Es handelt sich dabei um einen Ladepunkt mit 50 kW, 2 Ladepunkte mit 44 kW, 5 Ladepunkte mit 22 kW, 10 Ladepunkte mit 11 kW und 9 Ladepunkte mit 3,7 kW maximaler Ladeleistung.

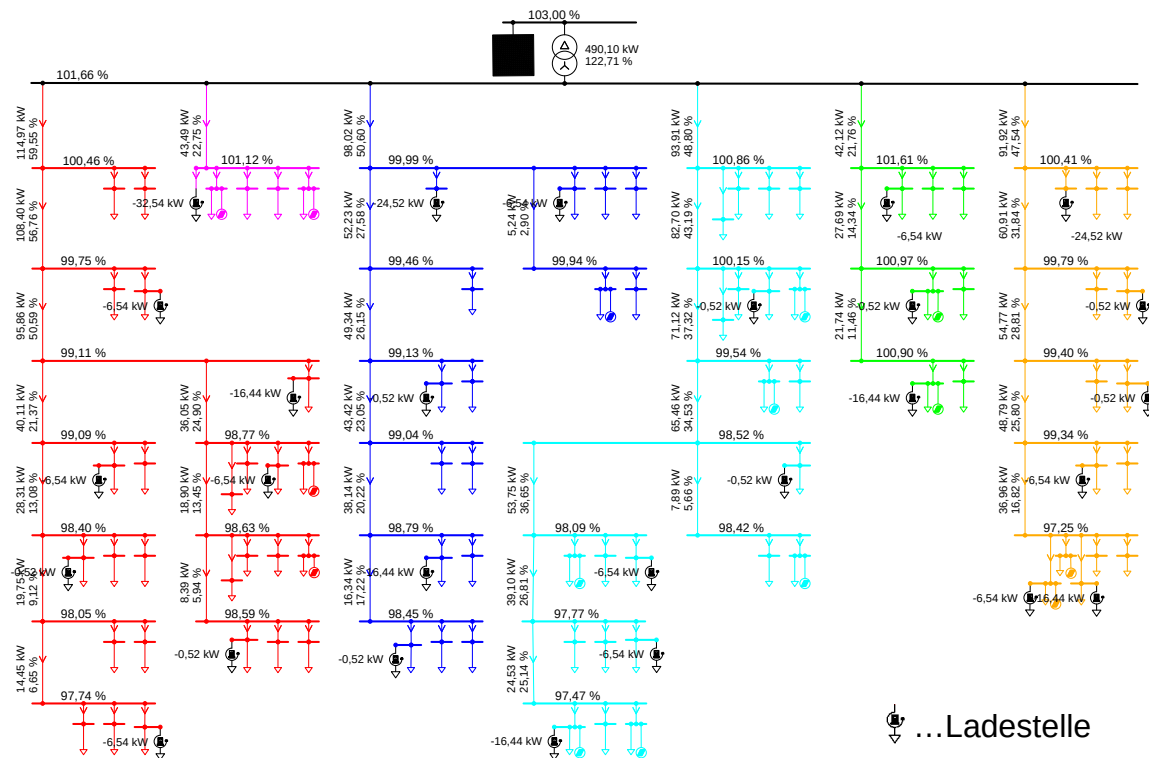


Abbildung 47 – Kleinstädtisches Netz mit zufällig verteilten Ladestationen zur Erfüllung von 100 % BEV-Bestand

Wird die Lastsituation nach einem Lastfluss im Netz untersucht, so lässt sich eine Überlastung des Ortsnetztransformators mit einem Wert von 122,7 % feststellen. Ein Transformatortausch auf die nächst höhere Leistungsebene könnte unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten auch in diesem Fall einen sicheren Betrieb ermöglichen. Da es sich hierbei um eine statische Betrachtung handelt, muss auch an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass diese Auslastung nur kurzzeitig auftreten und von den Verteilnetzbetreibern teilweise in Kauf genommen werden könnte, da die Betriebsmittel kurzzeitig überlastet betrieben werden können. Eine Zeitreihenuntersuchung könnte hier in einer ersten Abschätzung weitere Erkenntnisse bringen.

11.2.3 Großstädtisches Netz

11.2.3.1 Auswirkungen bis 2030

Bei einem BEV-Bestandsanteil von 11 % BEV bei PKW und 6,5 % BEV bei LNF für das **Jahr 2030** ergibt sich ein Bedarf von 10 Ladepunkten. **Unter den genannten Annahmen zeigen sich hinsichtlich Betriebsmittelauslastung und Spannungsproblematik keine Probleme**, selbst bei ungesteuerten Ladevorgängen.

11.2.3.2 Grenzszenarien – Erreichung der netzseitigen Grenzen

Bei einem BEV-Bestandsanteil von knapp 48 % BEV bei PKW und über 28 % bei LNF (28 Ladepunkte im Netz vorhanden) wird die Belastungsgrenze des Transformators (96,7 %) erreicht. Dieser Betrieb kann jedoch, sofern die Dauer der Belastung nur kurzzeitig auftritt, für längere Zeit aufrecht gehalten werden.

11.2.3.3 Grenzszenarien – Prognose für 100 % BEV-Bestand

Bei einer vollständigen Substituierung des konventionellen Fahrzeugbestandes durch Elektromobilität im Netzabschnitt ergibt sich aufgrund der bereits erwähnten Berechnungen für das Mobilitätsverhalten auch in diesem Szenario ein gewisser Leistungsbedarf, verursacht durch die Ladevorgänge im Netz. Mit Hilfe der Maximalwerte der benötigten Ladeleistung wurde die notwendige Ladeinfrastruktur bei 100 % BEV-Bestand ermittelt und deren Werte für die Ladeleistung in den Lastflussberechnungen hinterlegt (Abbildung 48).

Bei einem BEV-Bestand von 100 % werden 50 Ladestationen benötigt, um die erforderlichen Ladevorgänge abzudecken. Es handelt sich dabei um 2 Ladepunkte mit 50 kW, 3 Ladepunkte mit 44 kW, 10 Ladepunkte mit 22 kW, 18 Ladepunkte mit 11 kW und 17 Ladepunkte mit 3,7 kW maximaler Ladeleistung.

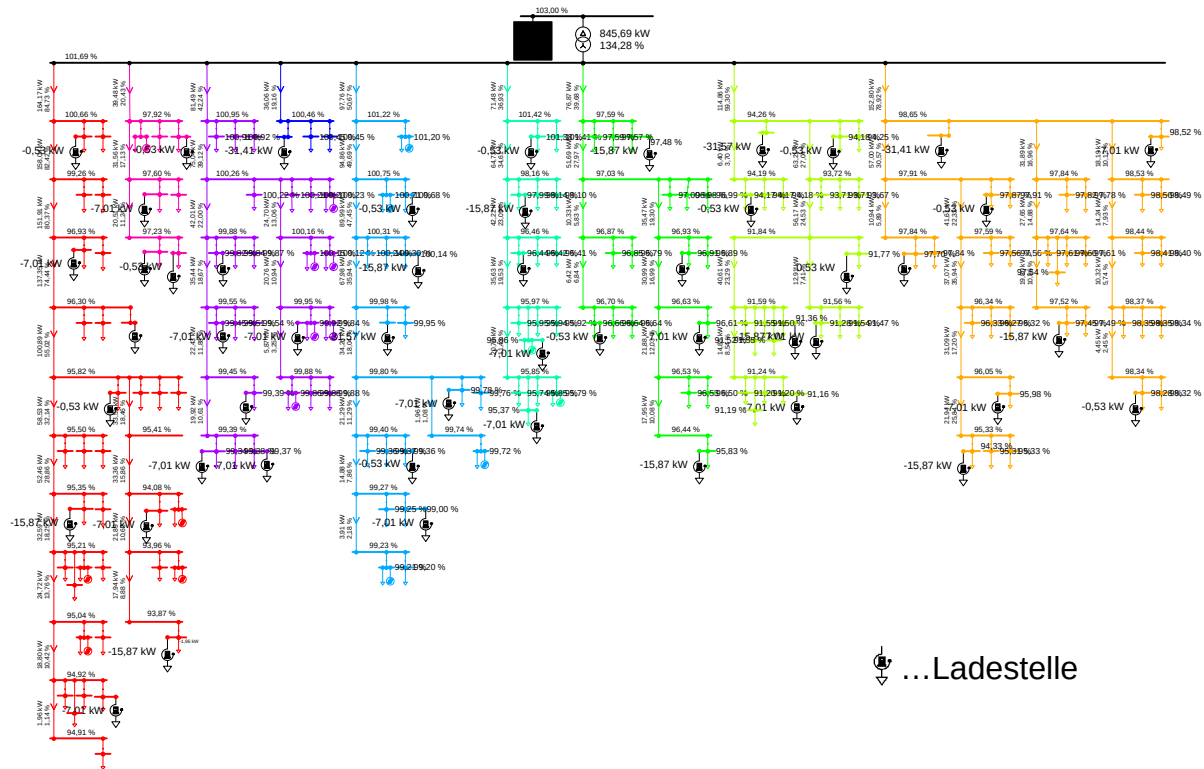


Abbildung 48 – Großstädtisches Netz mit zufällig verteilten Ladestationen zur Erfüllung von 100 % BEV-Bestand

Wird die Lastsituation nach einem Lastfluss im Netz untersucht, so lässt sich eine Überlastung des Ortsnetztransformators mit einem Wert von 134,3 % feststellen. Ein Transformatortausch auf die nächst höhere Leistungsebene könnte unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten auch hier Abhilfe schaffen. Zusätzlich wurde eine Annäherung an die Spannungsbandgrenzen in einem Abzweig festgestellt. Der Wert (91,2 %) liegt aber noch knapp oberhalb des erlaubten Bereiches von $\pm 10\%$ der Nennspannung. Da es sich hierbei um eine statische Betrachtung handelt, muss auch an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass diese Auslastung nur kurzzeitig auftreten könnte und diese Überlastungen von den Verteilnetzbetreibern teilweise in Kauf genommen werden könnten, da die Betriebsmittel kurzzeitig überlastet betrieben werden können. Eine Zeitreihenuntersuchung könnte hier in einer ersten Abschätzung weitere Erkenntnisse bringen.

12 Kosten

Basierend auf den zuvor gezeigten Berechnungen des globalen und lokalen Modells soll nachfolgend eine Abschätzung der Kosten für Ladeinfrastruktur durchgeführt werden. Dabei sollen einerseits die Kosten für die Errichtung von Ladestellen, andererseits für eine gegebenenfalls erforderliche Netzerweiterung abgeschätzt werden. Die Kosten für die Errichtung von Ladestellen sowie der Netzerweiterung sind sehr fallspezifisch, insbesondere was die baulichen Maßnahmen betrifft. In den nachfolgenden Kapiteln sollen daher Richtwerte präsentiert werden, die anschließend in einem einfachen Kostenmodell zu den Gesamtkosten führen. Das Modell hat nicht den Anspruch eine exakte Vorhersage für die anfallenden Kosten jeder einzelnen Ladestelle zu liefern, sondern soll lediglich eine Abschätzung bieten.

12.1 Errichtungskosten für eine Ladestelle

Die Kosten zur Errichtung der Ladestellen werden mit Hilfe der Kosten einer einzelnen Ladestation und der Anzahl der benötigten Ladestationen berechnet. Nachfolgend soll dies gezeigt werden.

Die Kosten zur Errichtung einer Ladestelle lassen sich im Wesentlichen in drei Teile gliedern:

- Hardware
Ladestation als Wallbox oder Ladesäule, inkl. Installation falls erforderlich (z. B. Schnellladestation oder öffentliche Station)
- Netzgebühren
Nur einmalige Kosten, d. h. Netzzutrittsentgelt und Netzbereitstellungs-entgelt, keine laufenden Kosten
- Bauliche Maßnahmen
Sämtliche bauliche Maßnahmen zur Errichtung der Ladestation, inkl. ggf. erforderlicher Leitungslegung sowie Grabungs- und Öffnungsarbeiten

Die laufenden Kosten sind sehr stark von der Wartung, dem Abrechnungssystem, dem tatsächlich verbrauchten Strom und den laufenden Netzgebühren abhängig. Diese werden in weiterer Folge nicht betrachtet. Nachfolgend soll eine Abschätzung der Errichtungskosten in den drei erwähnten Unterteilungen erfolgen.

Eine weitere Unterscheidung betrifft den Ort der Ladestation. Hier wird neben einer Unterscheidung zwischen Stadt und Land außerdem nach der Zugänglichkeit (Straßenrand, Stellplatz/Garage) und nach dem Ladeort aus dem lokalen Modell (Heim, Ziel, Gast) unterschieden. Des Weiteren wird nach der Ladeleistung differenziert, wobei Ladeleistungen über 50 kW gesondert betrachtet werden.

Zur übersichtlichen Erfassung der unterschiedlichen Kosten wird eine tabellarische Darstellung verwendet. In jeder Tabelle wird zwischen den 3 Kostenarten, 5 Ladeleistungen und städtisch/ländlich unterschieden. Für die einzelnen Ladeorte (Heim/Ziel/Gast und Straßenrand/Stellplatz) wird je eine Tabelle (in Summe 6 Tabellen) erstellt.

Die Zahlenwerte der Kosten konnten durch Anfragen an Wien Energie [47], die Wiener Netze [48] und die EVN [49] ermittelt werden. Bei den erhaltenen Daten ergeben sich je nach Fall teilweise große Bandbreiten und unterschiedliche Angaben (vor allem wegen der schwierigen Abschätzbarkeit der baulichen Maßnahmen). Es sollen daher nachfolgend die Annahmen zur Festlegung der Kosten jedes Ladestellenorts (jeder Tabelle) gezeigt werden. Alle Kosten werden exklusive USt. angegeben.

12.1.1 Heim Straßenrand

Hierbei handelt es sich um alle Ladestationen, die für die Heimladung verwendet werden, sich jedoch am Straßenrand befinden, da keine eigene Ladestation bzw. kein eigener Stellplatz zur Verfügung steht. Dies ist in Städten häufig der Fall.

Da in der **Hardware** der städtischen und ländlichen Ladestellen grundsätzlich kein Unterschied besteht, werden diese Kosten hier als gleich festgelegt. Die Berechnung der Kosten für die Hardware erfolgt durch Mittelung der Kostenangaben von [47] und [49].

Die Kosten für das **Netz** werden für städtische Ladestellen nach [48] und ländliche Ladestellen nach [49] geringfügig unterschiedlich angegeben. Dabei handelt es sich um die Netzkosten für Wien und Niederösterreich, die in dieser Arbeit als repräsentativ für ein städtisches und ein ländliches Netz betrachtet werden. Die Kosten werden daher entsprechend [48] (städtisch) und [49] (ländlich) unverändert übernommen.

Die Kosten für die **Bauleistung** sind für städtische und ländliche Ladestellen stark unterschiedlich, was sich aufgrund des höheren Aufwands für Grabungsarbeiten bzw.

zur Leitungslegung ergibt. Die Kosten für die Bauleistung im ländlichen Bereich werden nach [49] in einem breiten Rahmen angegeben. In dieser Arbeit wird der Mittelwert des angegebenen Bereichs verwendet. Nach [47] können die städtischen Bauleistungen mit in etwa dem doppelten Wert der ländlichen Kosten abgeschätzt werden. Des Weiteren werden die Kosten für eine Ladesäule am Straßenrand mit 11 kW bzw. 22 kW angegeben, nicht aber für niedrigere bzw. höhere Leistungen. Mangels entsprechender Angaben wird daher in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass die Kosten für 2,3/11 kW bzw. für 22/44 kW gleich sind. Die Annahme dabei ist, dass sich für die erwähnten Ladeleistungen jeweils der Aufwand der Bauleistung nicht ändert. Für 50 kW Ladeleistung können sich die baulichen Gegebenheiten deutlich ändern, wie auch im ländlichen Bereich sichtbar ist, da hier bereits ein eigener Anschluss an den Verteilernetz-Trafo notwendig sein kann. Da im städtischen Bereich nach [47] keine Angabe für 50 kW existiert und der bauliche Aufwand in der Stadt wesentlich höher ist als am Land, wurde der Maximalwert des ländlichen Bereichs nach [49] verwendet. Die aus diesen Überlegungen resultierenden Werte für die städtischen Bauleistungen liegen im Bereich der doppelten ermittelten ländlichen Kosten, was nach [47] eine zulässige Abschätzung darstellt.

Die ermittelten Kosten für die Ladestation Heim Straßenrand sind in Tabelle 12 zu sehen. Die in [50] gezeigte Abschätzung der Kosten für die Errichtung von öffentlich zugänglichen Ladestellen (bis 50 kW) zeigt ähnliche Ergebnisse.

Tabelle 12 – Errichtungskosten für Ladestationen am Heim Straßenrand

Heim Straßenrand					
Ländlich [EUR]	2,3 kW	11 kW	22 kW	44 kW	50 kW
Hardware	2.000	2.750	4.500	5.750	17.750
Netz	1.000	2.250	4.250	8.500	11.500
Bauleistung	3.175	3.300	3.300	6.250	15.250
Gesamt	6.175	8.300	12.050	20.500	44.500
Städtisch [EUR]	2,3 kW	11 kW	22 kW	44 kW	50 kW
Hardware	2.000	2.750	4.500	5.750	17.750
Netz	1.062	3.110	5.700	10.881	12.294
Bauleistung	7.500	7.500	15.000	15.000	25.000
Gesamt	10.562	13.360	25.200	31.631	55.044

12.1.2 Heim Stellplatz

Der eigene Stellplatz für die Heimladung ist im ländlichen Bereich oftmals die Garage eines Privathaushalts, während dies im städtischen Bereich in vielen Fällen der gemietete Stellplatz eines Mehrparteienhauses ist. Aus diesem Grund ergeben sich für diese Ladestationen deutlich unterschiedliche Kosten zwischen Stadt und Land.

Bei der **Hardware** wird angenommen, dass an jedem Stellplatz im ländlichen Bereich für eine Ladeleistung von 2,3 kW eine Schuko-Steckdose vorhanden ist, wodurch keine Kosten (auch für Netz und Bauleistung) entstehen. Ladeleistungen mit 44 kW und 50 kW werden bei Heimladung entsprechend Kapitel 8.1.1 nicht verwendet, sollen hier aber der Vollständigkeit halber und für eventuelle Neuberechnungen angeführt werden. Für Leistungen bis 44 kW werden die Kosten für ländliche Ladestationen nach [49] festgelegt, wobei der Mittelwert der angegebenen Bereiche verwendet wird. Für 50 kW wird angenommen, dass bereits dieselbe Hardware verwendet werden muss wie für eine öffentliche Ladestation. Dadurch ergeben sich zwischen Land und Stadt für 50 kW keine Unterschiede und somit wird derselbe Wert wie für die Ladestation am Heim Straßenrand verwendet. Bis 22 kW werden die städtischen Kosten für Wallboxen in [47] angegeben und in dieser Arbeit verwendet. Für Ladeleistungen mit 44 kW (und 50 kW) wird nach [47] dieselbe Hardware verwendet wie für Ladestationen im öffentlichen Raum. Daher werden daher für diese Leistungen dieselben Kosten wie für Heim Straßenrand verwendet.

Die Kosten für das **Netz** am Land werden nach [49] verwendet, wobei angenommen wird, dass für 2,3 kW und 11 kW keine Netzkosten entstehen, da diese Leistungen in einem ländlichen Privathaushalt bereits vorhanden sind. Höhere Leistungen decken sich mit den Kosten für Heim Straßenrand. Die Netzkosten in der Stadt sind dieselben wie für Heim Straßenrand.

Für **bauliche Maßnahmen** fallen im ländlichen Bereich bei Leistungen bis 22 kW grundsätzlich niedrigere Kosten an als in der Stadt, da in vielen Fällen keine oder nur einfache Maßnahmen, wie Leitungslegung zum Stellplatz hin, notwendig sind. Deutlich höher (und fast so hoch wie in der Stadt) sind die Kosten am Land bei 44 kW, da hier in vielen Fällen der vorhandene Haushaltsanschluss nicht ausreicht. Bis 44 kW werden im ländlichen Bereich die Mittelwerte der angegebenen Kostenbereiche nach [49] verwendet. Bei 50 kW ergeben sich im städtischen Bereich nach [47] geringfügig niedrigere Kosten als im ländlichen nach [49], was wegen der grundsätzlich höheren

Aufwände in der Stadt widersprüchlich scheint. Da es sich bei diesen Kostenangaben jedoch beiderseits um eine grobe Abschätzung handelt und der Unterschied zwischen den Werten gering ist, wird in dieser Arbeit der Mittelwert der beiden Zahlenwerte (jeweils für 44 kW und 50 kW) verwendet. Damit wird Konsistenz hinsichtlich der in dieser Arbeit verwendeten Annahme, dass bauliche Maßnahmen in der Stadt im Vergleich zum Land gleich oder aufwändiger sind, sichergestellt. Für Leistungen bis 44 kW im städtischen Bereich werden die Zahlenwerte nach [47] verwendet.

Die ermittelten Kosten für die Ladestation Heim Stellplatz sind in Tabelle 13 zu sehen.

Tabelle 13 – Errichtungskosten für Ladestationen am Heim Stellplatz/Garage

Heim Stellplatz/Garage					
Ländlich [EUR]	2,3 kW	11 kW	22 kW	44 kW	50 kW
Hardware	0	400	1.000	1.500	17.750
Netz	0	0	4.250	8.500	11.500
Bauleistung	0	500	500	5.500	7.500
Gesamt	0	900	5.750	15.500	36.750
Städtisch [EUR]	2,3 kW	11 kW	22 kW	44 kW	50 kW
Hardware	1.000	1.000	1.000	5.750	17.750
Netz	1.062	3.110	5.700	10.881	12.294
Bauleistung	1.500	1.700	1.700	6.000	7.500
Gesamt	3.562	5.810	8.400	22.631	37.544

12.1.3 Ziel Straßenrand

Für Fahrten an ein Ziel und Ladung am Straßenrand wird angenommen, dass dieselben Ladestellen verwendet werden wie bei einer Heimpladung am Straßenrand. Die Kosten sind daher mit denen von **Heim Straßenrand** ident. Eine eigene Tabelle der Kosten für Ziel Straßenrand ist im Anhang 16.2 zu finden.

12.1.4 Ziel Stellplatz

Mit der Ladung am Ziel Stellplatz ist die Ladung an einem öffentlichen Parkplatz oder in einer Garage, nicht aber am Straßenrand (gesondert betrachtet) gemeint. Dies trifft hauptsächlich auf Supermarkt-Parkplätze, P&R Anlagen, Einkaufszentren etc. zu.

Für die Kosten der **Hardware** wird angenommen, dass diese sowohl im städtischen als auch im ländlichen Bereich gleich sind, da bei den verwendeten Ladestationen kein Unterschied zwischen städtischen und ländlichen öffentlichen Parkplätzen besteht. Die Werte ergeben sich daher aus dem Mittelwert der Angaben nach [47] und [49].

Für die **Netzkosten** werden die gleichen Kosten verwendet wie bei der Straßenrand Ladestation (städtisch und ländlich unterschiedlich), da es sich dabei ebenfalls um öffentliche Ladestationen handelt und die Netzkosten dafür gleich sind.

Bei den **Bauleistungen** wird wie bei der Hardware davon ausgegangen, dass es zwischen ländlichen und städtischen Ladestationen auf öffentlichen Parkplätzen und in Garagen keinen Unterschied gibt. Aus diesem Grund sind auch die Kosten gleich, welche aus dem Mittelwert der Angaben entsprechend [47] und [49] gebildet werden.

Die ermittelten Kosten für die Ladestation Ziel Stellplatz sind in Tabelle 14 zu sehen.

Tabelle 14 – Errichtungskosten für Ladestationen am Ziel Stellplatz/Garage

Ziel Stellplatz/Garage					
Ländlich [EUR]	2,3 kW	11 kW	22 kW	44 kW	50 kW
Hardware	1.500	2.375	3.750	5.750	17.750
Netz	1.000	2.250	4.250	8.500	11.500
Bauleistung	2.188	2.400	3.150	6.125	11.125
Gesamt	4.688	7.025	11.150	20.375	40.375
Städtisch [EUR]	2,3 kW	11 kW	22 kW	44 kW	50 kW
Hardware	1.500	2.375	3.750	5.750	17.750
Netz	1.099	3.183	5.817	11.086	12.523
Bauleistung	2.188	2.400	3.150	6.125	11.125
Gesamt	4.787	7.958	12.717	22.961	41.398

12.1.5 Gast Straßenrand

Für Fahrten an ein Ziel in einem anderen Ort (Bundesland oder große Stadt) und dortige Ladung am Straßenrand wird (wie auch bei Ziel Straßenrand) angenommen, dass dieselben Ladestellen verwendet werden wie bei einer Heimladung am Straßenrand. Die Kosten sind daher mit jenen von **Heim Straßenrand** ident. Eine eigene Tabelle der Kosten für Ziel Straßenrand ist im Anhang 16.2 zu finden.

12.1.6 Gast Stellplatz

Für Fahrten an ein Ziel in einem anderen Ort (Bundesland oder große Stadt) und dortige Ladung an einem öffentlichen Parkplatz bzw. in einer Garage werden grundsätzlich die gleichen Ladestationen verwendet wie bei Ziel Stellplatz. Aus diesem Grund werden die Kosten mit jenen von **Ziel Stellplatz** gleichgesetzt. Eine eigene Tabelle der Kosten für Gast Stellplatz ist zusätzlich im Anhang 16.2 zu finden.

12.1.7 Autobahn

Die Errichtungskosten für Ladestationen mit höheren Ladeleistungen werden mit Hilfe der Kosten für Ladestationen auf den Autobahnen, die durch die ASFINAG geplant sind, abgeschätzt. Die Basis dafür bilden Anfragen an ASFINAG [51] und in weiterer Folge an Gutmann GmbH [52] und Innogy SE [53], [32]. Daraus wurden die Kosten für Hochleistungsladestellen mit 150 kW abgeschätzt. Diese sind in Tabelle 15 aufgelistet.

Tabelle 15 – Errichtungskosten für Schnellladestationen entlang der Autobahn

Autobahn	
[EUR]	150 kW
Hardware	60.000
Netz	29.913
Bauleistung	7.000
Gesamt	96.913

12.2 Kosten für Netzerweiterungsmaßnahmen

Das elektrische Verteilnetz wird bei seiner Planung nach gewissen Richtlinien und Kriterien für einen sicheren und effizienten Betrieb ausgelegt (Einhaltung der Spannungsqualität nach EN 50160, Einhaltung der Bedingungen der thermischen Dauerbelastung, Kurzschlussfestigkeit sowie des (n-1)-Ausfallkriteriums). Durch eine Erhöhung der Lasten (sogenannte „Lastverdichtung“) kann es mit der Zeit notwendig werden, gewisse Maßnahmen zu setzen oder aber auch eine Netzerweiterung durchzuführen.

Tabelle 16 gibt einen Überblick über die spezifischen Investitionskosten der wichtigsten Betriebsmittel, die sich im Mittel- und Niederspannungsverteilstrom befinden. Die Werte können je nach Ausführungsvariante und Qualitätsklasse stark

variieren, sie sollen jedoch ein Gefühl für die Kostendimensionen der einzelnen Komponenten vermitteln.

Tabelle 16 – Überblick von spezifischen Investitionskosten wichtiger Betriebsmittel

Komponente/Tätigkeit	Kosten	Quelle
Umspannwerk (UW) mit 110 kV Schaltanlage (2-40 MVA)	1,8-2,2 Mio. €	[54]
Feld einer SF6-Schaltanlage ¹² (126 kV, 50 MVA)	500 000 €/Stk.	[35]
HS/MS UW-Transformator 40 MVA inkl. Schutz	700 000 €/Stk.	[54]
MS/NS Stationstransformator 630 kVA inkl. Schutz	16 000 €/Stk.	[54]
Transformator ¹³ (123 kV / 12 kV) (Einzeleinheit)	12 €/kVA	[35]
Netzstation mit Lasttrennschalter ohne Transformator	18 000 €/Stk.	[54]
Freileitung (123 kV, 243-AL1/39-ST1A, Donaumast)	250 000 €/km	[35]
VPE-Kabel (12 kV, 3 x 185 mm ²)	20-30 €/m	[35]
PVC-Kabel (0,4 kV, 4 x 150 mm ²)	5-20 €/m	[35]
Kabelverlegungskosten in Straßen in 0,8 m Tiefe	50 €/m	[35]
Kabelverlegungskosten im dicht verbauten Gebiet	100 €/m	[55]

In [54] wird ein mögliches Szenario angegeben, in dem ein typisches ländliches Verteilnetz aufgrund erhöhter Anforderungen ausgebaut werden muss. Dabei werden verschiedene Maßnahmen beschrieben, welche auch in typischen Verteilnetzen in Österreich ihre Gültigkeit haben. In Tabelle 17 sind einige dieser Maßnahmen und deren Kosten angeführt.

Ein erheblicher Anstieg von Lasten in einem Mittelspannungsnetz kann sich mitunter auch auf die Hoch- und Höchstspannungsebenen auswirken, was zusätzlich zu zeitlich versetzten stufenweisen Ausbaumaßnahmen führen kann. Dies soll in dieser Studie allerdings nicht weiter ausgeführt werden.

¹² Bei einer SF6-Schaltanlage handelt es sich um eine gasisolierte Schaltanlage, welche zur Isolierung der elektrischen Leiter diese mit Schwefelhexafluorid (SF6) umgibt. Dadurch wird eine kompakte Bauweise realisiert, was heute Stand der Technik ist.

¹³ Bei Niederspannungstransformatoren befinden sich die Preise je nach Leistungsklasse und Ausführung zwischen 6.000 € für einen 160 kVA und 11.000 € für einen 630 kVA Transformator. Regelbare Ortsnetztransformatoren schlagen mit ca. dem doppelten Wert zu Buche [44].

Tabelle 17 – Mögliche Maßnahmen der Netzerweiterung und deren Kosten in einem beispielhaften Referenzszenario nach [54]

Komponente	Tätigkeit	Nutzen	Kosten
NS-Kabel	Erhöhung des Leiterquerschnitts von 95 mm ² auf 240 mm ²	Stromtragfähigkeit wird erhöht (von 220 A auf 360 A)	120 €/m
Trafostation	Tausch der 630 kVA Station gegen neue Kompaktstation mit 1250 kVA Trafo und NS-Verteiler	Nennleistung des Transformators wird erhöht. Mehr Leistung übertragbar.	93.000 €
MS-Kabel	MS-Freileitung Stahl-Alu 95/12 auf MS-Kabel 500 mm ² Al	Stromtragfähigkeit wird erhöht (von 350 A auf 640 A)	120 €/m
Umspannwerk	110 kV/20 kV Umbau von drei 20 MVA auf drei 40 MVA inkl. Transformator und MS-Schaltanlage	Nennleistung des UW wird erhöht. Mehr Leistung übertragbar.	3,0 Mio. €

12.3 Ergebnisse für die Kosten von Ladeinfrastruktur

Nachfolgend sollen die Ergebnisse des Kostenmodells exemplarisch gezeigt werden. Diese werden aus der Anzahl der benötigten Ladestationen (siehe Kapitel 9) und den Einzelkosten für Ladestationen (siehe Kapitel 12.1) gebildet.

Da jedes Verteilnetz individuell für sich betrachtet werden muss, ist eine großflächige Abschätzung der Kosten für eine Netzerweiterung ohne Information über den Zustand der einzelnen zahlreichen österreichischen Netzbetreiber (122 gemeldete Verteilnetze laut [56], welche gemeinsam über das Übertragungsnetz der Austrian Power Grid (APG) miteinander verbunden sind) nahezu unmöglich. Stattdessen wurde in Kapitel 12.2 ein Überblick über die notwendigen und möglichen Erweiterungen und deren Kosten im elektrischen Verteilnetz gegeben.

Bei den untersuchten Verteilernetzmodellen konnten unter den gewählten Annahmen bis zum Jahr 2030 keine Probleme hinsichtlich Betriebsmittelauslastung und Spannungsproblematik festgestellt werden. Es werden daher in dieser Arbeit keine Kosten für den Netzausbau berücksichtigt.

Die Kosten zur Errichtung von Ladeinfrastruktur (Ladestellen ohne Netzmaßnahmen) sind maßgeblich durch die Kosten für Hardware (Ladestelle), Netzgebühren und bauliche Maßnahmen geprägt, welche je nach Fall stark variieren können. Die nachfolgend gezeigten Kosten sind als Richtwerte zu verstehen und stellen eine erste

Abschätzung dar. Diese haben nicht den Anspruch, jede Ladestation im Detail mit ihren Kosten abzubilden, sondern sollen die typischen Kosten aufzeigen. Weitere Szenarien mit variierten Parametern und die dabei entstehenden Kosten werden in Kapitel 13 gezeigt.

12.3.1 Errichtungskosten bis 2030

Mit der Anzahl der benötigten Ladestellen aus Abbildung 34 bzw. Abbildung 35 in Kapitel 9.2.1 ergeben sich die Kosten für die Errichtung von Ladeinfrastruktur bis 2030. Diese sind für Wien und Österreich in Abbildung 49 nach Ladeleistung bzw. in Abbildung 50 nach Ladeort zu sehen. Es ist zu erkennen, dass die Kosten für die 22 kW Ladestationen höher sind als für 11 kW, obwohl letztere wesentlich mehr (höhere Anzahl an Ladestellen) sind. Dies lässt sich auf die deutlichen Mehrkosten für höhere Leistungen zurückführen.

Abbildung 50 ist zu entnehmen, dass die Ladestationen am Straßenrand in Summe deutlich höhere Kosten verursachen als auf Stellplätzen bzw. in Garagen, was auf die höheren Einzelkosten für Ladestationen am Straßenrand zurückzuführen ist. Insbesondere die hohe Anzahl an Heimpladestationen am Straßenrand verursacht einen beträchtlichen Anteil der Kosten. Da diese Ladestationen in der Regel nicht vom Fahrzeugnutzer selbst errichtet werden können, müssen **mehr als die Hälfte der Kosten von öffentlichen Stellen bzw. Ladestellenbetreibern** übernommen werden.

Die Kosten für die Errichtung von Ladeinfrastruktur betragen **bis 2030** (kumulierte Kosten bis 2030 für BEV-Bestand 2030) rund **9.800 €/Fahrzeug**. Das entspricht, bei 0,2 €/kWh Stromkosten und 25 kWh/100km Verbrauch den Energiekosten für **196.000 km pro Fahrzeug**.

Die Kosten liegen damit höher als in [29], [30] und [57]. Die höheren Kosten erklären sich durch die abweichenden Baukosten öffentlicher Ladestellen (vor allem städtisch wesentlich höher) und den höheren Ladestellenbedarf, der sich aus der unterschiedlichen Methodik ergibt.

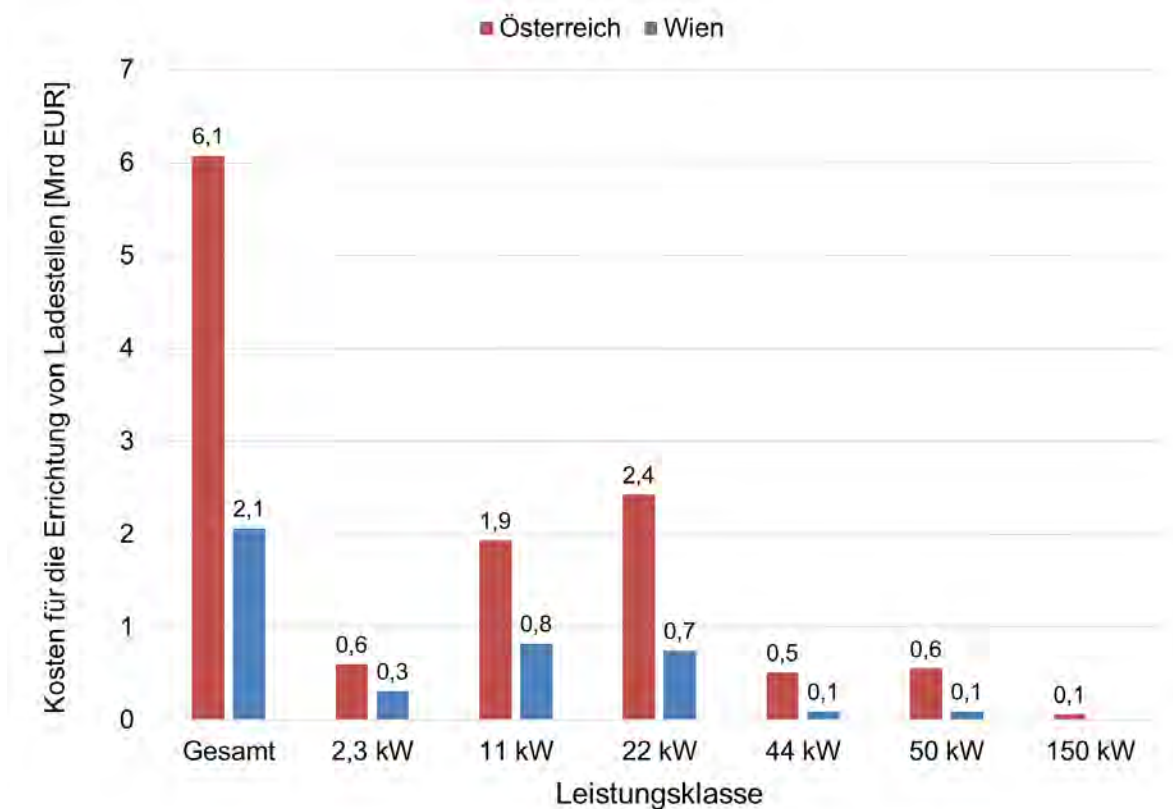


Abbildung 49 – Kumulierte Kosten für die Errichtung von Ladestationen nach Ladeleistung für Wien und Österreich bis 2030 (exkl. Netzmaßnahmen)

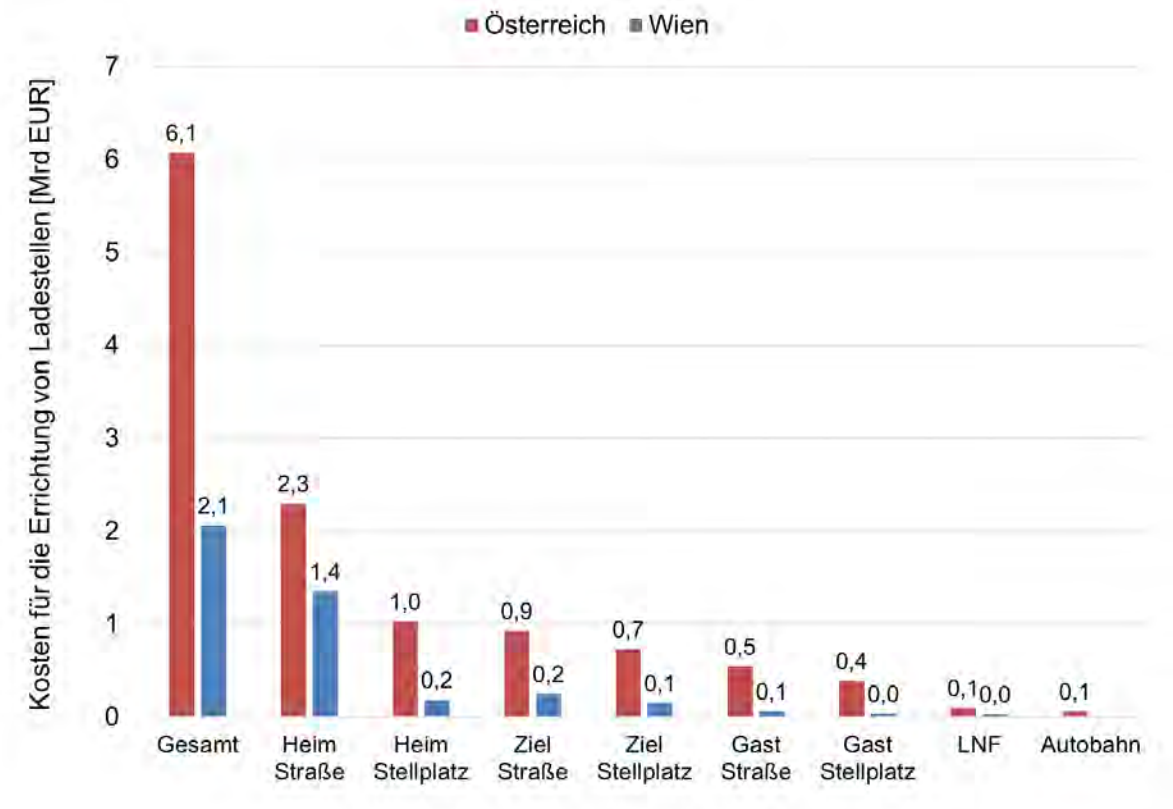


Abbildung 50 – Kumulierte Kosten für die Errichtung von Ladestationen nach Ladeort für Wien und Österreich bis 2030 (exkl. Netzmaßnahmen)

12.3.2 Errichtungskosten bei 100 % BEV-Bestand

Bei 100 % BEV ergeben sich entsprechend höhere Kosten, die in Abbildung 51 und Abbildung 52 exemplarisch für Wien und Österreich dargestellt sind.

Mit dem Fahrzeugbestand lassen sich die Kosten pro Fahrzeug berechnen. Die Kosten für die Errichtung von Ladeinfrastruktur betragen bei **100 % BEV Bestand** rund **9.600 €/Fahrzeug**, was im Vergleich zu 2030 niedriger ist. Der Grund dafür ist, dass der BEV-Bestandsanteil von PKW und LNF in diesem Szenario gleich ist, was einer deutlichen Erhöhung der LNF gegenüber den PKW entspricht. Gleichzeitig wird angenommen, dass LNF keine öffentlichen Ladestellen nutzen, weswegen zwar die Anzahl der Heimladestationen (der LNF) steigt, nicht aber die Anzahl der öffentlichen Ladestellen. Dadurch ergibt sich unter Einbeziehung der LNF ein niedrigerer Wert pro Fahrzeug. Bei getrennter Betrachtung der PKW und LNF ergibt sich jeweils der gleiche Betrag für 2030 bzw. 100 % BEV-Bestand.

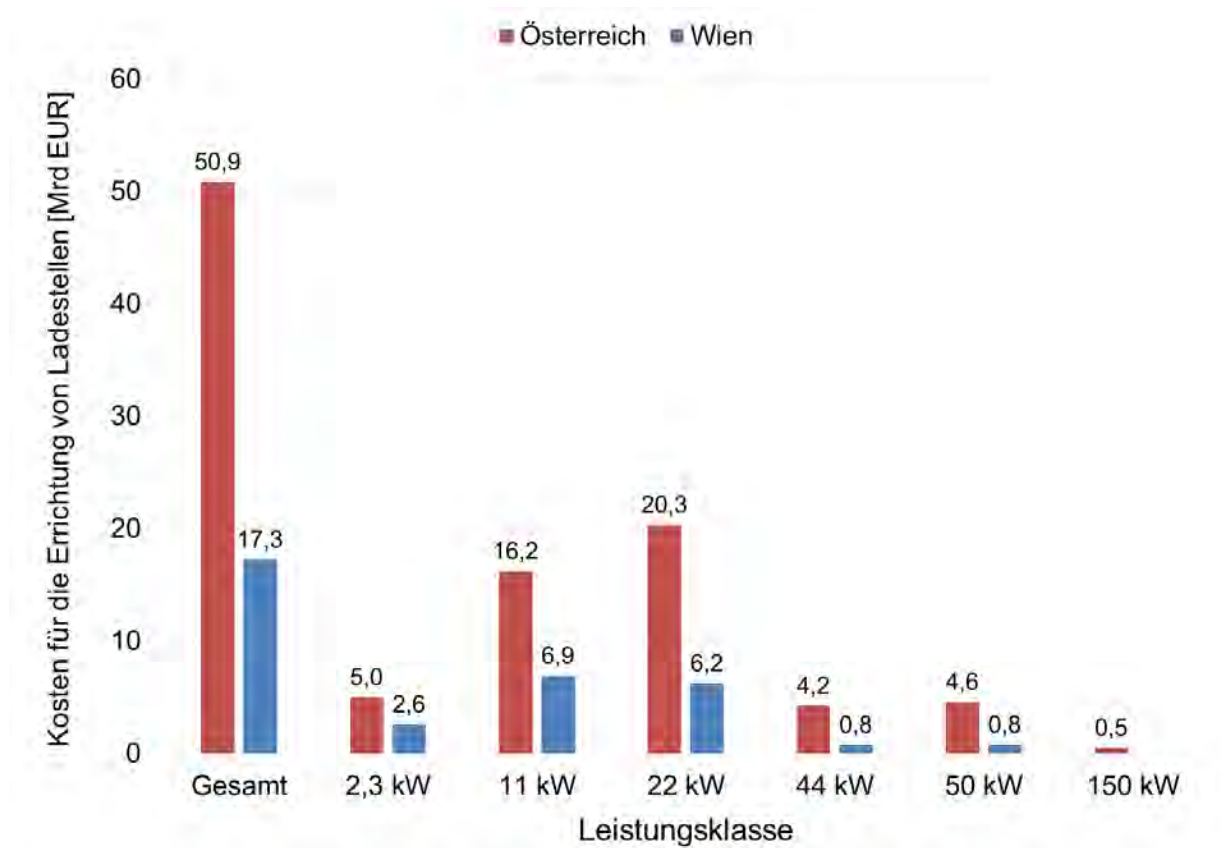


Abbildung 51 – Kumulierte Kosten für die Errichtung von Ladestationen nach Ladeleistung für Wien und Österreich bei 100 % BEV-Bestand (exkl. Netzmaßnahmen)

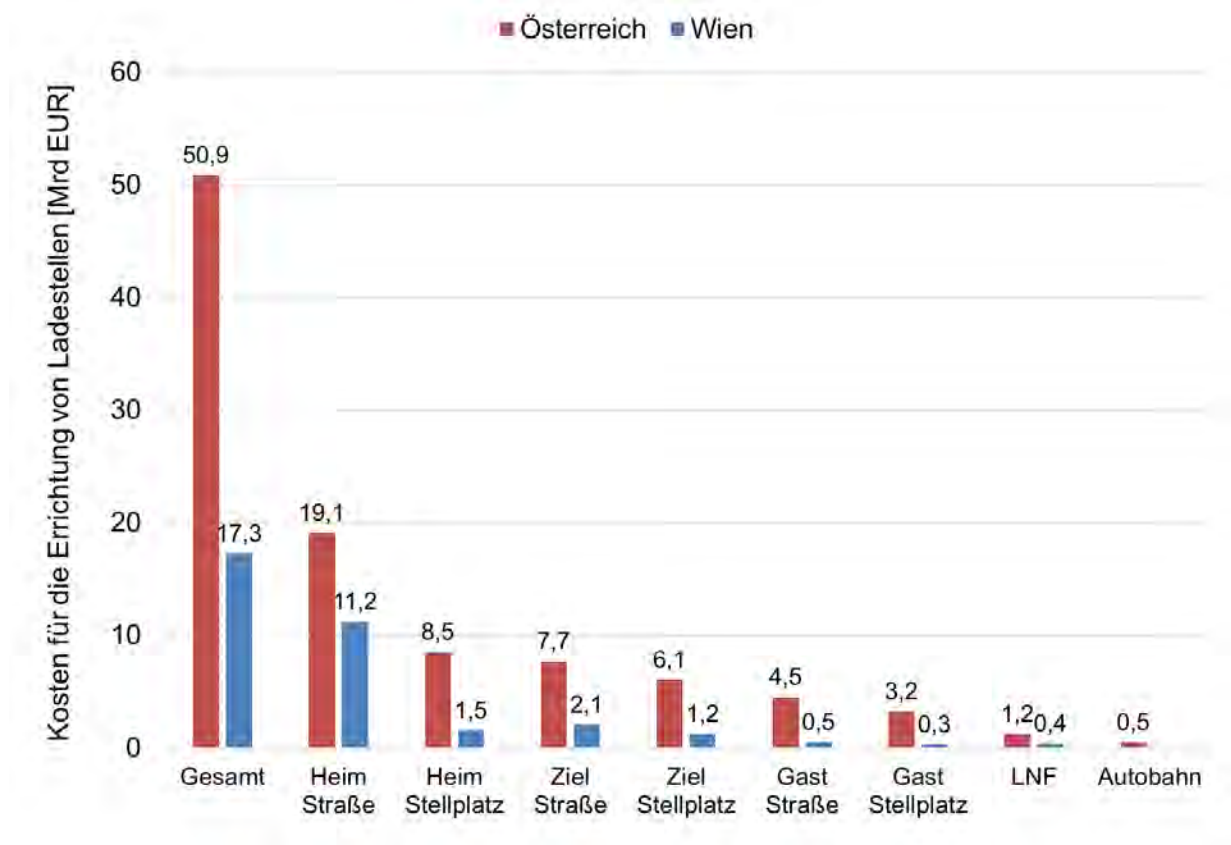


Abbildung 52 – Kumulierte Kosten für die Errichtung von Ladestationen nach Ladeort für Wien und Österreich bei 100 % BEV-Bestand (exkl. Netzmaßnahmen)

13 Sensitivitätsanalyse

In den bisherigen Kapiteln hat sich gezeigt, dass es einige Parameter gibt, die einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis haben. Des Weiteren werden einige Annahmen getroffen, welche grundsätzlich mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind. In diesem Kapitel sollen die wichtigsten Einflussgrößen und Annahmen einer Variation unterzogen und deren Einfluss auf die Ergebnisse bis 2030 gezeigt werden.

13.1 Segment-Shift und BEV-Fahrzeugentwicklung

In dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass sich der BEV-Verbrauch über die Jahre nicht ändert, was vor allem aus Gründen der Rechenleistung angenommen wurde. Da gerade beim BEV zu erwarten ist, dass in den kommenden Jahren zahlreiche Entwicklungen stattfinden werden, soll der Einfluss dieser Entwicklungen untersucht werden.

Hierbei werden drei Aspekte näher beleuchtet:

- Änderung der Fahrzeugsegmentverteilung von BEV (Segment-Shift)
- Steigende Kapazität und Energiedichte von Batterien
- Verbesserungen am Gesamtfahrzeug

13.1.1 Segment-Shift

Derzeit ist der größte Teil an BEV im kleineren Fahrzeugsegment angesiedelt, was geringere Verbrauchswerte zur Folge hat. Für höhere Neuzulassungszahlen ist davon auszugehen, dass sich die Segmentaufteilung der BEV an die der konventionellen Fahrzeuge angleichen wird. Durch diesen Segment-Shift ist eine Änderung des Aufbaugewichts zu erwarten, was sich auf den Energieverbrauch auswirkt.

In Abbildung 53 sind die Anteile der PKW-Neuzulassungen nach Fahrzeugsegmenten für konventionelle Fahrzeuge und BEV im Jahr 2017 nach [58] gezeigt. Zusätzlich ist das durchschnittliche Fahrzeuggewicht nach Segment (2016) gemäß [59] eingetragen. Die erwartete Segmentaufteilung für BEV im Jahr 2030 ist ebenfalls in Abbildung 53 zu sehen. Hierbei wird angenommen, dass es von dem überproportionalen Anteil an Kleinwagen zu einer Verschiebung in Richtung der Minis und Kompaktklasse sowie zu größeren Segmenten (Vans, SUV, etc.) kommt. Des Weiteren wird erwartet, dass sich der hohe Anteil an BEV-Oberklasse-Fahrzeugen, zurückzuführen auf den hohen Anteil

an Tesla Model S, durch die Ausrichtung auf ein breiteres Kundenspektrum (wegen höherer BEV-Neuzulassungen) in Richtung der oberen Mittelklasse und Mittelklasse verlagert.

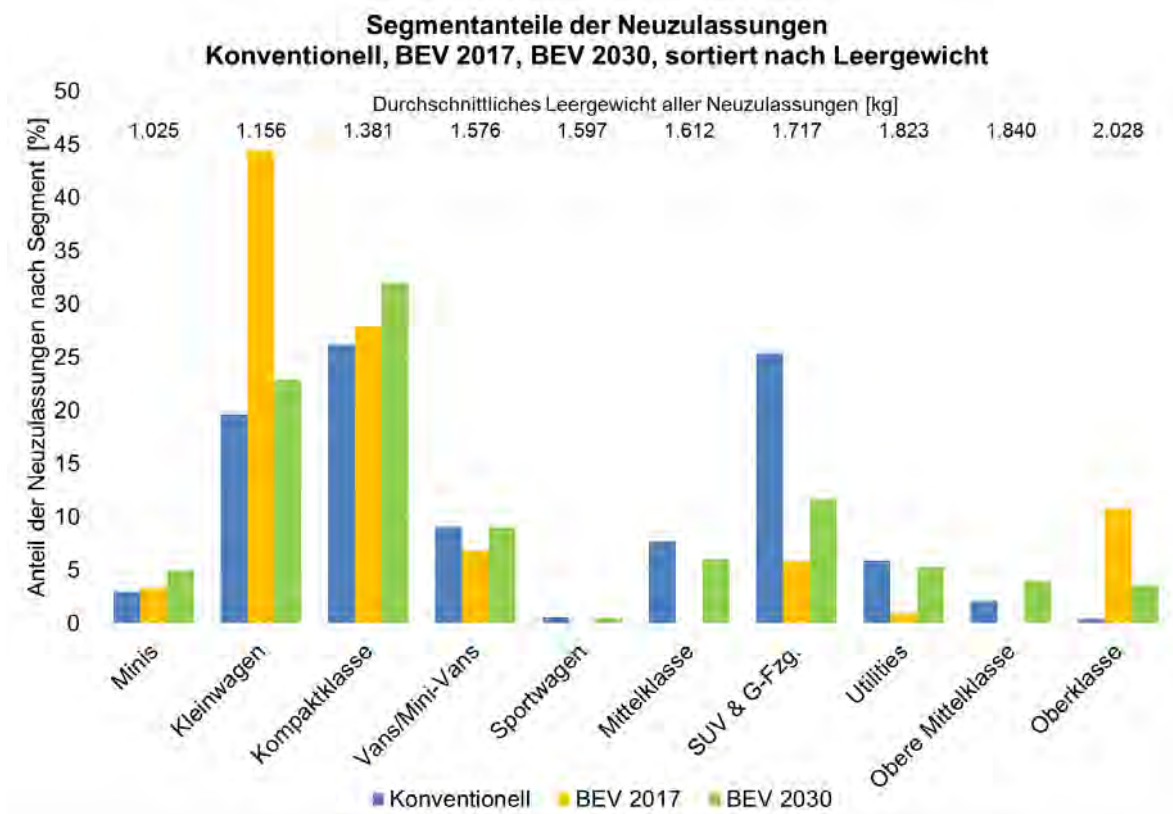


Abbildung 53 – Anteile der PKW-Neuzulassungen nach Segmenten für konventionelle Antriebe und BEV 2017 nach [58] und Entwicklung bis 2030, durchschnittliches Leergewicht (2016) der Segmente nach [59]

Die Änderung des Aufbaugewichts von BEV durch den Segment-Shift wird mit Hilfe eines Vergleichs der derzeitigen Leergewichte bei den konventionellen Fahrzeugsegmenten durchgeführt. In Abbildung 53 sind die Leergewichte der konventionellen Fahrzeuge und die Segmente für konventionelle und BEV 2017 bzw. BEV 2030 gezeigt. Berechnet man mit diesen Gewichten eine durchschnittliche Masse für die Segmentaufteilungen BEV 2017 und BEV 2030, so kann der Gewichtsunterschied zwischen diesen beiden Aufteilungen gezeigt werden. Dieser stellt direkt die Gewichtsänderung des Fahrzeugaufbaus durch den Segment-Shift dar.

Der detaillierte Verlauf der angenommenen BEV-Segmententwicklung von 2017 bis 2030 und die dadurch entstehende Gewichtsänderung sind in Abbildung 54 zu finden. Es ist zu erkennen, dass es durch die Änderung der Fahrzeugsegmente zu einem

Anstieg des Aufbaugewichts kommt, wobei hier noch keine Änderungen der Batterie berücksichtigt sind. Durch die Änderung des Fahrzeugsegments wird zusätzlich eine Änderung der Batteriegröße erwartet, was in Kapitel 13.1.2 berücksichtigt wird.

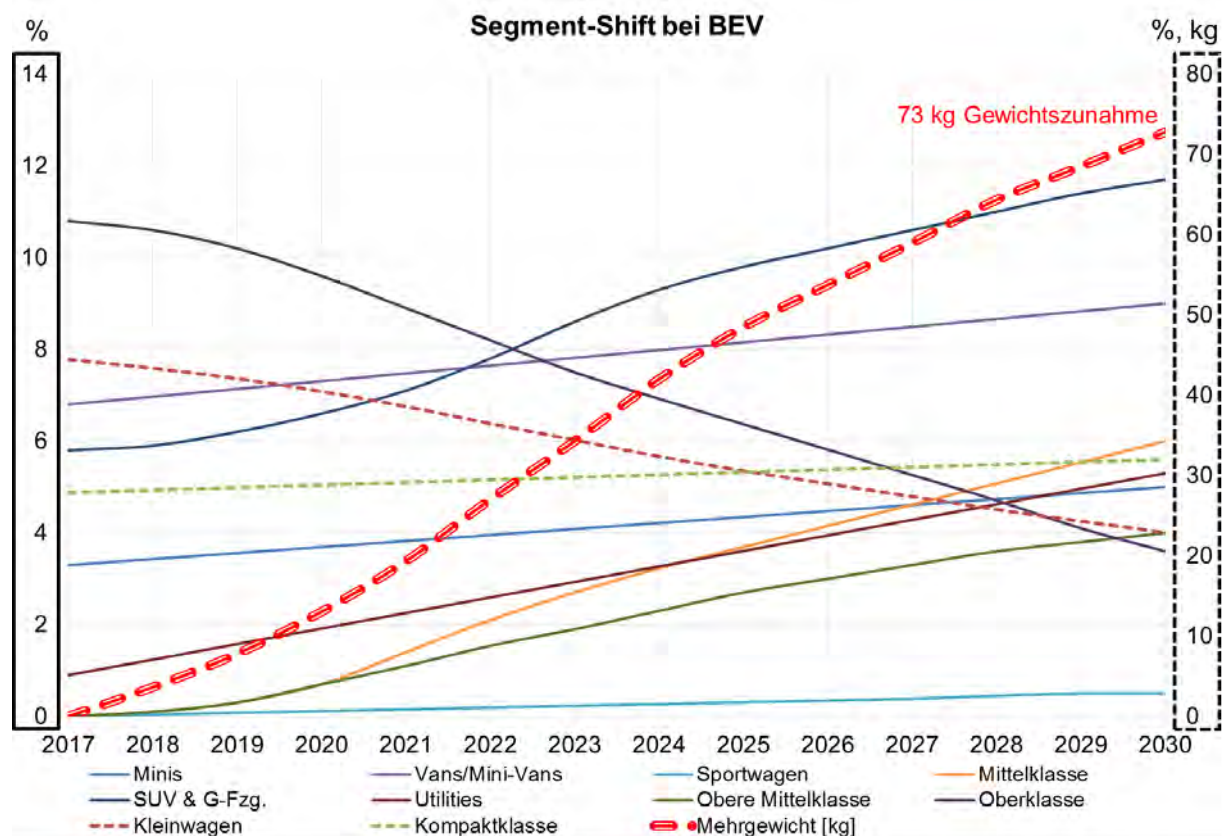


Abbildung 54 – Segment-Shift der BEV-Neuzulassungen (PKW) von 2017 bis 2030

13.1.2 Steigende Kapazität und Energiedichte von Batterien

Die Reichweite und Batteriekapazität der am Markt erhältlichen Fahrzeuge steigt derzeit kontinuierlich an. Es wird erwartet, dass sich die Batteriekapazität durch Entwicklungen bei den Kosten und der Energiedichte sowie durch den Segment-Shift (mehr Bauraum im Fahrzeug) in den nächsten Jahren weiter steigern wird.

Die angenommene Steigerung der Batteriekapazität der neu zugelassenen BEV ist in Abbildung 55 dargestellt. Hierbei liegt die Annahme einer starken Erhöhung der Batteriekapazität zu Grunde, was sich auch an zahlreichen Modellen feststellen lässt, die für die kommenden Jahre angekündigt bzw. kürzlich erschienenen sind (siehe auch [60], [61], [62], [63], [64]). Nach dem ersten starken Anstieg wird aufgrund sinkender Batteriekosten (nach [65]) ein weiteres Wachstum der Batteriekapazität erwartet,

jedoch mit zunehmenden Jahren geringer, da der Bedarf an größerer Reichweite sinkt. Der Ausgangswert von 30 kWh im Jahr 2017 ist an die typischen Batteriegrößen von BEV in diesem Jahr angelehnt (siehe [10]). Der Endwert ergibt sich aus der erwarteten Reichweite (nach [8]) von 500 km bis 2030 und dem berechneten durchschnittlichen Verbrauch von 25,6 kWh/100km (für ein Fahrzeug im mittleren Segment über ein Jahr inkl. Einfluss der Umgebungstemperatur, siehe Kapitel 8.7).

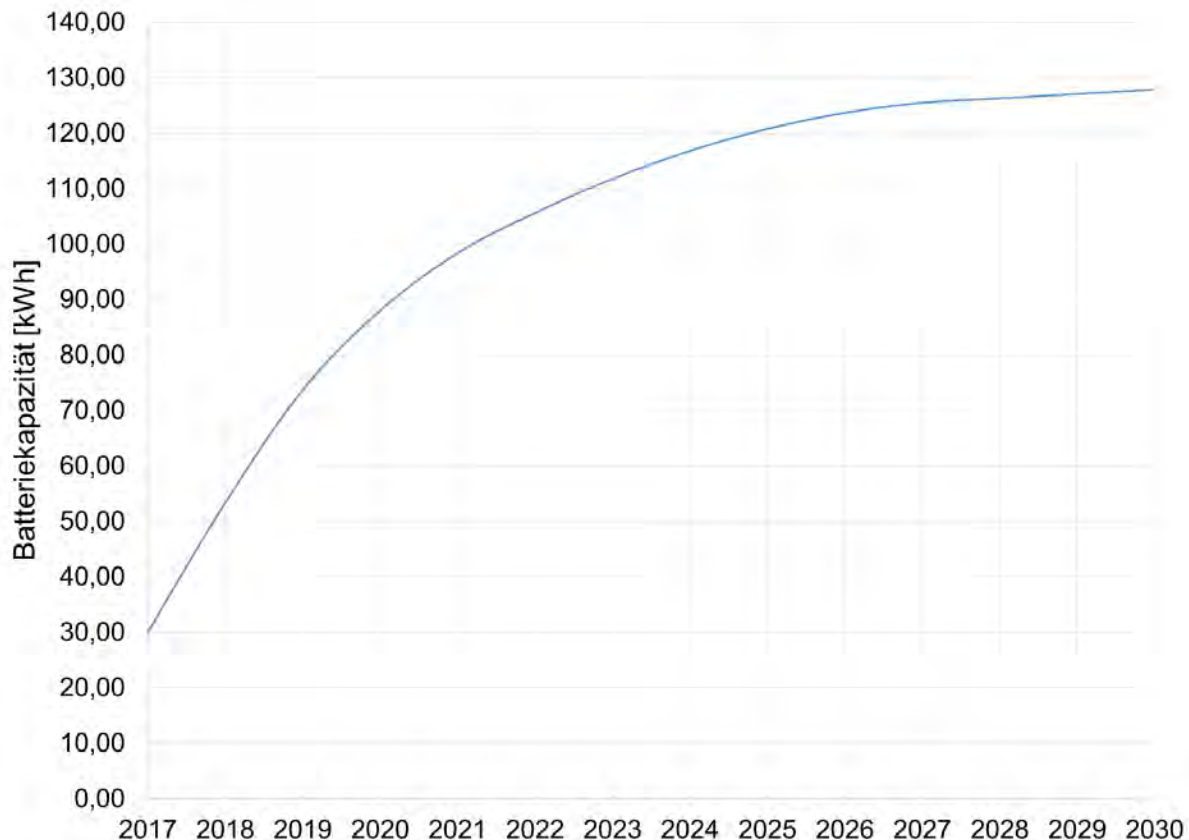


Abbildung 55 – Verlauf der Batteriekapazität von BEV PKW bis 2030

Ein gegenläufiger Effekt zum Mehrgewicht durch die erhöhte Batteriekapazität ist die Steigerung der gravimetrischen Energiedichte. In [65] wird die zukünftige gravimetrische Energiedichte auf Zellebene in Abhängigkeit der Zelltechnologie mit 300 Wh/kg (Li-Ion, 2020 - 2025), 400 Wh/kg (Solid State, 2025 - 2030) bzw. 500 Wh/kg (Lithium-Schwefel, 2030+) abgeschätzt. Nach [66] liegt die gravimetrische Dichte derzeit für Batterien mit 30 kWh auf Packebene im Bereich von 90 bis 130 Wh/kg.

In dieser Arbeit wird daher die Energiedichte (Pack) für das Jahr 2017 mit dem Mittelwert von 110 Wh/kg gewählt. Aufgrund zukünftiger Verbesserungen auf Zell- und Packebene wird davon ausgegangen, dass ein Wert von 320 Wh/kg auf Packebene

im Jahr 2030 erzielt werden kann. Der erwartete Verlauf der Energiedichte auf Packebene bis 2030 ist in [Abbildung 56](#) dargestellt. Dieser beginnt, wegen den derzeit starken Batterieentwicklungen, mit einer erhöhten Steigung, welche sich anschließend aufgrund der erwarteten Grenze der Li-Ionen Technologie reduziert. Die danach erwarteten Technologiesprünge können aus heutiger Sicht nur schwer abgeschätzt werden. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass neue Zelltechnologien zum Zeitpunkt der Serienreife nicht sofort (wegen Umstellung der Produktion, etc.) in allen neuzugelassenen Fahrzeugen zum Einsatz kommen. Aufgrund dessen wird nach dem ersten starken Anstieg ein linearer Verlauf ohne Sprünge angesetzt (in Anlehnung an [65], 2020 - 2030, ohne Sprünge).

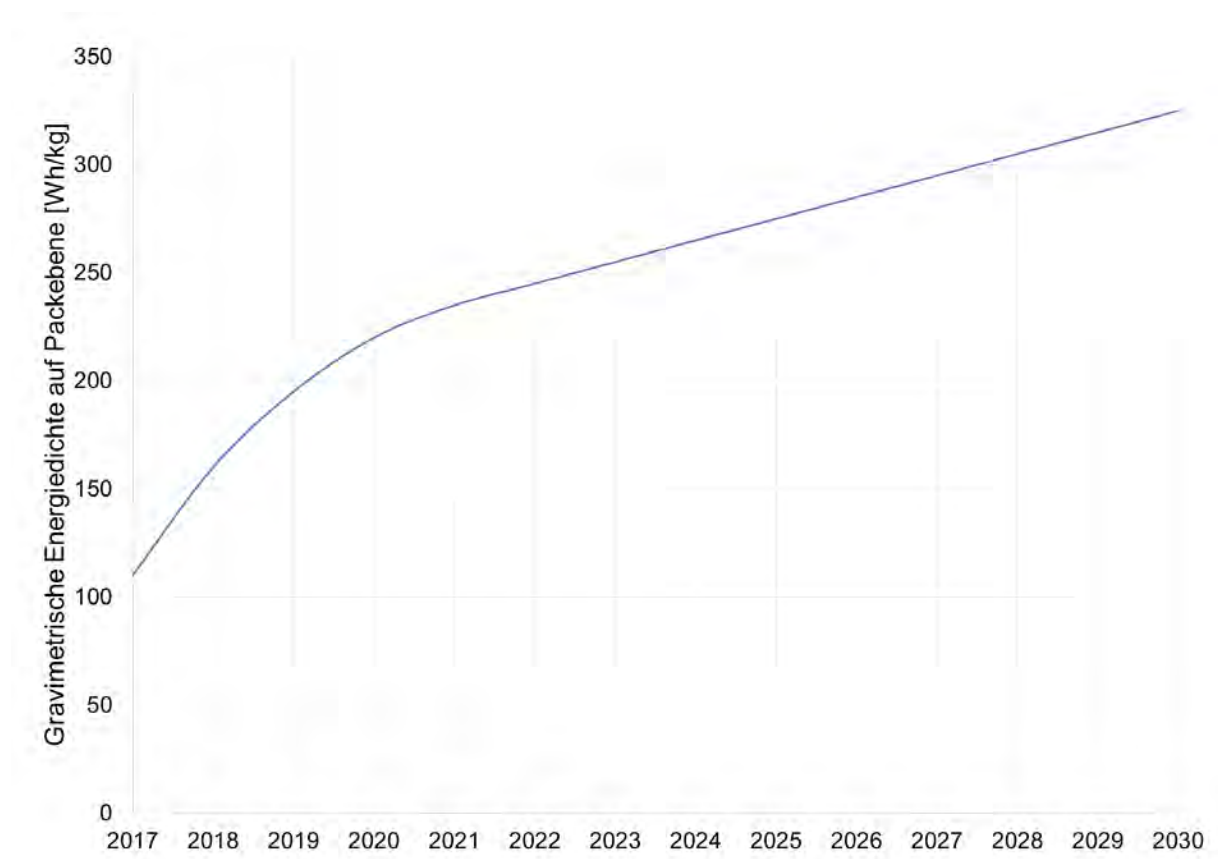


Abbildung 56 – Verlauf der gravimetrischen Energiedichte auf Packebene bis 2030

Unter Verwendung der Verläufe aus [Abbildung 55](#) und [Abbildung 56](#) ergibt sich das Batteriegewicht eines typischen BEV von 2017 bis 2030, welches in [Abbildung 57](#) aufgetragen ist.

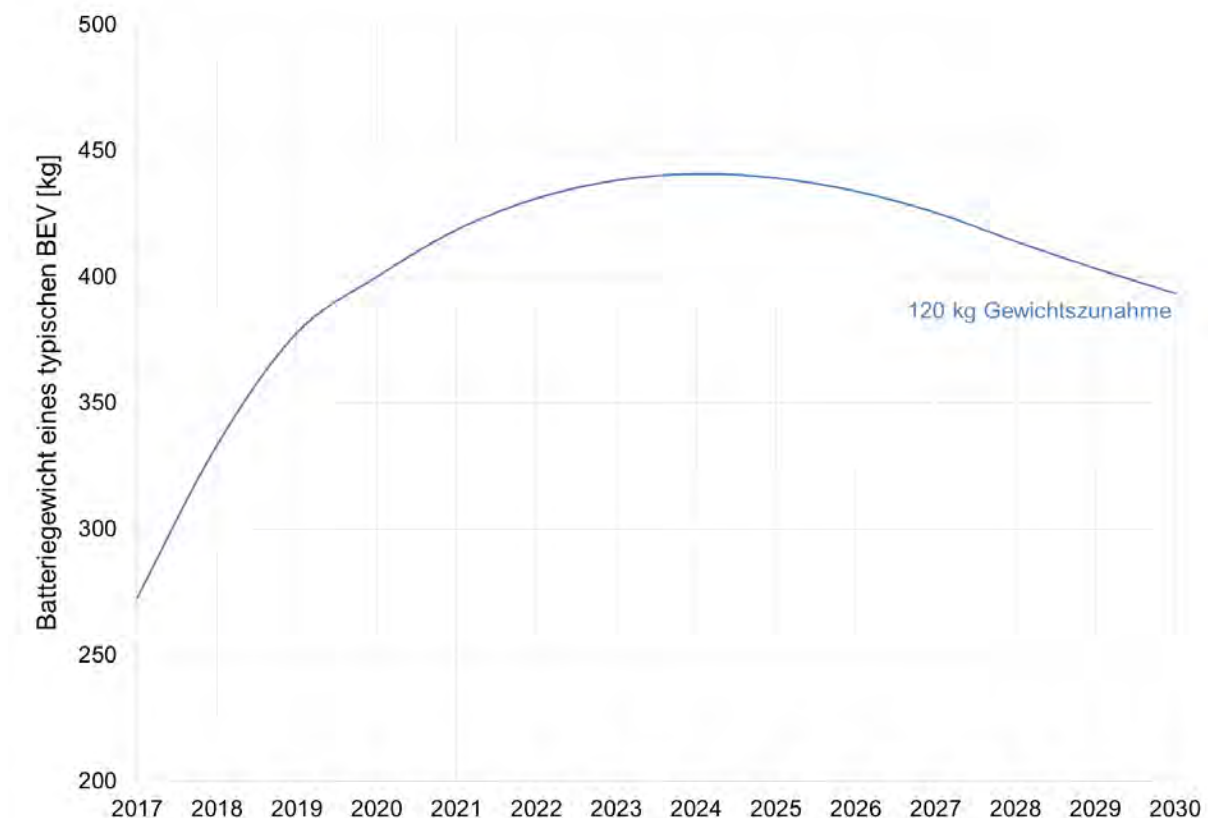


Abbildung 57 – Batteriegewicht eines typischen BEV PKW

13.1.3 Verbesserungen am Gesamtfahrzeug

Neben den Aspekten des Segment-Shifts und der Kapazitätssteigerung werden durch erwartete Weiterentwicklungen des batterieelektrischen Fahrzeuges Verbesserungen im Verbrauch erwartet. Es wird angenommen, dass sich durch Entwicklungen des Gesamtfahrzeuges eine deutliche Effizienzsteigerung erzielen lässt, welche in [8] mit 10 % bis 2030 abgeschätzt wird. Es wird daher der Einfachheit halber eine konstante jährliche Verbesserungsrate von 0,7 % angesetzt, was bis 2030 ca. 10 % entspricht.

13.1.4 Berechnung der Verbrauchsentwicklung

Die gezeigten Annahmen bezüglich Segment-Shift, Zunahme des Batteriegewichts und Verbesserung des Gesamtfahrzeuges führen zur Verbrauchsentwicklung über die nächsten Jahre.

Die Ermittlung der Verbrauchsänderung durch die zu erwartende Gewichtszunahme wurde mit Hilfe einer Fahrzeuglängsdynamik-Simulation in GT-Suite durchgeführt.

Zunächst wurde ein durchschnittliches BEV (Basisfahrzeug 2017) nachgebildet, das dieselben Verbräuche in den einzelnen Fahrzyklen aufweist wie die vermessenen Fahrzeuge in [10]. Dazu mussten zunächst die Fahrwiderstände ermittelt werden. In Abbildung 58 ist das Modellschema zur Berechnung der Fahrwiderstände und des Verbrauchs dargestellt. Die sich in der Simulation einstellenden Fahrwiderstandsdaten sind rein fiktiv und hängen nur über den Durchschnittsverbrauch mit den vermessenen Fahrzeugen zusammen. Die wichtigsten Fahrwiderstandsdaten des Basisfahrzeuges 2017, die sich aus der Nachbildung ergeben haben, sind:

- Fahrzeuggesamtgewicht (inkl. Fahrer): 1.580 kg
- Aufbaugewicht: 1.232 kg
- Luftwiderstandsbeiwert: 0,3
- Projizierte angeströmte Fläche: 2,2 m²
- Rollwiderstandsbeiwert: 0,012

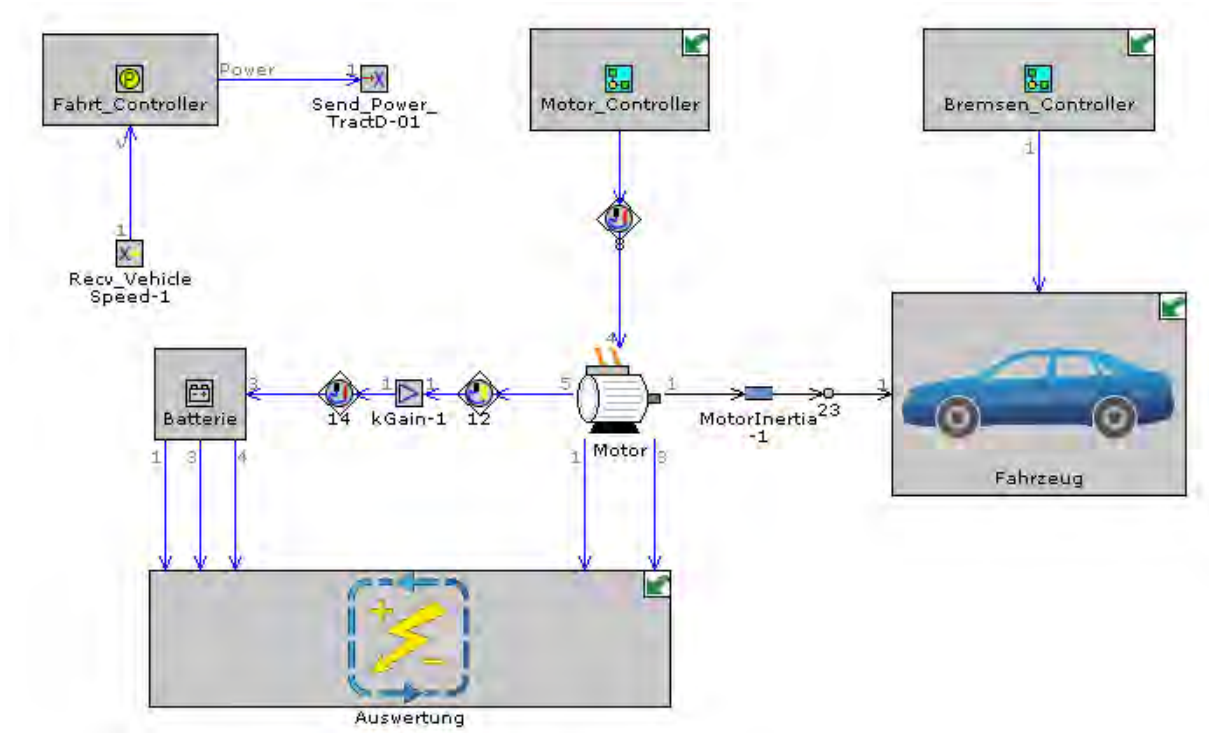


Abbildung 58 – Fahrzeuglängsdynamik-Simulationsmodell (Schema) in GT-Suite

Auf Basis der ermittelten Fahrwiderstände kann nun die Simulation der Gewichtszunahme durchgeführt werden. Das Fahrzeug bleibt in allen Daten gleich außer im Gesamtgewicht, dieses wird entsprechend der zuvor gezeigten Verläufe jährlich angepasst und beträgt 1.773 kg im Jahr 2030. In der Simulation soll lediglich der

Einfluss durch das Mehrgewicht der beiden angesprochenen Effekte (erhöhte Batteriegröße und Segment-Shift) gezeigt werden. Verbesserungen durch Gewichtsreduktion (z. B. Leichtbau), verringerten Luft- und Rollwiderstand sowie Antriebsverbesserungen werden in den erwähnten Gesamtfahrzeugverbesserungen (ca. 10 % bis 2030) zusammengefasst.

13.1.5 Ergebnis der Verbrauchsentwicklung

In Abbildung 59 ist das Ergebnis der Simulation sowie das Gesamtergebnis (inkl. Gesamtfahrzeugverbesserungen) gemeinsam mit den wichtigsten Eingangsgrößen eingetragen. Es ist zu erkennen, dass es durch das Mehrgewicht zu einem Mehrverbrauch der Neuzulassungen (rot strichlierte Linie) kommt, der durch weitere Verbesserungen am Gesamtfahrzeug anfangs nicht ganz kompensiert wird. Später überwiegt der Effekt durch die Verbesserungsmaßnahmen.

Wird die Entwicklung des Bestands (mit PROVEM [4]) berücksichtigt, so ergibt sich die schwarz strichlierte Linie. Es ist zu erkennen, dass die Verbrauchsänderungen bei den Neuzulassungen zu deutlich abgeschwächten Änderungen beim Bestand führen.

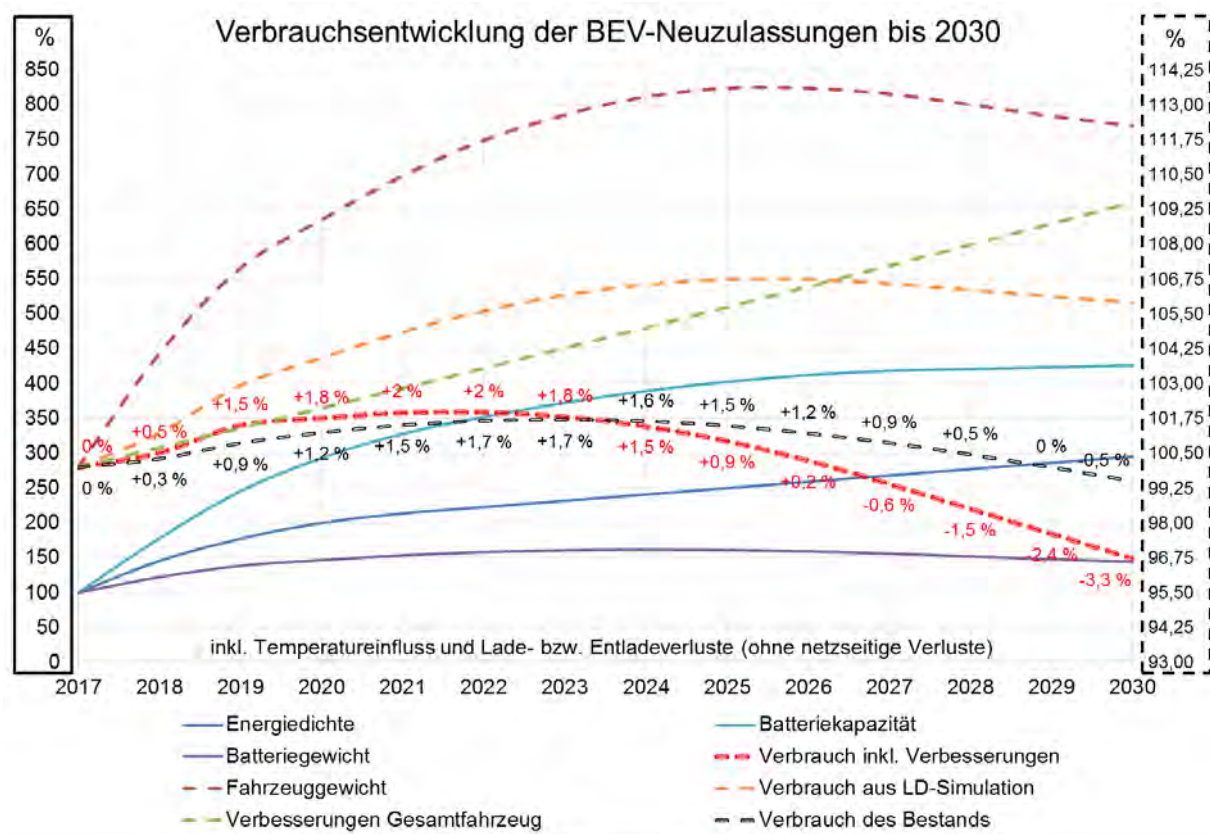


Abbildung 59 – Verbrauchsentwicklung von BEV PKW bis 2030

Durch den Segment-Shift und die erwarteten Fahrzeugentwicklungen beim BEV ergibt sich für den BEV-Bestand eine Verbrauchsänderung von maximal +1,7 % bzw. -0,5 %. Der Verbrauch beeinflusst die Ladedauer und daher die Gleichzeitigkeit, von der die benötigte Anzahl an Ladestellen und daher die Kosten abhängig sind. Bei einer Änderung des Verbrauchs um +1,7/-0,5 % im Jahr 2030 ändern sich die Gesamtkosten im Jahr 2030 um +0,27/-0,06 % bzw. +16/-3,7 Mio. €. In Kapitel 13.2 wird der Einfluss höherer Verbrauchsänderungen in einer Sensitivitätsanalyse gezeigt.

13.2 Variation des BEV-Verbrauchs

Neben den in Kapitel 13.1 gezeigten Verbrauchsentwicklungen der BEV-Flotte können sich durch andere Aspekte, wie beispielsweise andere Temperaturen im Jahr, Verbrauchsunterschiede ergeben. Die Auswirkungen eines geänderten Verbrauchs sollen in diesem Kapitel gezeigt werden.

Dabei werden zwei Fälle betrachtet:

- Erhöhung des Verbrauchs um 10 %
- Reduktion des Verbrauchs um 10 %

Die Auswirkungen auf folgende Parameter werden untersucht:

- Maximale Leistung eines Jahres
- Benötigte Anzahl an Ziel- und Gast-Ladestellen
- Kosten zur Errichtung von Ziel- und Gast-Ladestellen
- Kosten zur Errichtung aller Ladestellen

In Abbildung 60 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zu sehen. Es ist zu erkennen, dass eine Änderung des Verbrauchs zu einer im Allgemeinen geringeren Änderung der untersuchten Parameter führt. Der Verbrauch wirkt sich lediglich auf die berechnete Ladedauer aus und somit ergibt sich gegebenenfalls eine höhere bzw. niedrigere Überschneidung von Ladungen unterschiedlicher Fahrzeuge. Dadurch kommt es nur indirekt zu einer Änderung der Gleichzeitigkeit und der Maximalleistung und somit der Kosten.

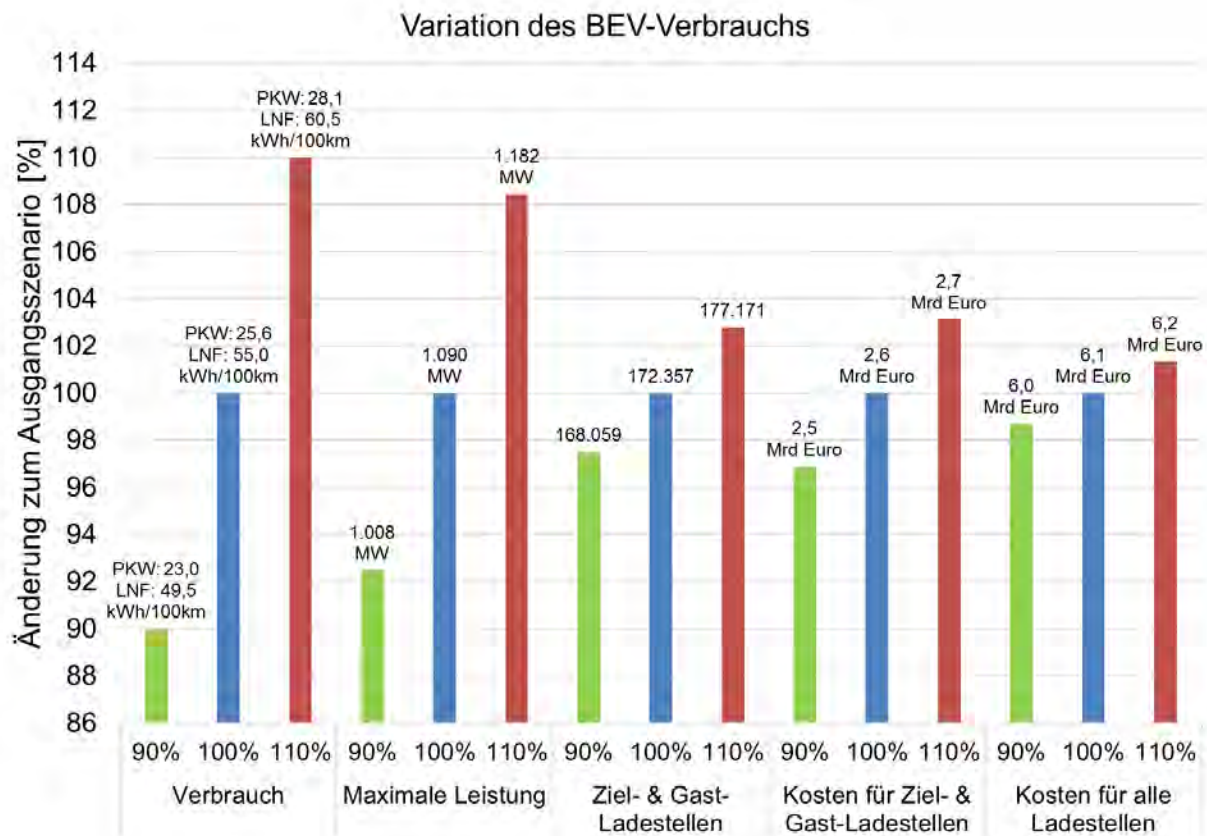


Abbildung 60 – Sensitivitätsanalyse unter Variation des BEV-Verbrauchs (2030)

13.3 Variation der verwendeten Ladeleistung

Die verwendete Ladeleistung (Nutzungsverteilung nach Kapitel 8.1.1) hat einerseits einen direkten Einfluss auf den Leistungsbedarf, andererseits ergibt sich durch die benötigte Ladedauer eine Überschneidung mehrerer Ladevorgänge (Gleichzeitigkeit) und somit ein indirekter Einfluss auf die benötigte Leistung. Aus diesem Grund sollen die Auswirkungen unterschiedlicher Nutzungsverteilungen der Ladeleistungen untersucht werden. Die Referenz bildet dabei der unveränderte Verlauf nach Abbildung 19, Kapitel 8.1.1.

Folgende Varianten werden betrachtet (siehe auch Abbildung 61):

- Variante 1: - 25 % mittlere Ladeleistung bezogen auf die Referenz
- Variante 2: Gleiche mittlere Ladeleistung wie Referenz, andere Verteilung
- Variante 3: + 25 % mittlere Ladeleistung bezogen auf die Referenz
- Variante 4: + 50 % mittlere Ladeleistung bezogen auf die Referenz

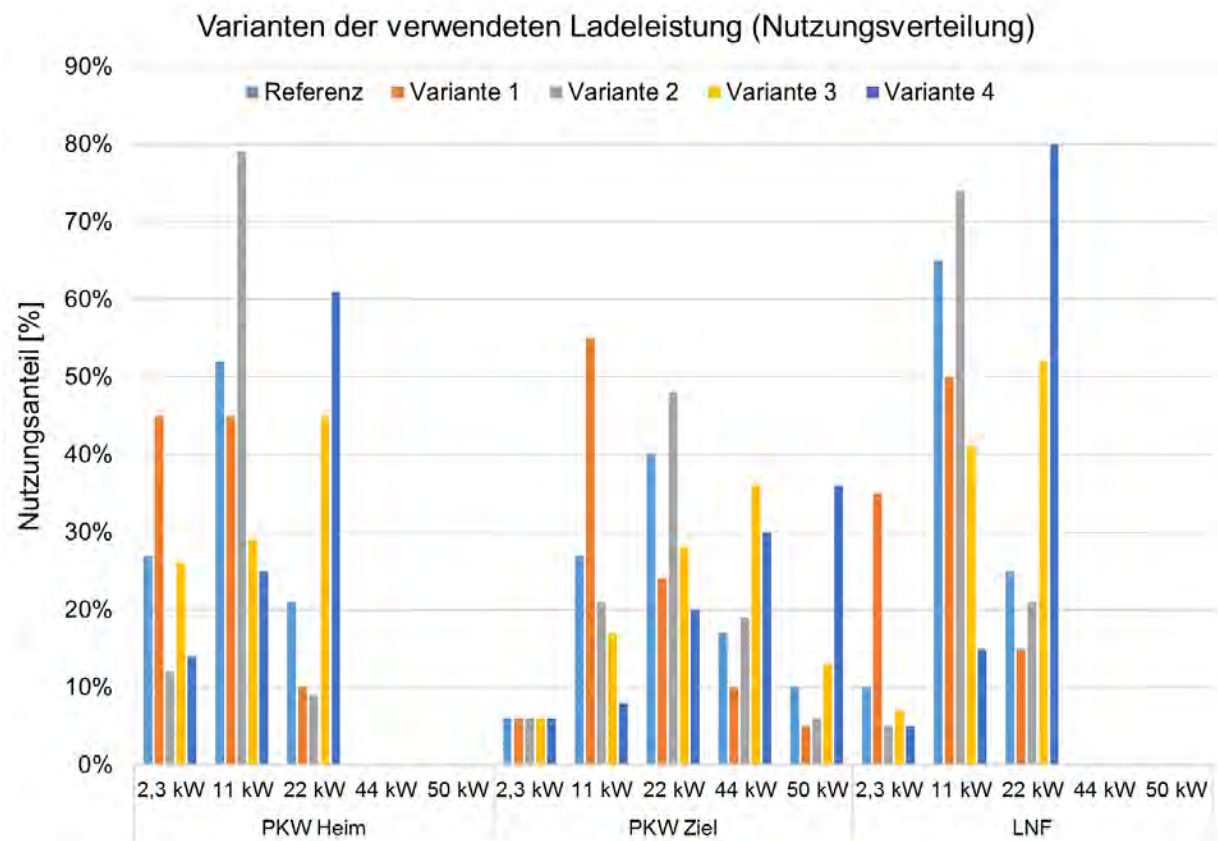


Abbildung 61 – Varianten der verwendeten Ladeleistung in der Sensitivitätsanalyse

Die Auswirkungen auf folgende Parameter werden untersucht:

- Maximale Leistung eines Jahres
- Benötigte Anzahl an Ziel- und Gast-Ladestellen
- Kosten zur Errichtung von Ziel- und Gast-Ladestellen
- Kosten zur Errichtung aller Ladestellen

In Abbildung 62 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zu sehen. Es ist zu erkennen, dass eine Änderung der Ladeleistungsnutzung einen großen Einfluss auf die Spitzenleistung und die Kosten hat. Bei gleicher durchschnittlicher Ladeleistung kann durch die Wahl einer anderen Nutzungsverteilung (Variante 2) bereits ein Kostenunterschied entstehen. Dies ist auf die hohen Kosten für Ladestellen mit höheren Ladeleistungen im privaten sowie öffentlichen Bereich zurückzuführen. Mit steigender durchschnittlicher Ladeleistung sinkt die Anzahl der benötigten öffentlichen Ladestellen (Ziel- & Gast-Ladestellen) ab, was auf die niedrigere Gleichzeitigkeit (einzelne Ladungen schneller abgeschlossen) zurückzuführen ist. Durch die höhere Ladeleistung steigen jedoch die Kosten trotz des niedrigeren Ladestellenbedarfs an.

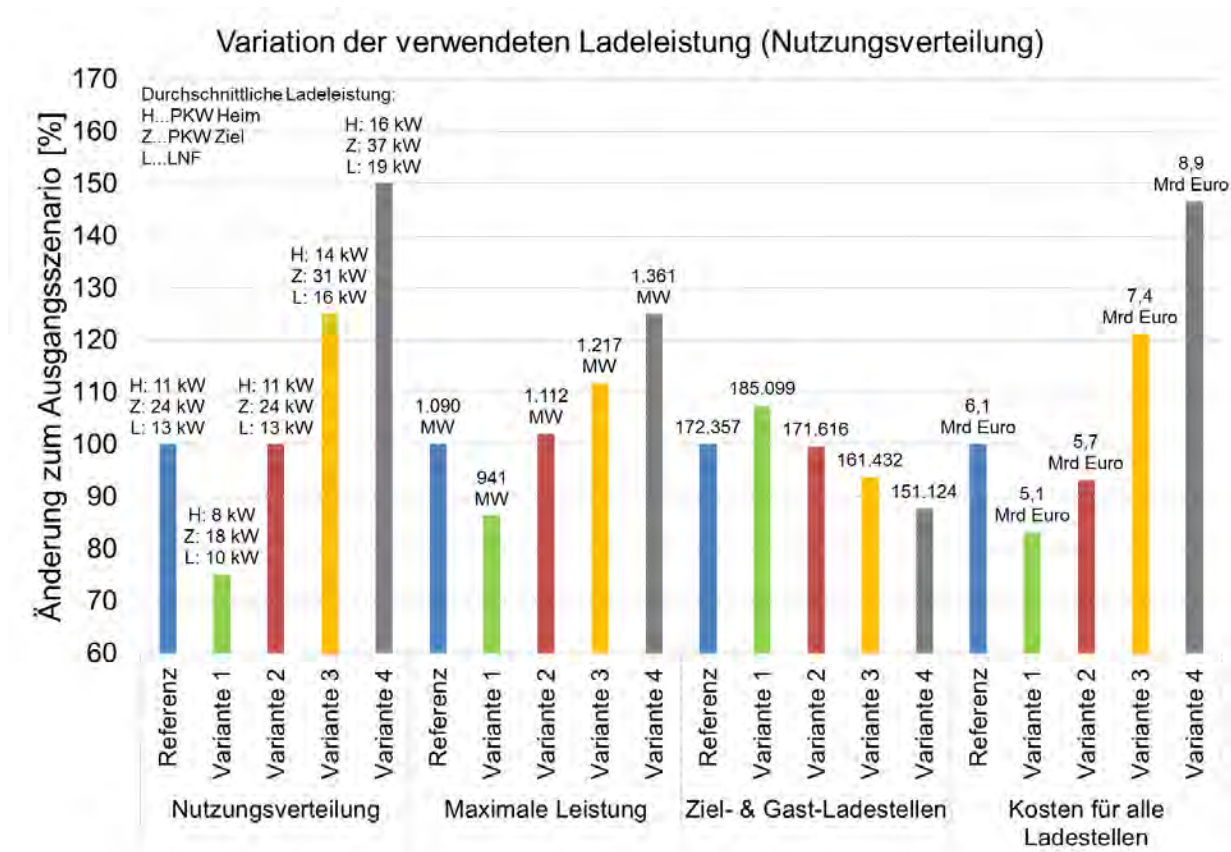


Abbildung 62 – Sensitivitätsanalyse unter Variation der verwendeten Ladeleistung

13.4 Reduzierter Heimladungsanteil

Der Heimladungsanteil hat einen wesentlichen Einfluss auf den Leistungsgang, die Gleichzeitigkeit und damit auf die Kosten. Grund dafür ist, dass bei Heimladung grundsätzlich eine niedrigere Ladeleistung genutzt wird als bei Ladungen am Zielort, weswegen sich die Ladestellennutzung bei geändertem Heimladungsanteil stark ändern kann. Mit 75 % wurde in dieser Arbeit ein hoher Heimladungsanteil angenommen. Es soll daher nachfolgend gezeigt werden, welchen Einfluss ein niedrigerer Heimladungsanteil hat. Die zuvor mit 95 % gewählten Heimladungsanteile zum Zweck des „Bringens von Personen“ und „Sonstige“ bleiben dabei unverändert, da hier keine höheren Zielladungsanteile erwartet werden.

Es werden zwei Fälle betrachtet:

- Heimladungsanteil von 50 %
- Heimladungsanteil von 25 %

Die Auswirkungen auf folgende Parameter werden untersucht:

- Maximale Leistung eines Jahres
- Benötigte Anzahl an Ziel- und Gast-Ladestellen
- Kosten zur Errichtung von Ziel- und Gast-Ladestellen
- Kosten zur Errichtung aller Ladestellen

In Abbildung 63 sind die Ergebnisse der Analyse zu sehen. Es ist zu erkennen, dass der Heimladungsanteil kaum einen Einfluss auf die maximale Ladeleistung hat. Der Grund dafür liegt in der Definition des Heimladungsanteils. Dieser beschreibt den Anteil an Fahrten, bei denen am Ziel nicht geladen wird. Die Strecke, die bis zum Ziel zurückgelegt wurde, wird dann erst am Heimstellplatz geladen. Die Strecke vom Zielort zurück zum Heimstellplatz wird (unabhängig vom Heimladungsanteil) zu 100 % am Heimstellplatz geladen. Dadurch kommt es trotz des geringen Heimladungsanteils zu einem beträchtlichen Anteil an gleichzeitig ladenden Fahrzeugen am Heimstellplatz in den Abendstunden, da hier viele Heimfahrten und kaum Zielfahrten stattfinden. Die benötigten Ladestellen am Zielort (Ziel/Gast) steigen durch einen geringen Heimladungsanteil aufgrund der höheren Gleichzeitigkeit an, was die Kosten erhöht.

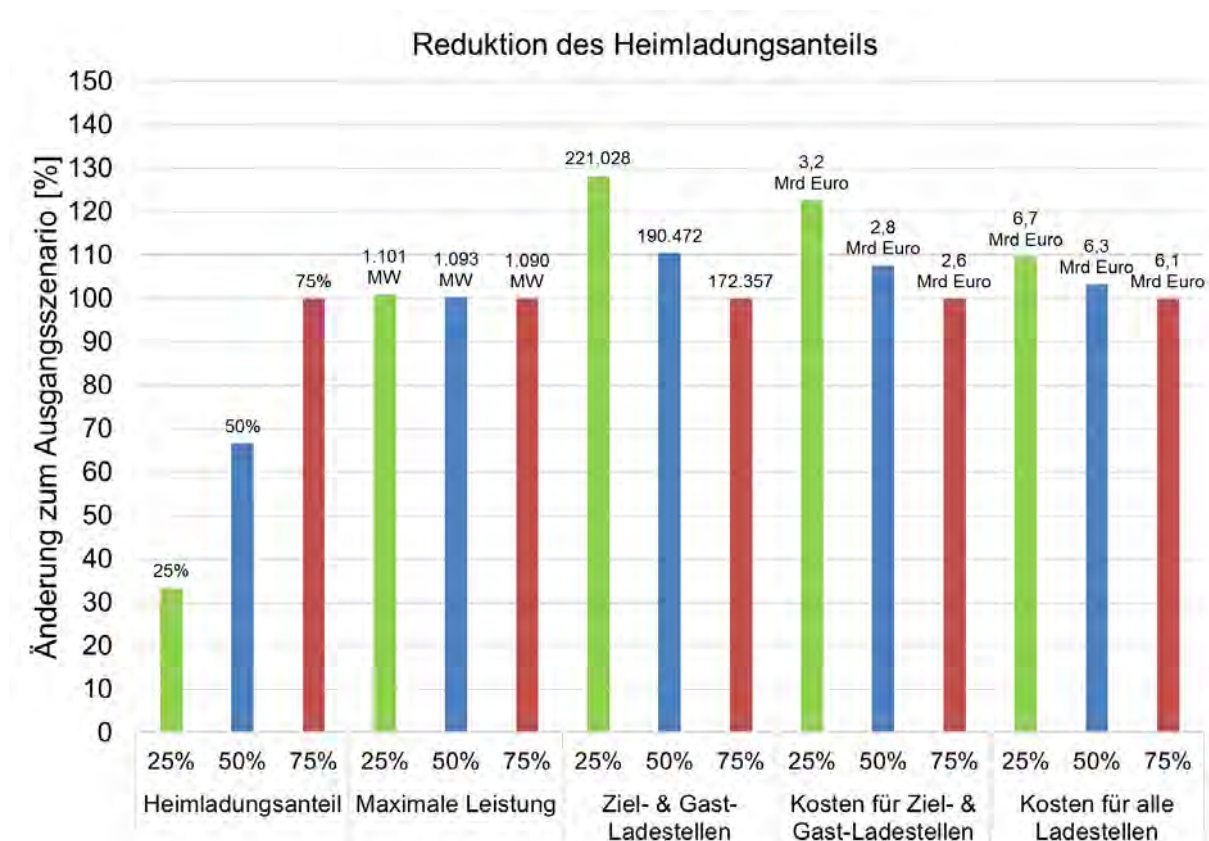


Abbildung 63 – Sensitivitätsanalyse unter Reduktion des Heimladungsanteils (2030)

13.5 Reduzierte Ausstattung des eigenen Stellplatzes mit Ladestellen

In Kapitel 9.1 wird davon ausgegangen, dass an 100 % der eigenen Stellplätze eine Ladestelle montiert wird. Diese Annahme beinhaltet sowohl Stellplätze von Privathaushalten als auch Mehrparteienhäusern, weswegen dieser Prozentsatz in der Praxis kaum erreichbar sein wird. Mangels besserer Daten wird im Ausgangsszenario trotzdem mit diesem Werte gerechnet. In diesem Kapitel soll der Einfluss dieses Prozentsatzes gezeigt werden.

Es werden fünf Fälle betrachtet:

- Ausstattungsfaktor: 90 %
- Ausstattungsfaktor: 80 %
- Ausstattungsfaktor: 70 %
- Ausstattungsfaktor: 60 %
- Ausstattungsfaktor: 50 %

Die Auswirkungen auf folgende Parameter werden untersucht:

- Benötigte Anzahl Heim-Straßenrand-Ladestellen
- Kosten zur Errichtung von Heim-Straßenrand-Ladestellen
- Kosten zur Errichtung aller Ladestellen

In Abbildung 64 sind die Ergebnisse der Analyse zu sehen. Die Anzahl der benötigten Ladestellen am Straßenrand für die Heimpladung steigt mit einer Reduktion des Ausstattungsgrades der eigenen Stellplätze stark an. Dies führt bereits bei geringen Abweichungen von der Vollausrüstung aller eigenen Stellplätze zu einer deutlichen Erhöhung der Kosten. Die dadurch entstehenden Kosten übersteigen die in den anderen Sensitivitätsanalysen betrachteten Einflüsse deutlich. Der Einfluss durch die Auslastung der öffentlichen Ladestellen, welcher in Kapitel 13.7 untersucht wird, verstärkt den gezeigten Effekt bei den Kosten zusätzlich. Zur Minimierung der Gesamtkosten ist daher eine vollständige Ausstattung aller eigenen Stellplätze mit Ladestellen zielführend.

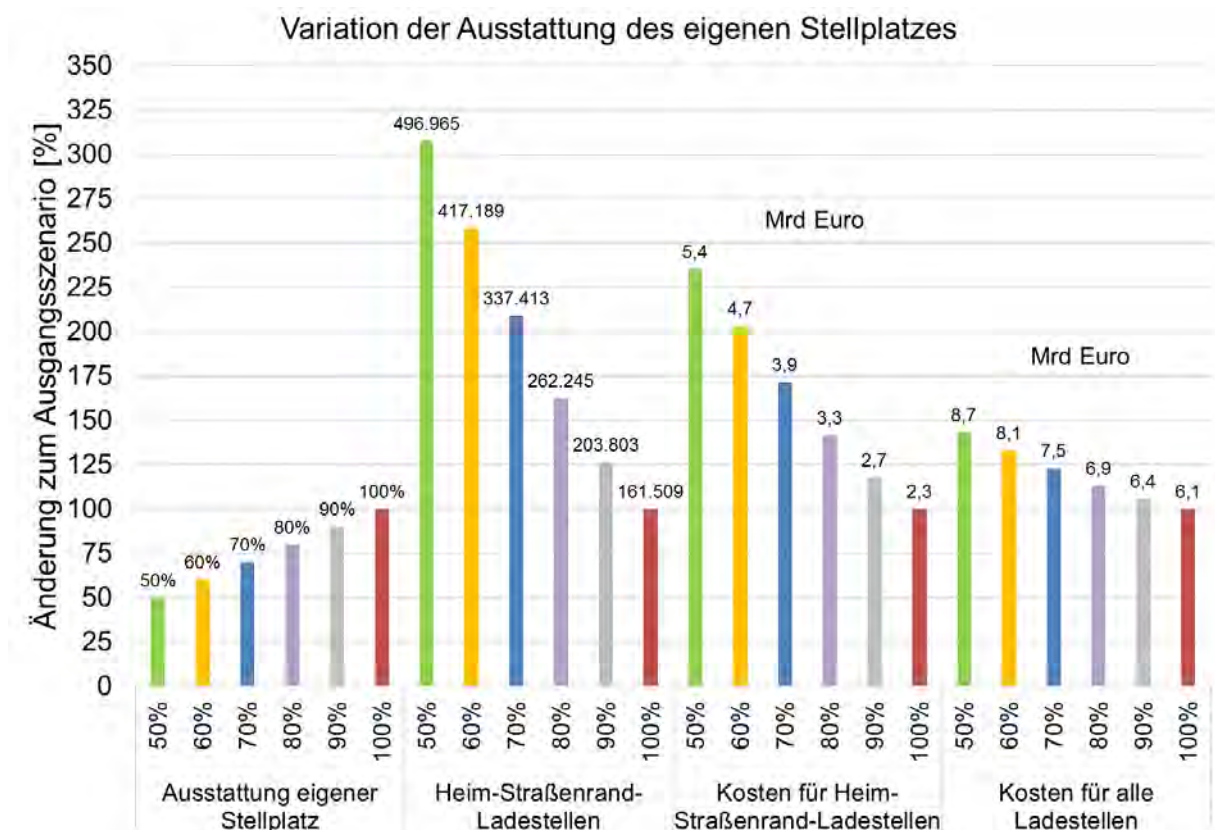


Abbildung 64 – Sensitivitätsanalyse unter Variation der Ausstattung des eigenen Stellplatzes mit einer Ladestelle (2030)

13.6 Verhältnis von Straßenrand- zu Stellplatz-Ladung bei Zielfahrten

Bei der Aufteilung der Zielladungen auf Ladestationen am Straßenrand und an eigenen, öffentlich zugänglichen Stellplätzen/Garagen wird in dieser Arbeit eine gleiche Aufteilung von jeweils 50 % verwendet. Da es sich hierbei um eine Annahme handelt, sollen die Auswirkungen von anderen Verteilungen gezeigt werden.

Es werden zwei Fälle betrachtet:

- Straßenrandanteil: 25 % (75 % Stellplatz/Garage)
- Straßenrandanteil: 75 % (25 % Stellplatz/Garage)

Die Auswirkungen auf folgende Parameter werden untersucht:

- Benötigte Anzahl an Ziel/Gast Straßenrand-Ladestellen
- Benötigte Anzahl an Ziel/Gast Stellplatz-Ladestellen
- Kosten zur Errichtung von Ziel- und Gast-Ladestellen
- Kosten zur Errichtung aller Ladestellen

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in Abbildung 65 dargestellt. Die Anzahl der Ziel- und Gast-Ladestellen ist definitionsgemäß direkt proportional zum Straßenrandanteil der Ladestationen, was sich auch in der Analyse erkennen lässt. Die entstehenden Kosten reagieren nur gering auf große Unterschiede des Verhältnisses von Straßenrand zu Stellplatz/Garage. Der Grund dafür liegt in den Einzelkosten zur Errichtung der Ladestellen. Diese sind für beide Fälle ähnlich, da es sich grundsätzlich um öffentliche Ladestationen handelt. Die Kosten für die Straßenrand-Ladestellen sind dabei geringfügig höher, was sich entsprechend auf die Sensitivitätsanalyse auswirkt.

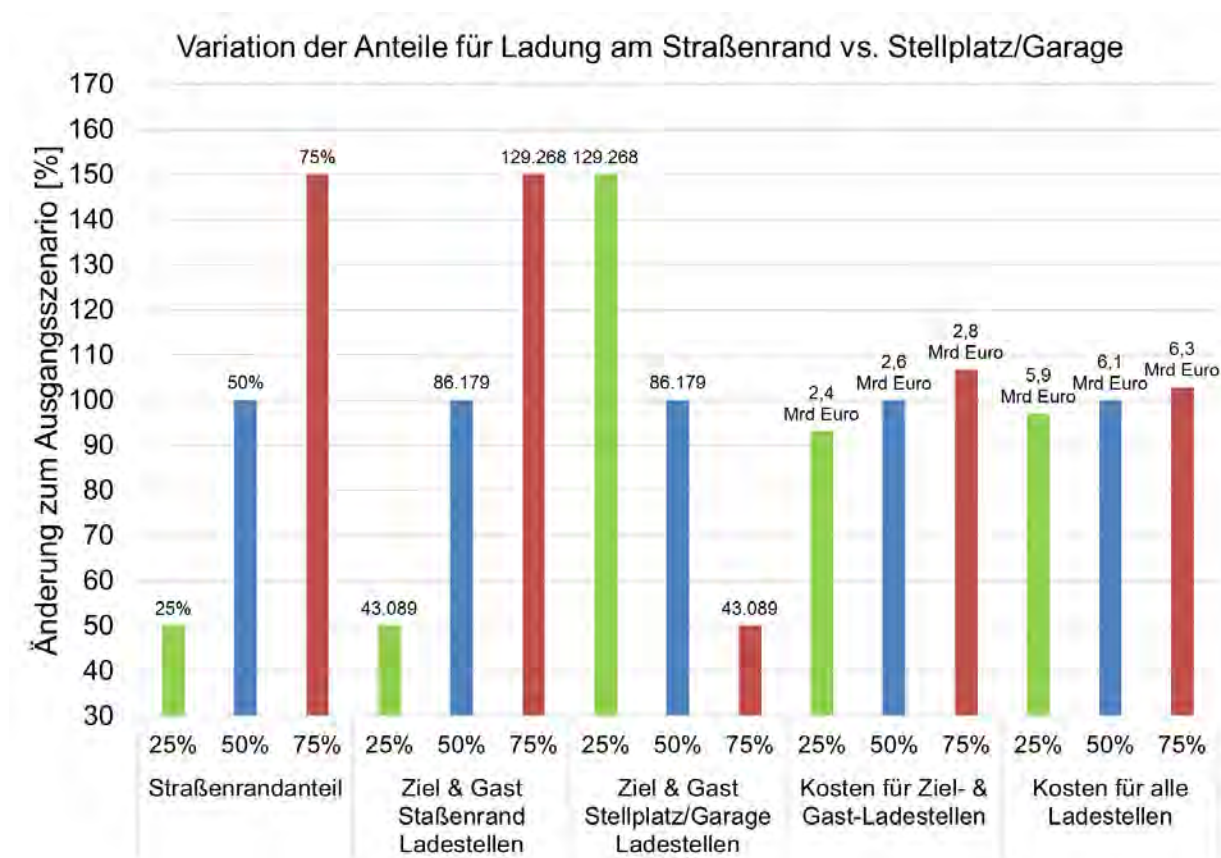


Abbildung 65 – Sensitivitätsanalyse unter Variation des Verhältnisses von Ladestellen am Straßenrand zu Stellplatz/Garage (2030)

13.7 Variation der Auslastung öffentlich zugänglicher Ladestellen

Bei den öffentlich zugänglichen Ladestellen am Straßenrand und an Stellplätzen/Garagen wird in Kapitel 9.1 beschrieben, dass aufgrund der nicht perfekten lokalen Aufteilung eine höhere Anzahl an öffentlich zugänglichen Ladestellen benötigt wird, als durch die Gleichzeitigkeit selbst errechnet werden kann. Der Faktor, mit dem die aus der Gleichzeitigkeit errechnete Anzahl an Ladestellen multipliziert wird, wird in dieser Arbeit als Auslastungsfaktor bezeichnet. Dieser wird je nach Ladestation unterschiedlich gewählt und beträgt für öffentlich zugängliche im Ausgangsszenario 1,5. Diese Zahl soll in einer Sensitivitätsanalyse variiert werden. Für Heim-Ladestellen und LNF-Ladestellen wird weiterhin mit 1 gerechnet.

Die zu variierenden Parameter sind daher die Auslastungsfaktoren der Ladestellen:

- PKW Heim Straßenrand
- PKW Ziel Straßenrand & Stellplatz
- PKW Gast Straßenrand & Stellplatz

Es werden zwei Fälle betrachtet:

- Auslastungsfaktor: 1
- Auslastungsfaktor: 2

Die Auswirkungen auf folgende Parameter werden untersucht:

- Verhältnis von Ladestellen zu BEV-Bestand
- Kosten für Straßenrand-Ladestellen
- Kosten für alle Ladestellen

In Abbildung 66 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zu sehen. Es ist zu erkennen, dass höhere Auslastungsfaktoren (entspricht einem höheren Angebot an Ladestationen) zu deutlich höheren Kosten führen. Insbesondere die Kosten der Ladestellen am Straßenrand, die in der Regel durch die öffentliche Hand getragen werden müssen, sind stark vom Auslastungsfaktor abhängig. Es sei an dieser Stelle nochmals erwähnt, dass der Auslastungsfaktor von 1 ein absolutes Minimum darstellt und in der Praxis aufgrund der nicht perfekten Verteilung der Ladestellen zu einem lokalen Mangel an Ladestationen führen kann.

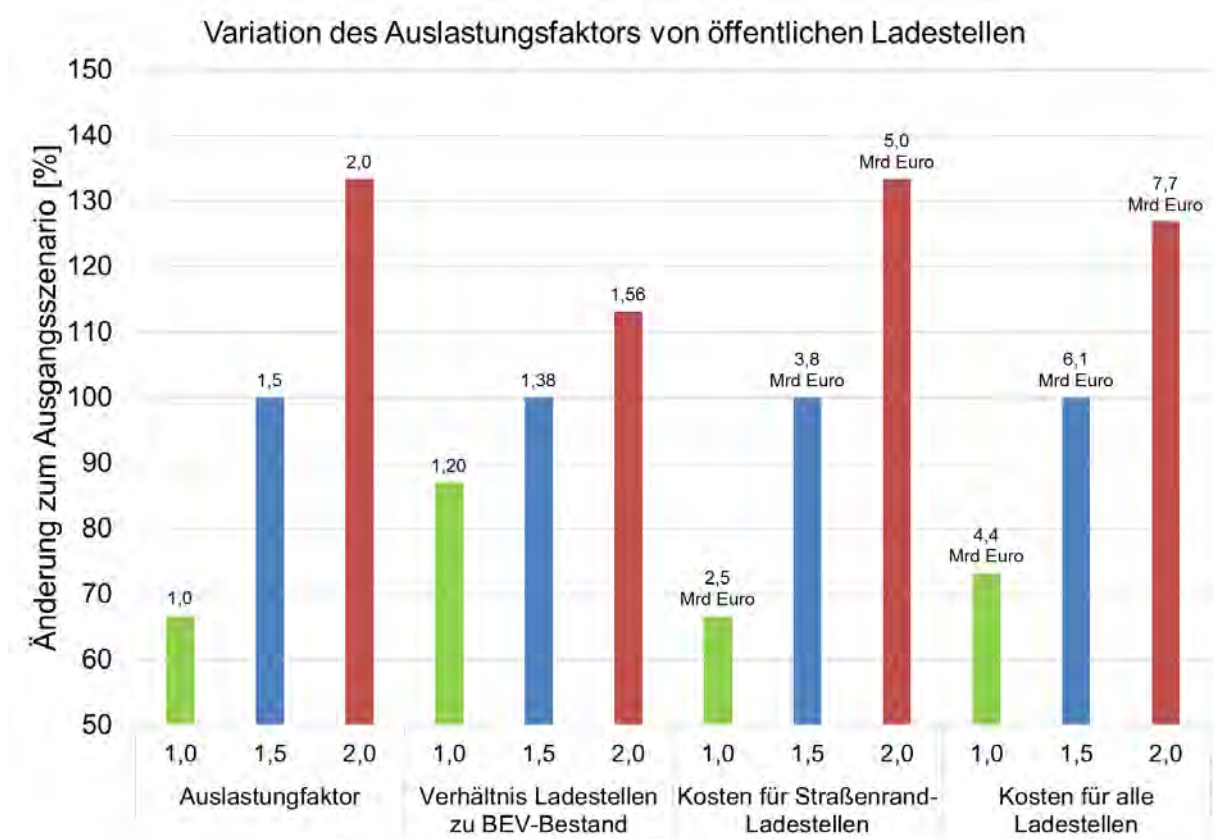


Abbildung 66 – Sensitivitätsanalyse unter Variation der Auslastung öffentlich zugänglicher Ladestellen (2030)

13.8 Best und Worst Case

Für die zuvor gezeigten Sensitivitätsanalysen ergeben sich je nach Variation hohe bzw. niedrige Werte für Leistung, Anzahl der Ladestellen und Kosten. In einer weiteren Analyse sollen alle Parameter derart gewählt werden, dass sie zu einem Best bzw. Worst Case führen. Als Vergleichsmaßstab (Benchmark) für den Best bzw. Worst Case dienen die Kosten.

Varierte Parameter im Best Case:

- Reduktion des Verbrauchs um 10 %
- Ladenutzungsverteilung nach Variante 1 (-25 % mittlere Ladeleistung)
- Heimladungsanteil von 75 %
- Ausstattungsfaktor der Heimstellplätze: 100 %
- Straßenrandanteil: 25 % (75 % Stellplatz/Garage)
- Auslastungsfaktor der öffentlichen Ladestationen: 1

Variierte Parameter im Worst Case:

- Erhöhung des Verbrauchs um 10 %
- Ladennutzungsverteilung nach Variante 3 (+25 % mittlere Ladeleistung)
- Heimpladungsanteil von 50 %
- Ausstattungsfaktor der Heimstellplätze von 70 %
- Straßenrandanteil: 75 % (25 % Stellplatz/Garage)
- Auslastungsfaktor der öffentlichen Ladestationen: 2

Die Auswirkungen auf folgende Parameter werden untersucht:

- Maximale Leistung eines Jahres
- Verhältnis von Ladestellen zu BEV-Bestand
- Anzahl der benötigten Straßenrand-Ladestellen
- Kosten für Straßenrand-Ladestellen
- Kosten für alle Ladestellen

In Abbildung 67 sind die Ergebnisse für den Best bzw. Worst Case zu sehen. Es ist zu erkennen, dass sich die Ergebnisse des Basisszenarios eher am Best Case als am Worst Case orientieren. Für die Kosten ergibt sich im Worst Case, bei einem hohen Verhältnis von 1,76 Ladestellen pro Fahrzeug, ein Maximalwert von 11,9 Mrd. € für alle Ladestellen in Österreich. Der Einfluss auf die Maximalleistung ergibt sich hauptsächlich aus der unterschiedlichen Nutzungsverteilung der verwendeten Ladeleistung. Im Worst Case liegt die Maximalleistung rund 18 % höher als im Basisszenario. Die Untersuchung des lokalen Verteilernetzes im Basisszenario zeigt, dass die Grenzbelastung erst bei wesentlich höheren Bestandszahlen erreicht wird. Im am stärksten ausgelasteten (ländlichen) Netzmodell treten die Grenzen bei fast dem 3-fachen BEV-Bestand (30 % BEV PKW) und somit der rund 3-fachen Maximalleistung im Vergleich zu 2030 (11 % BEV PKW) auf (siehe Kapitel 11.2.1.2). Daraus lässt sich schließen, dass die um 18 % höhere Spitzenleistung im Worst Case aufgrund des hohen Abstands zur Grenzbelastung zu keinem unzulässigen Betrieb in den untersuchten Netzmodellen führt.

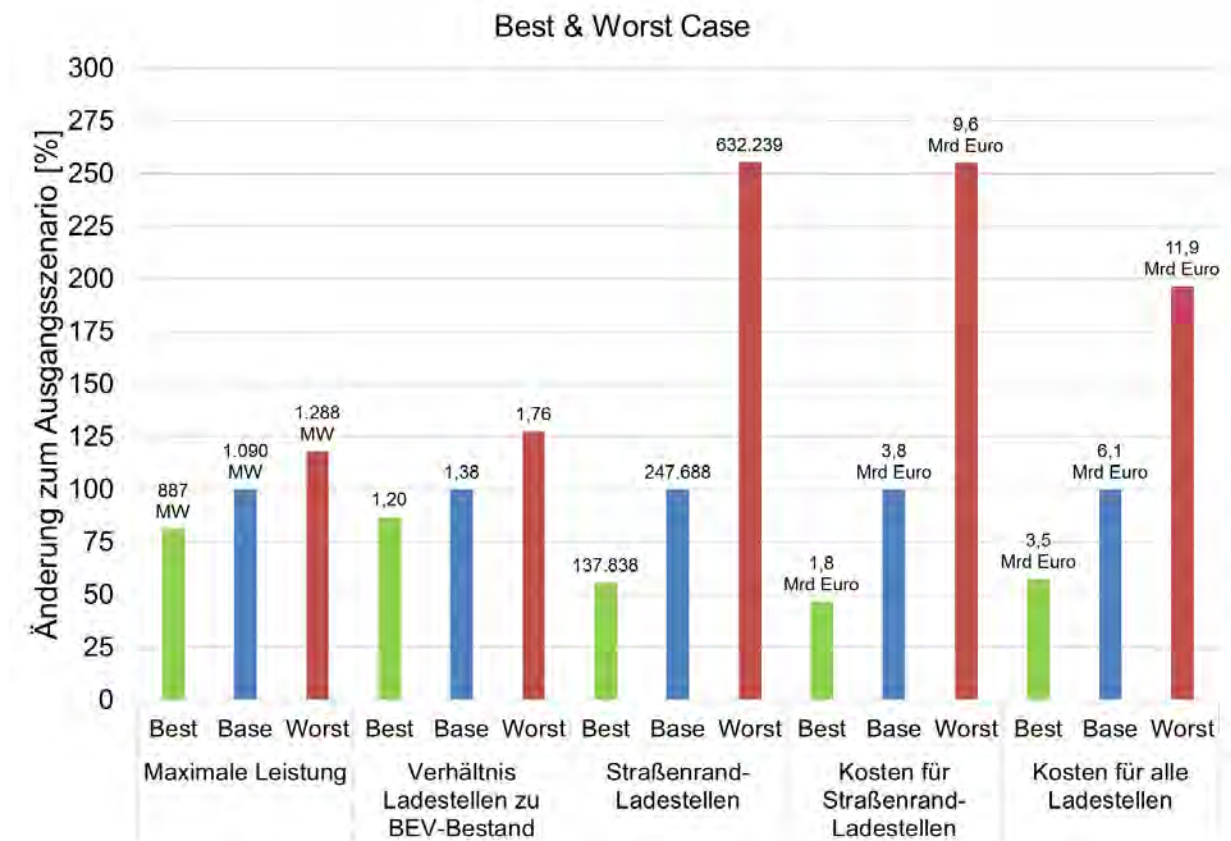


Abbildung 67 – Sensitivitätsanalyse für den Best bzw. Worst Case (2030)

14 Die wichtigsten Ergebnisse

In diesem Kapitel sollen zusammenfassend nochmals die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit gezeigt werden.

14.1 BEV-Bestandsentwicklung bis 2030

Mit der angenommenen Entwicklung der Neuzulassungen von BEV für PKW und LNF bis 2030 wurde die Entwicklung des BEV-Bestands berechnet. Diese ist in Abbildung 68 zu sehen. Bis 2030 werden **BEV-Bestände** von **11 % PKW** und **6,5 % LNF** erwartet.

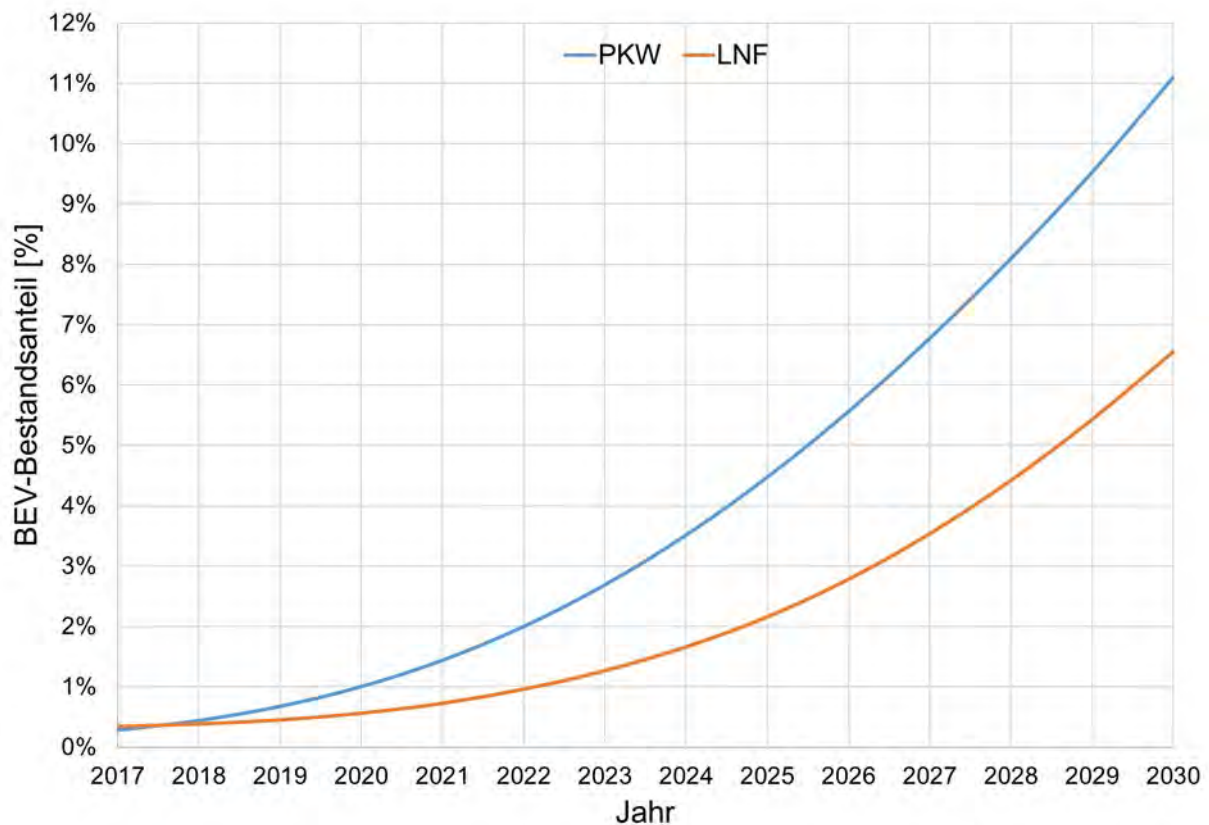


Abbildung 68 – Entwicklung des Bestandsanteils von BEV PKW und LNF

14.2 Leistungsgang der Maximalwoche

Der berechnete Leistungsgang der Maximalwoche (KW 3) im Jahr 2030 ist für verschiedene Ladeorte in Abbildung 69 dargestellt. Wegen der höheren Anzahl an Fahrten im Winter und dem höheren Verbrauch (niedrige Umgebungstemperaturen) kommt es in KW 3 zum Leistungsmaximum. Aufgrund einer hohen Anzahl an Ankünften an Zielorten durch Erwerbstätige zum Zweck der Freizeit ergibt sich um 17:45 Uhr an einem Freitag die Leistungsspitze. Diese beträgt **1,1 GW**, was ca. **10,8 %** des Maximums des Lastprofils von Österreich in KW 3 – 2018 entspricht. Für 100 % BEV-Bestand ergibt sich die Spitze mit 9,37 GW bzw. 93 % des Maximums in KW 3 – 2018.

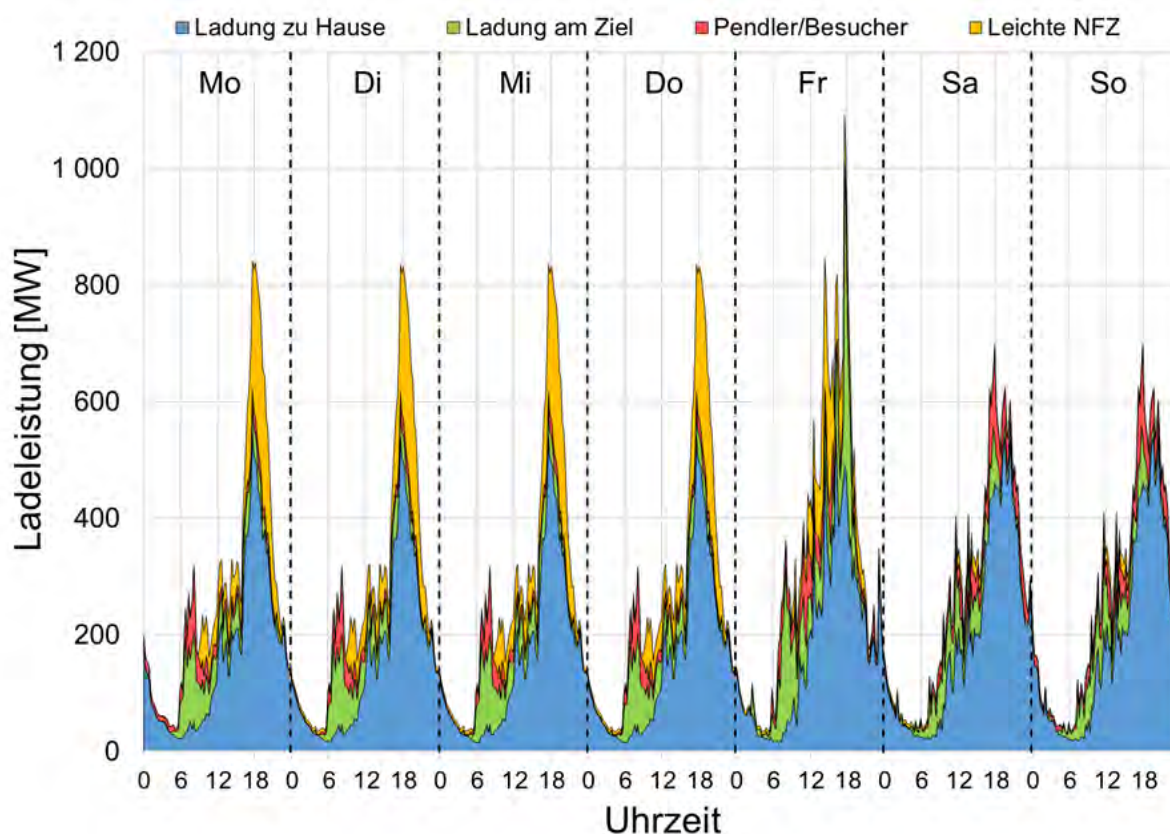


Abbildung 69 – Kumulierter Leistungsgang der Maximalwoche (KW 3) in Österreich im Jahr 2030 unterschieden nach Nutzung

14.3 Energiebedarf durch Elektromobilität

Der Energiebedarf, der durch BEV (PKW & LNF) im Jahr 2030 entsteht, beträgt **2,23 TWh**, was rund **3,2 %** des derzeitigen Strombedarfs entspricht. Der Verlauf bis 2030 ist in Abbildung 70 zu finden. Bei 100 % BEV-Bestand ergibt sich ein Bedarf von 19,8 TWh bzw. 28 % des derzeitigen Verbrauchs.

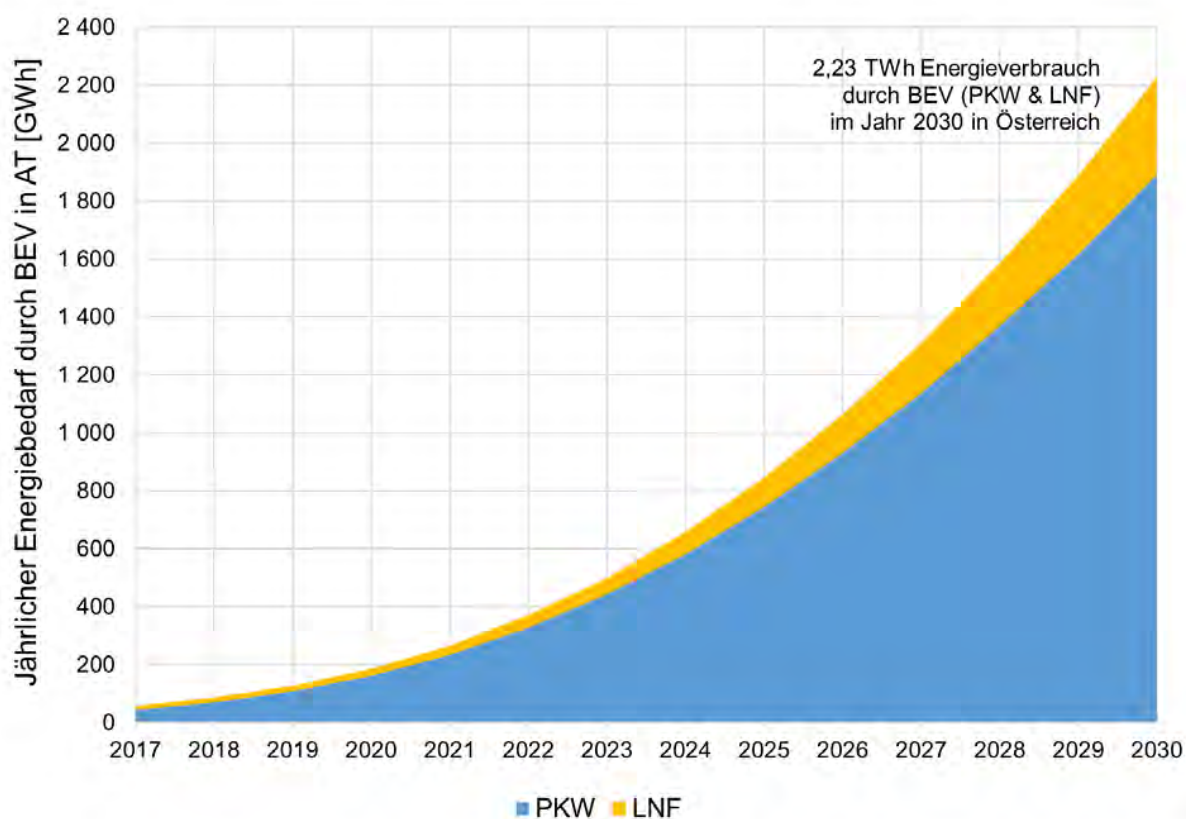


Abbildung 70 – Jährlicher Energiebedarf durch BEV in Österreich

14.4 Benötigte Anzahl an Ladestellen

Aus der berechneten Gleichzeitigkeit der Ladenutzung sowie dem BEV-Bestand im Jahr 2030 ergibt sich die benötigte Anzahl an Ladestellen, welche in Abbildung 71 nach der Ladeleistung dargestellt ist. Es ist zu erkennen, dass die meisten Ladestellen im niedrigen Leistungsbereich mit **2,3 - 11 kW** (hauptsächlich Heimpladung) benötigt werden. Ein weiterer großer Anteil fällt auf Ladestellen mit 22 kW, welche bei höher ausgestatteten Heimpladestellen und im öffentlichen Bereich erwartet werden.

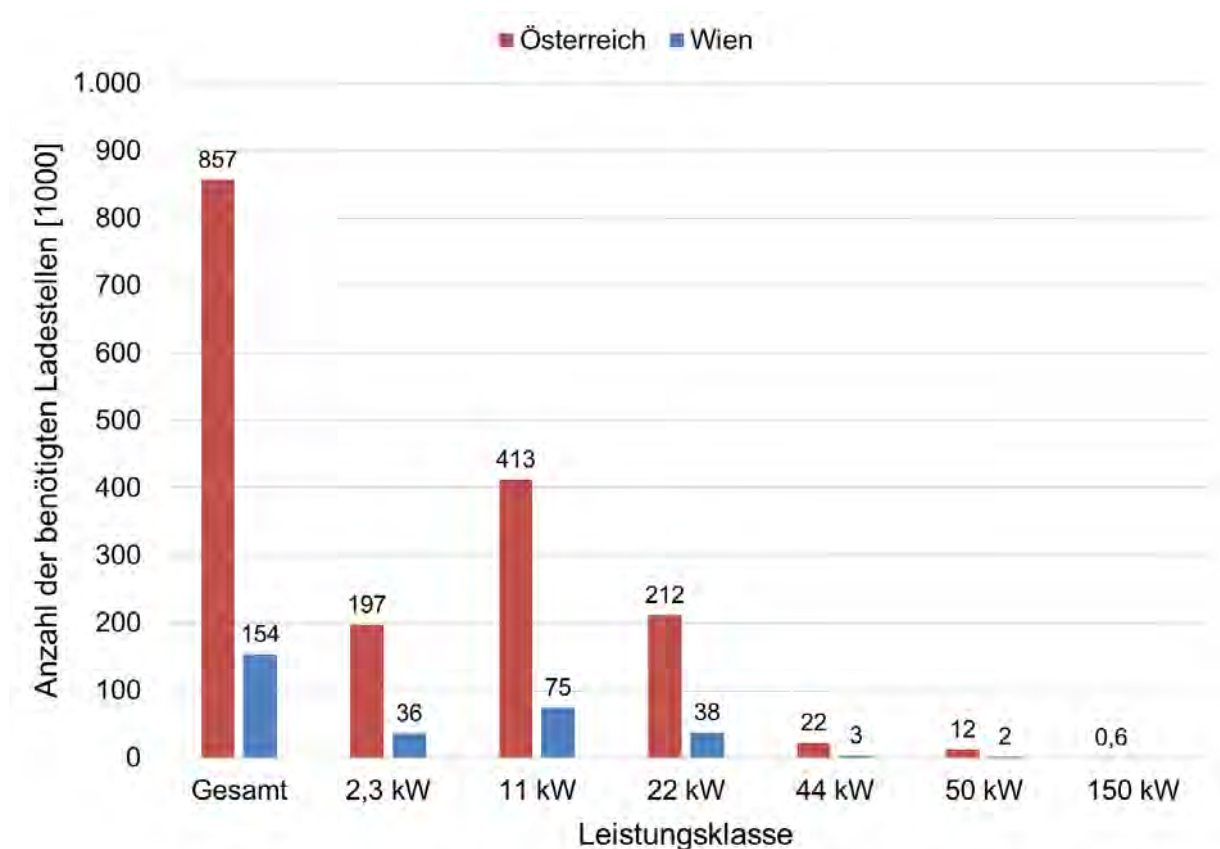


Abbildung 71 – Benötigte Anzahl an Ladestationen nach Ladeleistung für Wien und Gesamt Österreich bis 2030

Die benötigten Ladestellen lassen sich auch nach dem Ladeort unterscheiden, was in Abbildung 72 zu finden ist. Dabei ist erkennbar, dass sich mehr als die **Hälfte der Ladestellen am eigenen Stellplatz** befinden. Rund **29 % der Ladestellen** werden **am Straßenrand** benötigt. In Wien sind 67 % der benötigten Ladestellen am Straßenrand, was auf die geringe Anzahl an Personen mit eigenen Stellplätzen zurückzuführen ist. Die Errichtung dieser Ladestellen kann in der Regel nicht durch

den Fahrzeugbenützer selbst erfolgen, sondern muss durch die **zuständigen öffentlichen Institutionen** veranlasst werden.

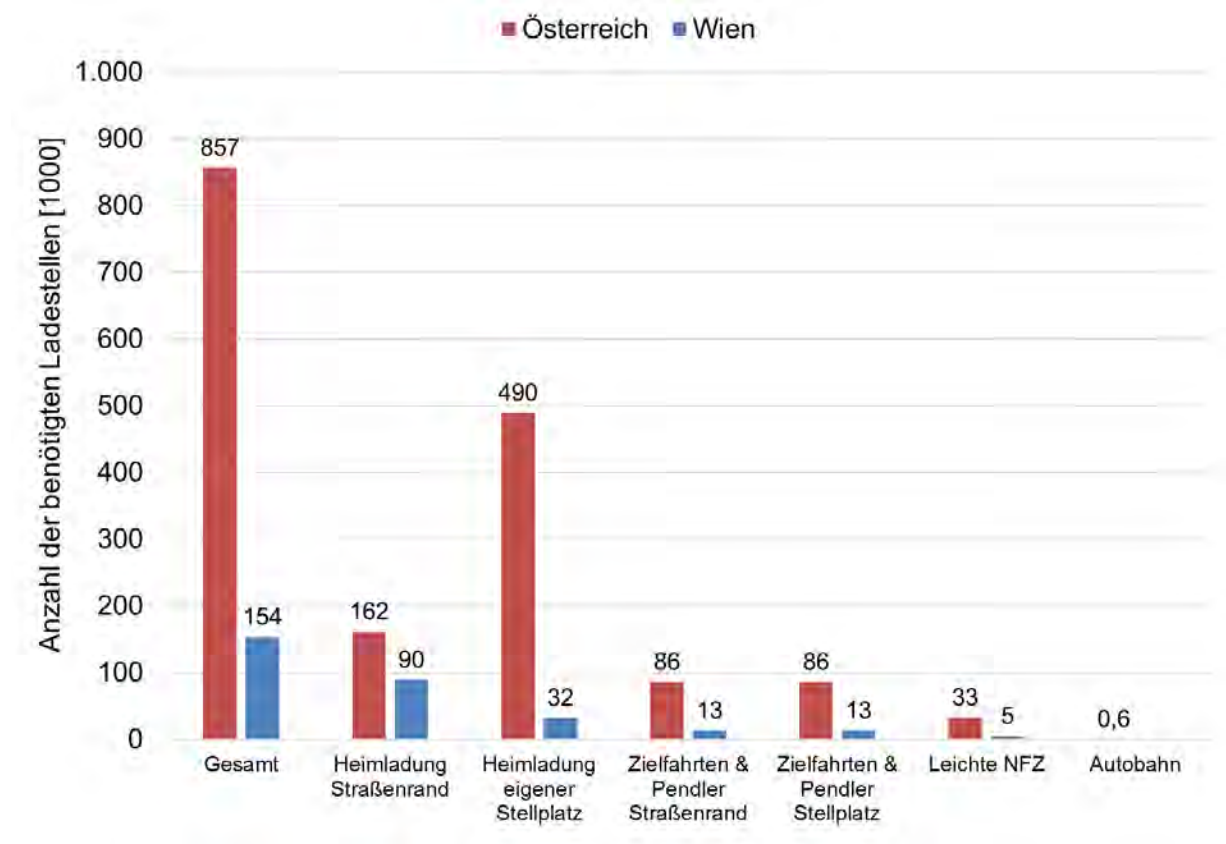


Abbildung 72 – Benötigte Anzahl an Ladestationen nach Ladeort für Wien und Österreich bis 2030

Die Anzahl der Ladestellen ist um den Faktor 1,38 höher als der Gesamtbestand der BEV (PKW & LNF) im Jahr 2030. Bei 100 % BEV-Bestand ergeben sich ähnliche Verhältnisse. Die Gesamtanzahl der benötigten Ladestellen beträgt dabei 7,2 Mio.

14.5 Auswirkungen auf das lokale Verteilernetz

In den untersuchten Modellen für ländliche, klein- und großstädtische Verteilernetze hat sich bis 2030 kein unzulässiger Betrieb bzw. keine Überschreitung netzseitiger Grenzen ergeben. In Einzelfällen, in denen bereits jetzt eine hohe Auslastung vorliegt, ist eine Überschreitung der zulässigen Betriebsbereiche bis 2030 nicht auszuschließen.

Bei den untersuchten Netzmodellen werden die Grenzen bei verschiedenen BEV-Bestandszahlen erreicht:

- Ländlich: 30 % PKW, 18 % LNF
- Kleinstädtisch: 56 % PKW, 33 % LNF
- Großstädtisch: 48 % PKW, 28 % LNF

Daraus lässt sich ableiten, dass die Grenzen als erstes bei einem typischen ländlichen Netz, beim knapp 3-fachen des erwarteten Bestands bis 2030, erreicht werden. Aufgrund der langen Planungszeiträume im Netzausbau (> 30 Jahre) kann der Beginn von Netzerweiterungen für höhere BEV-Bestände (über 2030 hinaus) bereits vor 2030 liegen.

14.6 Kosten

Die kumulierten Kosten für die Errichtung von Ladestellen bis 2030 sind unterschieden nach der Ladeleistung in [Abbildung 73](#) eingetragen und belaufen sich auf insgesamt 6,1 Mrd. €. Aufgrund der hohen Anzahl an benötigten **11 kW und 22 kW** Ladestellen ergeben sich hier die **höchsten Kosten**. Des Weiteren sind 22 kW Ladestellen zum Großteil im öffentlichen Bereich zu finden, wodurch höhere Kosten entstehen.

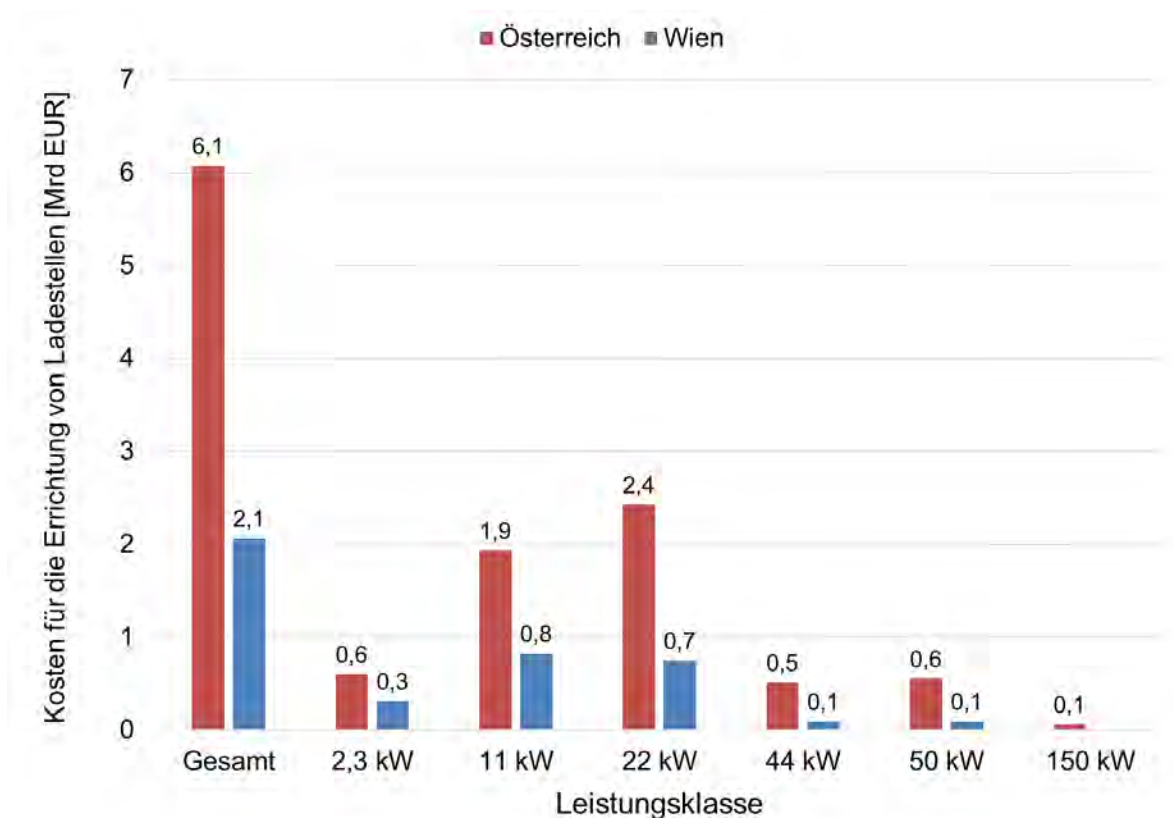


Abbildung 73 – Kumulierte Kosten für die Errichtung von Ladestationen nach Ladeleistung für Wien und Österreich bis 2030 (exkl. Netzmaßnahmen)

Eine Aufteilung der Kosten nach dem Ladeort ist in [Abbildung 74](#) zu finden. Die Ladestellen am eigenen Stellplatz, welche in ihrer Anzahl am höchsten sind, verursachen neben den Autobahnladestellen die niedrigsten Kosten, was auf die geringen Kosten bei der Installation zurückzuführen ist. Die benötigten **Ladestellen am Straßenrand verursachen 62 % der Kosten, davon 45 % in Wien**. Dies ist auf die hohe Anzahl an Fahrzeugen und gleichzeitig geringe Anzahl an eigenen Stellplätzen in Wien zurückzuführen. Da Ladestellen am Straßenrand in der Regel nicht durch den Fahrzeugnutzer selbst errichtet werden können, lässt sich daraus

schließen, dass **62 % der Kosten für den Ausbau der Ladeinfrastruktur** durch die **zuständigen öffentlichen Stellen oder Ladestellenbetreiber** getragen werden müssen.

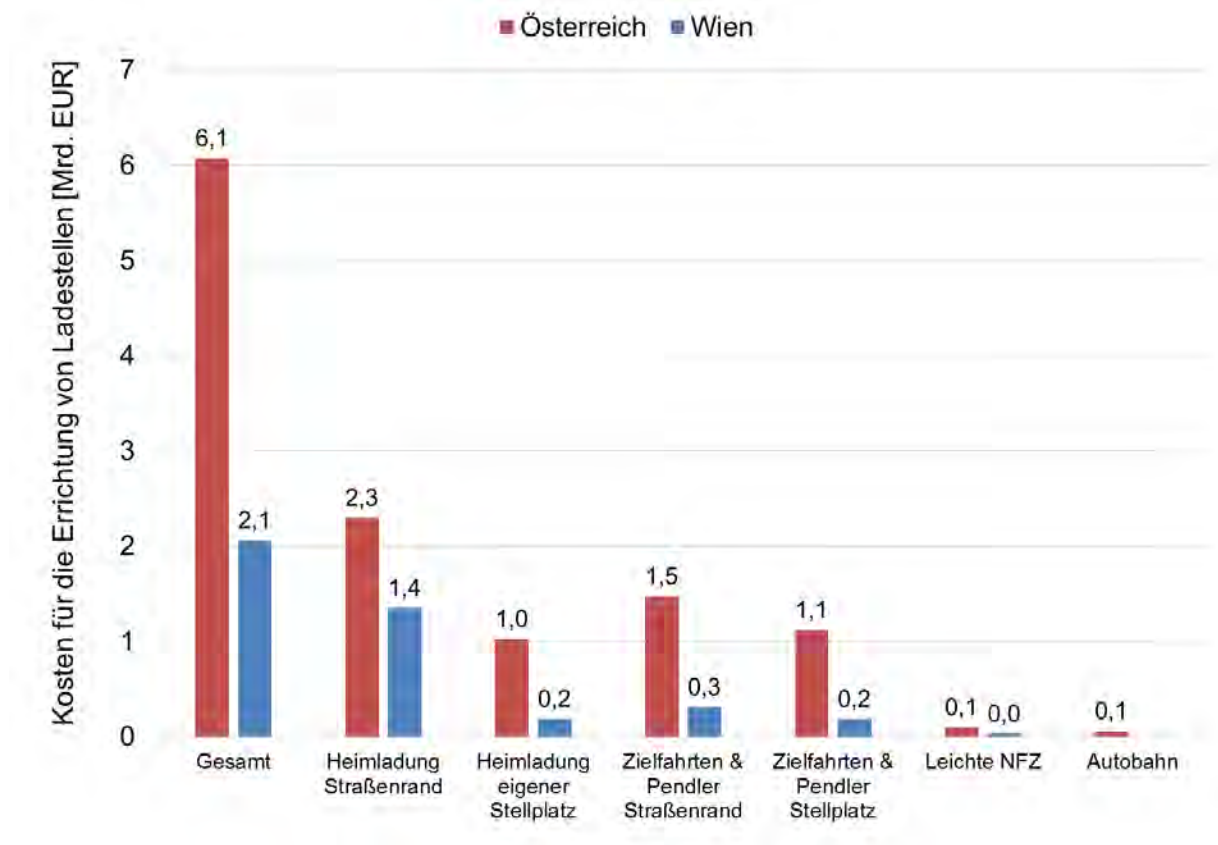


Abbildung 74 – Kumulierte Kosten für die Errichtung von Ladestationen nach Ladeort für Wien und Österreich bis 2030 (exkl. Netzmaßnahmen)

Bis **2030** ergeben sich daraus Kosten von rund **9.800 €/Fahrzeug**. Das entspricht, bei 0,2 €/kWh Stromkosten und 25 kWh/100km Verbrauch, den Energiekosten für **196.000 km pro Fahrzeug**.

Unter den gewählten Annahmen ergibt sich **hinsichtlich Betriebsmittelauslastung und Spannungsproblematik** für die betrachteten Netze bis 2030 **kein Investitionsbedarf**. In Einzelfällen, bei denen bereits jetzt eine hohe Auslastung des Verteilernetzes vorliegt, können Ausbaumaßnahmen und dadurch entstehende Kosten auch vor 2030 nicht ausgeschlossen werden.

Bei 100 % BEV-Bestand werden Kosten in der Höhe von 51 Mrd. € erwartet.

14.7 Ergebnisse im Best & Worst Case

In einer Sensitivitätsanalyse sind die Auswirkungen unterschiedlicher Annahmen und Eingangsparameter auf das Ergebnis untersucht worden. Für den Best bzw. Worst Case (hinsichtlich Kosten) sind die Ergebnisse in Abbildung 75 eingetragen. Es ist zu erkennen, dass sich der Base Case (Szenario mit den in dieser Arbeit verwendeten Werten und Annahmen) eher am Best Case orientiert.

Die Maximalleistung der Ladung je nach Case unterscheidet sich aufgrund der verwendeten Nutzungsverteilung der Ladeleistung.

Für die Ladestellen am Straßenrand ergibt sich im Worst Case eine wesentlich höhere Anzahl, was sich entsprechend auf die Kosten auswirkt. Den größten Einfluss hat dabei der Ausbaugrad der eigenen Stellplätze mit Ladestellen, welcher im Base Case mit 100 % angenommen wird. Im Worst Case beträgt dieser nur 70 %, wodurch eine höhere Anzahl an Ladestellen am Straßenrand benötigt wird, was deutlich höhere Kosten verursacht. Daraus lässt sich schließen, dass für eine **Minimierung der Kosten** eine **Vollausstattung der eigenen Stellplätze** zielführend ist.

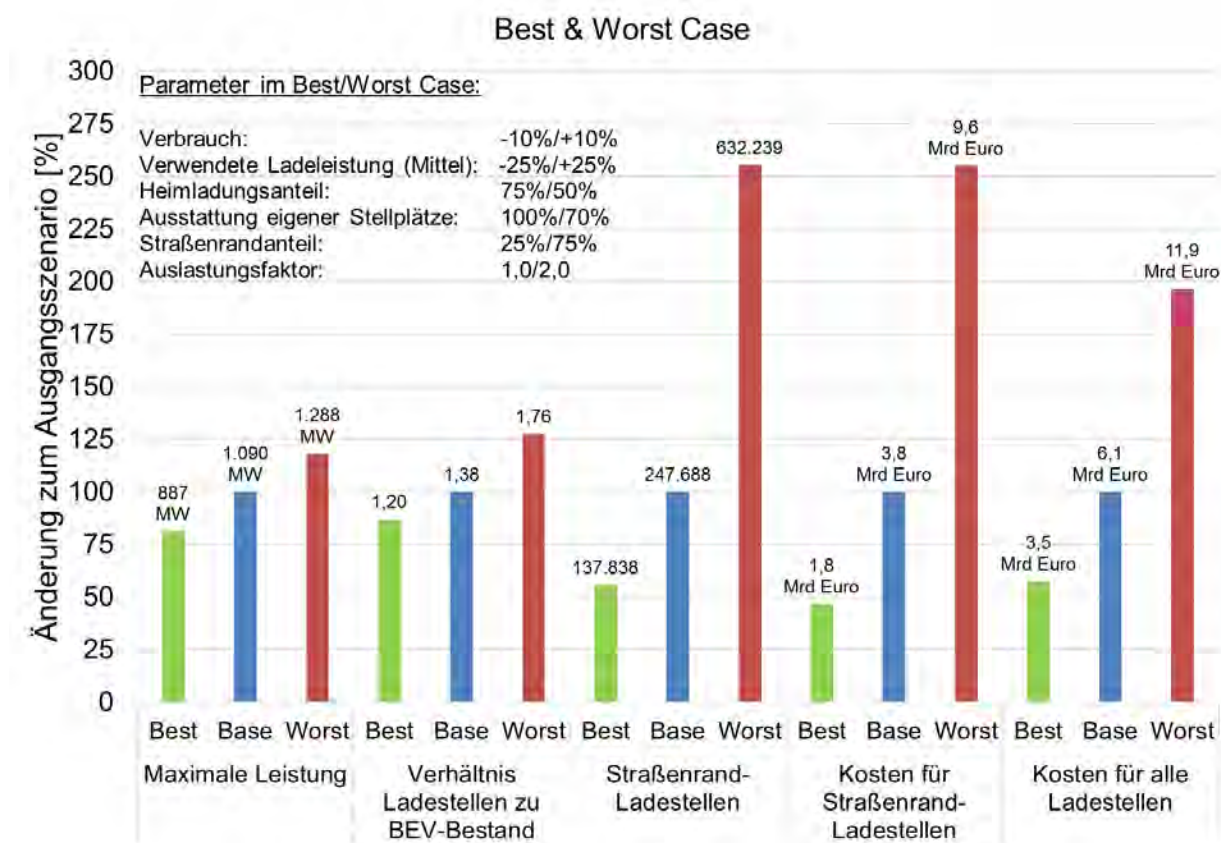


Abbildung 75 – Ergebnisse für den Best, Base und Worst Case im Jahr 2030

15 Zusammenfassung

Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs gewinnt zunehmend an Bedeutung. Neben dem wachsenden Hybridisierungsgrad rückt auch das vollelektrische bzw. batterieelektrische Fahrzeug (BEV) weiter in den Vordergrund. Die derzeit noch niedrigen BEV-Bestände beim PKW und leichten Nutzfahrzeug (LNF) unterliegen aufgrund der stark zunehmenden Neuzulassungszahlen einem beachtlichen Wachstum. Für zukünftig höhere BEV-Bestände ergeben sich zahlreiche Fragen in Hinblick auf die erforderliche Ladeinfrastruktur.

Ausgehend von einer Prognose des BEV-Bestands von PKW und leichten Nutzfahrzeugen (LNF) wird auf Basis detaillierter Mobilitätsdaten der infrastrukturelle Bedarf (Ladestellen, Spitzenleistung, Energiebedarf etc.) ermittelt. Bei der Berechnung wird nach Ort, Jahreszeit, Wochentag, Erwerbsstatus des Nutzers, Fahrtzweck und Ladeort unterschieden. Des Weiteren werden zur Berechnung des Verbrauchs temperaturabhängige Verbrauchsdaten aus Fahrzeugvermessungen und Längsdynamik-Simulationen verwendet. Zusammen mit Temperaturmessdaten zahlreicher ZAMG-Messstellen wird der Verbrauch nach Ort (Bundesländer und große Städte) und Kalenderwoche berechnet. Aus dem Verbrauch lässt sich zusammen mit der verwendeten Ladeleistung und der zurückgelegten Strecke aus dem Mobilitätsverhalten die Ladedauer berechnen.

Durch zahlreiche gleichzeitig stattfindende Ladevorgänge (Gleichzeitigkeit) wird die benötigte Anzahl an Ladestellen und der daraus resultierende Leistungsverlauf (Leistungsgang) berechnet. Die benötigte Anzahl an Ladestellen und deren Leistungsklassen (11 kW AC, 50 kW DC, etc.) ist für die Kosten maßgeblich. Die Kosten zur Errichtung der Ladestellen werden auf Basis dieser Berechnungen und den Errichtungskosten einzelner Ladestellen abgeschätzt.

Der Leistungsgang ist für das Netz bzw. den Energieversorger von größter Bedeutung, da die Stabilität des Netzes bzw. die Energieversorgung jederzeit (auch bei Spitzenlasten) gewährleistet sein muss. In verschiedenen lokalen Verteilernetzmodellen werden mit dem berechneten Leistungsgang die Auswirkungen auf das Netz bis 2030 untersucht. Des Weiteren wird der kritische BEV-Bestand (PKW & LNF), bei dem die Grenzen des Netzes erreicht werden, ermittelt.

Bis **2030** wird ein **BEV-Bestand** von **11 % beim PKW** bzw. **6,5 % beim LNF** (bei BEV-Neuzulassungen von 26 % PKW und 16 % LNF in 2030) erwartet. Deren Ladevorgänge erzeugen eine Spitzenlast von **1,1 GW**. Das entspricht ca. **11 % der derzeitigen Spitzenlast**. Bei 100 % BEV-Bestand (PKW & LNF) ergibt sich durch die Ladung eine Spitzenleistung von 9,4 GW bzw. 93 % der derzeitigen Spitzenlast. Der **zusätzliche Energiebedarf im Jahr 2030** beträgt **2,2 TWh** bzw. **3,2 % des derzeitigen Bedarfs**. Bei 100 % BEV-Bestand ergibt sich ein Mehrbedarf von 28 % bzw. 19,8 TWh.

Die benötigte Anzahl an Ladestationen ist nach Ort und Ladeleistung unterschiedlich. Im Jahr **2030** werden insgesamt für ganz **Österreich 857.000 Ladestellen** benötigt, davon 154.000 in Wien. **29 % der Ladestellen in Österreich** werden **am Straßenrand** (Parkstreifen) benötigt. In Wien sind 67 % der benötigten Ladestellen am Straßenrand, was auf die geringe Anzahl an Personen mit eigenen Stellplätzen zurückzuführen ist. Mit **73 %** wird die Mehrheit der Ladestellen in Österreich mit **11 kW bzw. 22 kW** erwartet. Bei 100 % BEV-Bestand werden 7,2 Mio. Ladestellen in Österreich benötigt, davon 1,2 Mio. in Wien.

In den **untersuchten typischen Verteilernetzmodellen** (ländlich, klein- und großstädtisch) zeigen sich **bis 2030 hinsichtlich Betriebsmittelauslastung und Spannungsproblematik keine Probleme**. In Einzelfällen, in denen bereits jetzt eine hohe Netzauslastung vorliegt, können Netzerweiterungsmaßnahmen nicht ausgeschlossen werden. Des Weiteren kann aufgrund der langen Planungsphasen im Netzausbau der Beginn von Erweiterungen für höhere BEV-Bestände (über 2030 hinaus) bereits vor 2030 liegen. Die jeweiligen **Grenzen der betrachteten Verteilernetze** werden bei BEV-Beständen **PKW & LNF** von **30 % & 18 % (ländlich)**, **56 % & 33 % (kleinstädtisch)** bzw. **48 % & 28 % (großstädtisch)** erwartet.

Die **kumulierten Errichtungskosten** (exkl. Netzerweiterungsmaßnahmen) für die benötigten **Ladestellen** bis **2030** werden mit **6,1 Mrd. € in Österreich**, davon 2,1 Mrd. € in Wien, erwartet. Das entspricht **9.800 €/Fahrzeug**, was bei 0,2 €/kWh Stromkosten und 25 kWh/100km Verbrauch den **Energiekosten für 196.000 km pro Fahrzeug** entspricht. **62 % der Kosten in Österreich** entfallen auf **Ladestellen am Straßenrand**. Aufgrund der geringen Anzahl an eigenen Stellplätzen werden in Wien 81 % der Kosten für Ladestellen am Straßenrand erwartet. Da Ladestellen am Straßenrand in der Regel nicht durch den Fahrzeugnutzer selbst errichtet werden können, lässt sich daraus schließen, dass die **Mehrheit der Kosten für den Ausbau**

der Ladeinfrastruktur durch öffentliche Stellen oder Ladestellenbetreiber getragen werden müssen. Bei 100 % BEV-Bestand ergeben sich Kosten in der Höhe von 51 Mrd. € (exkl. Netzerweiterungsmaßnahmen) in Österreich, davon 17 Mrd. € in Wien.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass für den Ladeinfrastrukturbedarf durch die zunehmende Anzahl an E-Fahrzeugen in den nächsten Jahren ein starker Anstieg erwartet wird. Im Vergleich zum Gesamtbedarf an elektrischer Energie ergibt sich bis 2030 nur eine geringe Zunahme der benötigten Energie und Leistung durch Elektromobilität. In den untersuchten Modellen für ländliche, klein- und großstädtische Verteilernetze hat sich bis 2030 kein unzulässiger Betrieb bzw. keine Überschreitung netzseitiger Grenzen ergeben. Für die Errichtung der benötigten Ladestellen werden aufgrund der hohen Anzahl und der hohen Kosten für Ladestellen im öffentlichen Bereich hohe Kosten erwartet.

16 Anhang

16.1 Liste der verwendeten Temperturmessstellen (ZAMG)

- **Bundesländer ohne die größten Städte**

- o **Burgenland**

Bruckneudorf, Eisenstadt/Nordost, Podersdorf, Andau, Mattersburg, Neudorf/Landsee, Bernstein, Güssing, Wörterberg, Kleinzicken

- o **Kärnten**

Katschberg, Döllach, Obervellach, Millstatt, Spittal/Drau, Gmünd, Flattnitz, Weitensfeld, Friesach, St. Veit/Glan, St. Andrä/Lavanttal, Preitenegg, Dellach, Kötschach-Mauthen, Weissensee, Hermagor, Bad Bleiberg, Fresach, Villacher Alpe, Kanzelhöhe, Arriach, Villach/Stadt, Ferlach, Pörschach, Feldkirchen, Völkermarkt-Goldbrunnhof, Freistritz Bleiburg, Loibl/Tunnel, Bad Eisenkappel

- o **Niederösterreich**

Litschau, Raabs/Thaya, Retz Windmühle, Weitra, Allentsteig, Stift Zwettl, Horn, Schönggrabern, Laa/Thaya, Leiser Berge, Mistelbach, Poysdorf/Ost, Hohenau, Bärnkopf, Jauerling Gipfel, Krems, Langenlois, Stockerau, Langenlebarn, Wolkersdorf, Gänserndorf/Stadt, Zwerndorf, Wachtberg bei Steyr, Amstetten, Oberndorf/Melk, Melk, Wieselburg, St. Pölten/Landhaus, Lilienfeld/Tarschb., Klausen-Leopoldsdorf, Buchberg, Brunn am Gebirge, Gumpoldskirchen, Gross Enzerdorf, Schwechat, Bad Deutsch-Altenb., Waidhofen/Ybbs Z., Lunz/See, Puchberg, Hohe Wand/Hochkogel, Wiener Neustadt/Flugh., Gutenstein/Mariah., Berndorf, Seibersdorf, Rax/Seilbahn, Semmering, Mönichkirchen, Reichenau/Rax, Pottschach, Hirschenkogel, Aspang

- o **Oberösterreich**

Kollerschlag, Rohrbach, Freistadt, Reichersberg, Schärding, Waizenkirchen, Reichenau/Mühlkreis, Bad Zell, Ranshofen, Ostermiething, Aspach, Mattighofen, Ried/Innkreis, Wolfsegg, Vöcklabruck, Wels, Hörsching, Kremsmünster, Enns, Mondsee, Feuerkogel, Altmünster, Micheldorf, St. Wolfgang, Bad Goisern, Bad Ischl, Windischgarsten

- o **Salzburg**
Mattsee, Kolomansberg, Lofer/Ort, Loferer Alm, Golling, Abtenau, Saalbach, Schmittenhöhe, Zell am See, Maria Alm, Bischofshofen, St. Veit/Pongau, St. Johann/Pongau, Radstadt, Krimml, Enzingerboden, Rudolfshütte, Rauris, Sonnblick, Kolm-Saigurn, Bad Gastein, Obertauern, St. Michael/Lungau, Tamsweg, Mariapfarr
- o **Steiermark**
Mariazell/St.Sebast., Bad Aussee, Bad Mitterndorf, Aigen/Ennstal, Irdning-Gumpenstein, Hall/Admont, Rottenmann, Mooslandl, Präbichl, Aflenz, Mürzzuschlag, Ramsau, Seckau, Kalwang, Bruck/Mur, Kapfenberg, Frohnleiten, Leoben, Fischbach, Hartberg, Eichberg, Oberwölz, Stolzalpe, Murau, Neumarkt, Zeltweg, St. Radegund, Schöckl, Gleisdorf, Laßnitzhöhe, Fürstenfeld, Deutschlandsberg, Wagna-Leibnitz, Bad Gleichenberg, Feldbach
- o **Tirol**
Kufstein, Söll, Kirchdorf, Kössen, Holzgau, Tannheim, Reutte, Ehrwald, Seefeld, Jenbach, Alpbach, Kitzbühel, Hahnenkamm/Ehrenb., Hochfilzen, St. Anton/Arlberg, Galzig, Valluga, Landeck, Imst, Prutz, Haiming, St. Leonhard/Pitztal, Umhausen, Neustift, Patscherkofel, Rinn, Steinach am Brenner, Mayrhofen, Virgen, Kals, Galtür, Ischgl, Nauders, Obergurgl, Pitztaler Gletscher, Brunnenkogel, St. Jakob/Def., Lienz, Sillian
- o **Vorarlberg**
Sulzberg, Bregenz, Fraxern, Dornbirn, Feldkirch, Alberschwende, Rohrspitz, Schoppernau, Schröcken, Warth, Mittelberg, Bludenz, Brand, Langen/Arlberg, Lech am Arlberg, Gaschurn
- **Größte Städte**
 - o **Wien**
Wien/Stammersdorf, Wien Jubiläumswarte, Mariabrunn, Wien Hohe Warte, Wien/Unterlaa, Wien Innere Stadt, Donauefeld
 - o **Graz**
Graz Flughafen, Graz Universität, Graz/Strassgang
 - o **Linz**
Linz/Stadt

- o **Salzburg**
Salzburg Flughafen, Salzburg/Freisaal
- o **Innsbruck**
Innsbruck/Univ., Innsbruck Flugplatz
- o **Klagenfurt**
Klagenfurt

16.2 Errichtungskosten für einzelne Ladestellen (exkl. USt.)

Tabelle 18 – Errichtungskosten für Ladestationen am Heim Straßenrand

Heim Straßenrand					
Ländlich [EUR]	2,3 kW	11 kW	22 kW	44 kW	50 kW
Hardware	2.000	2.750	4.500	5.750	17.750
Netz	1.000	2.250	4.250	8.500	11.500
Bauleistung	3.175	3.300	3.300	6.250	15.250
Gesamt	6.175	8.300	12.050	20.500	44.500
Städtisch [EUR]	2,3 kW	11 kW	22 kW	44 kW	50 kW
Hardware	2.000	2.750	4.500	5.750	17.750
Netz	1.062	3.110	5.700	10.881	12.294
Bauleistung	7.500	7.500	15.000	15.000	25.000
Gesamt	10.562	13.360	25.200	31.631	55.044

Tabelle 19 – Errichtungskosten für Ladestationen am Heim Stellplatz/Garage

Heim Stellplatz/Garage					
Ländlich [EUR]	2,3 kW	11 kW	22 kW	44 kW	50 kW
Hardware	0	400	1.000	1.500	17.750
Netz	0	0	4.250	8.500	11.500
Bauleistung	0	500	500	5.500	7.500
Gesamt	0	900	5.750	15.500	36.750
Städtisch [EUR]	2,3 kW	11 kW	22 kW	44 kW	50 kW
Hardware	1.000	1.000	1.000	5.750	17.750
Netz	1.062	3.110	5.700	10.881	12.294
Bauleistung	1.500	1.700	1.700	6.000	7.500
Gesamt	3.562	5.810	8.400	22.631	37.544

Tabelle 20 – Errichtungskosten für Ladestationen am öffentlichen Ziel Parkplatz

Ziel Straßenrand					
Ländlich [EUR]	2,3 kW	11 kW	22 kW	44 kW	50 kW
Hardware	2.000	2.750	4.500	5.750	17.750
Netz	1.000	2.250	4.250	8.500	11.500
Bauleistung	3.175	3.300	3.300	6.250	15.250
Gesamt	6.175	8.300	12.050	20.500	44.500
Städtisch [EUR]	2,3 kW	11 kW	22 kW	44 kW	50 kW
Hardware	2.000	2.750	4.500	5.750	17.750
Netz	1.062	3.110	5.700	10.881	12.294
Bauleistung	7.500	7.500	15.000	15.000	25.000
Gesamt	10.562	13.360	25.200	31.631	55.044

Tabelle 21 – Errichtungskosten für Ladestationen am Ziel Stellplatz/Garage

Ziel Stellplatz/Garage					
Ländlich [EUR]	2,3 kW	11 kW	22 kW	44 kW	50 kW
Hardware	1.500	2.375	3.750	5.750	17.750
Netz	1.000	2.250	4.250	8.500	11.500
Bauleistung	2.188	2.400	3.150	6.125	11.125
Gesamt	4.688	7.025	11.150	20.375	40.375
Städtisch [EUR]	2,3 kW	11 kW	22 kW	44 kW	50 kW
Hardware	1.500	2.375	3.750	5.750	17.750
Netz	1.099	3.183	5.817	11.086	12.523
Bauleistung	2.188	2.400	3.150	6.125	11.125
Gesamt	4.787	7.958	12.717	22.961	41.398

Tabelle 22 – Errichtungskosten für Ladestationen am öffentlichen Gast Parkplatz

Gast Straßenrand					
Ländlich [EUR]	2,3 kW	11 kW	22 kW	44 kW	50 kW
Hardware	2.000	2.750	4.500	5.750	17.750
Netz	1.000	2.250	4.250	8.500	11.500
Bauleistung	3.175	3.300	3.300	6.250	15.250
Gesamt	6.175	8.300	12.050	20.500	44.500
Städtisch [EUR]	2,3 kW	11 kW	22 kW	44 kW	50 kW
Hardware	2.000	2.750	4.500	5.750	17.750
Netz	1.062	3.110	5.700	10.881	12.294
Bauleistung	7.500	7.500	15.000	15.000	25.000
Gesamt	10.562	13.360	25.200	31.631	55.044

Tabelle 23 – Errichtungskosten für Ladestationen am Gast Stellplatz/Garage

Gast Stellplatz/Garage					
Ländlich [EUR]	2,3 kW	11 kW	22 kW	44 kW	50 kW
Hardware	1.500	2.375	3.750	5.750	17.750
Netz	1.000	2.250	4.250	8.500	11.500
Bauleistung	2.188	2.400	3.150	6.125	11.125
Gesamt	4.688	7.025	11.150	20.375	40.375
Städtisch [EUR]	2,3 kW	11 kW	22 kW	44 kW	50 kW
Hardware	1.500	2.375	3.750	5.750	17.750
Netz	1.099	3.183	5.817	11.086	12.523
Bauleistung	2.188	2.400	3.150	6.125	11.125
Gesamt	4.787	7.958	12.717	22.961	41.398

Tabelle 24 – Errichtungskosten für Schnellladestationen entlang der Autobahn

Autobahn	
[EUR]	150 kW
Hardware	60.000
Netz	29.913
Bauleistung	7.000
Gesamt	96.913

16.3 Vergleich mit anderen Untersuchungen

In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse exemplarisch mit anderen Untersuchungen verglichen werden.

16.3.1 Feldtest in Seitenstetten, Niederösterreich

In einem Feldversuch wurden im niederösterreichischen Seitenstetten 18 Haushalte einer Siedlung (insgesamt 25 Haushalte mit 38 Fahrzeugen) mit 23 BEV ausgestattet, was rund 61 % BEV-Bestand entspricht. Damit ist der BEV-Bestand deutlich höher als in dieser Studie im Jahr 2030 (11 %) und bei Erreichung der Grenzen des ländlichen Verteilernetzmodells (30 %, siehe Kapitel 11.2.1.2). Die Untersuchung erfolgte 6 Wochen lang, von 25. September bis 3. November 2017. Die hochgerechnete Jahresfahrleistung war mit 22.400 km pro Fahrzeug vergleichsweise hoch (12.900 km in dieser Arbeit, siehe Kapitel 4.3). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Teilnehmer angewiesen wurden, möglichst alle Fahrten elektrisch durchzuführen. Der Heimladungsanteil betrug 89 %. Die zur Verfügung gestellten Fahrzeuge und deren Ladeleistungsdaten sind in Tabelle 25 aufgelistet. [44]

Um einen Vergleich durchführen zu können, wurde auf Basis von Tabelle 25 mit Hilfe der tatsächlichen Ladeleistung (Scheinleistung) und dem Mittelwert des $\cos(\varphi)$ eine Ladewirkleistung errechnet. Diese ist in Tabelle 26 zu finden. Zusätzlich sind die Anteile der Leistungen/Fahrzeuge in Prozent eingetragen. Tabelle 26 dient direkt als Eingangsgröße für das Ladenutzungsverhalten in der Simulation im lokalen Modell und ersetzt die in Abbildung 19 in Kapitel 8.1.1 angegebenen Ladeleistungen.

Tabelle 25 – Fahrzeuge und Ladeleistungsdaten im Feldversuch Seitenstetten [44]

Fahrzeug	Anzahl	Theoretische Ladeleistung [kW]	Tatsächliche Ladeleistung [kVA]	$\cos(\varphi)$
BMW i3	4	11	10,3	0,94 - 0,97
Nissan Leaf	6	7,2	3,5	0,95 - 0,98
VW Golf	6	7,2	7,2	0,96 - 0,98
Kia Soul	4	7,2	3,2	0,97 - 0,99
Renault Zoe	3	22	10,3	0,62

Die Parameter der lokalen Auswertung mittels Simulation wurden entsprechend gewählt, um die Jahresfahrleistung im Feldversuch zu erreichen. Zusätzlich wurde der angegebene Heimladungsanteil berücksichtigt. Da im Feldversuch nicht alle 23 Fahrzeuge von Anfang an zur Verfügung standen, wurde die Anzahl der Fahrzeuge in den ersten beiden Woche entsprechend [44] auf 16 bzw. 22 Fahrzeuge reduziert.

Tabelle 26 – Anteile und errechnete Ladewirkleistung im Feldversuch Seitenstetten

Fahrzeug	Anteil [%]	Errechnete Wirkleistung [kW]
BMW i3	17,4	9,84
Nissan Leaf	26,1	3,38
VW Golf	26,1	6,98
Kia Soul	17,4	3,14
Renault Zoe	13,0	6,39

Die Ergebnisse der Simulation der ersten 4 Wochen (KW 40 - 43) sind in Abbildung 76 zu sehen. Entsprechend des Feldversuchs wird hier nur der Heimladungsanteil dargestellt. Die Wochen 5 und 6 des Versuchs werden nicht berücksichtigt, da hier gezielte Lastverschiebungen durch den Netzbetreiber durchgeführt wurden und keine Vergleichbarkeit mit den restlichen Ergebnissen besteht [44].

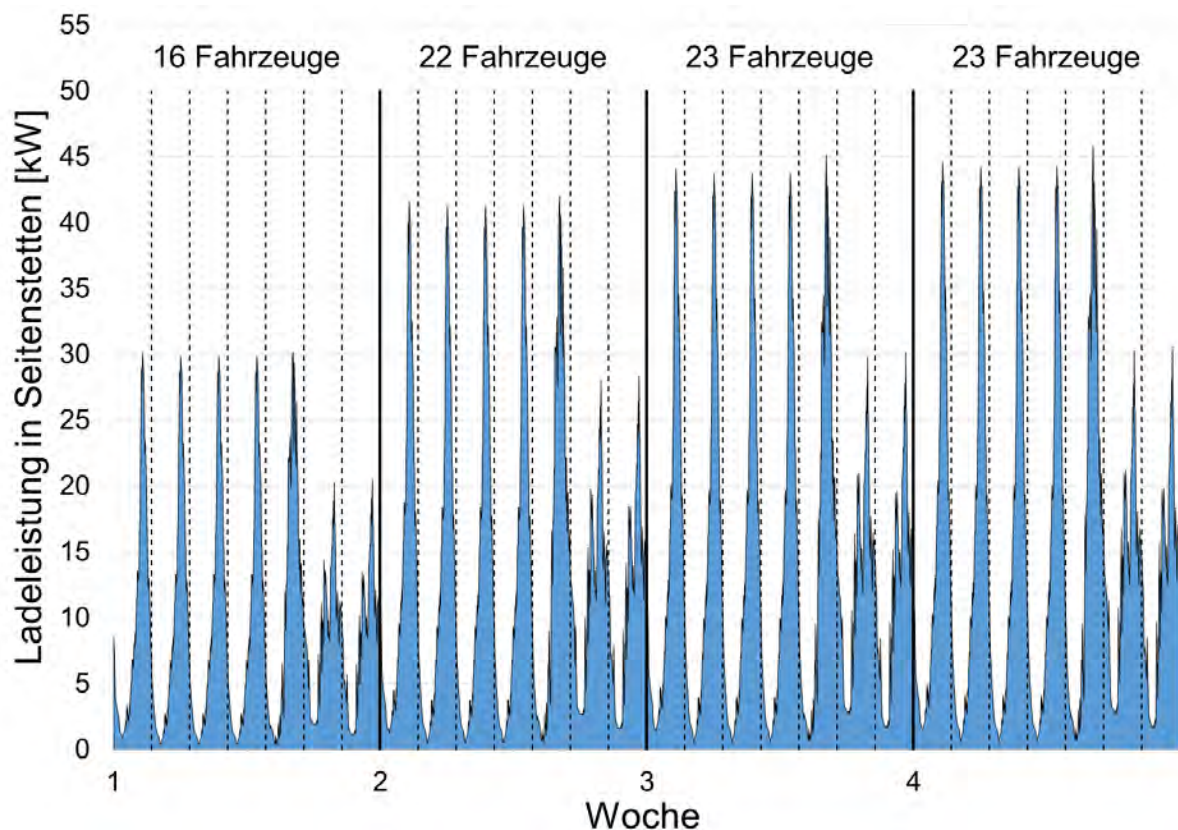


Abbildung 76 – Leistungsgang (Simulation) bei Heimladung in Seitenstetten

Ein Vergleich zwischen dem Simulationsmodell dieser Arbeit und dem Feldversuch ist in [Abbildung 77](#) zu sehen. Hier wurden die Spitzenleistungen jedes Tages in der Höhe und der Uhrzeit des Auftretens eingetragen. Es lässt sich erkennen, dass an den meisten Tagen die Spitzenleistungen in ihrer Höhe im Versuch und in der Simulation nahezu gleich sind. Die wenigen Ausreißer in der Höhe der Leistung lassen sich beispielsweise auf ein stark abweichendes Mobilitätsverhalten zurückführen, das insbesondere in der ersten Woche aufzutreten scheint. Ein Grund dafür könnte in der Eingewöhnungsphase der Personen im Feldversuch liegen.

Die Zeitpunkte der Lastspitzen liegen im Feldversuch deutlich später als in der Simulation. Dieses Ergebnis entspricht den Erwartungen, da im Feldversuch eine P(U)-Regelung verwendet wurde [44]. Diese soll einen unzulässig hohen Spannungsabfall im Netz, beispielsweise verursacht durch zu hohe Haushalts- und Ladeleistung, verhindern, indem die Ladeleistung an der Ladestation entsprechend reduziert wird. Dies führt gerade am frühen Abend (Haushaltsspitze) zu einer Reduktion der Ladeleistung und somit zu einer Verschiebung in die späteren Abendstunden.

Zusätzlich kann sich dadurch die Gleichzeitigkeit und somit die kumulierte Spitzenlast der Ladung erhöhen.

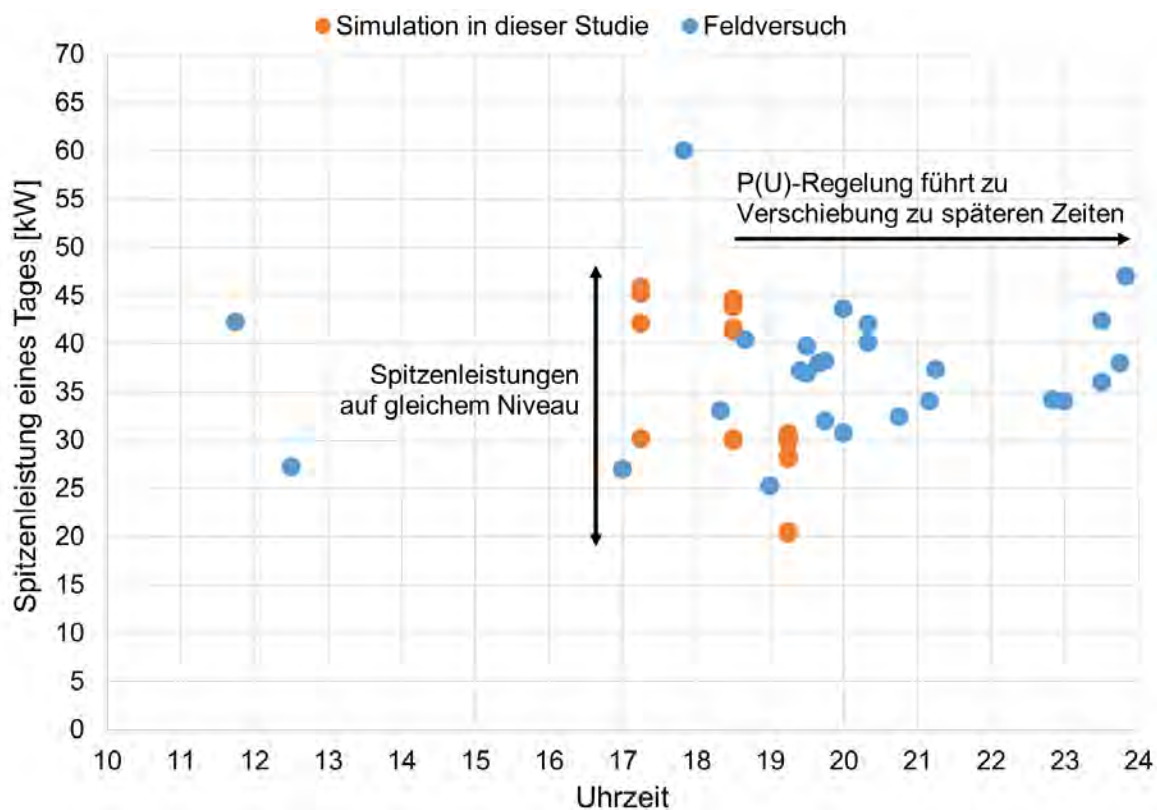


Abbildung 77 – Verteilung der Spitzenlasten im Feldversuch [44] und in der Simulation in dieser Studie

Die im Feldversuch eingesetzte P(U)-Regelung, als dezentrale Maßnahme zur Gewährleistung des zulässigen Betriebs im Verteilernetz, erwies sich als notwendig [44]. Insbesondere aus den deutlichen Verschiebungen zu späteren Zeiten hin lässt sich schließen, dass ohne Regulationsmaßnahmen in diesen Fällen eine Überlastung der Betriebsmittel sehr wahrscheinlich gewesen wäre.

Der Energiebedarf liegt in der Simulation dieser Studie durchwegs höher als im Feldtest, was auf die höheren BEV-Verbräuche in dieser Arbeit (siehe Kapitel 6.1.1) zurückzuführen ist. Der durchschnittliche Verbrauch inkl. Ladeverluste beträgt in der Simulation 25,2 kWh/100km, während dieser im Feldversuch 17,5 kWh/100km beträgt [44]. Der Verbrauch hängt maßgeblich von der Temperatur, dem Ladewirkungsgrad, der Fahrweise, dem Fahrzeug und dem Fahrzyklus ab. Die Fahrzeuge im Feldversuch sind im kleineren Segment angesiedelt, während der Verbrauch in dieser Arbeit Fahrzeuge im mittleren Segment repräsentiert.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Ergebnisse der maximalen täglichen Leistung des Feldversuchs nach [44] und der Simulation in dieser Studie sehr ähnlich sind. Die Auftrittszeitpunkte der Leistungsmaxima sind im Feldversuch aufgrund der eingesetzten P(U)-Regelung teilweise stark unterschiedlich, wodurch die Notwendigkeit der P(U)-Regelung deutlich wird. Der Bedarf an Lösungsmaßnahmen im Verteilernetz ist zusätzlich aufgrund der deutlich höheren Parameter im Feldversuch (61 % BEV-Bestand, 22.400 km pro Fahrzeug) zu erwarten. In dieser Studie werden die Grenzen des ländlichen Verteilernetzes bei 30 % erwartet, des Weiteren beträgt die jährliche Fahrleistung 12.900 km. Die unterschiedlichen Verbräuche lassen sich durch die zahlreichen Einflussparameter sowie die unterschiedlichen Fahrzeugsegmente erklären.

16.3.2 Studie zum zukünftigen Infrastrukturbedarf in Österreich

Eine Studie nach [29] und [67] beschäftigt sich mit dem zukünftigen dezentralen Infrastrukturbedarf in Österreich bis 2030. Dabei werden sowohl BEV als auch PHEV¹⁴ sowie PKW und LNF berücksichtigt. In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse der Studie mit den Ergebnissen dieser Arbeit verglichen werden.

Wie bereits in Kapitel 9.1 beschrieben, werden in [29] die benötigten Ladestellen im Verhältnis zum Bestand angegeben. Der dabei zu Grunde liegende Bestand wird mit rund **0,9 - 1,7 Mio. E-Fahrzeugen bis 2030** angegeben. Dabei wird zwischen BEV und PHEV nicht unterschieden, da in [29] mit keinem unterschiedlichen Ladebedarf von BEV und PHEV gerechnet wird, was in der Praxis wahrscheinlich nicht der Fall ist. In dieser Arbeit ergibt sich nach Kapitel 4.2 ein deutlich niedrigerer Bestand (wegen reiner BEV-Betrachtung) von rund **0,6 Mio. Fahrzeugen bis 2030**.

In [29] wird je nach Szenario ein **Verhältnis von Ladestellen zum Bestand von 1,1 - 1,3** (low - high) angenommen. Wie bereits in Kapitel 9.1 beschrieben, ergibt sich in dieser Arbeit für das absolute Minimum an Ladestellen ein Verhältnis von 1,2, jedoch nur unter perfekter Verteilung der Ladestellen. Das in dieser Arbeit verwendete Verhältnis von Ladestellen zum BEV-Bestand liegt im **Basisszenario bei 1,38**. In einer

¹⁴ In dieser Arbeit werden ausschließlich BEV betrachtet, weswegen sich im Vergleich andere Werte ergeben können

Sensitivitätsanalyse in Kapitel 13.8 werden für den **Best Case 1,20** und für den **Worst Case 1,76** berechnet.

Die Kostenberechnung erfolgt in [29] unterschiedlich zu dieser Arbeit. Es wird eine Verteilung der Ladestellen und eine Unterscheidung der Kosten je nach Ladeleistung und Szenario vorgenommen. Diese Unterscheidung ist in Tabelle 27 zu sehen. Dabei sind im Vergleich zu den in dieser Arbeit angenommenen Kosten teilweise große Unterschiede zu erkennen. Insbesondere die **Kosten für öffentliches Laden sind deutlich niedriger** als in dieser Arbeit angenommen (siehe Anhang 16.2).

Tabelle 27 – Annahmen der Kosten und Verteilung der Ladestationen nach [29]

	Anteile			Kosten je Ladepunkt [€]		
	low	medium	high	low	medium	high
Triple-Charger 50 kW DC / 43 kW AC	0,5 %	1 %	1 %	21.510	31.510	39.010
Schnellladen 50 kW DC	0,5 %	1 %	1 %	32.000	52.000	67.000
Öffentliches Laden 22 kW AC × 2	4 %	3 %	8 %	2.750	3.980	6.460
Geteiltes Laden 11 kW AC × 2	15 %	20 %	35 %	2.750	3.678	5.855
Privates Laden > 3,7 kW AC	80 %	75 %	55 %	1.400	1.854	2.307

Aus diesen Annahmen ergeben sich die Kosten für Österreich bis 2030. Das Ergebnis für die Gesamtkosten bis 2030 nach [67] je nach Szenario ist:

- Low: **3,5 Mrd. €**
- Medium: **6,3 Mrd. €**
- High: **11,0 Mrd. €**

In dieser Arbeit ergeben sich in der Sensitivitätsanalyse die Kosten je nach Case:

- Best Case: **3,5 Mrd. €**
- Base Case: **6,1 Mrd. €**
- Worst Case: **11,9 Mrd. €**

Es ist zu erkennen, dass sich trotz der deutlich abweichenden Annahmen und Methoden der beiden Studien nahezu gleiche Kosten für die verschiedenen Szenarien ergeben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die Auswirkungen des höheren Bestands, der niedrigeren Einzelkosten und des niedrigeren Ladestellenbedarfs nach

[29] auf die Gesamtkosten einigermaßen ausgleichen. Es ist zu erkennen, dass beide Studien hohe Kosten für den Ausbau von Ladeinfrastruktur bis 2030 erwarten, auch wenn die Methoden und Annahmen stark unterschiedlich sind.

Im Low Szenario bzw. Best Case ergeben sich trotz des niedrig angesetzten Ladestellen-Bestand-Verhältnisses von 1,1 in [29] (das unter dem errechneten Minimum dieser Arbeit liegt) die gleichen Kosten. Der Worst Case ergibt ähnliche Werte, was auf die höheren Einzelkosten zurückzuführen ist. Der höhere E-Fahrzeugbestand nach [29] wird durch das Ladestellen-Bestand-Verhältnis von 1,76 dieser Arbeit größtenteils kompensiert.

In [29] ist eine Aufteilung der Kosten auf die Bundesländer zu finden, welche mit Hilfe der Tankstellenverteilung der Bundesländer durchgeführt wird. Es wird angenommen, dass die Verteilung der Ladestellen über die Bundesländer mit denen der Tankstellen übereinstimmen, wodurch die Kosten aufgeteilt werden. Gerade in großen Städten (z. B. Wien) ergibt sich dabei eine wesentlich höhere Anzahl an Fahrzeugen pro Tankstelle. In [29] wird angenommen, dass dies für Ladestellen ebenfalls gilt, was bedeutet, dass erwartet wird, dass der Benützungsgrad einer Ladestelle in Städten deutlich höher ist.

In dieser Arbeit wird erwartet, dass sich ein wesentlich höherer Benützungsgrad für Ladestationen in Städten in der Regel nicht realisieren lässt, da angenommen wird, dass Ladestellen anders genutzt werden als Tankstellen. Es ist anzunehmen, dass gerade bei Ladungen am Heimstellplatz (Straßenrand oder eigener Stellplatz), welche den Großteil der Ladevorgänge ausmachen, das Fahrzeug auch über die Ladezeit hinaus den Parkplatz (mit Ladestelle) besetzen wird, da in der Praxis kaum zu erwarten ist, dass ein Fahrzeugnutzer beispielsweise in der Nacht das Fahrzeug auf einen anderen Parkplatz stellt. Ein Umparken des Fahrzeuges ist zwar bei höheren Ladeleistungen (44 kW und höher) wahrscheinlicher, jedoch stellen diese nur einen geringen Anteil der Ladungen dar.

Des Weiteren wird bei der Annahme nach [29] nicht berücksichtigt, dass gerade in großen Städten die Anzahl an Fahrzeugnutzern mit einem eigenen Stellplatz geringer ist. Dadurch müssen am Straßenrand Ladestationen errichtet werden, wodurch wesentlich höhere Kosten entstehen, was in dieser Arbeit berücksichtigt ist.

Die Verteilung der Kosten auf die Bundesländer nach [29] ist im Vergleich zu dieser Arbeit in Abbildung 78 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Verteilung der Kosten entsprechend der Tankstellenverteilung in den meisten (ländlichen) Fällen ähnliche Ergebnisse wie diese Arbeit liefert. Für große Städte weichen die Kosten aber deutlich ab, wie sich am Anteil von Wien erkennen lässt.

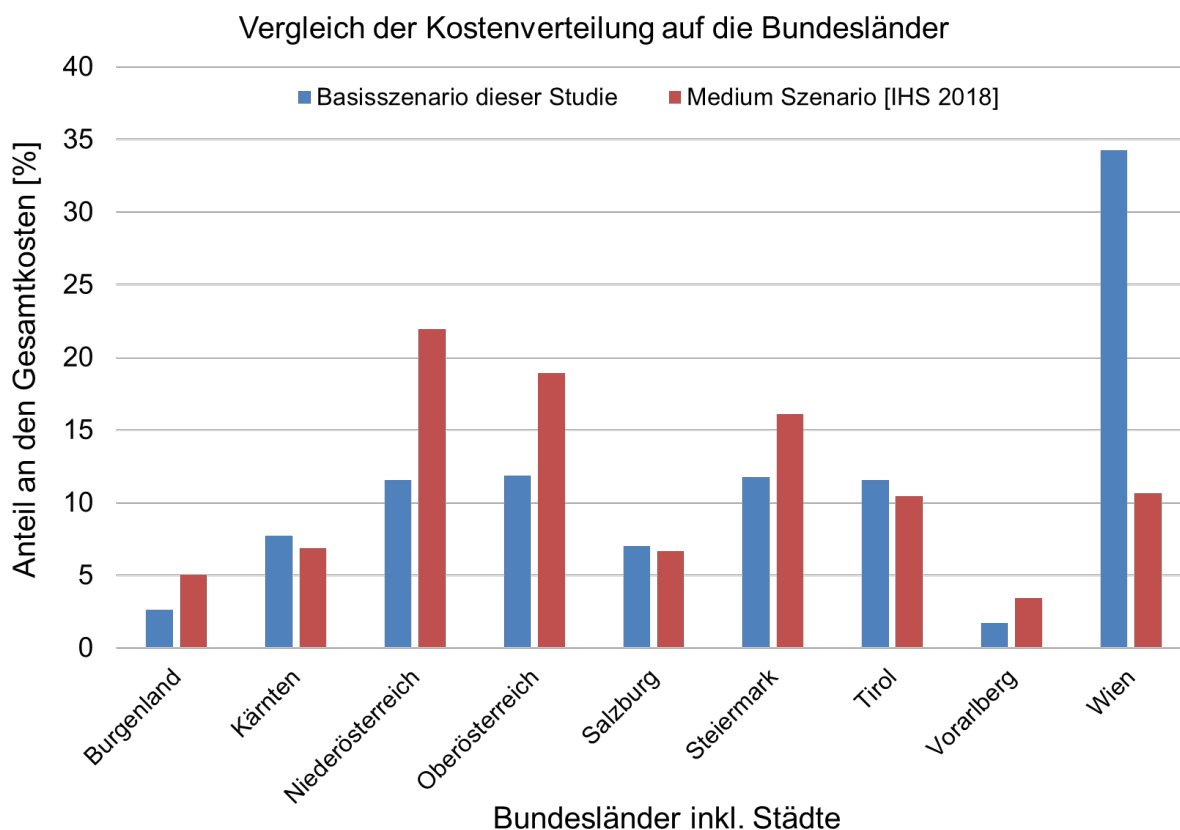


Abbildung 78 – Vergleich der Kostenverteilung auf die Bundesländer nach [29] im Vergleich zu dieser Arbeit

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich die beiden Studien aufgrund der stark unterschiedlichen Annahmen und Methoden nicht vergleichen lassen. Trotzdem ergeben sich in beiden Studien ähnliche Ergebnisse. Insbesondere für die Gesamtkosten zur Errichtung der Ladestellen sowie für die Verteilung auf die ländlichen Bundesländer (ohne Wien) ergeben sich nur geringe Unterschiede.

17 Literaturverzeichnis

- [1] Statistik Austria: Kfz-Neuzulassungen Jänner bis Dezember 2017, [Online]. Available: http://statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_neuzulassungen/index.html. [Zugriff am 06 06 2018].
- [2] Statistik Austria: Auskunft per Email durch Reisel, J., Bestand und Neuzulassungen Elektro der Nutzfahrzeuge Klasse N1, 06.06.2018.
- [3] Statistik Austria: Kfz-Bestand 2017 revidiert, [Online]. Available: http://statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/index.html. [Zugriff am 06 06 2018].
- [4] Emissionsprognose-Tool PROVEM, Wien: Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, Technische Universität Wien, 2018.
- [5] Cozzarini, C.: Berechnung limitierter und nichtlimitierter PKW- und NFZ-Emissionen in Deutschland - Szenarien und Prognosen, Wien: Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau, 1998, Dissertation.
- [6] Tober, W.: Entwicklung der Schadstoff- und CO₂-Emissionen des Straßenverkehrs in Österreich und Deutschland bis 2030 und Ableitung des Handlungsbedarfs, Wien: Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, Technische Universität Wien, 2012, Dissertation.
- [7] Statistik Austria: Kfz-Neuzulassungen Jänner bis Dezember 2018 (vorläufige Ergebnisse), [Online]. Available: https://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_neuzulassungen/index.html. [Zugriff am 22 01 2019].
- [8] Geringer, B., Eichlseder, H.: ÖAMTC Expertenbericht Mobilität und Klimaschutz 2030, Wien: ÖAMTC, 2018.
- [9] Statistik Austria: Fahrzeug-Bestand am 31. Dezember 2018 (vorläufige Ergebnisse), [Online]. Available: http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_umwelt_innovation_mobilitaet/verkehr/strasse/kraftfahrzeuge_-_bestand/index.html. [Zugriff am 22 01 2019].
- [10] Tober, W., Praxisbericht Elektromobilität und Verbrennungsmotor, Wien: Springer Vieweg, ISBN 978-3-658-13602-4, 2016.
- [11] Gauss, C.: ADAC-EcoTest - Das verbraucherorientierte Umweltbewertungsverfahren, nicht nur für Elektrofahrzeuge, Landsberg a. Lech: ADAC e.V., 2010.
- [12] Qi, Z., Yang, J., et al: Investigating Real-World Energy Consumption of Electric Vehicles: A Case Study of Shanghai, 210000, China: 8th International Congress of Information and Communication Technology (ICICT-2018), Published by Elsevier Ltd., 2018.

-
- [13] Yuksel, T., Michaelek, J.: Effects of Regional Temperature on Electric Vehicle Efficiency, Range, and Emissions in the United States, Pittsburgh, Pennsylvania 15213, United States: Carnegie Mellon University, 2015.
- [14] ADAC Autotest: Tesla Model X100D (EcoTest), Mai 2018.
- [15] ADAC Autotest: Nissan Leaf (40 kWh) Acenta (EcoTest), Juni 2018.
- [16] ADAC Autotest: Hyundai Kona Elektro (64 kWh) Premium (EcoTest), Oktober 2018.
- [17] Dörr, H., Albrecht, R. et al: Neue Fahrzeugtechnologien und ihre Effekte auf Logistik und Güterverkehr, Serviceability of Low-Emission-Vehicle-Technologies to eco-optimize Future Logistics and Freight Transport (EFLOG), Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, September 2014.
- [18] Mercedes-Benz: Der neue Sprinter (Broschüre), Seite 22, [Online]. Available: <https://www.mercedes-benz.at/vans/content/dam/vans/austria/brochure/sprinter-kastenwagen-brochure.pdf>. [Zugriff am 2019 01 23].
- [19] Arndt, W.-H., Döge, N.: Elektrifizierungspotential kommerzieller Kraftfahrzeug-Flotten im Wirtschaftsverkehr als dezentrale Energie-Ressource in städtischen Verteilnetzen – komDRIVE, Berlin: Universitätsverlag der TU Berlin (Hrsg. Stefanie Marker), 2016.
- [20] Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, „Klimaübersicht: Jahrbuch - Monatsauswertung,“ 2016. [Online]. Available: <http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimauebersichten/jahrbuch>. [Zugriff am 14 03 2018].
- [21] Tomschy, R., Herry, M. et al: Ergebnisbericht zur österreichweiten Mobilitätserhebung "Österreich unterwegs 2013/2014", Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (Hrsg.), Juni 2016.
- [22] Austrian Mobile Power: Factsheet "Elektroauto - Ladedauer & Anschlusstypen", 01 2018. [Online]. Available: http://www.austrian-mobile-power.at/amp/AMP_Factsheets/Austrian_Mobile_Power_Factsheet_12_Uebersicht_Netzanschluss_und_Ladedauer_bei_Elektroautos.pdf. [Zugriff am 07 06 2018].
- [23] Smatrics: Erste Stationen in Österreich und Deutschland, „Laden wie tanken: Startschuss für die ersten 350kW Ladestationen,“ 10 11 2017. [Online]. Available: <https://smatrics.com/news/erste-stationen-oesterreich-und-deutschland>. [Zugriff am 07 06 2018].
- [24] Statistik Austria: Bevölkerung 2015 nach Bundesland, Geschlecht und Erwerbsstatus, Abgestimmte Erwerbsstatistik 2015 mit Stichtag 31.10. Erstellt am 30.06.2017, 2015.
- [25] Statistik Austria: Pressemitteilung: 11.541-101/17, Bevölkerung Österreichs aktuell auf 8,77 Mio. gestiegen, Zuwachs von 0,83% im Jahr 2016, Wien, 23.05.2017.

-
- [26] Energymonitor: Consumption for each 1/4 hour (15.01.2018 - 21.01.2018), CISMO Clearing Integrated Services and Market Operations GmbH, [Online]. Available: <https://www.energymonitor.at/en/power/consumption/15minutes>. [Zugriff am 25.06.2018].
- [27] E-Control: Statistikbroschüre 2017, Wien: Energie-Control Austria.
- [28] Statistik Austria: Mikrozensus, Tabelle 11: Garagen und Autoabstellplätze nach Rechtsverhältnis, Gemeindegrößenklasse, Bundesland, Bauperiode, Ausstattungskategorie, Haushaltsgröße, Haushalts- und Familientyp, Mietvertragsdauer und Befristung des Mietvertrags, Wien, 2017.
- [29] Schnabl, A. et al: Zukünftiger dezentraler Infrastrukturbedarf in Österreich, Ökonomische Effekte von Investitionen in den Bereichen Elektromobilität, Energie und Wasser/Abwasser, Wien: Institut für Höhere Studien (IHS), 2018.
- [30] IHS Wien, Umweltbundesamt, TU Wien, DIW Berlin, Öko-Institut, CASE: Synthesebericht DEFINE - Development of an Evaluation Framework for the Introduction of Electromobility, Wien, 2015.
- [31] ASFINAG: E-Ladestationen auf ASFINAG-Netz, [Online]. Available: <https://www.asfinag.at/verkehrssicherheit/rasten/e-ladestationen/>. [Zugriff am 27.06.2018].
- [32] Perissinotto, D., Innogy SE, Asfinag Ladestationen alle 100 km, Experteninterview per E-Mail vom 27.06.2018.
- [33] S. von Roon, Netzausbau in Deutschland - Wozu werden neue Stromnetze benötigt, Sankt Augustin Berlin: KAS, 2014.
- [34] D. I. F. NORMUNG-DIN, DIN IEC 60038 IEC-Normspannungen, Berlin Wien Zürich: Beuth Verlag, 2012.
- [35] K. Heuck, K.-D. Dettmann und D. Schulz, Elektrische Energieversorgung: Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis, Springer-Verlag, 2013.
- [36] P. Contact, „Elektromobilität wird alltagstauglich: Schnellladen mit Ladeströmen bis 500 A,“ [Online]. Available: https://www.phoenixcontact.com/online/portal/pc?1dmy&urile=wcm%3apath%3a/pcde/web/corporate/press/press_information/8f2adee9-18f1-4cd9-b770-9e8f2a798970. [Zugriff am 19. Juli 2018].
- [37] R. Flosdorff und G. Hilgarth, Elektrische Energieversorgung, Teubner, 2003.
- [38] Ö. E-Wirtschaft, TAEV - Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an öffentliche Versorgungsnetze mit Betriebsspannungen bis 1000 Volt, mit Erläuterungen der einschlägigen Vorschriften., 2016.
- [39] E. DIN, „50160: Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks,“ German version EN, Bd. 50160, pp. 2011--02, 2011.

-
- [40] O. T. H. Regensburg, Informationsportal regelbare Ortsnetztransformatoren, 2018.
- [41] C. Leitinger, „Netzintegration von solarer elektrischer Mobilität-Auswirkungen auf das elektrische Energiesystem,“ 2011.
- [42] J. Klinger, Ladeinfrastruktur für Elektromobilität im privaten und halböffentlichen Bereich Planung · Errichtung · Wartung, Berlin: VDE VERLAG, 2018.
- [43] H. Stigler, C. GUTSCHI, G. NISCHLER, W. SÜßENBACHER und S. OTZASEK, „Auswirkungen zukünftiger Elektromobilität auf die österreichische Elektrizitätswirtschaft,“ Studie im Auftrag von Österreichs Energie, IEE TU Graz, Graz, 2010.
- [44] Angerer, F.: Feldtest Seitenstetten, Netzwerk F&E - 2. WS Ladeinfrastruktur der Zukunft, Traismauer: Amt der NÖ Landesregierung, 20.02.2018.
- [45] Consentec GmbH, Kurzgutachten zur Ermittlung von Verlustanteilen je Netzebene, 2013.
- [46] Statistik Austria: Mikrozensus, Tabelle 4: Haushaltsgröße und Überbelag nach Rechtsverhältnis, Gemeindegrößenklasse, Bundesland, Bauperiode, Ausstattungskategorie, Haushalts- und Familientyp, Mietvertragsdauer und Befristung des Mietvertrags, Wien, 2017.
- [47] Berger, D., Wien Energie, Kosten für Ladeinfrastruktur, Experteninterview per E-Mail vom 29.05.2018.
- [48] Wienernetze.at, „Netzanschluss, Preise und Bedingungen, Strom,“ [Online]. Available: https://www.wienernetze.at/wn/services/netzanschluss/netzanschluss_1/strom/Strom.html. [Zugriff am 2018 06 25].
- [49] Tatzber, F., EVN, Kosten für Ladestationen & Installation, Experteninterview per E-Mail vom 21.03.2018.
- [50] Nationale Plattform Elektromobilität (NPE): Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland, Statusbericht und Handlungsempfehlungen 2015, Berlin: Hrsg.: Gemeinsame Geschäftsstelle Elektromobilität der Bundesregierung (GGEMO), 2015.
- [51] Mocnik, W., ASFINAG, Ende 2018 alle 100 Kilometer Ladestationen, Experteninterview per E-Mail vom 23.03.2018.
- [52] Stöckl, C., Gutmann GmbH, Asfinag Ladestationen alle 100 km, Experteninterview per E-Mail vom 19.04.2018.
- [53] Perissinotto, D., Innogy SE, Asfinag Ladestationen alle 100 km, Experteninterview per E-Mail vom 09.04.2018.
- [54] Sillaber, Alfons: Leitfaden zur Verteilnetzplanung und Systemgestaltung: Entwicklung dezentraler Elektrizitätssysteme, Springer-Verlag, 2016.

-
- [55] H.-P. Vetö und C. Gererstorfer, „Abschätzung der Integration der erneuerbaren Energie in die bestehende Netzinfrastruktur (Projektnummer 10.157),“ Österreichs E-Wirtschaft, Wien, 2014.
- [56] Verbund, „Verbund,“ [Online]. Available: <https://www.verbund.com/de-at/privatkunden/themenwelten/wiki/netzbetreiber-stromanbieter>. [Zugriff am 27 06 2018].
- [57] Robinius, M., Linßen, J., et al: Comparative Analysis of Infrastructures: Hydrogen Fueling and Electric Charging of Vehicles, Jülich, DE: Forschungszentrum Jülich, Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment; ISBN 978-3-95806-295-5, 2018.
- [58] Statistik Austria: KFZ-Zulassungen 2017, Unterlagen zur Pressekonferenz, Wien, 10. Jänner 2018.
- [59] Kraftfahrbundesamt DE: Fahrzeugzulassungen (FZ), Neuzulassungen von Kraftfahrzeugen nach Umwelt-Merkmalen, FZ 14, Flensburg, 2016.
- [60] Chevrolet Bolt EV: Features, „Chevrolet,“ [Online]. Available: <https://www.chevrolet.com/byo-vc/client/en/US/chevrolet/bolt-ev/2018/bolt-ev/features/trims/?styleOne=397450>. [Zugriff am 10 08 2018].
- [61] KIA Pressemitteilung: BALD GEHT'S LOS, Crossover Kia Niro EV, „KIA Presse,“ 19 06 2018. [Online]. Available: <https://press.kia.com/at/at/home/press-releases/2018/kia-niro-ab-sofort-vorbestellbar.html>. [Zugriff am 10 08 2018].
- [62] Jaguar I-Pace: Spezifikationen und Preise, [Online]. Available: <https://www.jaguar.at/jaguar-range/i-pace/specifications/index.html>. [Zugriff am 10 08 2018].
- [63] Tesla Model 3 Long Range EPA Certification Documents via Teslarati.com, 05 07 2017. [Online]. Available: <https://cdn.teslarati.com/wp-content/uploads/2017/09/Tesla-Model-3-EPA-CSI-HTSLV00.0L13.pdf>. [Zugriff am 10 08 2018].
- [64] Pint, S., et al: Das neue vollelektrische Antriebssystem von Audi, Wien: 39. Internationales Wiener Motorensymposium 2018, 2018.
- [65] FEV Consulting: Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs von Fahrzeugen und ihre Auswirkung auf den Maschinen- und Anlagenbau und die Zulieferindustrie, Antrieb im Wandel, März 2018.
- [66] Grunditz, E., Thiringer, T., IEEE: Performance Analysis of Current BEVs Based on a Comprehensive Review of Specifications, IEEE TRANSACTIONS ON TRANSPORTATION ELECTRIFICATION, VOL. 2, NO. 3, SEPTEMBER 2016.
- [67] Schnabl, et al: Zukünftiger dezentraler Infrastrukturbedarf in Österreich, Präsentation, Wien: Institut für Höhere Studien, Februar 2018.