UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR WIEN
University of Natural Resources
and Life Sciences, Vienna

Masterarbeit

Machbarkeit der Umstellung auf E-Mobilität in der Logistik am Fallbeispiel STIEGL

verfasst von

Dipl.-Ing. Stefan Zwirschitz, BSc

im Rahmen des Masterstudiums

Umwelt- und Bioressourcenmanagement

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Wien, Oktober 2022

Betreut von:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Tobias Pröll

Mitbetreut von:

Dipl.-Ing. Dr. David Wöss
Dipl.-Ing. Thomas Märzinger

Institut für Verfahrens- und Energietechnik
Department für Materialwissenschaften und Prozesstechnik

Eidesstattliche Erklärung

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

Wien, am 27.09.2022



Dipl.-Ing. Stefan Zwirschitz

Kurzfassung

Der Verkehrssektor steht, aufgrund seiner hohen Emissionen und im Hinblick auf die Klimaziele, vor einer großen Herausforderung. Der Trend bei Neuzulassungen von PKW mit alternativen Antriebsformen war zuletzt stark steigend, diese Entwicklung steht bei leichten und schweren Nutzfahrzeugen jedoch noch bevor.

Die vorliegende Arbeit analysiert die Möglichkeit, den Fuhrpark der Stieglbrauerei zu Salzburg GmbH (STIEGL) auf einen elektrischen Fuhrpark umzustellen. Dabei wurden die Tourendaten der Firma STIEGL analysiert und neue Routenzusammensetzungen erstellt. Anhand der Routen wurde ein Fuhrpark zusammengestellt, und ein statisches Lademanagement simuliert. Dabei wurden verschiedene Größen von PV-Anlagen und ein stationärer Batteriespeicher miteinander verglichen. Neben der reinen Überprüfung der Machbarkeit wurden auch die Gesamtkosten der einzelnen Varianten für den Betrachtungszeitraum von 8 Jahren ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen, dass für eine Umstellung auf einen E-Fuhrpark, 17 E-LKW mit einer Reichweite von 250 km und 4 E-LKW mit einer Reichweite von 120 km notwendig sind. Die Gesamtkosten nach 8 Jahren sind bei den untersuchten Varianten mit E-Fuhrpark um rund 440.000 € günstiger als der dieselbetriebene Fuhrpark. Ebenfalls möglich ist ein autarker Betrieb des Fuhrparks, wobei dies mit deutlichen Mehrkosten verbunden wäre.

Die Arbeit kommt zu dem Schluss, dass eine Umstellung des Fuhrparks auf eine elektrische Antriebsform möglich ist und auch die Gesamtkosten dadurch reduziert werden können. Ebenfalls lässt sich dadurch die Abhängigkeit von Energieimporten reduzieren.

Abstract

Due to high emissions, the transport sector faces a major challenge in view of the climate targets. The trend in new registrations of electric vehicles as passenger cars has recently been rising significantly, but this trend is still ahead for light and heavy commercial vehicles.

This thesis analyzes the option of converting the vehicle fleet of the Stieglbrauerei zu Salzburg GmbH (STIEGL) to an electric vehicle fleet. The tour data from the STIEGL company were analyzed and new route compositions created. Based on the routes, a fleet of vehicles was constituted and static charging management was simulated. Various sizes of PV systems and a stationary battery storage system were compared with each other. In addition to the feasibility check, the total costs of ownership for the observation period of 8 years were determined.

The results show that switching to an electric vehicle fleet requires 17 electric trucks with a range of 250 km and four electric trucks with a range of 120 km. The total costs of ownership after 8 years for the variants with an electric vehicle fleet are approximately 440,000€ cheaper than the diesel-powered fleet. Self-sufficient operation of the vehicle fleet is also possible, although this would involve significant additional costs.

The conclusion of this theses is that a conversion of the vehicle fleet to an electric vehicle fleet is possible and as a result the overall costs can also be reduced. In addition, this also reduces dependency on energy imports.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung II

Kurzfassung III

Abstract IV

Inhaltsverzeichnis V

1 Einleitung 1

1.1 Hintergrund und Motivation 1

1.2 Forschungsfrage 1

1.3 Methoden 3

2 Grundlagen 4

2.1 Vorgaben und Maßnahmen für den Verkehrssektor 4

2.2 Förderungen von E-Fahrzeugen 6

2.3 Ökologische Betrachtung von E-Fahrzeugen 7

2.4 Lademanagement 10

2.5 E-LWK Grundlagen 12

2.6 Batterietechnologie 14

2.7 Photovoltaik Anlagen 21

3 Methodologie 27

3.1 Das Projekt MEGAWATT-LOGISTIK 27

3.2 Parameter für die Berechnung 27

3.3 Ablauf der Berechnung 36

4 Ergebnisse 40
4.1 Fuhrpark 40
4.2 Energiebedarf und Netzanschluss 41
4.3 Investitionskosten und Betriebskosten 41
4.4 Total Costs of Ownership 44
4.5 Berücksichtigung der Wartungskosten 45
4.6 Berücksichtigung der Förderungen 46
4.7 Autarker Betrieb 47
4.8 CO_2 Emissionen des LKW-Fuhrparks 49
5 Diskussion 51
6 Conlusio 54
7 Literaturverzeichnis 55
8 Anhang 61
8.1 Routenzuordnung 61
8.2 Total Investment Costs 66
8.3 Betriebskosten 66
8.4 Total Costs of Ownership 67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Batteriegröße in kWh in Abhängigkeit von der Reichweite und der Gewichtsklasse (Tanco, Cat and Garat, 2019, p. 1357) 14
Tabelle 2: Durchschnittsgeschwindigkeit der einzelnen Touren (Eigene Darstellung, Datenquelle: Technoloogy, 2021) 29
Tabelle 3: Reichweite und Batteriegröße der drei definierten E-LKW 29
Tabelle 4: Verbrauch und Ladeleistung von Renault Zoe, VW ID.3 und Tesla Model 3 (Quellen: (Renault, 2022), (Volkswagen), (Tesla, 2022)) 30
Tabelle 5: Ladesäulen mit 22 kW (go-e GmbH; Wallbox Chargers; Geizhals) 31
Tabelle 6: Zusammensetzung des optimierten Fuhrparks 40
Tabelle 7: Benötigter Netzanschluss Tagsüber (PKW) und Nachts (LKW) 41
Tabelle 8: Grundstücke im Eigentum der Stiegl Immobilien GmbH am Standort Salzburg 48
Tabelle 9: Kosten für einen autarken Betrieb des Fuhrparks 49
Tabelle 10: Emissionen des LKW-Fuhrparks in Tonnen CO_2-Äquivalente pro Jahr 50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Treibhausgas-Emissionen (gesamt) in der EU und in Österreich von 1990 bis 2017 (Rechnungshof Österreich, 2021)..... 5
Abbildung 2: Treibhausgas-Emissionen und Ziele für Österreich (Umweltbundesamt, 2021a)..... 6
Abbildung 3: Vergleich des Energieverbrauchs eines Verbrennungs-PKW mit einem E-PKW bei einer Distanz von 100 km; Kalkulation von Tank- zu Antriebsenergie (Holmberg and Erdemir, 2019) 7
Abbildung 4: Energieumwandlung eines Verbrennungs-PKW; Kalkulation von Tank- zu Antriebsenergie (Holmberg and Erdemir, 2019) 8
Abbildung 5: Energieumwandlung eines Elektro-PKW; Kalkulation von Tank- zu Antriebsenergie (Holmberg and Erdemir, 2019) 8
Abbildung 6: Energieverbrauch eines Klasse 6 Diesel-LKW und E-LKW (Zhou *et al.*, 2017) 9
Abbildung 7: Treibhausgasemissionen von Schwergewicht-LKW unterschiedlicher Antriebsarten (Sen, Ercan and Tatari, 2017) 10
Abbildung 8: Konzepte von elektrischen Straßensystemen (ERS) (Netzer, 2021, p. 12) 11
Abbildung 9: Batteriekosten pro kWh (Tanco, Cat and Garat, 2019, p. 1358)..... 13
Abbildung 10: Funktionsweise einer Lithium-Ionen Zelle (Thackeray, Wolverton and Isaacs, 2012, p. 7857)..... 15
Abbildung 11: Vergleich verschiedener Kathoden-Materialien (Liu, Placke and Chau, 2022, p. 4067) 16
Abbildung 12: Vergleich verschiedener Anoden-Materialien (Liu, Placke and Chau, 2022, p. 4067) 17
Abbildung 13: Entwicklung der Coloumbic Efficiency und der Kapazität einer LFP Zelle und einer NMC Zelle (Yang *et al.*, 2018, p. 492)..... 19
Abbildung 14: Degradation in Prozent einer widerverwendeten großen (a) und kleiner (b) Batterie (Assuncao, Moura and de Almeida, 2016, p. 126) 20

Abbildung 15: Marktanteile der verschiedenen PV-Technologien im Jahr 2021 (Feldman *et al.*, 2022, p. 53) 22
Abbildung 16: Effizienz verschiedener PV Technologien in der Forschung zwischen 1975 und 2022 (NREL, 2022) 25
Abbildung 17: Weltkarte der CO2e Emissionen bei der Stromproduktion mittels multikristalliner Silicium PV-Anlagen unter Berücksichtigung der Transportwege und der solaren Einstrahlung (Ito *et al.*, 2016, p. 172) 26
Abbildung 18: Durchschnittliche Globalstrahlung und Leistung für eine 150, 300 und 450 kW PV-Anlage für den Standort Salzburg (Eigene Darstellung, Betrachtungszeitraum 16.03.2006 bis 31.12.2021) (ZAMG, 2022) 33
Abbildung 19: Mittlere Strompreisentwicklung von Nicht-Haushalten 2016-2020 (eigene Darstellung); (E-Control, 2022) 34
Abbildung 20: Sortierung der Routen, Zuordnung zu LKWs und festlegen der LKW-Größe (schematische eigene Darstellung) 37
Abbildung 21: Lademanagement bei PV Produktion 39
Abbildung 22: Abbildung der LKW am Standort 40
Abbildung 23: Betriebskosten und Total Investment Costs (TIC) für Diesel- und E-LKW Szenarien 42
Abbildung 24: Zusammensetzung der Total Investment Costs (TIC) der untersuchten Szenarien 43
Abbildung 25: Total Costs of Ownership über 8 Jahre 45
Abbildung 26: Total Costs of Ownership inkl. Wartungskosten über 8 Jahre 46
Abbildung 27: Total Costs of Ownership unter Berücksichtigung von Förderungen und Wartungskosten über 8 Jahre 47
Abbildung 28: Emissionen des LKW-Fuhrparks in Tonnen CO_2e in 8 Jahren 50

Abkürzungsverzeichnis

CO_2e	CO_2 Äquivalente
E-LKW	rein elektrisch betriebene LKW
E-PKW	rein elektrisch betriebene PKW
K_{LKW}	Kosten für einen LKW
kWp	Kilowatt peak (Spitze)
TCO	Total Cost of Ownership

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Um den Klimawandel zu begrenzen und entsprechend negative Auswirkungen zu verhindern, beschlossen die Vereinten Nationen 2015 bei der 21. Weltklimakonferenz in Paris, die Erderwärmung auf deutlich unter 2°C im Vergleich zum vorindustriellen Niveau zu begrenzen, wobei sich die Staaten bemühen, die Steigerung auf unter 1,5°C zu halten (Umweltbundesamt, 2021b). Im Zuge dessen, haben Staaten und Staatengemeinschaften weitere Ziele festgelegt, damit die übergeordneten Klimaziele von Paris eingehalten werden können. Betrachtet man die Sektoren mit dem größten CO_2e-Ausstoß, so fällt dem Verkehr mit knapp einem Drittel der gesamten CO_2e-Emissionen (Europäisches Parlament, 2019) eine besondere Bedeutung zu. Ein Erreichen der Klimaziele von Paris ist ohne eine Dekarbonisierung des Verkehrssektors nicht möglich, weshalb diese auch in europäischen und nationalen Zielen festgehalten ist. Während der Anteil elektrisch betriebener Fahrzeuge in der Kategorie der PKW stetig steigt und bereits rund 14% der Neuzulassungen ausmacht (ORF, 2022), ist diese Entwicklung bei den Nutzfahrzeugen noch nicht erkennbar. Dabei haben schwere und leichte Nutzfahrzeuge einen ganz wesentlichen Anteil an den verkehrsbedingten Emissionen im Straßenverkehr (Europäisches Parlament, 2019). Es ist daher notwendig, diesen Sektor genauer zu betrachten, und auch hier die Möglichkeiten eines Umstiegs auf nachhaltigere Antriebsformen zu prüfen.

1.2 Forschungsfrage

Die Arbeit beschäftigt sich mit den Herausforderungen bei einer Elektrifizierung des Verkehrs bei der Stieglbrauerei zu Salzburg GmbH (STIEGL) und beschreibt Voraussetzungen für dessen Umsetzung. Dabei geht es primär um eine

Umstellung des Fuhrparks von Diesel-LKW auf Elektro-LKW, welche anhand von Routendaten ausgearbeitet werden soll. Weiters ist ein wesentlicher Punkt das Lademanagement am Standort, bei welchem neben den E-LKW auch die Mitarbeiter-PKW (E-PKW) und Staplerfahrzeuge miteinbezogen werden sollen.

Neben dem Konzept für die Umstellung werden auch ökologische Vor- und Nachteile beschrieben und Möglichkeiten ausgearbeitet, um den Betrieb möglichst ökologisch zu gestalten.

Damit das Konzept für eine Elektrifizierung des Verkehrs auch seitens der Stieglbrauerei zu Salzburg GmbH hinsichtlich einer möglichen Umsetzung bewertet werden kann, sind auch die Total Cost of Ownership (TCO) zu berechnen.

Folgende Forschungsfragen lassen sich daher formulieren:

- Welche spezifischen Anforderungen an eine Fahrzeugflotte können anhand der vorliegenden Bewegungsdaten für STIEGL ermittelt werden?
- Wie kann eine mögliche Zusammensetzung der Fahrzeugflotte anhand der am Markt befindlichen E-LKW Modelle aussehen?
- Welche Anforderungen werden bei einer Elektrifizierung des Verkehrs (LKW, PKW, Stapler, etc.) am Standort an die Ladeinfrastruktur, vor allem hinsichtlich Anzahl und Anschlussleistung der Ladestationen, gestellt?
- Durch welche Maßnahmen kann ein Betrieb der E-Fahrzeugflotte möglichst nachhaltig erfolgen?
- Wie verhalten sich die Kosten (TCO) bei einem Umstieg auf einen E-Fuhrpark im Vergleich zur Beibehaltung eines dieselbetriebenen Fuhrparks?

1.3 Methoden

Die Grundlage der Arbeit bietet einerseits eine fundierte Literaturrecherche und andererseits die von STIEGL zu Verfügung gestellten Routendaten des Fuhrparks.

Bei der Literaturrecherche wurde hauptsächlich auf das von der Universität für Bodenkultur Wien angebotene „Web of Science“ zurückgegriffen, über welches diverse Publikationen abgerufen werden können. Erweitert wurde die Suche via Google bzw. Google Scholar und die Bibliothek der Technischen Universität Wien. Ausgehend von ersten zur Thematik passenden Journals und Büchern, wurde die Suche im Schneeballprinzip fortgesetzt, um die Literaturrecherche breiter und umfassender zu gestalten.

Die seitens STIEGL zu Verfügung gestellten Daten beziehen sich auf eine Arbeitswoche und geben die gefahrenen Distanzen der einzelnen LKW am jeweiligen Tag an.

Die Touren wurden anhand der Distanz und der Dauer neu zusammengestellt und dadurch die spezifischen Anforderungen an den Fuhrpark ermittelt, sowie ein Konzept für das Lademanagement entwickelt. Die Programmierung des Prozesses erfolgte mittels Python.

2 Grundlagen

2.1 Vorgaben und Maßnahmen für den Verkehrssektor

Im Juni 2021 ist das Europäische Klimagesetz in Kraft getreten. In diesem ist eine Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55% gegenüber dem Stand von 1990 festgeschrieben und die Klimaneutralität bis zum Jahr 2050 festgelegt (Europäische Kommission, 2021a). Da der Verkehr einen Anteil von nahezu 30% der gesamten CO_2-Emissioen in der EU hat (Europäisches Parlament, 2019), spielt dieser eine wesentliche Rolle beim Erreichen der Klimaziele. Im Jahr 2016 entfielen 72% der verkehrsbedingten Emissionen auf den Straßenverkehr, bei welchem wiederum schwere und leichte Nutzfahrzeuge einen Anteil von 38,1% haben (Europäisches Parlament, 2019). Um die Klimaziele 2030 bzw. 2050 zu erreichen, wurden seitens der EU-Kommission ein Maßnahmenpaket vorgestellt, in welchem eine Reduktion der PKW CO_2e Emissionen bis 2030 um 55% und eine komplette Emissionsfreiheit bis 2035 für Neuwagen festgelegt ist. Neben den Maßnahmen für PKW ist auch für neuzugelassene leichte Nutzfahrzeuge eine Reduktion der CO_2e Emissionen von 50% bis 2030 und eine Emissionsfreiheit bis 2035 vorgesehen (Europäische Kommission, 2021a). Im Juli 2021 gab die Europäische Kommission ein Vorschlagpaket für die Erreichung der Klimaziele 2030 unter dem Namen „Fit for 55“ heraus. Darin vorgeschlagen ist eine Ausweitung des Emissionshandels auf die Sektoren Verkehr und Gebäude. Für den Schiffsverkehr soll der Emissionshandel schrittweise im Zeitraum 2023-2025 eingeführt werden und für die Luftfahrt die kostenlosen Emissionszertifikate abgeschafft werden. Für den Straßenverkehr und den Gebäudesektor soll der Emissionshandel 2026 in einem separaten System eingeführt werden. Der Emissionshandel soll bei den Brennstoffanbietern mit einer definierten Höchstgrenze ansetzen, um nicht jeden einzelnen Haushalt oder

Verkehrsteilnehmer direkt zur Teilnahme zu verpflichten (Europäische Kommission, 2021b).

Auf nationaler Ebene betrachtet, sind im Jahr 2017 die Treibhausgas-Emissionen gegenüber 1990 um +4,6% gestiegen, während der EU-Schnitt bei -23,5% liegt (siehe Abbildung 1) (Rechnungshof Österreich, 2021).

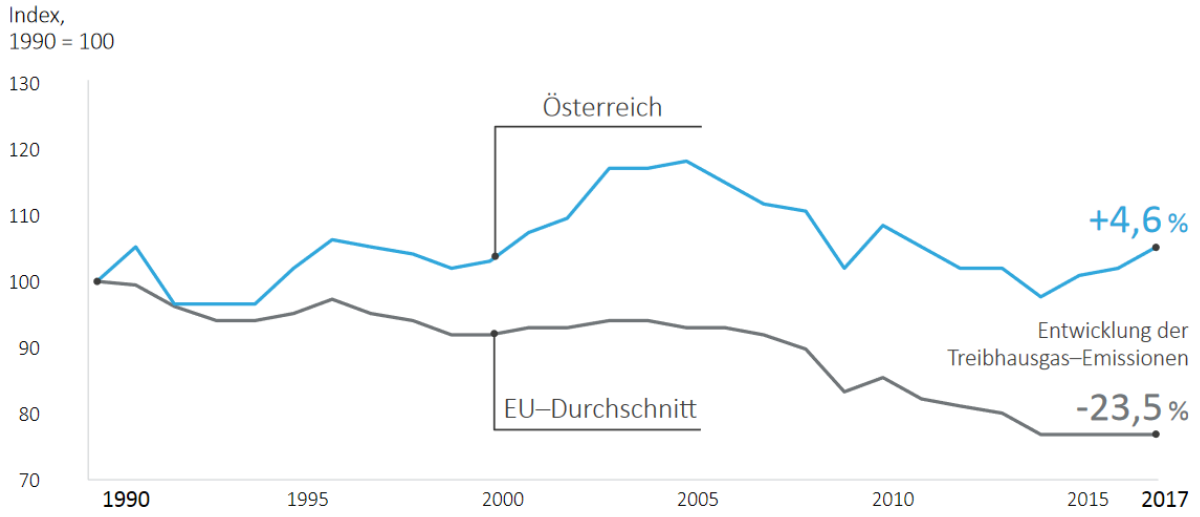


Abbildung 1: Treibhausgas-Emissionen (gesamt) in der EU und in Österreich von 1990 bis 2017 (Rechnungshof Österreich, 2021)

Österreich verfehlt, wie in Abbildung 2 ersichtlich, seit 2017 (bis 2019) seine jährlichen Klimaziele (Rechnungshof Österreich, 2021), welche jedoch noch vor dem Europäischen Klimagesetz und dem Vorschlagspaket „Fit for 55“ definiert wurden. Durch die europäischen Vorgaben ist dementsprechend mit einer Verschärfung der nationalen Ziele zu rechnen, welche noch für 2021 erwartet werden (Umweltbundesamt, 2021a). Für die mit Stand Ende 2019 beschlossenen Maßnahmen wird bis 2030 eine Reduktion von nur 21% und bis 2050 von nur 55% der CO2-Emissionen gegenüber dem Basisjahr 1990 prognostiziert (Rechnungshof Österreich, 2021).

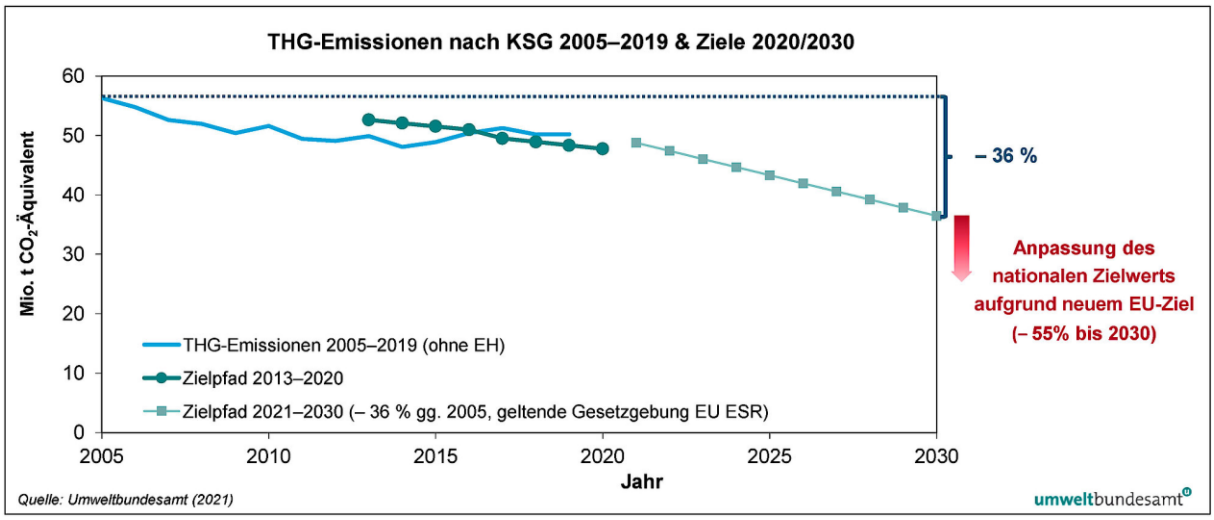


Abbildung 2: Treibhausgas-Emissionen und Ziele für Österreich (Umweltbundesamt, 2021a)

2.2 Förderungen von E-Fahrzeugen

Um den Umstieg auf elektrisch betriebene Fahrzeuge attraktiv zu machen, gibt es seit Jahren Förderungen vom Bund, welche über den Klima- und Energiefonds abgewickelt werden. So werden E-PKW und leichte Nutzfahrzeuge unter 2 t für Unternehmen mit 1.000€ vom Bund gefördert (Klima- und Energiefonds, 2022). Leichte Nutzfahrzeuge zwischen 2 t und 2,5 t werden mit 5.500€ vom Bund bezuschusst und leichte Nutzfahrzeuge über 2,5 t mit 10.500€ (Klima- und Energiefonds, 2022). Hinzu kommen Förderungen für die Ladeinfrastruktur (Klima- und Energiefonds, 2022) und steuerliche Vorteile in Bezug auf die Absetzbarkeit von Betriebs- und Wartungskosten (WKO, 2022).

Im Bereich der für diese Arbeit relevanten schweren Nutzfahrzeuge (>3,5 t), werden die Förderungen über die österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) abgewickelt. Dabei werden 80% der Mehrkosten für E-LKW im Vergleich zu Diesel-LKW übernommen, sowie 40% der Investitionskosten für die Infrastruktur (FFG, 2022).

2.3 Ökologische Betrachtung von E-Fahrzeugen

Holmberg und Erdimir (2019) untersuchten in ihrer Arbeit die Reibungsverluste und die CO_2-Emissionen von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren und jenen von Elektromotoren. Bei einem typischen PKW mit Verbrennungsmotor werden nur 21% der im Treibstoff enthaltenen Energie in Bewegungsenergie des Fahrzeugs umgewandelt (siehe Abbildung 4), während bei E-PKWs etwa 77% der gespeicherten Energie für die Fortbewegung genutzt werden können (siehe Abbildung 5). In Abbildung 3 ist die zu ladende bzw. zu tankende Energie ersichtlich, um einen PKW 100 km weit fortzubewegen. Während der Energieeinsatz beim Verbrennungs-PKW 230 MJ ausmacht, liegt dieser beim E-PKW bei nur 65 MJ.

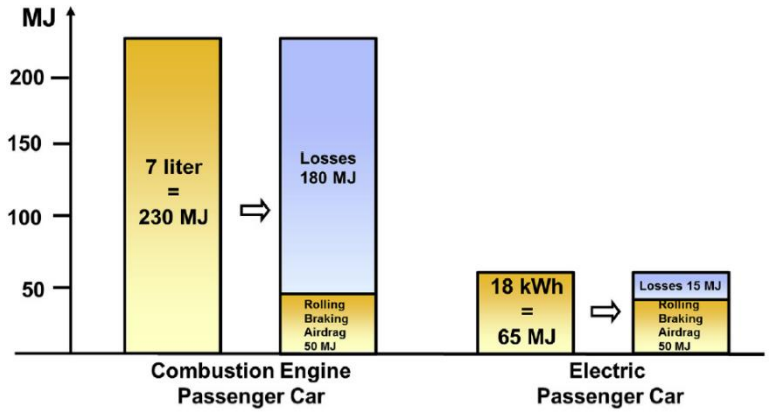


Abbildung 3: Vergleich des Energieverbrauchs eines Verbrennungs-PKW mit einem E-PKW bei einer Distanz von 100 km; Kalkulation von Tank- zu Antriebsenergie (Holmberg and Erdemir, 2019)

Vergleicht man Abbildung 4 und Abbildung 5 miteinander, so fallen die hohen thermischen Verluste bei dem Verbrennungs-PKW ins Auge. Während beim

E-PKW 80% der gespeicherten Energie als mechanische Energie zu Verfügung stehen, ist dieser Anteil bei dem Verbrennungs-PKW nur bei 38%.

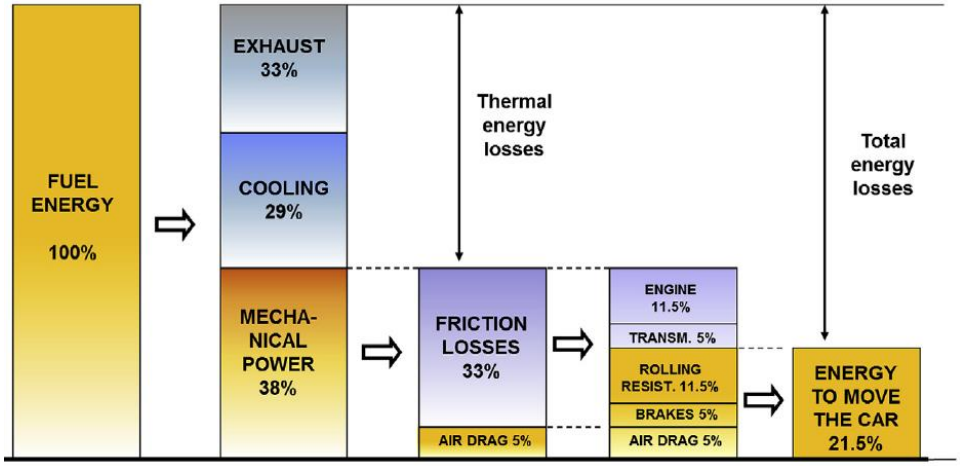


Abbildung 4: Energieumwandlung eines Verbrennungs-PKW; Kalkulation von Tank- zu Antriebsenergie (Holmberg and Erdemir, 2019)

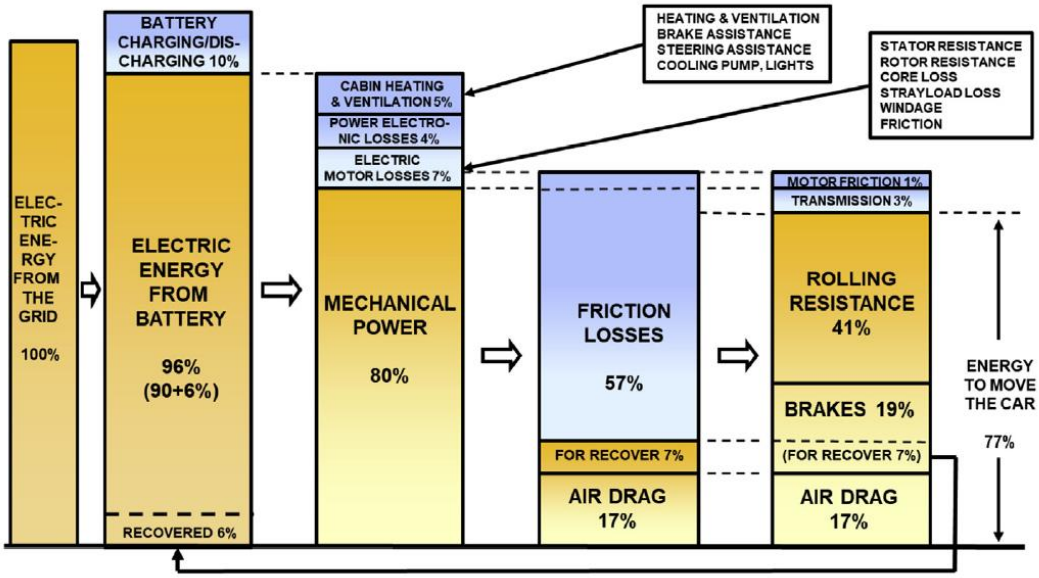


Abbildung 5: Energieumwandlung eines Elektro-PKW; Kalkulation von Tank- zu Antriebsenergie (Holmberg and Erdemir, 2019)

Die von Zhou et al. (2017) durchgeführte Studie bezieht sich auf Nutzfahrzeuge und zeigt die Abhängigkeit des Energieverbrauchs von der Beladung eines LKW. So wird der Diesel-LKW bei voller Beladung deutlich effizienter als bei Teilbeladung. Der E-LKW wird zwar ebenfalls effizienter, jedoch nicht in dem

Ausmaß wie der Diesel-LKW. Die steigende Effizienz bezogen auf das Kilogramm transportierte Masse, lässt sich durch das Gewicht des Fahrzeuges erklären, welches bei niedriger Beladung einen höheren Anteil am Gesamtgewicht hat. Der Unterschied zwischen Diesel- und Elektro-LKW ist darauf zurückzuführen, dass der Verbrennungsmotor sehr empfindlich auf die Motorlast reagiert, während der Wirkungsgrad beim Elektromotor relativ konstant bleibt (Zhou *et al.*, 2017). In Abbildung 6 ist ersichtlich, dass in der in Kanada durchgeführten Studie der E-LKW unter allen Bedingungen einen niedrigeren Energieverbrauch vorweisen kann.

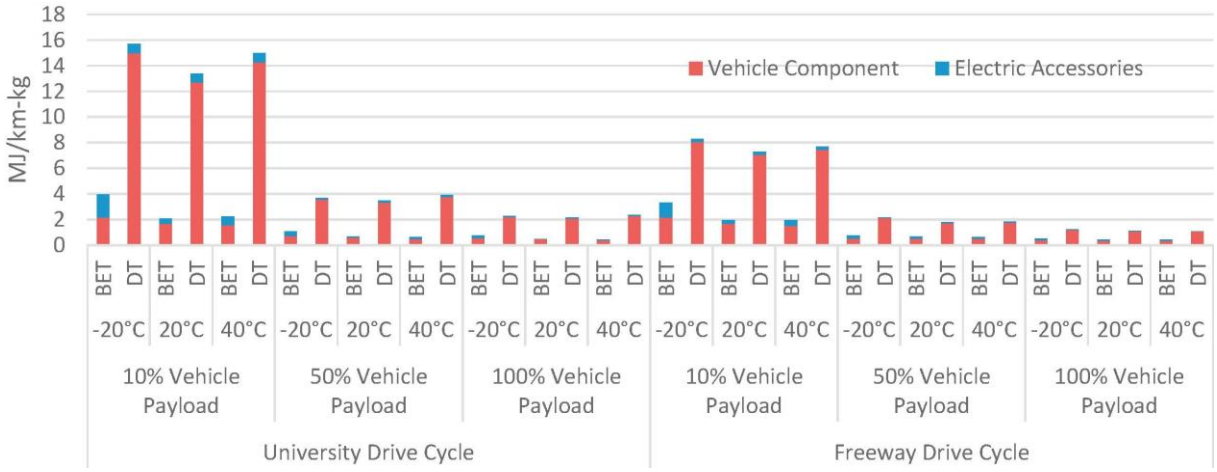


Abbildung 6: Energieverbrauch eines Klasse 6 Diesel-LKW und E-LKW (Zhou *et al.*, 2017)

Betrachtet man die Emissionen bei der Produktion eines E-LKW, so kommen Lee and Thomas (2017) zu dem Ergebnis, dass diese um rund 30% höher sind als bei einem Diesel-LKW. Betrachtet man den gesamten Lebenszyklus eines LKW, so macht die Herstellung jedoch nur einen untergeordneten Anteil der Gesamtemissionen aus (siehe Abbildung 7). Bei der Studie von Zhao et al. (2016) ist der Anteil der Herstellung deutlich höher, dennoch ist dieser nur ein Bruchteil der Gesamtemissionen. Ausschlaggebender ist in beiden Studien die Betriebsphase, wodurch der hinterlegte Strommix an Bedeutung gewinnt. Beide Studien wurden in den USA durchgeführt, wobei der Anteil der Erneuerbaren deutlich geringer angesetzt wurde, als dies in Österreich der Fall ist. Jedenfalls

zeigen die Studien, dass E-LKW einen Beitrag zu Reduktion der Treibhausgase im Verkehrssektor leisten können, sofern diese mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen betrieben werden.

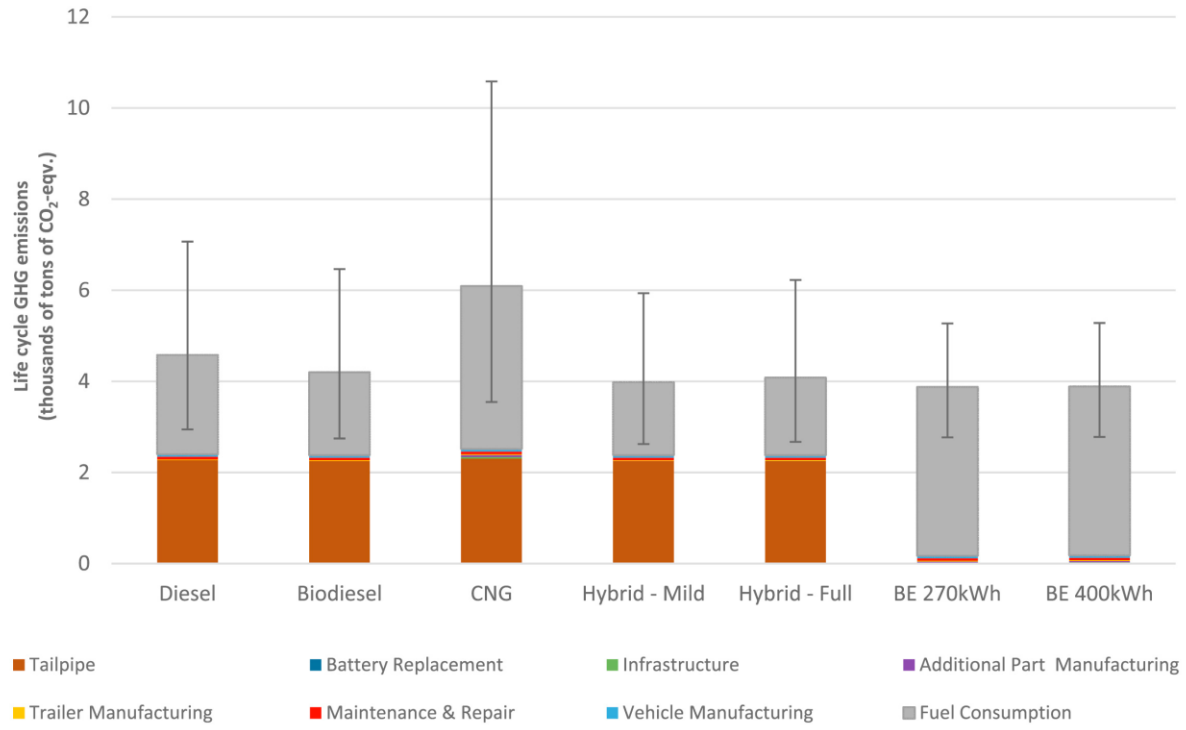


Abbildung 7: Treibhausgasemissionen von Schwergewicht-LKW unterschiedlicher Antriebsarten (Sen, Ercan and Tatari, 2017)

2.4 Lademanagement

In der Literatur werden 3 Arten des Lademanagements beschrieben (Welzel *et al.*, 2021):

1. Das klassische Lademanagement, in welchem alle Fahrzeuge mit maximaler Leistung geladen werden, bis die Maximalkapazität des Netzanschlusses erreicht ist. Danach werden alle Fahrzeuge mit gleichmäßig verringerter Leistung geladen.
2. Das statische Lademanagement, in welchem die Ladeleistung jedes Fahrzeugs individuell nach Ankunfts- und Abfahrtszeit sowie nach den

verfügbaren Stromquellen (PV-Anlage, Netzanschluss) gesteuert wird. Dabei sind sämtliche Parameter vorab bekannt und es wird ein Ladeplan für alle Fahrzeuge erstellt.

3. Das dynamische Lademanagement, welches wie das statische Lademanagement Ankunfts- und Abfahrtszeit sowie die verfügbaren Stromquellen berücksichtigt. Es sind jedoch die Parameter vorab nicht bekannt, wodurch das dynamische Lademanagement für jedes Intervall eines Zeitraumes berechnet werden muss.

Das klassische Lademanagement bedarf keiner besonderen Steuerung und wird bis heute vielfach eingesetzt. Im Gegensatz dazu stecken hinter dem statischen und dynamischen Lademanagement Optimierungsmodelle, welche dazu führen, dass eine PV-Anlage optimal für das Laden eingesetzt werden kann und Kosten für den Netzanschluss sowie die Stromkosten minimiert werden können. Weiters führt dieser optimierte Verbrauch der selbsterzeugten Sonnenenergie zu einer Reduktion der Emissionen und leistet einen Beitrag zur Stabilisierung des Stromnetzes.

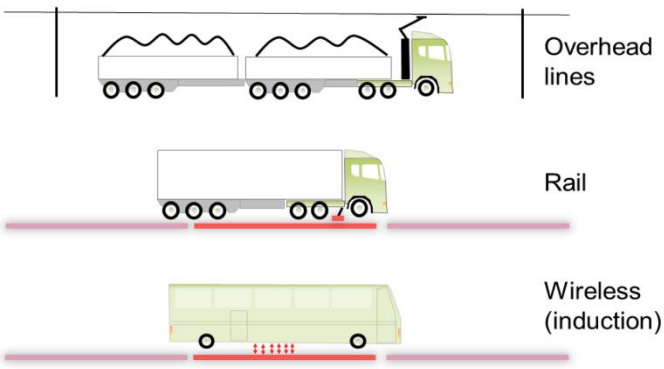


Abbildung 8: Konzepte von elektrischen Straßensystemen (ERS) (Netzer, 2021, p. 12)

Neben dem Lademanagement an Ladesäulen existieren auch noch andere Formen zum Laden von E-LKW, wie E-Autobahnen und Batteriewechsel. In Abbildung 8 sind die Konzepte von elektrischen Straßensystemen (ERS) schematisch dargestellt. Durch den Einsatz von E-Autobahnen können zentrale Herausforderungen im Straßengütertransport wie Nutzlastbeschränkungen, hohe Investitionskosten und lange Ladezeiten gelöst werden (Netzer *et al.*, 2022). Die von Netzer et al. (2022) durchgeführte Studie zeigt, dass durch den Einsatz von Oberleitungen auf Österreichs Autobahnen, die

Batteriekapazität von E-LKW für alle Szenarien auf unter 350 kWh reduziert werden kann und die Investitionskosten in Batterien und Ladeinfrastruktur um bis zu 65% reduziert werden kann.

Batteriewechsel-Stationen könnten leichter im Straßennetz implementiert werden, da hierbei bestehende Tankstellen leicht umgerüstet werden könnten (Vallera, Nunes and Brito, 2021). Die Batterien der E-Fahrzeugen werden dabei mit einem Roboter automatisch gewechselt, wobei für einen Akkupack rund eine Minute benötigt wird. Durch standardisierte Batterien könnten PKW und LKW die Stationen gleichermaßen nutzen, wobei bei einem PKW der Tausch eines Batteriemodules und bei LKW der Tausch von rund 20 Batteriemodulen notwendig ist (Vallera, Nunes and Brito, 2021). Die Batteriewechseltechnologie hat den Vorteil, dass die Akkus langsam geladen werden können, wodurch das Stromnetz deutlich weniger belastet wird und die Batterien geschont werden (Vallera, Nunes and Brito, 2021). Es muss jedoch beachtet werden, dass für einen Einsatz von Batteriewechsel-Stationen ein hoher Grad an Standardisierung erforderlich ist. Dafür müssten sich PKW/LKW Hersteller sowie Batteriehersteller auf einen gemeinsamen Standard einigen. Durch die hohe Innovationskraft und schnelle Weiterentwicklung im Batteriesektor erscheint diese Standardisierung als die größte Herausforderung bei diesem Konzept.

2.5 E-LWK Grundlagen

Als größtes Hindernis für den Umstieg auf E-LKW wird der hohe Anschaffungspreis, gefolgt von der Ladeinfrastruktur angegeben. Die Reichweite wird erst danach an dritter Stelle genannt. Die größte Motivation für den Umstieg auf E-LKW stellt die Niedrig-Emissions-Zone dar. Deutlich geringere Motivatoren sind die TOC und die geringen Lärmemissionen (Anderhofstadt and Spinler, 2019).

Lee and Thomas (2017) rechnen mit Anschaffungskosten von $150.000 für einen 80 kWh E-LKW und mit Kosten von $180.000 für einen 120 kWh E-LKW, wobei der Preis für den LKW ohne Batterie mit $90.000 angegeben wird. Dabei beziehen sich Lee and Thomas auf einen 11,8t LKW mit einem 120 kW Motor. Mareev et al. (2018) beschreiben die Kosten für einen 40t LKW mit €60.000 zuzüglich 17 €/kWh für den E-Motor und 21,5 €/kWh für die Leistungselektronik.

Bei den Kosten für die Batterie nehmen Lee and Thomas (2017) einen Wert von 250 $/kWh für das Jahr 2020 an. Mareev et al. (2018) kommen im Jahr 2018 für die höherwertigen Zellen auf einen Wert von 300 €/kWh, wobei eine Reduktion von -6,7%/a angegeben wird. Tanco et al. (2019) verglichen verschiedene Publikationen und stellten dies übersichtlich in Abbildung 9 dar, wobei zu erkennen ist, dass in den nächsten 10 Jahren eine Halbierung der Preise von rund 200 $/kWh (2020) auf rund 100 $/kWh (2030) zu erwarten ist.

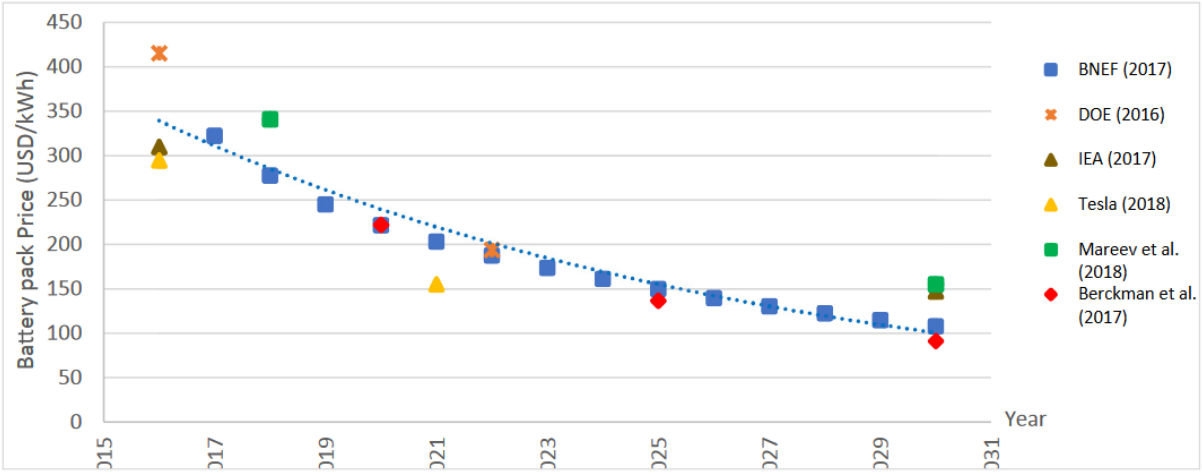


Abbildung 9: Batteriekosten pro kWh (Tanco, Cat and Garat, 2019, p. 1358)

Der Verbrauch eines E-LKW zwischen 7,5t und 12t liegt gemäß der Studie von Taefi et al. (2017) zwischen 0,73 und 0,75 kWh/km. Die von Tanco et al. (2019) durchgeführte Studie kommt zu ähnlichen Ergebnissen und ist in Tabelle 1 dargestellt. Dabei entspricht die Gewichtsklasse MDT (medium-duty trucks, 6,4-15t) den untersuchten LKWs von Taefi et al. (2017). Die Gewichtsklasse LDT

(light-duty trucks) definiert LKW der Klasse 2-3 mit 3,5 bis 6,4t, wohingegen die Gewichtklasse HDT (heavy-durty trucks) die Klasse 8 mit mehr als 15t angibt.

Weight class	Urban (100 km)	Regional (200 km)	Long-haul (500 km)
LDT	82.2	108.72	373.8
MDT	124.4	149.76	519.6
HDT	210.8	312	960.6

Tabelle 1: Batteriegröße in kWh in Abhängigkeit von der Reichweite und der Gewichtsklasse (Tanco, Cat and Garat, 2019, p. 1357)

2.6 Batterietechnologie

2.6.1 Lithium-Ionen Akkus

Lithium-Ionen Zellen bestehen aus den zwei Elektroden Anode und Kathode, einem ionenleitfähigen Elektrolyt und einem Separator, welcher die Elektroden voneinander trennt und einen Kurzschluss der Zelle verhindert (Schallauer, 2020). Dabei wandern positiv geladene Lithium-Ionen von der Anode zur Kathode, wodurch ein Fluss der negativ geladenen Elektronen über äußerem Stromkreis entsteht (siehe Abbildung 10). Beim Aufladen wird der Stromfluss umgedreht, wodurch die Positiven Lithium-Ionen wieder durch den Separater zurück zu Anode wandern.

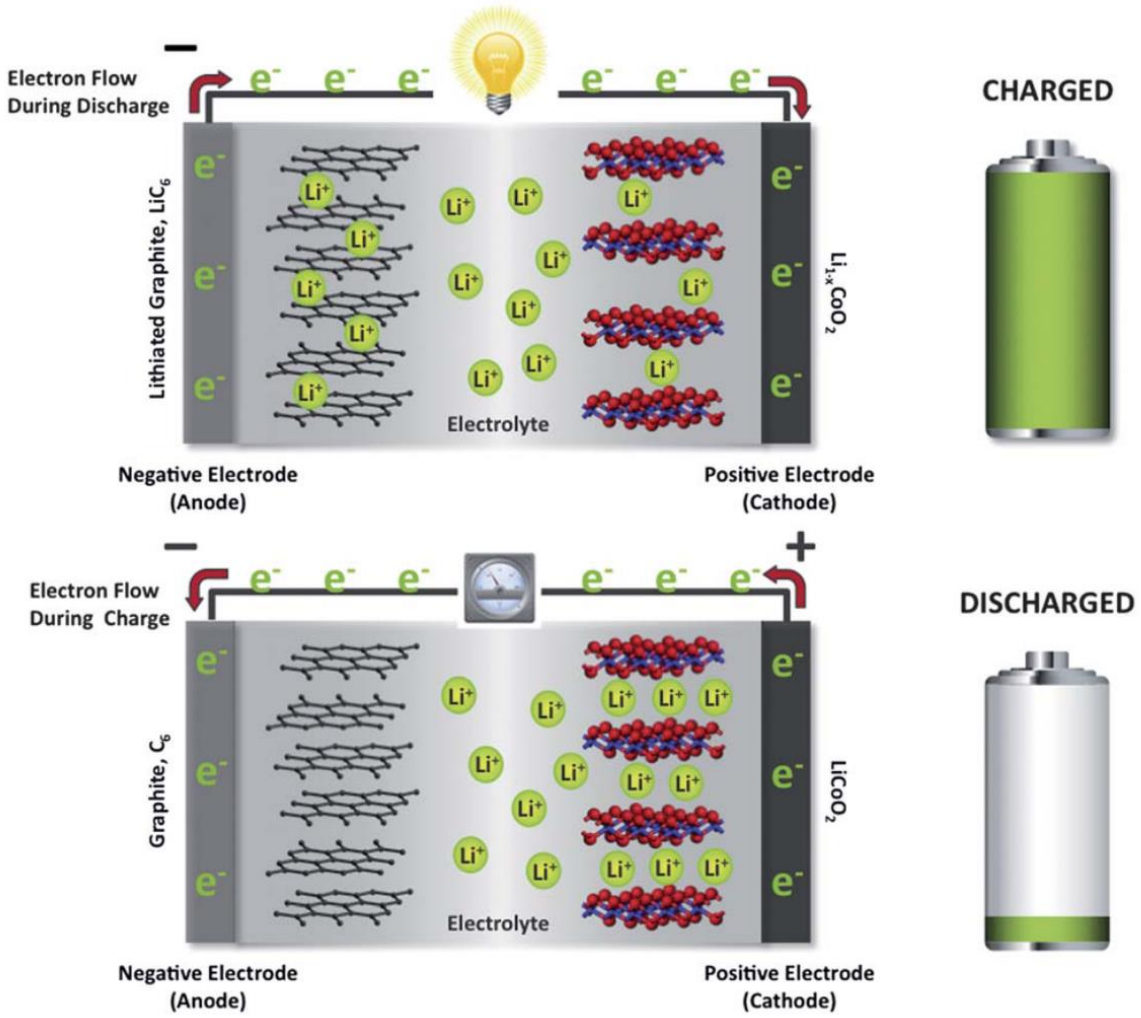


Abbildung 10: Funktionsweise einer Lithium-Ionen Zelle (Thackeray, Wolverton and Isaacs, 2012, p. 7857)

Bei den Kathoden der Lithium-Ionen Batterien finden heute verschiedenste Materialen Anwendung. Besonders weit verbreitet im Sektor der E-Mobilität sind Kathoden aus $LiFePO_4$, da sich diese durch ihre hohe Sicherheit, hohe Anzahl an Zyklen und geringe Kosten auszeichnen (Liu, Placke and Chau, 2022; Zeng *et al.*, 2019). Im Vergleich zu anderen Kathoden, haben $LiFePO_4$ Kathoden jedoch eine verhältnismäßig geringe Energiedichte und eine geringere Performance (Liu, Placke and Chau, 2022; Zeng *et al.*, 2019). Kathoden aus $LiNi_xCo_yAl_2O_2$ weisen eine höhere Energiedichte, höhere Performance und ähnliche Lebenszyklen bei gleichzeitig niedrigeren Kosten, im Vergleich zu $LiFePO_4$ Kathoden auf (Liu, Placke and Chau, 2022). Ein wesentlicher Nachteil ist jedoch die geringe

Sicherheit sowie die geringe thermische Stabilität (Liu, Placke and Chau, 2022). Dieser Kathodentyp wird vor allem bei den Modellen von Tesla eingesetzt (Liu, Placke and Chau, 2022). Ebenfalls von vielen Herstellen (VW, Chevrolet, Renault, ByD, NIO) eingesetzt wird ein Batterietyp mit einer Kathode aus $LiNi_{1-x-y}Co_xMn_yO_2$, welcher sich durch eine ähnlich hohe Energiedichte und Performance auszeichnet, jedoch weniger Zyklen und höhere Kosten, dafür eine höhere Sicherheit als $LiNi_xCo_yAl_2O_2$ Batterietypen aufweisen (Liu, Placke and Chau, 2022). Aufgrund der höheren Kapazität und geringerer Kosten stellen heute $LiNi_{1-x-y}Co_xMn_yO_2$ Kathoden den Stand der Technik dar (vormals $LiFePO_4$) (Liu, Placke and Chau, 2022). Ein Vergleich der einzelnen Kathoden ist in Abbildung 11 ersichtlich.

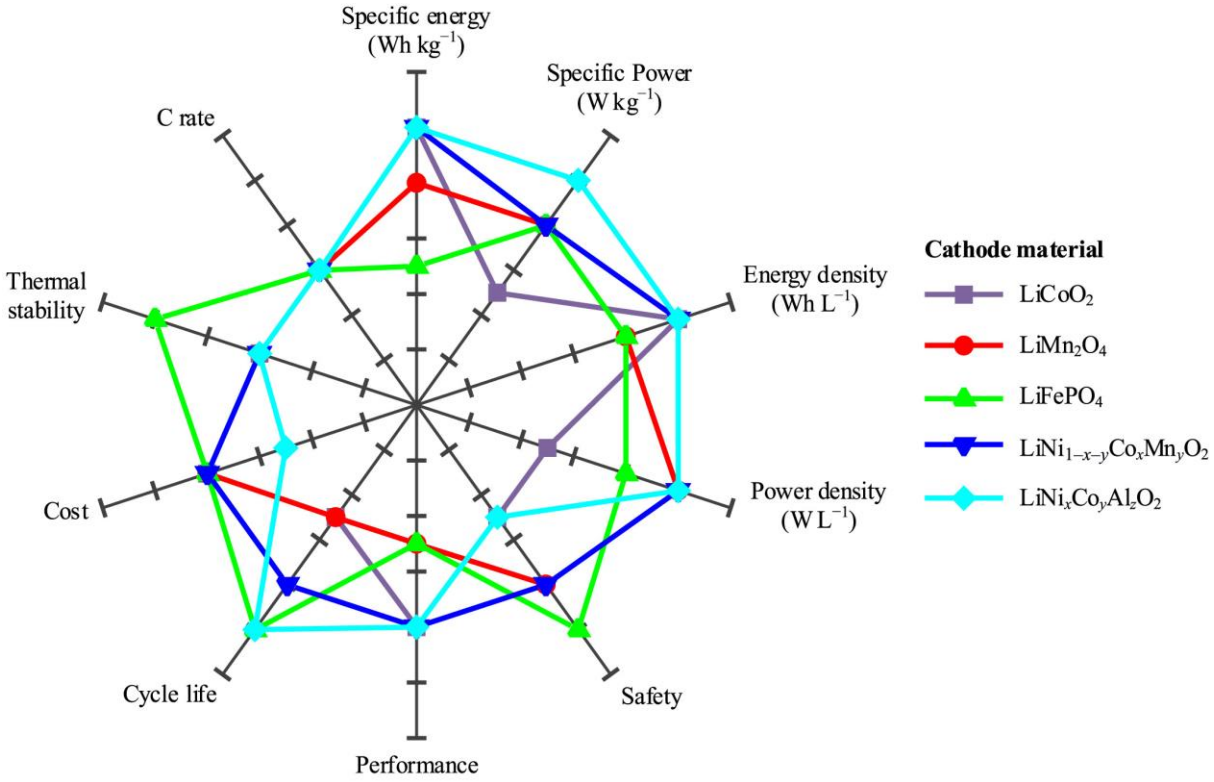


Abbildung 11: Vergleich verschiedener Kathoden-Materialien (Liu, Placke and Chau, 2022, p. 4067)

Bei den Anoden Materialien wurde in der ersten Generation von Lithium-Ionen-Batterien Petrolkoks eingesetzt, während bei der zweiten und dritten Generation eine Weiterentwicklung zu hartem Kohlenstoff in Form von Graphit stattfand

(Liu, Placke and Chau, 2022). Graphit ist auch heute noch Stand der Technik bei Anoden Materialien und es wird nur vereinzelt eine kleine Menge Silizium (≤ 8 Gewichtsprozent) dem Graphit in Form von SiO_x hinzugefügt (Liu, Placke and Chau, 2022). Anoden aus Lithium-Titan ($Li_4Ti_5O_{12}$) weisen eine geringe Leistung und geringe Energiedichte auf und sind deshalb nicht für den Einsatz in Fahrzeugen mit großer Reichweite geeignet. Aufgrund ihrer positiven Eigenschaft im Bereich des Schnellladens, finden diese jedoch vereinzelt Einsatz bei Elektrobussen (Liu, Placke and Chau, 2022). Ein Vergleich der einzelnen Anoden ist in Abbildung 12 ersichtlich.

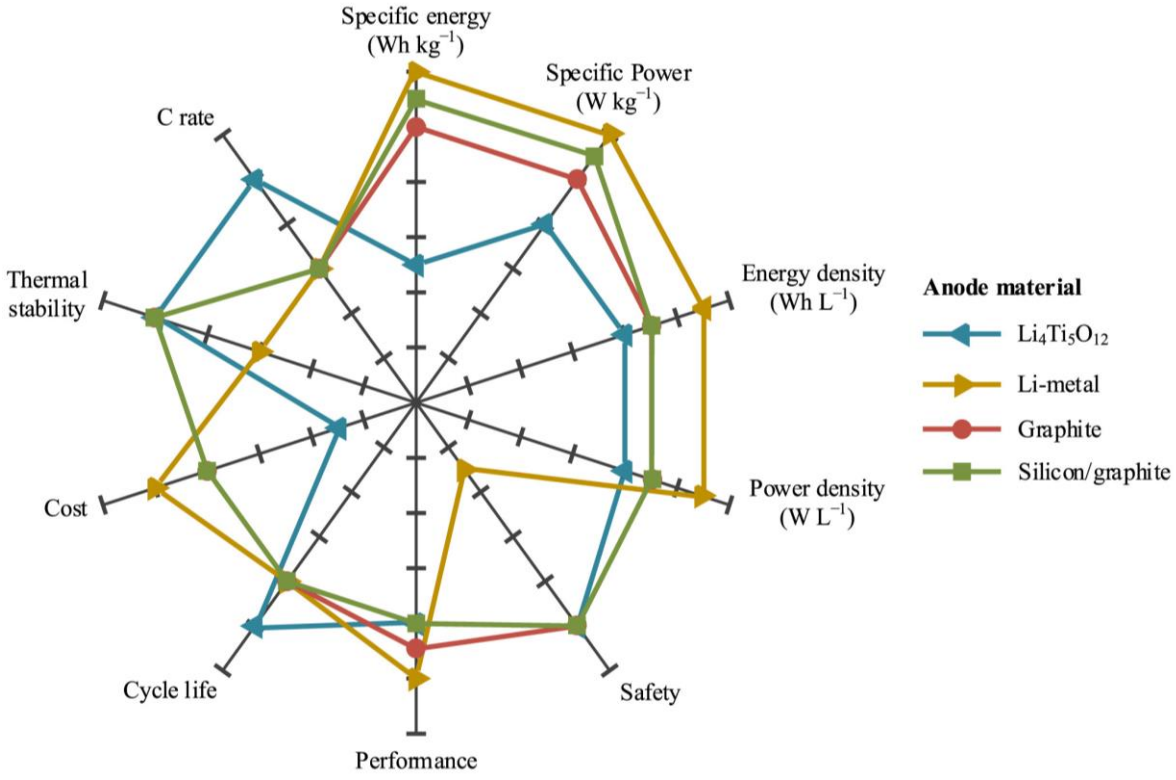


Abbildung 12: Vergleich verschiedener Anoden-Materialien (Liu, Placke and Chau, 2022, p. 4067)

Betrachtet man die CO_2e Emissionen bei der Batterieherstellung (cardle to gate), so kommen die Studien bei den am häufigsten eingesetzten NCM Batterien (Kathode aus $LiNi_{1-x-y}Co_xMn_yO_2$) zu Ergebnissen zwischen 100 und 200 kg CO_2e pro kWh, wobei die meisten Studien Werte um 130 kg CO_2e pro kWh angeben (Kim *et al.*, 2016; Raugei and Winfield, 2019; Baumann *et al.*, 2017). Die vor allem von

Tesla eingesetzten LCA Zellen (Kathode aus $LiNi_xCo_yAl_2O_2$) bewegen sich hierbei in einem ähnlichen Bereich (Baumann *et al.*, 2017). Bei Neuwagen nicht mehr so häufig eingesetzte LFP Zellen (Kathode aus $LiFePO_4$) haben deutlich höhere Emissionen im Bereich zwischen 100 und 250 kg CO_2e pro kWh, wobei im Schnitt rund 160 kg CO2e pro kWh angegeben werden (Baumann *et al.*, 2017; Raugei and Winfield, 2019). Kobalt freie LMO Zellen (Kathode aus $LiMn_2O_4$) weisen in den Studien hingegen deutlich geringere CO_2e Emissionen (39 bis 95 kg CO_2e pro kWh) auf als NCM oder LCA Zellen (Raugei and Winfield, 2019; Kim *et al.*, 2016), werden jedoch aufgrund der geringeren Energiedichte immer seltener in E-PKW eingesetzt (Liu, Placke and Chau, 2022).

2.6.2 Coloumbic Efficiency

Die Coloumbic Efficiency (CE) stellt den Wirkungsgrad der Batterie dar. Dieser wird definiert durch:

$$\eta = \frac{C_d}{C_c}$$

Dabei stellt C_d die Entladekapazität einer Zelle bei einem einzelnen Zyklus dar und C_c die Aufladekapazität der selben Zelle im selben Zyklus (Yang *et al.*, 2018). Eine ideale Zelle ohne unerwünschte Nebenreaktionen weißt daher permanent eine CE von 1,0 auf und würde bedeuten, dass die Zelle ewig läuft (Yang *et al.*, 2018). In Abbildung 13 ist der Verlauf der Coloumbic Efficiency einer LFP Zelle (Kathode aus $LiFePO_4$) und einer NMC Zelle (Kathode aus $LiNi_{1-x-y}Co_xMn_yO_2$) zu sehen. Dabei ist zu erkennen, dass die Coloumbic Efficiency bei LFP Zellen sehr konstant bleibt, während diese bei den NMC Zellen nach rund 800 Zyklen deutlich abnimmt.

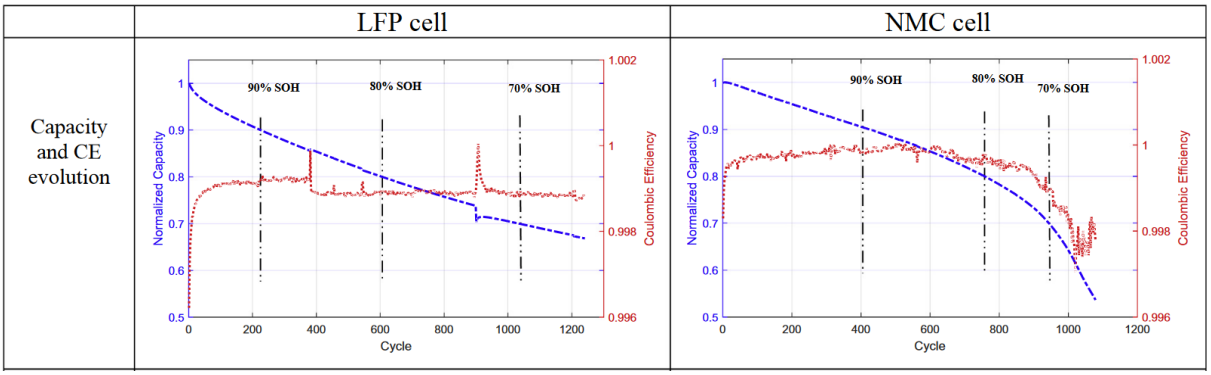


Abbildung 13: Entwicklung der Coloumbic Efficiency und der Kapazität einer LFP Zelle und einer NMC Zelle (Yang *et al.*, 2018, p. 492)

2.6.3 Wiederverwendung als stationäre Batteriespeicher

Gebrauchte Batterien aus E-PKW stellen eine kostengünstige, und durch die Verlängerung der Lebenszeit auch umweltfreundliche, Alternative für stationäre Batteriespeicher dar. Studien zeigen, dass bei gebrauchten Batterien die Kosten um 12-57% und die CO_2e-Emissionen um 7-31% niedriger sind als im Vergleich zu neuen Lithium-Ionen Batterien (Kamath *et al.*, 2020) und sich dadurch im Prognosejahr 2050 alleine in Kalifornien 7 Mio. t CO_2e pro Jahr einsparen lassen, sofern diese anstelle von Gaskraftwerken die Bedarfsspitzen abdecken (Sathre *et al.*, 2015). Dabei können wiederverwendete $LiFePO_4$ Batterien in einem stationären Speicher eine ähnliche Performance wie neue Batterien liefern, nur zu reduzierten Kosten (Tong *et al.*, 2013).

Debnath et al. (2014) untersuchten die Degradation von Batterien im „ersten“ und „zweiten“ Leben. Um die Batterie zu schonen wurde die Entladung (DOD – depth of discharge) nur zwischen 40 und 80% variiert mit dem Mittelwert von 60%. Die Temperatur wurde in einem Bereich zwischen 20 und 60°C gehalten. Damit konnten 5821 Zyklen verzeichnet werden, bevor die Batteriekapazität um 29,02% gesunken war. Für das „zweite“ Leben als stationärer Speicher haben Debnath et al. (2014) den DOD Level weiter, auf den Bereich zwischen 30% und 50% mit dem Mittelwert von 40%, reduziert. Die Temperatur für den stationären Speicher wird mit konstant 35°C angegeben. Durch dieses Setting konnten weitere

4.500 Ladezyklen erzielt werden, ehe die Batterie auf 50% ihrer Kapazität, bezogen auf die Anfangskapazität im „zweiten“ Leben, absank.

In einer 2009 in den West Midlands (UK) durchgeführte Studie mit über 100 E-PKW zeigte sich, dass die E-PKW mit einer relativ gleichmäßig verteilten verbleibenden Batterieladung zwischen 20% und 80%, den Ladevorgang starten. Der Mittelwert der Entladung (DOD) lag demnach nur bei 35% (Strickland *et al.*, 2014). Die Studie von Strickland et al. (2014) ergab bei dem DOD von 35% im „ersten“ Leben einen Verbleib von 900 vollständigen Ladezyklen für die Widerverwendung als stationärer Speicher.

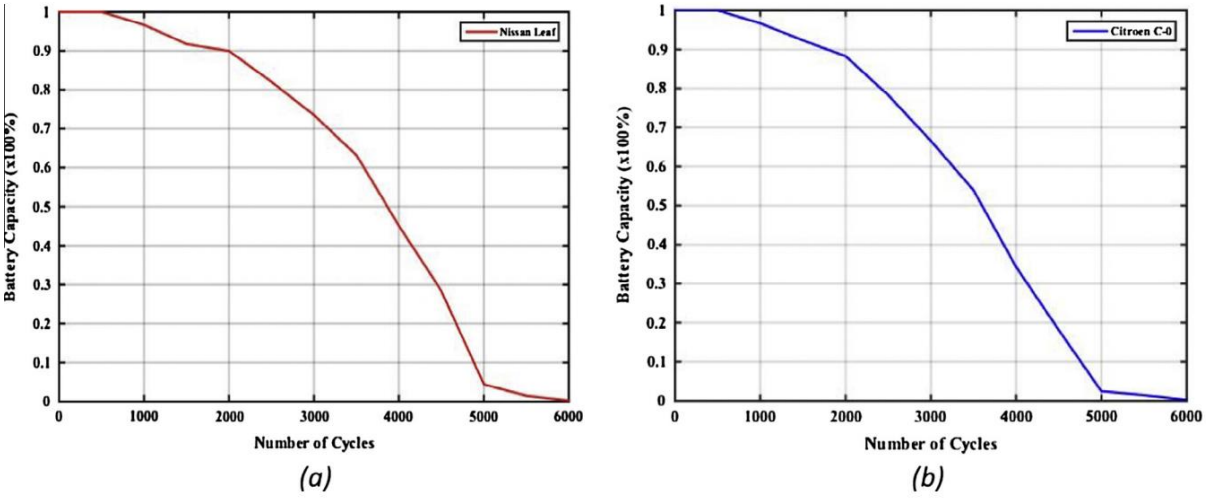


Abbildung 14: Degradation in Prozent einer widerverwendeten großen (a) und kleiner (b) Batterie (Assuncao, Moura and de Almeida, 2016, p. 126)

Ahmadi et al. (2017) zeigen in ihrer Studie, dass neben der Verringerung der Kapazität der Verlust der Energieeffizienz ein wesentlicher Faktor bei der Verwendung gebrauchter $LiFePO_4$ Batterien ist. Während die Energieeffizienz der Batterie beim Einsatz im E-PKW nur sehr geringe Auswirkung auf die Treibhausgasemissionen hat, ist der Einfluss bei einem stationären Energiespeicher ungleich höher. Es wird davon ausgegangen, dass die Verringerung der Energieeffizienz ähnlich dem Verlust der Speicherkapazität verläuft (Ahmadi *et al.*, 2017). Beim Kapazitätsverlust wird von

Ahmadi et al. (2017) ein steiler Verlauf für die Nutzung im E-PKW angegeben und ein leicht flacherer für die Nutzung im stationären Speicher. Diese langsamere Alterung der Batterie im „zweiten“ wird mit schonenderen Ladezyklen und dem Wegfall von Alterungsfaktoren wie dem regenerativen Bremsen argumentiert. Das Ende des „ersten“ Lebens nehmen Ahmadi et al. (2017) jedoch bereits bei einem Kapazitätsverlust von nur 20% an und für die langsamere Alterung im „zweiten“ Leben wird ein Kapazitätsverlust von nur 15% in 10 Jahren angegeben.

2.7 Photovoltaik Anlagen

Eine Photovoltaik Zelle (PV Zelle) wandelt solare Einstrahlung direkt in elektrische Energie um (Honrubia-Escribano *et al.*, 2018). Aufgrund der hohen Effizienz werden Solarzellen heute fast ausschließlich aus Silizium hergestellt (Tyagi *et al.*, 2013). Die kommerzielle Produktion der ersten Generation von Solarzellen begann 1963, wobei zwischen mono- und polykristallinen Zellen unterschieden werden muss (Honrubia-Escribano *et al.*, 2018). Monokristalline Zellen werden oft mittels Czochralski (CZ) Prozess hergestellt, wobei hochreines Silizium geschmolzen wird und mittels Bor- oder Phosphoratomen in präzisen Mengen dotiert wird (Tyagi *et al.*, 2013). In die dotierte Siliziumschmelze wird ein Impfkristall getaucht, welcher langsam nach oben gezogen und gedreht wird, wodurch ein einkristalliner, zylindrischer Baren wächst (Tyagi *et al.*, 2013). Durch die genaue Steuerung von Temperatur und Geschwindigkeit, können Fehler in der Kristallstruktur vermieden werden (Tyagi *et al.*, 2013). Der Nachteil des CZ Prozesses ist, dass leichte Verunreinigungen mit Sauerstoff-, Kohlenstoff- und Übergangsmetallionen im Einkristall vorliegen (Razykov *et al.*, 2011). Für PV Zellen mit höchster Effizienz, ist daher das Zonenschmelzverfahren das präferierte Verfahren (Razykov *et al.*, 2011). Dabei werden sogenannte Poly-Stäbe (Stäbe aus polykristallinem Silizium) abschnittsweise mittels Induktionsheizung aufgeschmolzen (von Ammon, 2014). Das Ergebnis ist ein hochreiner

Siliziumkristall, welcher für den Einsatz hocheffizienter PV Zellen verwendet werden kann (von Ammon, 2014). Die Kosten liegen jedoch deutlich über jenen des CZ Verfahrens, da das Ausgangsmaterial für das Zonenschmelzverfahren (poly-Stäbe) nur mittels Siemens Verfahren hergestellt werden kann und im Vergleich zum Ausgangsmaterial für das CZ Verfahren mit einem Aufschlag von weit über 50% gehandelt wird (von Ammon, 2014). In beiden Fällen werden die monokristallinen Siliziumbarren anschließend in dünne Wafer geschnitten. Die Effizienz bei Standard monokristallinen PV Zellen liegt bei rund 20% und haben aktuell, wie in Abbildung 15 ersichtlich, einen Marktanteil von 76% (Feldman *et al.*, 2022).

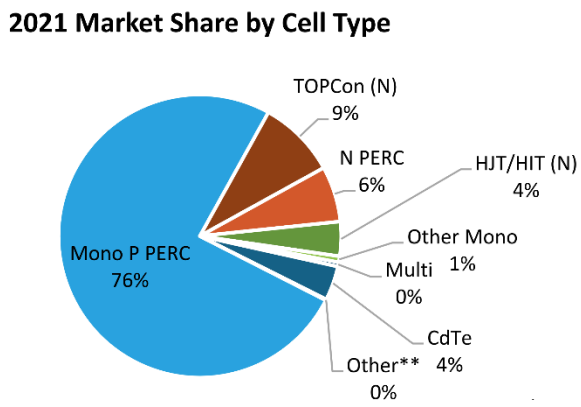


Abbildung 15: Marktanteile der verschiedenen PV-Technologien im Jahr 2021 (Feldman *et al.*, 2022, p. 53)

Neben monokristallinen PV Zellen gibt es noch die in der Herstellung deutlich einfacheren polykristallinen PV Zellen, wobei die Siliziumschmelze in eine rechteckige Form gegossen und langsam abgekühlt wird. Anschließend wird der erstarrte polykristalline Siliziumbarren in dünne Scheiben geschnitten. Die Korngrenzen behindern jedoch den Fluss der Elektronen und führen daher zu einer geringeren Effizienz (Honrubia-Escribano *et al.*, 2018), welche für eine Standard polykristalline PV Zelle mit 17,6% angegeben wird (Feldman *et al.*, 2022). Waren diese bis zum Jahr 2015 noch die am häufigsten eingesetzten PV Zellen, so beläuft sich ihr Marktanteil heute auf unter 1% (Feldman *et al.*, 2022).

Solarzellen der zweiten Generation sind sogenannte Dünnschichtzellen. Dabei werden mittels Sputterprozess dünne Schichten eines bestimmten Halbleitermetalls auf Glas oder Edelstahlsubstraten abgeschieden, wodurch Schichtdicken von weniger als 10 µm entstehen (Honrubia-Escribano *et al.*, 2018).

Kristalline Wafer haben im Vergleich dazu mehrere hundert µm, wodurch der Materialeinsatz und die Produktionskosten bei Dünnschichtzellen deutlich geringer sind (Honrubia-Escribano *et al.*, 2018). Zu beachten ist jedoch, dass aufgrund der dünnen Schicht weniger solare Einstrahlung absorbiert werden kann. Im Wesentlichen gibt es vier Dünnschichtzellen, welche heute im kommerziellen Einsatz zu finden sind: amorphe (unkristallisierte) Siliziumzellen, dünne polykristalline Siliziumzellen, organische und polymer Zellen aus Kupfer-Indium-Diselenid (CIS/CIGS) und Cadmiumtellurid Zellen (CdTe) (Honrubia-Escribano *et al.*, 2018; Tyagi *et al.*, 2013).

Tandemzellen (Multijunction Cells) bestehen aus mehreren übereinander geschichteten Teilsolarzellen aus unterschiedlichen Materialien. Dadurch wird das Spektrum der absorbierbaren Strahlung erhöht und die Effizienz deutlich gesteigert. Ein Beispiel dafür sind Indium Galliumphosphid (InGaP) und Galliumarsenide (GaAs) (Honrubia-Escribano *et al.*, 2018). Mit der sehr hohen Effizienz geht jedoch auch ein sehr hoher Preis einher, weshalb Tandemzellen vor allem in der Raumfahrt Anwendung finden (Honrubia-Escribano *et al.*, 2018). Eine Möglichkeit um die Kosten zu reduzieren stellt die konzentrierte PV Technologie dar, bei welcher mittels einer Linse die Sonneneinstrahlung gebündelt wird und auf eine kleine Tandemzelle bestrahlt wird (Honrubia-Escribano *et al.*, 2018).

Eine Sonderform ist die auf Perowskit basierte Tandemzelle. Diese basiert auf der ABX_3 Formel (Jost *et al.*, 2020; Liu *et al.*, 2021). Dabei steht A für organische Kationen wie $CH_3NH_3^+$ oder $NH_2CH{=}NH_2^+$ oder anorganische wie Cäsium (Cs^+). B steht für Metallkationen wie Pb2+ oder Sn2+ und X für Halogenidanionen wie I^-, Br^- oder Cl^- (Liu *et al.*, 2021). Durch die Perowskit Technik sind sehr effiziente Module mit über 30% Wirkungsgrad zu einem angemessenen Preis möglich (Jost *et al.*, 2020). Ein Problem ist jedoch die Instabilität bei steigender Temperatur und Feuchtigkeit (Liu *et al.*, 2021).

In Abbildung 16 ist zu erkennen, wie sich die Effizienz der einzelnen PV-Technologien über die Jahre entwickelt hat. Es ist jedoch zu beachten, dass es hierbei um Forschungszellen handelt und diese Ergebnisse nicht den PV-Markt abbilden. Es ist zu erkennen, dass die konventionellen Tandemzellen den höchsten Wirkungsgrad aufweisen, wobei mittlerweile Werte von über 47% erzielt werden (NREL, 2022). Auffallend sind die Perowskit Zellen, welche die meisten Forschungsergebnisse in der Grafik aufweisen und einen steilen Anstieg der Effizienz von rund 15% im Jahr 2015 auf über 30% im Jahr 2022. Damit liegen Perowskit Zellen den Wirkungsgrad betreffend bereits über den kristallinen Siliziumzellen (NREL, 2022).

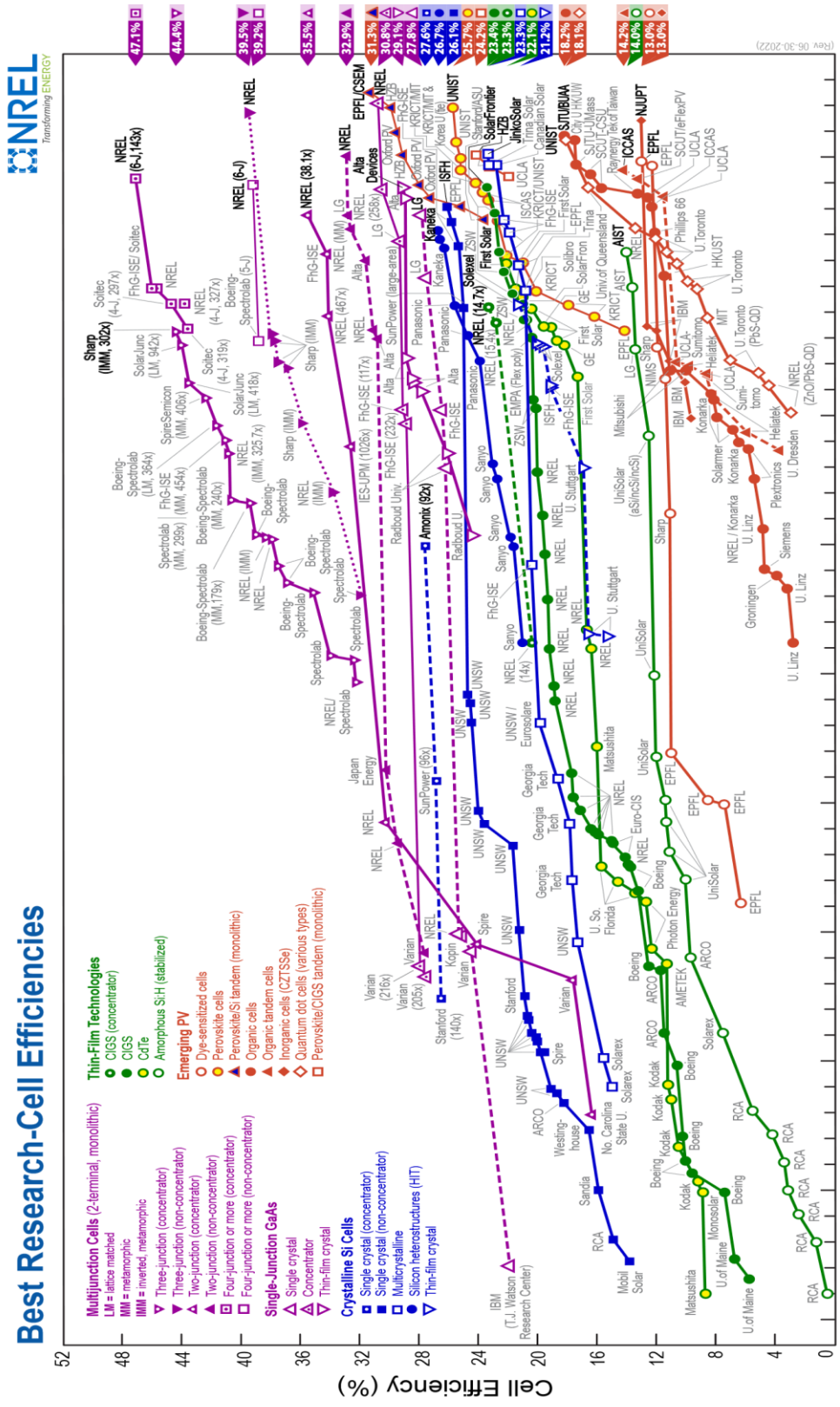


Abbildung 16: Effizienz verschiedener PV Technologien in der Forschung zwischen 1975 und 2022 (NREL, 2022)

Für die Herstellung der PV Zellen sind große Mengen an Energie notwendig. Hinzu kommen die Emissionen der Transportwege. Gleichzeitig ist die Sonneneinstrahlung und die damit verbundene Stromproduktion abhängig von der geographischen Lage des Installationsortes. Ein weiterer wichtiger Faktor bei der ökologischen Betrachtung ist die Lebensdauer bzw. die Alterung der Module. Ito et al. (2016) haben diese Faktoren berücksichtigt und eine Weltkarte mit den CO_2e Emissionen für polykristalline Solarzellen erstellt. Auch wenn die Karte für polykristalline Solarzellen erstellt wurde, so beschreiben Ito et al. (2016) in ihrer Studie einen annähernd gleichen CO_2e Ausstoß für monokristalline Solarzellen in den zwei genauer untersuchten Gebieten in Marokko und Frankreich. Für Österreich belaufen sich die Emissionswerte daher auf 70-80 gCO_2e/kWh (Ito *et al.*, 2016).

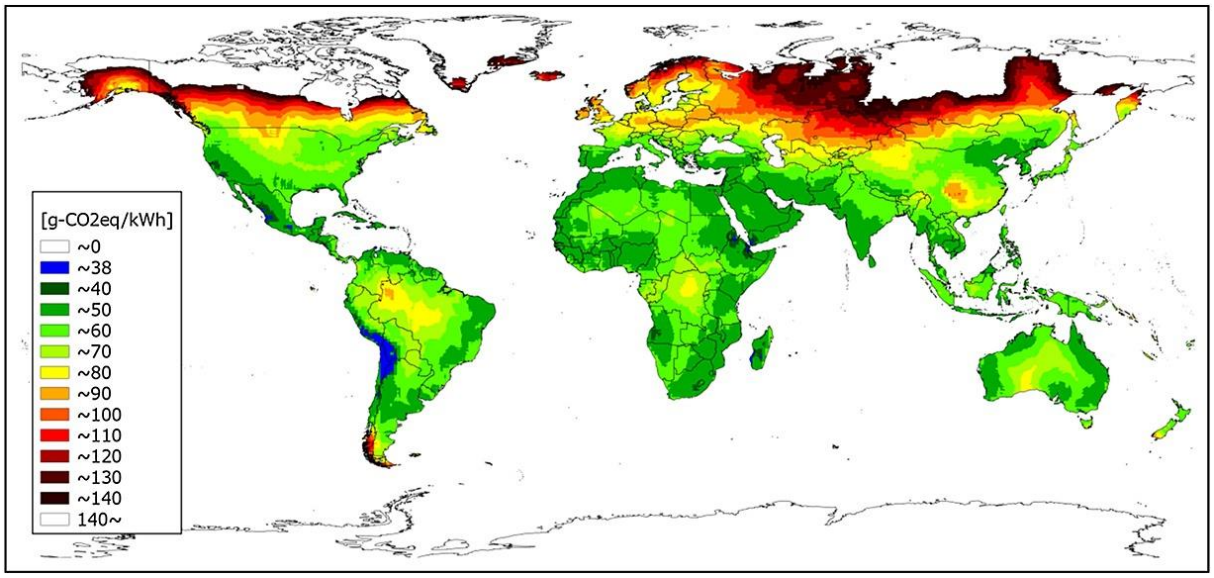


Abbildung 17: Weltkarte der CO2e Emissionen bei der Stromproduktion mittels multikristalliner Silicium PV-Anlagen unter Berücksichtigung der Transportwege und der solaren Einstrahlung (Ito *et al.*, 2016, p. 172)

3 Methodologie

3.1 Das Projekt MEGAWATT-LOGISTIK

Diese Diplomarbeit wird im Rahmen des Projekts MEGAWATT-LOGISTIK geschrieben. Bei dem Projekt handelt es sich um ein Forschungsprojekt unter der Leitung der Universität für Bodenkultur Wien, welches sich mit der Umstellung auf elektrische LKW in der Logistikbranche beschäftigt. Das Projekt startete im Oktober 2018 und hat neben Energieversorgern auch Logistikunternehmen und Nahversorger als Projektpartner.

Die Ziele des Projekts MEGAWATT-LOGISTIK sind folgende (BOKU, 2015):

- Durchführung eines Feldtests mit 26t-E-LKW
- Erfassung von Key Performance Indikatoren
- Erstellung eines Planungswerkzeugs, mithilfe dessen eine kostenoptimierte Umsetzung für Unternehmen möglich ist
- Erarbeitung neuer Geschäftsmodelle für Energieversorger und Fuhrparkbetreiber
- Einsparung von 3.600 Tonnen CO_2e im Projektzeitraum

Damit sollen Lösungen für Logistikunternehmen, bei der Umstellung auf einen elektrischen Fuhrpark, erarbeitet werden und finanzielle Risiken reduziert werden (BOKU, 2015). Im Rahmen des Projekts werden mehrere Abschlussarbeiten geschrieben.

3.2 Parameter für die Berechnung

3.2.1 Routen

Die Grundlage für die Routenzusammensetzung stellte der Datensatz dar, welcher von STIEGL übermittelt wurde. Dabei sind die einzelnen Touren mit der Distanz

und einem 15% Aufschlag sowie den durchschnittlichen Kunden je Tour gegeben. Weiters wurden nach Wochentagen aufgeschlüsselt die Anzahl der jeweils zu fahrenden Touren angegeben. Für die Berechnung des optimalen Fuhrparks wurden die Tourdaten seitens STIEGL um eine Durchschnittsgeschwindigkeit ergänzt (siehe Tabelle 2). Die Ermittlung der Durchschnittsgeschwindigkeit der einzelnen Touren wurde mithilfe des Openrouteservice (ORS) (Technology, 2021) der Universität Heidelberg durchgeführt. Es ist zu beachten, dass die Entfernungen, welche seitens STIEGL angegeben wurde, nicht exakt mit jener aus dem ORS zusammenpassen, da die genauen Kundenadressen nicht bekanntgegeben wurden.

Tour Bezeichnung	Entfernung [km]	Dauer [min]	Durchschnittsgeschw. [km/h]
Alpenstraße – Gneiß – Leoplodskron	9,4	26	21,7
Bergheim – Braunau	47,9	77	37,3
Bergtour (Großgmain)	14,1	23	36,8
Elsbeth – Abtenau – Rußbach am Paß Gschütt	64,1	98	39,2
Frächtertour (Abtenau)	52,1	73	42,8
Gnigl – Parsch – Aigen – Elsbethen	17,9	42	25,6
Itzling – Gnigl – Bergheim	14,8	32	27,8
Tour Pohn (Anif)	8,5	16	31,9
Bad Goisern – Obertraun	96,4	142	40,7
Maxglan – Wals – Taxham – Liefering	17,9	39	27,5
Obertrum – Mattighofen – Maria Schmolln	52,6	82	38,5

Seekirchen – Straßwalchen – Zipf	61,0	99	37,0

Tabelle 2: Durchschnittsgeschwindigkeit der einzelnen Touren (Eigene Darstellung, Datenquelle: Technoloogy, 2021)

3.2.2 E-LKW

Für die Berechnung wurden drei E-LKW mit Reichweiten von 120 km, 250 km und 400 km definiert.

Für den Verbrauch wurde der Wert aus dem Feldtest mit 1,29 kWh/km herangezogen (BOKU, 2020). Weiters wurde ein Aufschlag von 30% hinzugerechnet, um auch unter Berücksichtigung der Batteriealterung noch die entsprechende Reichweite bewältigen zu können. Um der Unterteilung in Batteriepacks gerecht zu werden, wurde auf die nächstgrößere 10er Zahl gerundet.

Reichweite [km]	Kapazität [kWh]	Kapazität + 30% Zuschlag [kWh]	Batteriepack Größe [kWh]
120	154,8	201,24	210
250	322,5	419,25	420
400	516	670,80	680

Tabelle 3: Reichweite und Batteriegröße der drei definierten E-LKW

Die Kosten der E-LKW wurden in die zwei Komponenten LKW und Batterie zerlegt. Dieser Ansatz wird auch in der Literatur gewählt, um die unterschiedlichen Reichweiten in den Kosten abzubilden (Sen, Ercan and Tatari, 2017; Feng and Figliozzi, 2013). Es wird mit 79.200€[1] für das Fahrzeug (Lee and Thomas, 2017) und mit 200 €/kWh für die Batterie (Tanco, Cat and Garat, 2019) gerechnet.

$$K_{LKW,120km} = 79.200 + 210 * 200 = 121.200\ €$$

[1] Umrechnungsfaktor von US$ in EUR: 1:0,88 (Stand 01.12.2021); wurde auch für alle weiteren Umrechnungen herangezogen.

$$K_{LKW,250km} = 79.200 + 420 * 200 = 163.200\ €$$

$$K_{LKW,400km} = 79.200 + 680 * 200 = 215.200\ €$$

3.2.3 E-PKW

Die Umstellung des Fuhrparks auf einen E-Fuhrpark beinhaltet auch die Berücksichtigung der Mitarbeiter PKW. Wesentlich für die Berechnung ist der Energiebedarf der PKW (kWh) sowie die maximale Ladeleistung. Für den Energiebedarf wurde der Verbrauch von einem Renault Zoe, einem VW ID.3 und einem Tesla Model 3 gemittelt (siehe Tabelle 4) und mit einer angenommenen Fahrleistung von 30 km multipliziert. Es gingen daher ein Energiebedarf von 5,38 kWh pro Mitarbeiter PKW mit einer maximalen Ladeleistung von 50 kW in die Berechnung ein.

Modell	Verbrauch [kWh/km]	Max. Ladeleistung [kW]
Renault Zoe R110, 16“	0,178	50
VW ID.3	< 0,194	100
Tesla Model 3 Performance	0,166	250
Mittelwert	0,179	

Tabelle 4: Verbrauch und Ladeleistung von Renault Zoe, VW ID.3 und Tesla Model 3 (Quellen: (Renault, 2022), (Volkswagen), (Tesla, 2022))

3.2.4 Ladesäulen für LKW und PKW

Stand heute gibt es eine Vielzahl an Ladesäulen mit einer Leistung von 11 kW oder 22 kW für den privaten Einsatz. Ausgehend vom ADAC Test Wallboxen (Rudschies, 2022) wurden drei Hersteller beziehungsweise Modelle mit 22 kW Leistung ausgewählt (siehe Tabelle 5). Für die Berechnung herangezogen wurde der Mittelwert, der drei betrachteten Produkte, von 725,52 €.

Hersteller	Produkt	Preis brutto [€]
go-e GmbH	HOMEfix 22 kW	582,50
Wallbox Chargers, S.L.	Commander 2	1.090,83
ABB Asea Brown Boveri Ltd	Terra AC Wallbox TAC-W22-T-0	503,24

Tabelle 5: Ladesäulen mit 22 kW (go-e GmbH; Wallbox Chargers; Geizhals)

Ladesäulen im Bereich von über 150 kW Leistung konnten bei der Literaturrecherche nur in geringem Ausmaß gefunden werden, wobei Großteils keine Preise genannt werden konnten. Für die Berechnung wurde der DC FastCharger von Quantron AG mit einer Ladeleistung von 180 kW herangezogen, welcher die Leistung bei Bedarf auf zwei angeschlossene Elektrofahrzeuge aufteilen kann (Quantron, 2020). Dieser ist jedoch für den kommerziellen Einsatz (z.B. Tankstellen) gedacht und weist eine für den vorgesehenen Einsatz nicht notwendige Ausstattung (Bezahlmodul für Debit- und Kreditkarten, hochauflösendes Frontdisplay, etc.) auf. Der Preis beläuft sich auf 47.612,47 € (Quantron, 2020), welcher auch in der Berechnung angesetzt wurde.

Bei der Annahme eines Arbeitstages mit 9 Stunden, bleiben 15 Stunden um die LKW wieder vollständig zu laden, welches bei den kleineren 22 kW Ladesäulen einer Energiemenge von 330 kWh entspricht. Die mittlere LKW Größe mit einer Reichweite von 250 km und einer Ladekapazität von 322,5 kWh wäre selbst bei einer kompletten Entladung bis zum nächsten Werktag wieder voll aufgeladen. Um die Spitzenwerte der PV Anlage abzudecken, sowie um im Bedarfsfall bis zu zwei LKW schneller laden zu können, wird eine Ladesäule mit 180 kW in der Berechnung berücksichtigt. Die restliche Anzahl der Ladesäulen bemisst sich an der PKW Anzahl, da diese die LKW Anzahl übersteigt. Dementsprechend werden 38 Ladesäulen mit 22 kW in der Berechnung berücksichtigt.

3.2.5 Stationärer Batteriespeicher

Das Modell schießt einen stationären Batteriespeicher mit ein, welcher es ermöglicht den tagsüber vorherrschenden PV Überschuss zu speichern und über Nacht den LKW zu Verfügung zu stellen.

Für die Kosten der stationären Batteriespeicher wurde der Ansatz von Assuncao et al. (2016) mit 34 €/kWh für die Zellen verwendet. Hinzu kommen noch Kosten für den Lade-Controller mit 114 €/kW und den DC/AC Inverter mit 242 €/kW (Zubi *et al.*, 2020). Die Kosten für Lade-Controller und DC/AC Inverter beziehen sich jedoch nur auf die Leistung der Batterie und nicht auf die Kapazität. Auf den Gesamtpreis wird ein Zuschlag von 30% zugerechnet für noch nicht berücksichtigte Bauteile, den Profit der Händler und Installationskosten.

3.2.6 PV Anlage

In der Studie von Benda und Cerna (2020) wird mit einem PV Preis von rund 750 €/kWp gerechnet, wobei sinkende Kosten der PV Module die steigenden „soft costs“ (Projektierung, Steuern, Margen, Finanzierung, etc.) überwiegen und zu einer deutlichen Reduktion des Gesamtpreises in den letzten Jahren geführt hat. Fina et al. (2020) rechnen hingegen in einer auf Österreich bezogenen Studie mit 1.050 €/kWp, gehen jedoch ebenfalls davon aus, dass die Preise in den nächsten Jahren auf 840 €/kWp fallen werden. Für die Berechnung in dieser Arbeit wurde daher der Preis von 840 €/kWp angenommen.

Die Hallen 3-6 am Standort Rochusgasse 19 in Salzburg weisen eine Dachfläche von rund 8.100 m² auf. Unter der Berücksichtigung von Störobjekten und Wartungsgängen kann mit einem Flächenverbrauch von rund 14 m²/kWp gerechnet werden (Hartl, o.J.), wodurch eine maximale Leistung von rund 580 kWp verbaut werden kann. In der Berechnung wurden drei verschiedene Größen von PV Anlagen untersucht (150 kWp, 300 kWp und 450 kWp).

Für die Strahlungswerte wurden die Werte der ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) für die Messstation „Salzburg-Freisaal“ mit der ID 6305 herangezogen. Die vorliegende Globalstrahlung [W/m²] lt. ZAMG wurde ins Verhältnis zu den Standard Test Conditions (STC) von PV Zellen, welche sich auf 1.000 W/m² belaufen (Austria, o.J.), gesetzt und mit dem PV Peak multipliziert. Die sich dadurch ergebenden PV Kurven sind in Abbildung 18 ersichtlich.

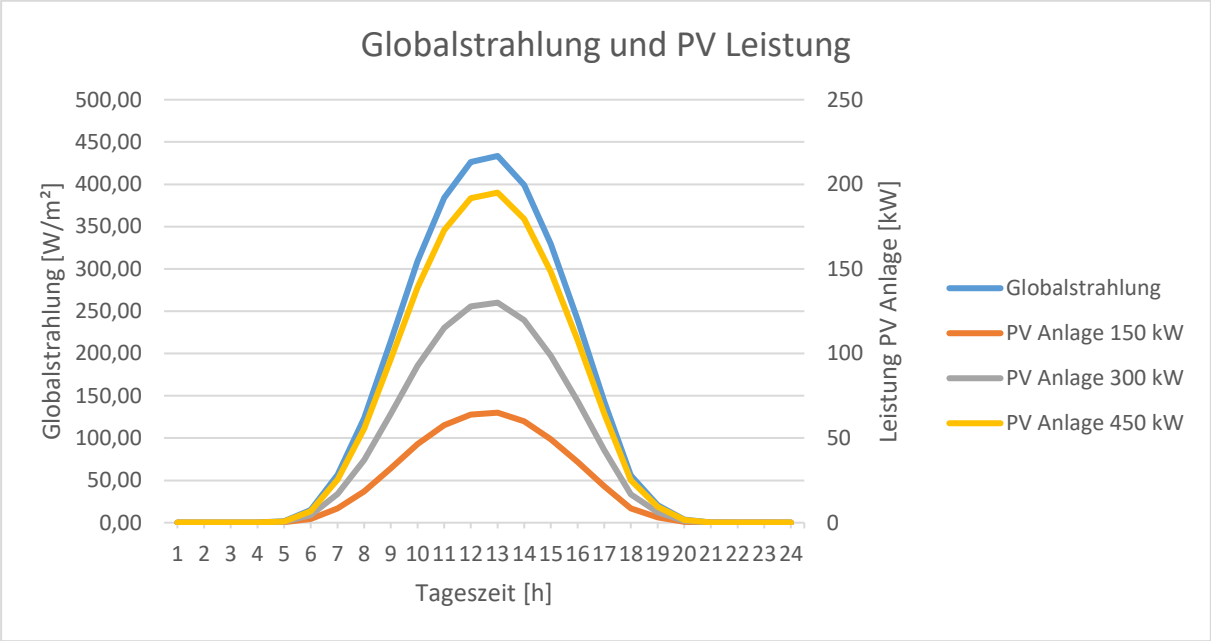


Abbildung 18: Durchschnittliche Globalstrahlung und Leistung für eine 150, 300 und 450 kW PV-Anlage für den Standort Salzburg (Eigene Darstellung, Betrachtungszeitraum 16.03.2006 bis 31.12.2021) (ZAMG, 2022)

3.2.7 Strompreis

Der Strompreis setzt sich aus den Energiekosten, dem Netznutzungsentgelt und Steuern und Abgaben (Ökostromkosten, Gebrauchsabgabe, Elektrizitätsabgabe und Umsatzsteuer) zusammen (E-Control, 2021). Die Preisentwicklung des Gesamtpreises beziehungsweise der einzelnen Bestandteile ist in Abbildung 19 zu erkennen. Aktuelle Preisabfragen kommen hingegen auf deutlich höhere Preise von über 30 Cent/kWh für die Stadt Salzburg (E-Controll, 2022).

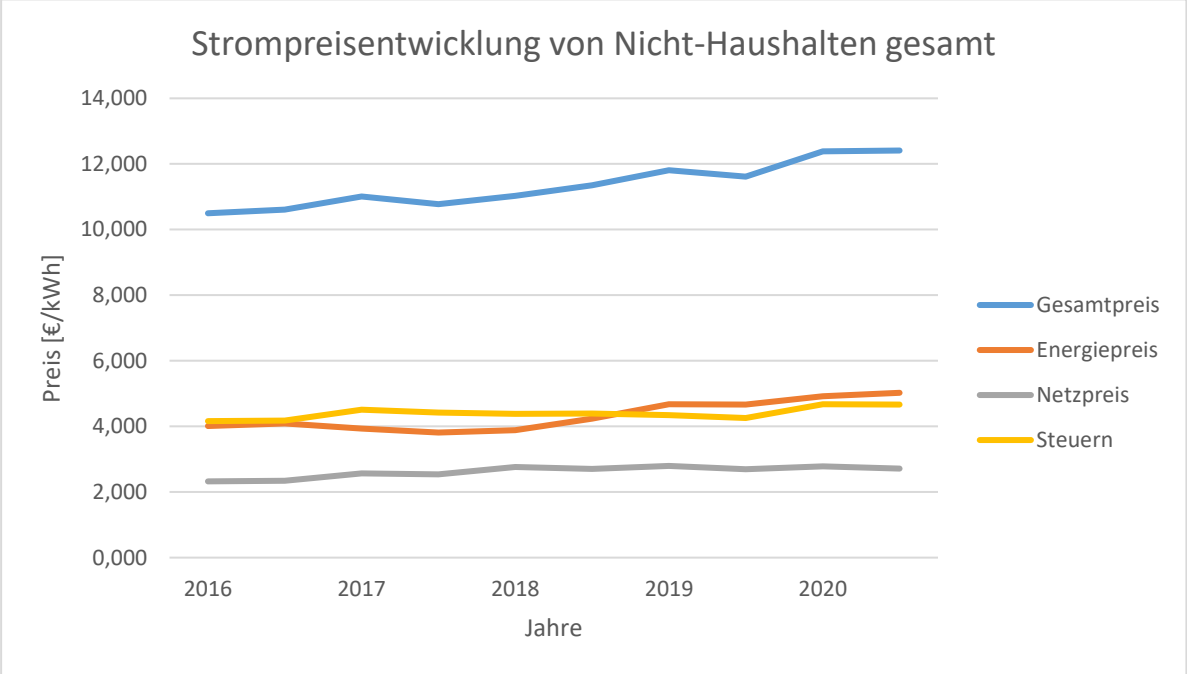


Abbildung 19: Mittlere Strompreisentwicklung von Nicht-Haushalten 2016-2020 (eigene Darstellung); (E-Control, 2022)

In einer durch die IG Windkraft in Auftrag gegebenen Studie, wurden die Strom-Energiepreise anhand der Investitionskosten sowie der Lebensdauer der Anlagen für das Jahr 2030, je nach Ausbauszenario der Erneuerbaren Energien, mit 6,865 Cent/kWh beziehungsweise 6,530 Cent/kWh ermittelt. Unter der Annahme von gleichbleibenden Netzpreisen von 2,715 Cent/kWh, worauf der Trend der letzten 5 Jahre schließen lässt, und der gleichbleibenden Besteuerung (inkl. sonstiger Abgaben) von 35,8%, würde dies einen Strompreis von 14,40 Cent/kWh ergeben.

$$Gesamtpreis = \frac{6{,}53\ \frac{Cent}{kWh} + 2{,}715\ \frac{Cent}{kWh}}{1 - 0{,}358} = 14{,}40\ Cent/kWh$$

Die aktuellen Preise stellen einen klaren Ausreißer dar, weshalb für die Berechnungen die prognostizierten Preise für 2030 der IG Windkraft herangezogen werden, welche eine Erhöhung von 16 % im Vergleich zum 2. Halbjahr 2020 darstellen.

Die Einspeisevergütung liegt je nach Anbieter und eingespeister Energiemenge zwischen 3 und 7 Cent/kWh. Die höchste Vergütung kommt großteils nur bei den ersten 1.000 kWh zu tragen und diese reduziert sich ab 5.000 kWh auf unter 5 Cent/kWh (E-Controll, 2022). Für die Berechnung in dieser Arbeit wird aufgrund der Größe der zu untersuchenden PV-Anlagen mit einer Einspeisevergütung von 4 Cent/kWh gerechnet.

3.2.8 Wirkungsgrade

Im Feldtest wurde bei Stiegl nur ein sehr geringer Wirkungsgrad beim Ladeprozess erreicht, welcher jedoch auf ein noch nicht ausgereiftes Lademanagement zurückzuführen war. Der höchste Wirkungsgrad im Feldtest wurde beim Unternehmen Spar mit 96,5% erreicht (BOKU, 2020). Für die Berechnung wurde ein Wirkungsgrad von 95% gewählt, welcher sich an dem Spitzenwert vom Feldtest orientiert. Dieser Wert wurde sowohl für den Ladeprozess beim E-LKW, als auch für den Ladeprozess beim E-PKW angesetzt.

Ebenso wurde der Wirkungsgrad bei dem stationären Batteriespeicher mit 95% angenommen, welcher Verluste in der Batteriezelle sowie bei der Leistungselektronik abdecken soll.

3.2.9 Diesel LKW

Um einen Vergleich mit einem konventionellen Diesel-Fuhrpark ziehen zu können, wurde in die Berechnung auch Daten für eine Diesel-Flotte einbezogen. Als Anschaffungspreis wird mit 66.000 € pro LKW gerechnet (Lee and Thomas, 2017) sowie mit einem Verbrauch von rund 25 l/100km (Webfleet Solutions, 2020). Aufgrund der schweren Prognose des Dieselpreises wurden die aktuellen Preise vom 11. April 2022 herangezogen, welche sich auf 1,797 €/l belaufen (Wirtschaftskammer Österreich, 2022).

3.3 Ablauf der Berechnung

3.3.1 Routenzusammenstellung

Die seitens Stiegl zu Verfügung gestellten Daten beinhalten die Touren, welche an den jeweiligen Wochentagen zurückgelegt werden sowie die Distanzen der entsprechenden Touren. Diese wurden wie in Punkt 3.2.1 beschrieben, um eine Dauer ergänzt. Das Programm sortiert die Touren der jeweiligen Wochentage absteigend nach der Distanz und ordnet diese danach einem LKW zu. Zugeordnet werden die Routen immer beginnend bei dem ersten LKW. Es werden die Routen nach der Reihe durchgegangen und überprüft, ob diese unter der Bedingung, dass die Gesamtdistanz unter 400 km liegt und die Gesamtdauer nicht mehr als 9 Stunden beträgt, zugeordnet und summiert (siehe Abbildung 20). Erst nachdem der erste LKW nach dem Schema „befüllt“ wurde, wird mit dem nächsten LKW und der längsten noch offengebliebenen Route begonnen.

Nach der Zuordnung zu den LKW werden diese noch auf die minimal erforderliche Reichweite reduziert (siehe Abbildung 20). LKW, welche eine Gesamtdistanz von 120 km nicht überschreiten, werden als „kleine“ LKW definiert, jene die Distanzen zwischen 120 km und 250 km zurücklegen, werden als „mittlere“ LKW definiert und jene die zwischen 250 km und 400 km liegen, als „große“ LKW.

Anschließend wird der Wochentag mit den meisten „großen“ LKW ausgewählt und die Zuteilung der Routen unter der festgesetzten Anzahl „großer“ LKW erneut durchgeführt. Dieser Schritt wird anhand der Maximalanzahl an „mittleren“ LKW wiederholt. Dadurch wird ein homogener Fuhrpark für alle Wochentage erreicht, welcher das Minimum an benötigten LKWs darstellt.

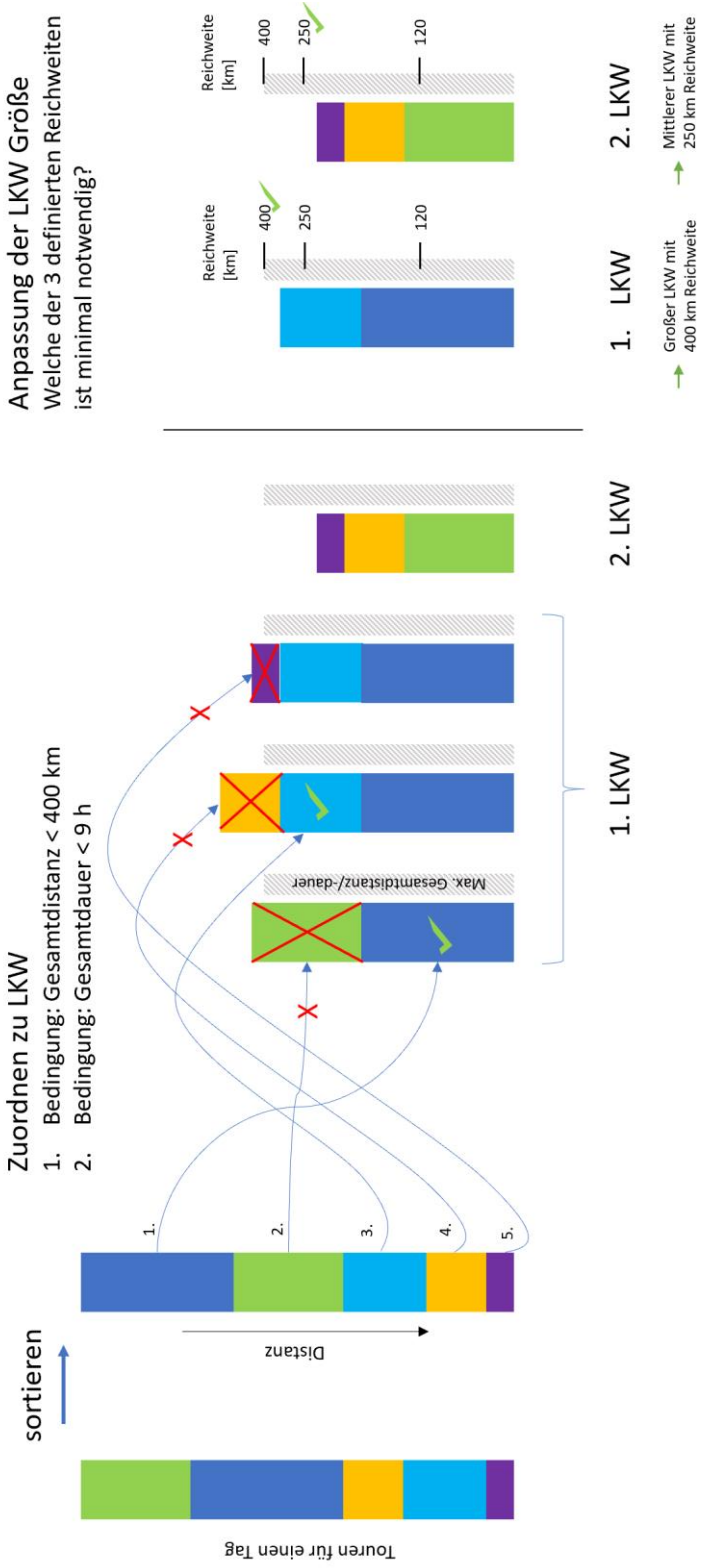


Abbildung 20: Sortierung der Routen, Zuordnung zu LKWs und festlegen der LKW-Größe (schematische eigene Darstellung)

3.3.2 Lademanagement

In der Berechnung wurde das Lademanagement so umgesetzt, dass sobald der erste E-LKW seine Route beendet hat, die gesamte PV-Leistung zum Laden des bzw. der LKW verwendet wird (siehe Abbildung 21). Im weiteren Schritt wird das Maximum der PV-Kurve, vor dem Ankommen des ersten LKW, ermittelt. Diese Stunde mit der größten PV-Leistung wird für das Laden der PKW herangezogen. Sollte, unter Berücksichtigung der maximalen Ladeleistung und dem Ladebedarf der PKW, diese Stunde nicht ausreichen, wird die Stunde vor der maximalen PV-Leistung sowie im weiteren Schritt die Stunde danach herangezogen (siehe Abbildung 21). Dieses Muster (Stunde davor, Stunde danach) wird unter der Bedingung, dass nur die Stunden vor dem Ankommen des ersten LKW betrachtet werden, so lange fortgesetzt, bis die PKW vollständig geladen sind. Ist der Ladebedarf größer, als die von der PV-Anlage produzierte Energie, wird der restliche Bedarf gleichmäßig vom Netz bezogen.

Bei dem Ladebedarf der LKW wird zunächst die in der Batterie gespeicherte Energie abgezogen, und im weiteren Schritt dieselbe Systematik angewandt wie bei den PKW. Der verbleibende Ladebedarf wird gleichmäßig auf den Zeitraum zwischen 16 Uhr Nachmittag und 7 Uhr früh verteilt und vom Netz bezogen.

Durch dieses Lademanagement kann die Leistungselektronik des stationären Batteriespeichers geringer ausgelegt werden sowie die Leistung des Netzanschlusses reduziert werden.

Dabei wird jedoch davon ausgegangen, dass die Tagesganglinie der PV-Leistung vorab bekannt ist und die LKW die simulierten Routendauern einhalten. Es wird daher das in Kapitel 2.4 beschriebene statische Lademanagement angewendet.

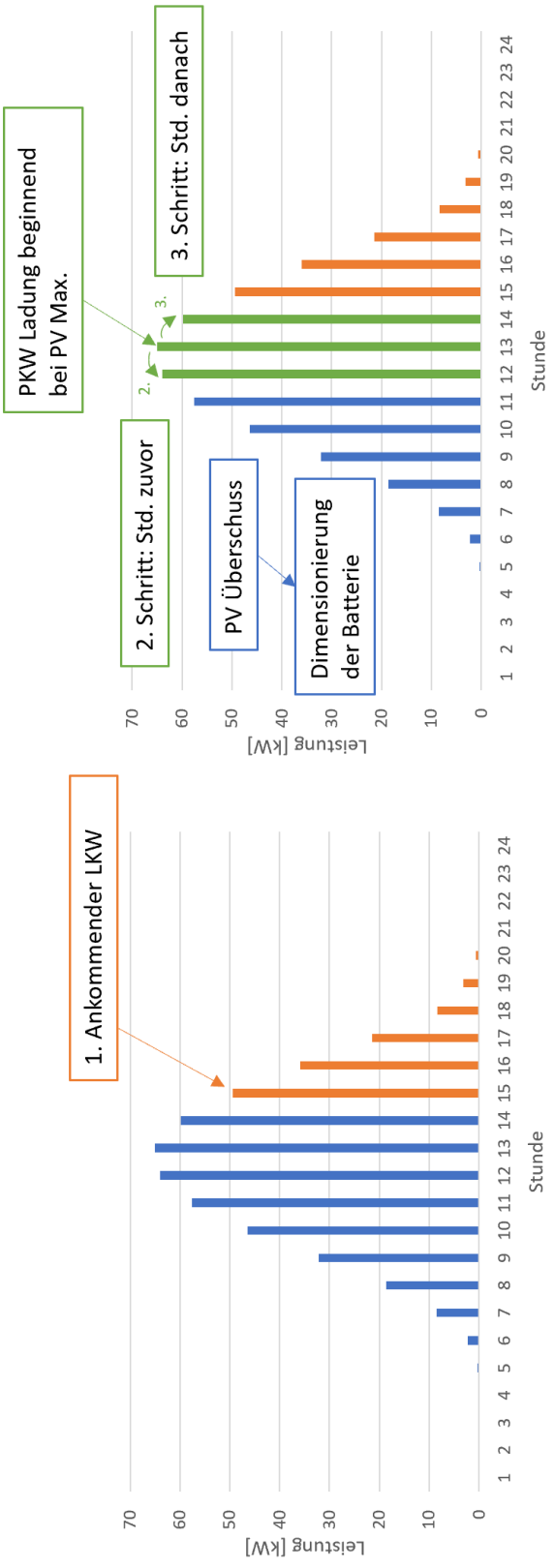


Abbildung 21: Lademanagement bei PV Produktion

4 Ergebnisse

4.1 Fuhrpark

Durch die in Punkt 3.3.1 beschriebene Optimierung kann ein Fuhrpark mit 4 „kleinen“ LKW und 17 „mittleren“ LKW erreicht werden (siehe Tabelle 6). Große LKW werden keine benötigt, da der limitierende Faktor die Zeit von 9 Stunden ist und nicht die maximale Reichweite.

Kleine LKW Reichweite 120 km	Mittlere LKW Reichweite 250 km	Große LKW Reichweite 400 km
4	17	0

Tabelle 6: Zusammensetzung des optimierten Fuhrparks

In Abbildung 22 ist über eine Arbeitswoche die Anzahl der LKW am Standort dargestellt. Zu erkennen ist, dass Montag und Dienstag immer ein LKW am Standort verfügbar ist. Am Freitag sind dies sogar zwei LKW. Donnerstag und Freitag ist der gesamte Fuhrpark im Einsatz, die ersten LKW kehren jedoch bereits um kurz nach 10 Uhr (Donnerstag) bzw. kurz nach 13 Uhr (Freitag) zum Standort zurück.

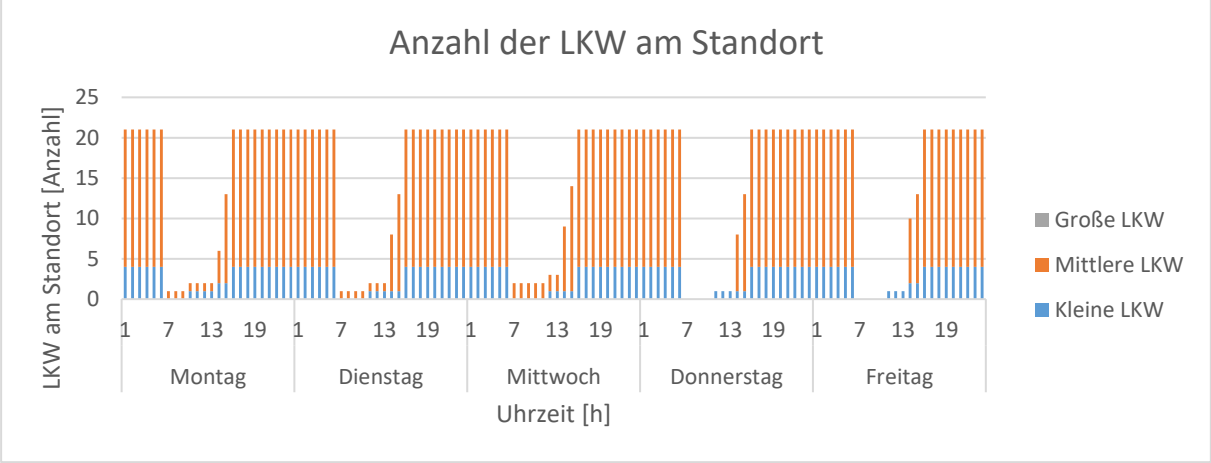


Abbildung 22: Abbildung der LKW am Standort

4.2 Energiebedarf und Netzanschluss

In Tabelle 7 ist der benötigte Netzanschluss für die einzelnen Szenarien ersichtlich. Für die PKW wird nur im Szenario ohne PV Anlage Energie vom Netz bezogen. Die Netzanschlussleistung für den gesamten Fuhrpark betrachtet, liegt je nach PV- und Batteriegröße zwischen 288,90 kW bei reinem Netzbezug und 148,18 kW bei einer PV-Größe von 450 kWp und einer Batteriegröße von 1063,00 kWh.

	Netzanschluss Tag 07:00 – 15:00	Netzanschluss Nacht 16:00 – 07:00
PV = 0 kW Batterie = 0 kWh	28,62 kW	288,90 kW
PV = 150 kW Batterie = 197,32 kWh	0 kW	238,96 kW
PV = 300 kW Batterie = 630,88 kWh	0 kW	199,30 kW
PV = 450 kW Batterie = 1063,00 kWh	0 kW	148,18 kW

Tabelle 7: Benötigter Netzanschluss Tagsüber (PKW) und Nachts (LKW)

4.3 Investitionskosten und Betriebskosten

Bei der Berechnung wurde ein Zinssatz von 0% herangezogen, da zu diesem Zeitpunkt der EURIBOR im negativen Bereich gelegen ist (Triami Media, 2022). Die stark steigende Inflation im weiteren Verlauf des Jahres 2022 und die damit verbundene Abzeichnung einer Zinswende, war zum damaligen Zeitpunkt nicht vorhersehbar.

In Abbildung 23 ist ersichtlich, dass die Investitionskosten für einen Diesel-LKW Fuhrpark mit Abstand am geringsten sind. Während die Investitionskosten für den Diesel-LKW Fuhrpark bei rund 1,4 Mio. € liegen, so fallen für das günstigste Szenario mit E-LKWs um über 1,9 Mio. € mehr an, welches einer Steigerung der

Investitionskosten um über 135% darstellt. Die Differenz der Anschaffungskosten zwischen dem rein aus dem Netz gespeisten Fuhrpark und dem Szenario mit der größten PV Anlage (450 kWp) und einer auf den maximalen PV Überschuss ausgelegten Batterie (1.063 kWh) beträgt hingegen nur 0,57 Mio. €. Die Zusammensetzung der Anschaffungskosten ist in Abbildung 24 ersichtlich.

Aus Abbildung 23 sind jedoch auch die deutlich höheren Betriebskosten der Diesel-LKW Flotte ersichtlich, welche jährlich um mindestens 298,44 € über den Kosten der E-LKW Flotte liegen, wobei Wartungskosten nicht berücksichtigt wurden.

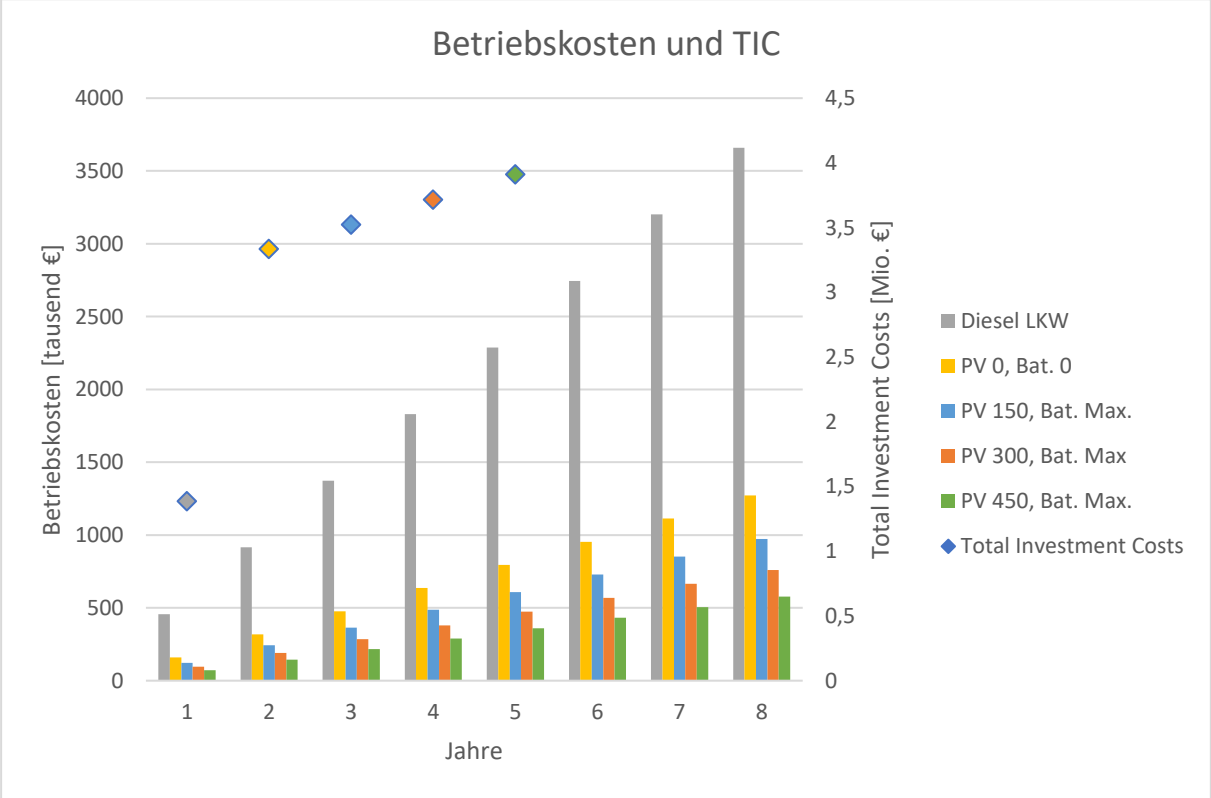


Abbildung 23: Betriebskosten und Total Investment Costs (TIC) für Diesel- und E-LKW Szenarien

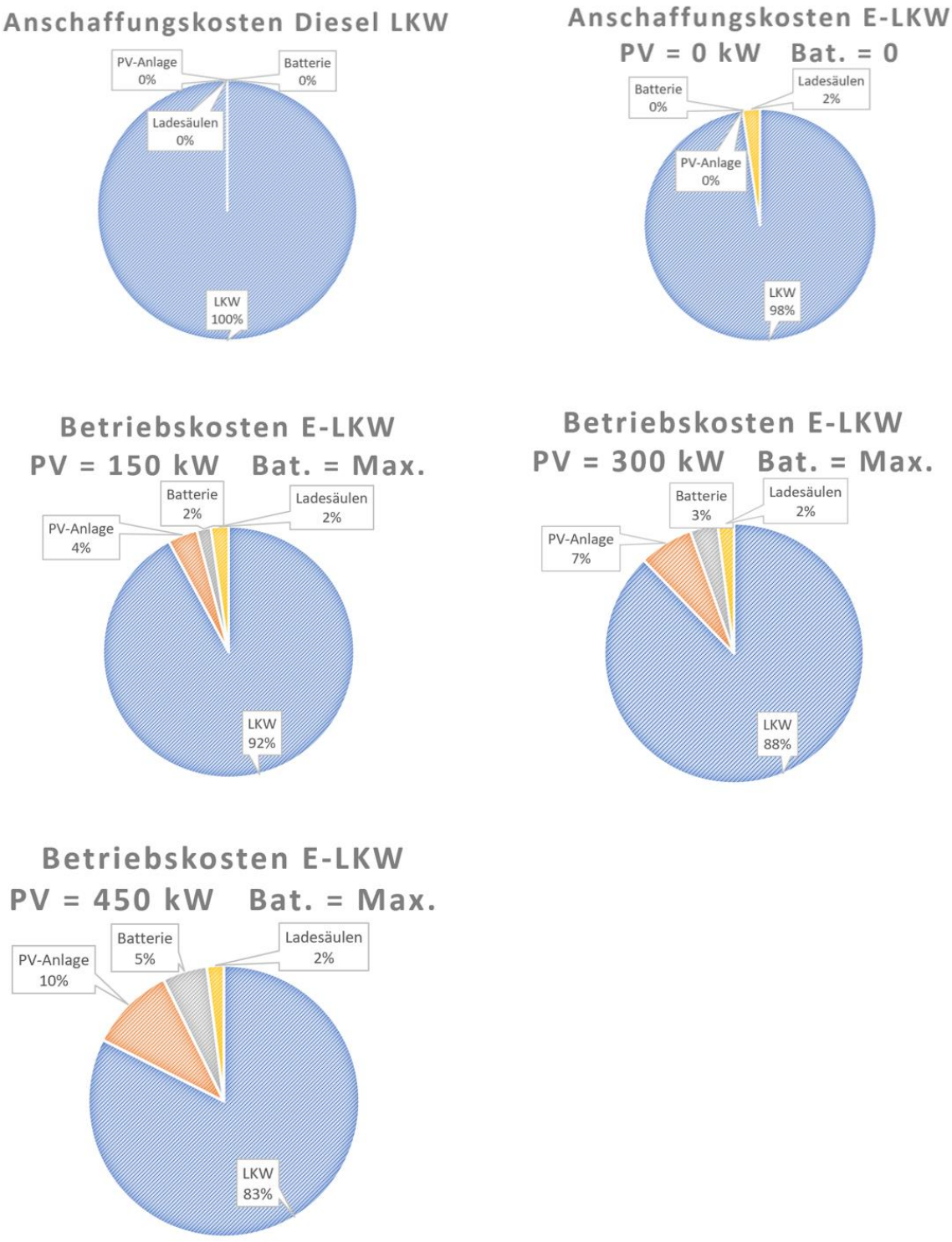


Abbildung 24: Zusammensetzung der Total Investment Costs (TIC) der untersuchten Szenarien

4.4 Total Costs of Ownership

Die Total Costs of Ownership zeigen welche Kosten dem Eigentümer entstehen unter Berücksichtigung der Investitions- und Betriebskosten. Dabei sind die Kosten für den Fuhrpark, für die PV-Anlagen, den stationären Batteriespeicher sowie die Diesel- bzw. Stromkosten enthalten. Es zeigt sich, dass die Kosten für den Dieselfuhrpark von einem geringeren Niveau aus starten, jedoch deutlich steiler steigen im Vergleich zu den Kosten des E-Fuhrparks (siehe Abbildung 25). Nach 8 Jahren ist der Dieselfuhrpark mit Abstand die teuerste Variante (5,05 Mio. € und 439.116 € teurer als der E-Fuhrpark). Der Schnittpunkt zwischen Diesel-Fuhrpark und E-Fuhrpark (ohne PV-Anlage) liegt bei 6,53 Jahren.

Bei den untersuchten E-Fuhrpark Varianten zeigt sich, dass diese aufgrund unterschiedlicher Anschaffungskosten der PV-Anlagen sowie des stationären Batteriespeichers, zunächst bis zu 487.766 € auseinanderliegen. Die geringeren Bezugskosten aus dem Stromnetz führen jedoch dazu, dass diese immer mehr zusammenlaufen und sich kreuzen, sodass nach 8 Jahren die Variante mit einer PV-Größe von 300 kWp und einem stationären Batteriespeicher von 630,88 kWh die kostengünstigste Variante darstellt (4,47 Mio. €) und die Differenz zu den anderen E-Fuhrpark Varianten nur maximal 132.579 € beträgt.

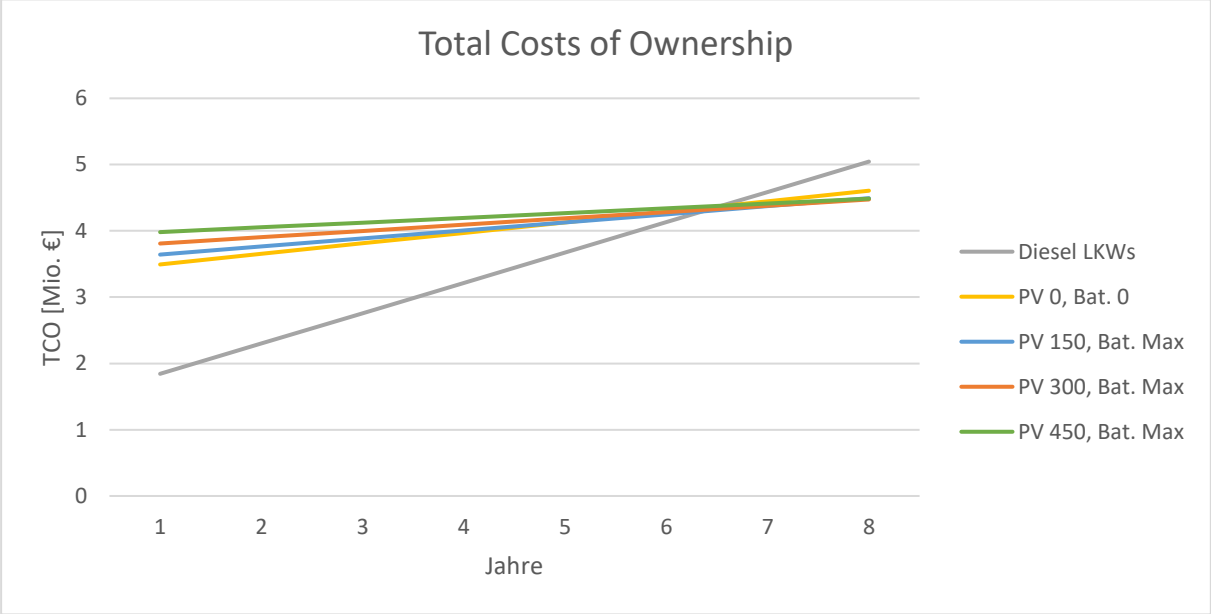


Abbildung 25: Total Costs of Ownership über 8 Jahre

4.5 Berücksichtigung der Wartungskosten

Werden bei der Berechnung zusätzlich Wartungskosten von 0,1094 €/km bei Diesel-LKW und 0,0766 €/km bei E-LKW (Lee and Thomas, 2017) berücksichtigt, erhöht dies die Differenz zwischen Diesel-LKW und dem E-Fuhrpark ohne PV-Anlage auf 641.820 € (siehe Abbildung 26). Die Werte der Wartungskosten entstammen jedoch der Literatur, da im Feldtest kein signifikanter Unterschied zwischen Diesel- und E-LKWs festgestellt werden konnte. Bei einer dauerhaften Umstellung des gesamten Fuhrparks ist jedoch anzunehmen, dass die anfänglichen hohen Wartungskosten des Feldtests abnehmen und sich jenen der Literatur angleichen. Die Kosten nach 8 Jahren belaufen sich auf 5,72 Mio. € für den Diesel-Fuhrpark und auf 4,95 Mio. € für den E-Fuhrpark mit einer PV-Größe von 300 kWp und einem stationären Batteriespeicher mit 630,88 kWh. Der Schnittpunkt zwischen Diesel- und E-Fuhrpark verschiebt sich um rund ein halbes Jahr nach vorne und liegt bei 6,00 Jahren.

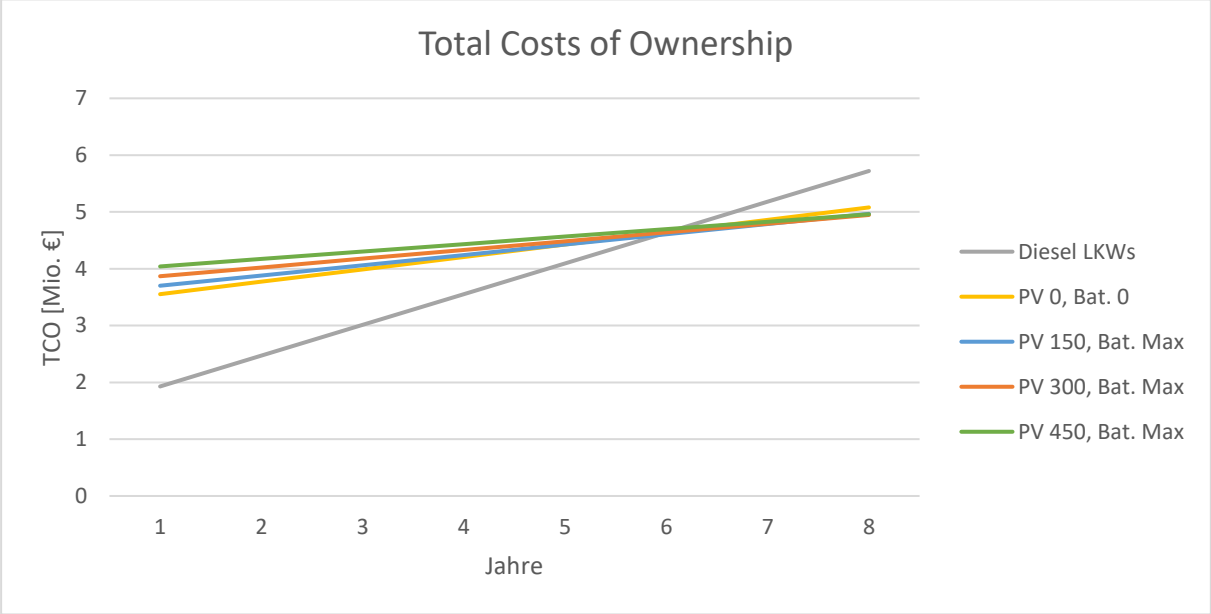


Abbildung 26: Total Costs of Ownership inkl. Wartungskosten über 8 Jahre

4.6 Berücksichtigung der Förderungen

Für die Berechnung der Förderungen wurden die in Kapitel 2.2 beschriebenen Fördersätze von 80% der Mehrkosten für die Anschaffung von E-LKW, sowie 40% der Anschaffungskosten für die Ladeinfrastruktur verwendet. Damit beläuft sich die Förderung auf 1.498.560€ für den E-LKW Fuhrpark und 30.073€ für die Ladeinfrastruktur. Weiters wurde für die PV-Anlage eine Förderung von 170€/kWp gemäß dem Erneuerbaren Ausbau Gesetz (OeMAG, 2022) berücksichtig.

Durch die Förderungen können die Investitionskosten (ohne PV-Anlage und stationärem Batteriespeicher) auf 1,8 Mio. € gesenkt werden. Durch die geförderten Investitionskosten und die geringeren Wartungs- und Betriebskosten, stellt der E-Fuhrpark bereits nach 1,3 Jahren die günstigere Lösung im Vergleich zum Diesel-Fuhrpark dar (siehe Abbildung 27). Nach 8 Jahren ist der E-Fuhrpark um 2,17 Mio. € günstiger als der Diesel-Fuhrpark. Durch die Förderung der PV-Anlage ist das Szenario mit der 450 kWp PV-Anlage und dem 1.063 kWh

Batteriespeicher die günstigste Lösung (197.100€ günstiger als das Szenario ohne PV-Anlage).

Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass sich die Höhe der Förderungen sowie die Voraussetzungen laufend ändern und dies nur den Stand zum Jahr 2022 darstellt. Weiters ist zu beachten, dass die Förderungen ein gewisses Volumen haben und daher bei vielen Förderanträgen keine Garantie auf eine Förderung in der vollen Höhe gegeben werden kann.

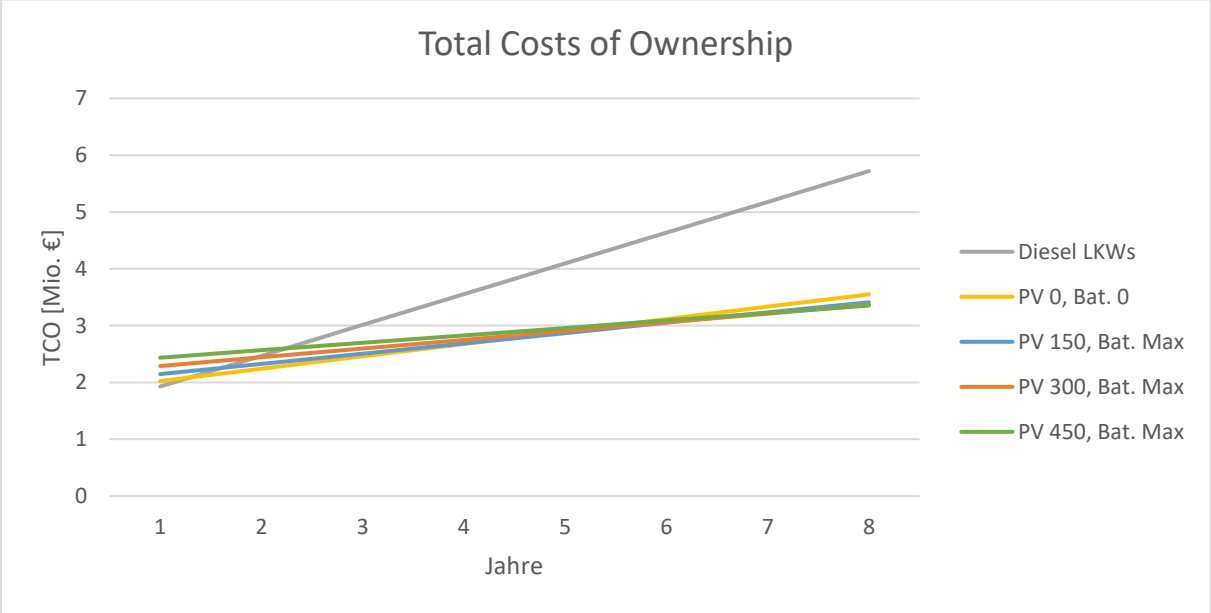


Abbildung 27: Total Costs of Ownership unter Berücksichtigung von Förderungen und Wartungskosten über 8 Jahre

4.7 Autarker Betrieb

Für die Berechnung eines autarken Betriebes wurden der Mittelwert der Wintermonate November bis Februar für die Dimensionierung der PV Anlage herangezogen.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine installierte PV-Leistung von 2.100 kWp benötigt wird, welche einer Fläche von rund 29.400 m² entspricht. Wird die Batterie so dimensioniert, dass diese die Ladestromversorgung nach einem

durchschnittlichen Tag für einen komplett verdunkelten Folgetag sichern kann, so muss diese auf rund 6.900 kWh ausgelegt werden.

Im Umkreis des Getränkelagers wurden die in Tabelle 8 aufgelisteten Flächen im Eigentum der Stiegl Immobilien GmbH festgestellt. Damit wird dargelegt, dass die erforderliche Fläche von 29.400 m² für den autarken Betrieb des Fuhrparks aufgebracht werden kann.

Grundstücksnummer	KG	Fläche [m²]	Nutzung
595	56531	19.307	Getränkelager und Parkplatz
739/1	56531	4.612	Parkplatz
736/1	56531	1.349	Parkplatz
740/1	56531	16.689	Gebäude
591/1	56531	5.051	Gebäude
731/4	56531	9.083	Stieglbräu Stallungen und Parkplatz
783/1	56531	77.630	Stieglbrauerei
731/2	56531	10.490	Stieglbrauerei

Tabelle 8: Grundstücke im Eigentum der Stiegl Immobilien GmbH am Standort Salzburg

Die Kosten für einen autarken Betrieb des Fuhrparks sind in Tabelle 9 ersichtlich und belaufen sich nach 8 Jahren auf 6,15 Mio. €. Damit ist diese Variante mit Abstand die teuerste und es entstehen Mehrkosten von 1,21 Mio. € im Vergleich zur kostengünstigsten Variante mit einer PV Anlage von 300 kWp. Das Einspeiseentgelt von 52.505 € pro Jahr kann hierbei nicht die höheren Investitionskosten ausgleichen. Ein wesentlicher Faktor ist hierbei die hohe Differenz zwischen 14,4 Cent/kWh für den Bezug und nur 4 Cent/kWh für das

Einspeisen in das Stromnetz. Ein Schnittpunkt mit der 300 kWp Variante wäre theoretisch erst nach 16 Jahren erreicht, wobei viele Komponenten (LKW, Batterie,…) diese Lebensdauer nicht erreichen würden.

Investitionskosten	**6,10 Mio. €**
PV Anlage	1.764.000 €
Batteriespeicher	1.001.100 €
Ladesäulen	75.182 €
E-LKW	3.259.200 €
Laufende Kosten pro Jahr	**6.617 €**
Stromkosten (Bezug)	0 €
Einspeiseentgelt	- 52.505 €
Wartungskosten	59.122 €
Gesamtkosten nach 8 Jahren	**6,15 Mio. €**

Tabelle 9: Kosten für einen autarken Betrieb des Fuhrparks

4.8 CO_2 Emissionen des LKW-Fuhrparks

Für die Berechnung der CO_2e Emissionen wird mit 3,14 kg/l Diesel gerechnet (Umweltbundesamt, 2019) und mit 55 g/kWh für den Bezug aus dem Stromnetz bei aktuellem Strommix (E-Control, 2020). Der Strommix soll jedoch bis 2030 aus 100% Erneuerbaren Energien bestehen, weshalb für den Betrachtungszeitraum von 8 Jahren mit gemittelten Emissionen von 27,5 g/kWh gerechnet wird.

Die Ergebnisse zeigen, dass durch den Umstieg auf E-LKW pro Jahr rund 771 t CO_2e eingespart werden können. Wird der E-LKW Fuhrpark aus dem Netz gespeist, führt dies zu Emissionen von 29 t CO_2e pro Jahr, welche jedoch durch

den Einsatz einer 450 kW PV-Anlage kombiniert mit einer Batterie von 1.063 kWh mehr als halbiert werden können (siehe Tabelle 10).

Die Berechnung bezieht sich jedoch nur auf die Betriebsphase des Fuhrparks. Die höheren Emissionen bei der Herstellung, sowohl der E-LKW, als auch der Batteriespeicher und der PV-Anlage, wurden in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt.

Diesel LKW	PV = 0 kW Bat. = 0,00 kWh	PV = 150 kW Bat. = 197,32 kWh	PV = 300 kW Bat. = 630,88 kWh	PV = 450 kW Bat. = 1.063,00 kWh
799,345	28,761	23,398	18,214	13,842

Tabelle 10: Emissionen des LKW-Fuhrparks in Tonnen CO_2-Äquivalente pro Jahr

Bezieht man in die Betrachtung die in Kapitel 2.6.1 beschriebenen 130 gCO_2e/kWh bei Lithium-Ionen-Akkus mit ein, so ergeben sich zusätzliche Emissionen von 1.037 t CO_2e bereits in der Anschaffungsphase des E-LKW Fuhrpark. Nach 8 Jahren können, wie in Abbildung 28 ersichtlich, durch einen E-Fuhrpark über 5.000 t CO_2e eingespart werden.

Diesel LKW	PV = 0 kW Bat. = 0,00 kWh	PV = 150 kW Bat. = 197,32 kWh	PV = 300 kW Bat. = 630,88 kWh	PV = 450 kW Bat. = 1.063,00 kWh
6.395	1.268	1.225	1.183	1.148

Abbildung 28: Emissionen des LKW-Fuhrparks in Tonnen CO_2e in 8 Jahren

5 Diskussion

In Bezug auf die erste Forschungsfrage wird festgestellt, dass nur LKW bis zu einer maximalen Reichweite von 250 km benötigt werden. Anhand der zu Verfügung gestellten Routendaten, kann eine Umstellung auf E-LKW in dieser Arbeit als problemlos beurteilt werden. Dies geht auch mit der Studie von Liimatainen et al. (2019) einher, welche in der Schweiz ein hohes Potential von 71% der Tonnenkilometer im Straßengüterverkehr sehen und insbesondere auf das sehr hohe Potential bei mittelschweren LKW (bis 26 t) hinweisen.

Der E-Fuhrpark würde sich aus LKW mit einer Reichweite von 120 km und mit einer Reichweite von 250 km zusammensetzen. Diese Reichweiten können heute bereits durch mehrere am Markt befindliche Modelle abgedeckt werden. Beispielsweise bietet Volvo mit dem Modell FL Electric und Renault mit dem Modell D Z.E. einen 16t-LKW mit einer Reichweite von bis zu 300 km an (Liimatainen, van Vliet and Aplyn, 2019). MAN bietet mit dem Modell eTGM einen E-LKW mit 26t und bis zu 190 km Reichweite an. Weiters gibt es verschiedene Modelle des Herstellers BYD mit bis zu 36t und einer Reichweite von 200 km (Liimatainen, van Vliet and Aplyn, 2019). Durch die beschriebene Auswahl, welche die zweite Forschungsfrage beantwortet, ist keine Abhängigkeit von nur einem Hersteller gegeben und es kann bei der Anschaffung von einem funktionierenden Marktumfeld ausgegangen werden.

Der in der dritten Forschungsfrage abgefragte benötigte Netzanschluss ist von dem jeweiligen Scenario abhängig. Ausschlaggebend ist jedenfalls die Anschlussleistung außerhalb der Arbeitszeit (16 – 7 Uhr). Wird der Ladebedarf der LKW rein durch das Stromnetz gedeckt, so wird eine Anschlussleistung von 288,9 kW benötigt. Dementsprechend ist ein Netzanschluss der Netzebene 6 (100 - 400 kW) notwendig (Wiener Netze, 2022). Bei einer 450 kW PV-Anlage und einem 1.063 kWh Batteriespeicher, wird eine Anschlussleistung von 148,18 kW benötigt, wodurch dennoch ein Anschluss an Netzebene 6 notwendig ist. Bei der

Verringerung der Anschlussleistung durch die Kombination von PV-Anlage und stationärem Batteriespeicher, wurde mit der durchschnittlichen Sonneneinstrahlung gerechnet und keine bewölkten Tage berücksichtigt. Zieht man eine Anschlussleistung von 288,9 kW heran, bei welcher jedenfalls alle LKW über Nacht geladen werden können, so beläuft sich das Netzbereitstellungsentgelt auf 44.112,14 € netto (Salzburg Netz, 2016). Die Anzahl der Ladesäulen ist primär von der Anzahl der E-PKW abhängig, wodurch im konkreten Fall 38 Ladesäulen mit einer Leistung von 22 kW und eine Ladesäule mit einer Leistung von 180 kW benötigt wird.

Die vierte Forschungsfrage, in welcher nach Maßnahmen gefragt wird wodurch die Umstellung möglichst nachhaltig umgesetzt werden kann, wird mit der Installation einer PV-Anlage und eines stationären Batteriespeichers beantwortet. Zieht man für den Vergleich die durchschnittlichen CO_2e Emissionen aus dem Stromnetz heran und bewertet gemäß dem Strom- und Gaskennzeichnungsbericht den Strom aus der PV-Anlage mit 0g CO_2e Emissionen (E-Control, 2020), so verringern sich die Emissionen immer weiter, je größer die PV-Anlage wird, bis hin zu einer Größe von 2.100 kWp, bei welcher ein autarker Betrieb des Fuhrparks möglich ist. Damit die tagsüber erzeugte Energie auch zum Laden der E-LKW verwendet werden kann, ist die Installation eines stationären Batteriespeichers notwendig. Dieser wird an die Größe der PV-Anlage angepasst und beläuft sich beim autarken Betrieb auf 6.900 kWh. Für den Batteriespeicher werden alte E-PKW Batterien verwendet, bei welchen durch die Wiederverwendung der Lebenszyklus verlängert wird. Kootstra et al. (2015) weißen in ihrer Studie auch auf den stabilisierenden Effekt für das Stromnetz durch dem Einsatz eines wiederverwendeten Batteriespeichers hin. Die Studie von Wolff et al. (2019), welche Lithium Sulfur Batterien mit einer höheren Kapazität untersucht, prognostiziert jedoch einen langfristig schrumpfenden Markt für „second life“ Batterien, da diese aufgrund steigender Kapazität auch mit Restkapazitäten von 60% oder weniger noch im „first life“ verwendet werden können. Da bei den

Batterien jedoch ein Zusammenhang zwischen Kapazität, Gewicht und Kosten besteht, ist anzunehmen, dass bei effizienteren Batterien dennoch nur die benötigte beziehungsweise vom Kunden gewünschte Batteriegröße verbaut wird und diese bei rund 80% Restkapazität getauscht wird. In dieser Arbeit wird daher von einem weiter steigenden Markt für gebrauchte E-PKW Batterien ausgegangen, wie dies auch von Martinez-Laserna et al. (2018) und Tong et al. (2013) beschrieben wird.

In Bezug auf die fünfte Forschungsfrage, nach den Total Cost of Ownership (TCO), zeigt die Berechnung, dass ein Umstieg auf einen E-Fuhrpark kostengünstiger wäre, als den Dieselfuhrpark zu erneuern. Laut der durchgeführten Berechnung ist nach rund 6,5 Jahren der E-Fuhrpark aufgrund der niedrigeren Betriebskosten günstiger, wodurch am Ende des Betrachtungszeitraumes von 8 Jahren Einsparungen von rund 440.000 € möglich sind. Noch günstiger fällt die Variante mit der Kombination einer 300 kWp PV-Anlage und einem 630 kWh Batteriespeicher aus. Hierbei ist jedoch nur mit jährlichen Durchschnittswerten gerechnet worden und sowohl tägliche, als auch saisonale Schwankungen wurden nicht berücksichtigt. Daher wird an sonnigen Sommertagen mehr Strom produziert werden, als gespeichert werden kann und somit zu niedrigen Einspeisekonditionen ins Netz eingespeist werden müssen, während an trüben Wintertagen mehr Strom aus dem Netz bezogen werden muss. Die von Kootstra et al. (2015) durchgeführte Studie in Kalifornien zeigt jedoch, dass vor allem bei großen Verbrauchern die Kombination von PV-Anlage und Batterie eine Reduktion der Kosten bewirkt. Kamath et al. (2020) kommen in ihrer ebenfalls in den USA durchgeführten Studie zu dem Schluss, dass sich die Kosten durch den Einsatz eines stationären Batteriespeichers um 15-20% reduzieren lassen im Vergleich zur alleinigen Installation einer PV-Anlage.

6 Conlusio

Die in der Arbeit durchgeführte Berechnung zeigt, dass ein Umstieg auf einen E-Fuhrpark bei STIEGL möglich ist und auch aus wirtschaftlichen Aspekten in Erwägung gezogen werden sollte. Die optimierten Routen sind durch die Arbeitszeit, und nicht durch die Reichweite der E-LKW beschränkt. Die höheren Betriebskosten eines Diesel-Fuhrparks gleichen höhere Anschaffungskosten des E-Fuhrparks nach 6,5 Jahren aus und führen im Betrachtungszeitraum von 8 Jahren zu einem Einsparungspotential von rund 440.000 €. Weiters kann durch den Einsatz einer PV-Anlage und eines Batteriespeichers die Abhängigkeit von Energieimporten reduziert werden und es wäre mit hohen Investitionskosten sogar ein autarker Betrieb des Fuhrparks möglich. In Zeiten von stark steigenden Energiepreisen sowie einer unsicheren Versorgungslage, kann diese Erkenntnis, neben den in der Arbeit beschriebenen nachhaltigen Aspekten, auch zu einer Reduktion von Kosten- und Versorgungsrisiken dienen.

In einer weiterführenden Arbeit können die angenommenen Preise evaluiert werden sowie die Berechnungen mit einem angepassten Zinssatz durchgeführt werden. Um noch solidere Aussagen treffen zu können, sollten in einer weiterführenden Arbeit die täglichen und saisonalen Schwankungen bei der solaren Einstrahlung berücksichtigt werden, anhand derer sich eine veränderte Dimensionierung der PV-Anlage und insbesondere des stationären Batteriespeichers ergeben könnte. Die Betrachtung der CO_2e-Emissionen wurde nur auf die Betriebsphase beschränkt, bei welcher künftig der Kauf von CO2 Zertifikaten notwendig wird. Um jedoch die Umstellung auf den E-Fuhrpark aus nachhaltiger Sicht besser bewerten zu können, wäre eine umfassendere Betrachtung des gesamten Lebenszyklus (inkl. Herstellung und Entsorgung) notwendig.

7 Literaturverzeichnis

Ahmadi, L., Young, S. B., Fowler, M., Fraser, R. A. and Achachlouei, M. A. (2017) 'A cascaded life cycle: reuse of electric vehicle lithium-ion battery packs in energy storage systems', *International Journal of Life Cycle Assessment,* 22(1), pp. 111-124.

Anderhofstadt, B. and Spinler, S. (2019) 'Factors affecting the purchasing decision and operation of alternative fuel-powered heavy-duty trucks in Germany - A Delphi study', *Transportation Research Part D-Transport and Environment,* 73, pp. 87-107.

Assuncao, A., Moura, P. S. and de Almeida, A. T. (2016) 'Technical and economic assessment of the secondary use of repurposed electric vehicle batteries in the residential sector to support solar energy', *Applied Energy,* 181, pp. 120-131.

Austria, P. (o.J.) *Technische Grundlagen*. Wien: Bundesverband PHOTOVOLTAIC AUSTRIA. Available at: https://pvaustria.at/technische-grundlagen/ (Accessed: 04.04. 2022).

Baumann, M., Peters, J. F., Weil, M. and Grunwald, A. (2017) 'CO2 Footprint and Life-Cycle Costs of Electrochemical Energy Storage for Stationary Grid Applications', *Energy Technology,* 5(7), pp. 1071-1083.

Benda, V. and Cerna, L. (2020) 'PV cells and modules - State of the art, limits and trends', *Heliyon,* 6(12).

BOKU 2015. MEGAWATT-Logistics, Projektantrag. Wien: Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG).

BOKU 2020. MegaWATT Logistics - Second Interim Report. Wien: Universität für Bodenkultur Wien.

Debnath, U. K., Ahmad, I. and Habibi, D. (2014) 'Quantifying economic benefits of second life batteries of gridable vehicles in the smart grid', *International Journal of Electrical Power & Energy Systems,* 63, pp. 577-587.

E-Control 2020. Strom- und Gaskennzeichnungsbericht für das Prüfungsjahr 2020. Wien: E-Control.

E-Control (2021) *Zusammensetzung des Strompreises*. Wien: Energie-Control Austria für die Regulierung der Elektrizitäts- und Erdgaswirtschaft (E-Control). Available at: https://www.e-control.at/industrie/strom/strompreis/preiszusammensetzung (Accessed: 29.03. 2022).

E-Control (2022) 'Strompreisentwicklung - Jahresreihen'. Available at: https://www.e-control.at/statistik/strom/marktstatistik/preisentwicklung (Accessed 29.03.2022).

E-Controll (2022) *Tarifkalkulator*. Wien: Energie-Control Austria für die Regulierung der Elektrizitäts- und Erdgaswirtschaft (E-Control). Available at: https://www.e-control.at/industrie/service-beratung/gewerbe-tarifkalkulator (Accessed: 01.04. 2022).

Europäische Kommission 2021a. Europäischer Grüner Deal - Die Verwirklichung unserer Ziele. Luxemburg: Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union.
Europäische Kommission (2021b) *Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen.* Brüssel: EUR-Lex.
Europäisches Parlament (2019) *CO2-Emissionen von Autos: Zahlen und Fakten.* Brüssel: Europäisches Parlament. Available at: https://www.europarl.europa.eu/news/de/headlines/society/20190313STO31218/co2-emissionen-von-autos-zahlen-und-fakten-infografik (Accessed: 27.08. 2021).
Feldman, D., Dummit, K., Zuboy, J., Heeter, J., XU, K. and Margolis, R. 2022. Spring 2022

Solar Industry Update. USA: National Renewable Energy Laboratory.
Feng, W. and Figliozzi, M. (2013) 'An economic and technological analysis of the key factors affecting the competitiveness of electric commercial vehicles: A case study from the USA market', *Transportation Research Part C-Emerging Technologies,* 26, pp. 135-145.
FFG 2022. Förderung emissionsfreier Nutzfahrzeuge. Wien: Österreichische Forschungsförderunggesellschaft mbH.
Fina, B., Auer, H. and Friedl, W. (2020) 'Cost-optimal economic potential of shared rooftop PV in energy communities: Evidence from Austria', *Renewable Energy,* 152, pp. 217-228.
Geizhals *ABB Terra AC Wallbox TAC-W22-T-0.* Wien: Preisvergleich Internet Services AG. Available at: https://geizhals.at/abb-terra-ac-wallbox-tac-w22-t-0-6agc081279-a2528178.html?hloc=at (Accessed: 19.03. 2022).
go-e GmbH *go-eCharger HOMEfix 22 kW.* Feldkirchen in Kärnten: go-e GmbH. Available at: https://shop.go-e.co/go-eCharger-home-fixinstallation (Accessed: 19.03. 2022).
Hartl, L. (o.J.) *Wie viel Fläche wird für eine 1 kWp PV-Anlage benötigt?* Wien: Dachgold e.U. Available at: https://www.dachgold.at/pv-lexikon/wie-viel-flaeche-wird-fuer-eine-1-kwp-pv-anlage-benoetigt/ (Accessed: 04.04. 2022).
Holmberg, K. and Erdemir, A. (2019) 'The impact of tribology on energy use and CO2 emission globally and in combustion engine and electric cars', *Tribology International,* 135, pp. 389-396.
Honrubia-Escribano, A., Ramirez, F. J., Gomez-Lazaro, E., Garcia-Villaverde, P. M., Ruiz-Ortega, M. J. and Parra-Requena, G. (2018) 'Influence of solar technology in the economic performance of PV power plants in Europe. A comprehensive analysis', *Renewable & Sustainable Energy Reviews,* 82, pp. 488-501.
Ito, M., Lespinats, S., Merten, J., Malbranche, P. and Kurokawa, K. (2016) 'Life cycle assessment and cost analysis of very large-scale PV systems and suitable locations in the world', *Progress in Photovoltaics,* 24(2), pp. 159-174.
Jost, M., Kegelmann, L., Korte, L. and Albrecht, S. (2020) 'Monolithic Perovskite Tandem Solar Cells: A Review of the Present Status and Advanced

Characterization Methods Toward 30% Efficiency', *Advanced Energy Materials,* 10(26).
Kamath, D., Shukla, S., Arsenault, R., Kim, H. C. and Anctil, A. (2020) 'Evaluating the cost and carbon footprint of second-life electric vehicle batteries in residential and utility-level applications', *Waste Management,* 113, pp. 497-507.
Kim, H. C., Wallington, T. J., Arsenault, R., Bae, C., Ahn, S. and Lee, J. (2016) 'Cradle-to-Gate Emissions from a Commercial Electric Vehicle Li-Ion Battery: A Comparative Analysis', *Environmental Science & Technology,* 50(14), pp. 7715-7722.
Klima- und Energiefonds 2022. Leitfaden E-Mobilität für Betriebe, Gebietskörperschaften

und Vereine. Wien: Klima- und Energiefonds.
Kootstra, M. A., Tong, S. J. and Park, J. W. (2015) 'Photovoltaic grid stabilization system using second life lithium battery', *International Journal of Energy Research,* 39(6), pp. 825-841.
Lee, D. Y. and Thomas, V. M. (2017) 'Parametric modeling approach for economic and environmental life cycle assessment of medium-duty truck electrification', *Journal of Cleaner Production,* 142, pp. 3300-3321.
Liimatainen, H., van Vliet, O. and Aplyn, D. (2019) 'The potential of electric trucks - An international commodity-level analysis', *Applied Energy,* 236, pp. 804-814.
Liu, P. Y., Han, N., Wang, W., Ran, R., Zhou, W. and Shao, Z. P. (2021) 'High-Quality Ruddlesden-Popper Perovskite Film Formation for High-Performance Perovskite Solar Cells', *Advanced Materials,* 33(10).
Liu, W., Placke, T. and Chau, K. T. (2022) 'Overview of batteries and battery management for electric vehicles', *Energy Reports,* 8, pp. 4058-4084.
Mareev, I., Becker, J. and Sauer, D. U. (2018) 'Battery Dimensioning and Life Cycle Costs Analysis for a Heavy-Duty Truck Considering the Requirements of Long-Haul Transportation', *Energies,* 11(1).
Martinez-Laserna, E., Gandiaga, I., Sarasketa-Zabala, E., Badeda, J., Stroe, D. I., Swierczynski, M. and Goikoetxea, A. (2018) 'Battery second life: Hype, hope or reality? A critical review of the state of the art', *Renewable & Sustainable Energy Reviews,* 93, pp. 701-718.
Netzer, L. 2021. Reduktionspotenzial der Akkukapazität von E-Lkw durch ein

Oberleitung. Wien: Universität für Bodenkultur Wien.
Netzer, L., Wöss, D., Märzinger, T., Müller, W. and Pröll, T. 2022. Impact of an e-highway on the required battery capacities

and charging infrastructure for cargo transport with e-trucks on the basis of a

real use case. Vienna: Energies 2022.
NREL (2022) *Best Research-Cell Efficiency Chart*. USA: National Renewable Energy Laboratory. Available at: https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html (Accessed: 23.09. 2022).

OeMAG (2022) *EAG-Investitionszuschüsse*. Wien: OeMAG Abwicklungsstelle für Ökostrom AG. Available at: https://www.oem-ag.at/de/foerderung/photovoltaik/eag-investitionszuschuesse/ (Accessed: 26.09. 2022).
ORF (2022) *Weniger Pkws, aber mehr E-Autos und SUVs*. Wien: Österreichischer Rundfunk. Available at: https://oesterreich.orf.at/stories/3138980/ (Accessed: 27.08. 2022).
Quantron 2020. Preisliste 2020. Gersthofen: Quantron AG.
Raugei, M. and Winfield, P. (2019) 'Prospective LCA of the production and EoL recycling of a novel type of Li-ion battery for electric vehicles', *Journal of Cleaner Production,* 213, pp. 926-932.
Razykov, T. M., Ferekides, C. S., Morel, D., Stefanakos, E., Ullal, H. S. and Upadhyaya, H. M. (2011) 'Solar photovoltaic electricity: Current status and future prospects', *Solar Energy,* 85(8), pp. 1580-1608.
Rechnungshof Österreich (2021) *Bericht des Rechnungshofes: Klimaschutz in Österreich - Maßnahmen und Zielerreichung 2020*, Wien: Rechnungshof Österreich. Available at: https://www.rechnungshof.gv.at/rh/home/home/Bund_2021_16_Klimaschutz_in_Oesterreich.pdf (Accessed: 29.08.2021).
Renault 2022. Renault ZOE E-TECH Electric Preisliste. Wien: Renault Österreich GmbH.
Rudschies, W. (2022) *ADAC Test Wallboxen: Welche ist die beste?* München: Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC). Available at: https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/tests/elektromobilitaet/wallboxen/ (Accessed: 19.03. 2022).
Salzburg Netz 2016. Netzbereitstellungsentgelt. Salzburg: Salzburg Netz GmbH.
Sathre, R., Scown, C. D., Kavvada, O. and Hendrickson, T. P. (2015) 'Energy and climate effects of second-life use of electric vehicle batteries in California through 2050', *Journal of Power Sources,* 288, pp. 82-91.
Schallauer, D. (2020) *Aufbau und Kalibrierung eines isothermen Kalorimeters zur Untersuchung der Wärmefreisetzung beim Zyklieren von Lithium-Ionen Zellen.* Diplomingenieur, Universität für Bodenkultur, Wien.
Sen, B., Ercan, T. and Tatari, O. (2017) 'Does a battery-electric truck make a difference? - Life cycle emissions, costs, and externality analysis of alternative fuel-powered Class 8 heavy-duty trucks in the United States', *Journal of Cleaner Production,* 141, pp. 110-121.
Strickland, D., Chittock, L., Stone, D. A., Foster, M. P. and Price, B. (2014) 'Estimation of Transportation Battery Second Life for Use in Electricity Grid Systems', *Ieee Transactions on Sustainable Energy,* 5(3), pp. 795-803.
Taefi, T. T., Stutz, S. and Fink, A. (2017) 'Assessing the cost-optimal mileage of medium-duty electric vehicles with a numeric simulation approach', *Transportation Research Part D-Transport and Environment,* 56, pp. 271-285.
Tanco, M., Cat, L. and Garat, S. (2019) 'A break-even analysis for battery electric trucks in Latin America', *Journal of Cleaner Production,* 228, pp. 1354-1367.

Technology, H. I. f. G. (2021) *Openrouteservice*. Heidelberg: Heidelberg Institute for Geoinformation Technology. Available at: https://maps.openrouteservice.org (Accessed: 19.02. 2022).
Tesla (2022) *Verbrachsangabe und Energieeffizienz*. Schweiz: Tesla. Available at: https://www.tesla.com/de_CH/support/european-union-energy-label (Accessed: 20.02. 2022).
Thackeray, M. M., Wolverton, C. and Isaacs, E. D. (2012) 'Electrical energy storage for transportation-approaching the limits of, and going beyond, lithium-ion batteries', *Energy & Environmental Science,* 5(7), pp. 7854-7863.
Tong, S. J., Same, A., Kootstra, M. A. and Park, J. W. (2013) 'Off-grid photovoltaic vehicle charge using second life lithium batteries: An experimental and numerical investigation', *Applied Energy,* 104, pp. 740-750.
Triami Media (2022) *Euribor-Werte pro Jahr*. Utrecht: Triami Media B.V. Available at: https://www.euribor-rates.eu/de/euribor-werte-pro-jahr/ (Accessed: 04.09. 2022).
Tyagi, V. V., Rahim, N. A. A., Rahim, N. A. and Selvaraj, J. A. L. (2013) 'Progress in solar PV technology: Research and achievement', *Renewable & Sustainable Energy Reviews,* 20, pp. 443-461.
Umweltbundesamt (2019) *Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger*. Wien: Umweltbundesamt GmbH. Available at: https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html (Accessed: 01.05. 2022).
Umweltbundesamt (2021a) *Ausblick Klimaziele 2020 und 2030*. Wien: Umweltbundesamt GmbH. Available at: https://www.umweltbundesamt.at/news210119/ausblick-klimaziele-2020-und-2030 (Accessed: 29.08. 2021).
Umweltbundesamt (2021b) *Übereinkommen von Paris*. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt. Available at: https://www.umweltbundesamt.de/impressum (Accessed: 27.08. 2022).
Vallera, A. M., Nunes, P. M. and Brito, M. C. (2021) 'Why we need battery swapping technology', *Energy Policy,* 157.
Volkswagen *Volkswagen ID.3*. Salzburg: Porsche Austria GmbH & Co OG. Available at: https://www.volkswagen.at/id3 (Accessed: 20.02. 2022).
von Ammon, W. (2014) 'FZ and CZ crystal growth: Cost driving factors and new perspectives', *Physica Status Solidi a-Applications and Materials Science,* 211(11), pp. 2461-2470.
Wallbox Chargers *Wallbox Chargers, S.L.* Madrid: Wallbox Chargers, S.L. Available at: https://wallbox.com/de_at/commander-2-typ-2-5m-22kw-dreiphasige (Accessed: 19.03. 2022).
Webfleet Solutions (2020) *So viel Kraftstoff verbrauchen LKW*. Leipzig: Webfleet Solutions Sales B.V. Available at: https://www.webfleet.com/de_de/webfleet/blog/so-viel-kraftstoff-verbrauchen-lkw/ (Accessed: 18.04. 2022).

Welzel, F., Klinck, C. F., Pohlmann, Y. and Bednarczyk, M. (2021) 'Grid and user-optimized planning of charging processes of an electric vehicle fleet using a quantitative optimization model', *Applied Energy,* 290.
Wiener Netze (2022) *Strom*. Wien: Wiener Netze GmbH. Available at: https://www.wienernetze.at/stromnetzbedingungen (Accessed: 26.06. 2022).
Wirtschaftskammer Österreich, F. M. (2022) *Kraftstoffpreise zum 11. April 2022 - Wöchentliche Erhebung des FVMI*. Wien: Wirtschaftskammer Österreich. Available at: https://www.wko.at/branchen/industrie/mineraloelindustrie/kraftstoffpreise.html (Accessed: 18.04. 2022).
WKO (2022) *Elektromobilität aus steuerlicher Sicht*. Wien: Wirtschaftskammer Österreich. Available at: https://www.wko.at/service/steuern/elektromobilitaet-aus-steuerlicher-sicht.html (Accessed: 26.09. 2022).
Wolff, D., Casals, L. C., Benveniste, G., Corchero, C. and Trilla, L. (2019) 'The Effects of Lithium Sulfur Battery Ageing on Second-Life Possibilities and Environmental Life Cycle Assessment Studies', *Energies,* 12(12).
Yang, F. F., Wang, D., Zhao, Y., Tsui, K. L. and Bae, S. J. (2018) 'A study of the relationship between coulombic efficiency and capacity degradation of commercial lithium-ion batteries', *Energy,* 145, pp. 486-495.
ZAMG (2022) *Messstationen Stundendaten*. Wien: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG). Available at: https://data.hub.zamg.ac.at/dataset/klima-hourly (Accessed: 04.02. 2022).
Zeng, X. Q., Li, M., Abd El-Hady, D., Alshitari, W., Al-Bogami, A. S., Lu, J. and Amine, K. (2019) 'Commercialization of Lithium Battery Technologies for Electric Vehicles', *Advanced Energy Materials,* 9(27).
Zhao, Y., Onat, N. C., Kucukvar, M. and Tatari, O. (2016) 'Carbon and energy footprints of electric delivery trucks: A hybrid multi-regional input-output life cycle assessment', *Transportation Research Part D-Transport and Environment,* 47, pp. 195-207.
Zhou, T., Roorda, M. J., MacLean, H. L. and Luk, J. (2017) 'Life cycle GHG emissions and lifetime costs of medium-duty diesel and battery electric trucks in Toronto, Canada', *Transportation Research Part D-Transport and Environment,* 55, pp. 91-98.
Zubi, G., Adhikari, R. S., Sanchez, N. E. and Acuna-Bravo, W. (2020) 'Lithium-ion battery-packs for solar home systems: Layout, cost and implementation perspectives', *Journal of Energy Storage,* 32.

8 Anhang

8.1 Routenzuordnung

Montag

LKW	Alpenstrasse-Gneis-Leopoldskron	Bergheim-Braunau	Bergtour	Elsbethen-Abtenau	Frächtertour	Gnigl-Parsch-Aigen	Itzling-Gnigl	KA-Tour Pohn	Koppl-Bad Goisern	Maxglan-Wals-Taxham-Liefering	Obertrum-Mattighofen	Seekirchen-Straßwalchen-Ebense	Größe (120 km, 250 km, 400 km)
1			1x						1x				Mittel
2			1x						1x				Mittel
3			1x						1x				Mittel
4												1x	Mittel
5												1x	Mittel
6												1x	Mittel
7				1x						1x			Mittel
8				1x						1x			Mittel
9				1x						1x			Mittel
10				1x						1x			Mittel
11		1x								1x			Mittel
12		1x								1x			Mittel
13		1x								1x			Mittel
14					2x								Mittel
15	1x				1x								Mittel
16						1x	1x						Mittel
17	2x												Mittel

18							2x						Klein
19							1x						Klein
20													Klein
21													Klein

Dienstag

LKW	Alpenstrasse-Gneis-Leopoldskron	Bergheim-Braunau	Bergtour	Elsbethen-Abtenau	Frächtertour	Gnigl-Parsch-Aigen	Itzling-Gnigl	KA-Tour Pohn	Koppl-Bad Goisern	Maxglan-Wals-Taxham-Liefering	Obertrum-Mattighofen	Seekirchen-Straßwalchen-Ebense	Größe (120 km, 250 km, 400 km)
1									1x				Mittel
2									1x				Mittel
3									1x				Mittel
4												1x	Mittel
5												1x	Mittel
6												1x	Mittel
7				1x						1x			Mittel
8				1x						1x			Mittel
9				1x						1x			Mittel
10		1x								1x			Mittel
11		1x								1x			Mittel
12	1x												Mittel
13	1x												Mittel
14											1x		Mittel
15					2x								Mittel
16					2x								Mittel

17						1x	1x						Mittel
18						1x	1x						Klein
19	2x												Klein
20							1x						Klein
21													Klein

Mittwoch

LKW	Alpenstrasse-Gneis-Leopoldskron	Bergheim-Braunau	Bergtour	Elsbethen-Abtenau	Frächtertour	Gnigl-Parsch-Aigen	Itzling-Gnigl	KA-Tour Pohn	Koppl-Bad Goisern	Maxglan-Wals-Taxham-Liefering	Obertrum-Mattighofen	Seekirchen-Straßwalchen-Ebense	Größe (120 km, 250 km, 400 km)
1			1x						1x				Mittel
2			1x						1x				Mittel
3									1x				Mittel
4									1x				Mittel
5												1x	Mittel
6												1x	Mittel
7				1x						1x			Mittel
8				1x						1x			Mittel
9		1x								1x			Mittel
10		1x								1x			Mittel
11		1x								1x			Mittel
12											1x		Mittel
13											1x		Mittel
14					2x								Mittel
15						1x	1x						Mittel

16	2x												Mittel
17	2x												Mittel
18	2x												Klein
19													Klein
20													Klein
21													Klein

Donnerstag

LKW	Alpenstrasse-Gneis-Leopoldskron	Bergheim-Braunau	Bergtour	Elsbethen-Abtenau	Frächtertour	Gnigl-Parsch-Aigen	Itzling-Gnigl	KA-Tour Pohn	Koppl-Bad Goisern	Maxglan-Wals-Taxham-Liefering	Obertrum-Mattighofen	Seekirchen-Straßwalchen-Ebense	Größe (120 km, 250 km, 400 km)
1			1x						1x				Mittel
2									1x				Mittel
3									1x				Mittel
4									1x				Mittel
5									1x				Mittel
6												1x	Mittel
7												1x	Mittel
8												1x	Mittel
9				1x						1x			Mittel
10				1x						1x			Mittel
11				1x						1x			Mittel
12				1x						1x			Mittel
13		1x								1x			Mittel
14		1x											Mittel

15		1x											Mittel
16		1x											Mittel
17					2x								Mittel
18						1x		1x					Klein
19						1x		1x					Klein
20	2x												Klein
21							1x						Klein

Freitag

LKW	Alpenstrasse-Gneis-Leopoldskron	Bergheim-Braunau	Bergtour	Elsbethen-Abtenau	Frächtertour	Gnigl-Parsch-Aigen	Itzling-Gnigl	KA-Tour Pohn	Koppl-Bad Goisern	Maxglan-Wals-Taxham-Liefering	Obertrum-Mattighofen	Seekirchen-Straßwalchen-Ebense	Größe (120 km, 250 km, 400 km)
1									1x				Mittel
2									1x				Mittel
3									1x				Mittel
4												1x	Mittel
5												1x	Mittel
6				1x						1x			Mittel
7				1x						1x			Mittel
8				1x						1x			Mittel
9				1x						1x			Mittel
10				1x						1x			Mittel
11				1x									Mittel
12		1x											Mittel
13		1x											Mittel

14		1x											Mittel
15											1x		Mittel
16					2x								Mittel
17	1x				1x								Mittel
18	2x												Klein
19	2x												Klein
20							2x						Klein
21							1x						Klein

8.2 Total Investment Costs

Kosten [€]	Diesel LKWs	PV 0, Bat. 0	PV 150, Bat. 179,32 kWh	PV 300, Bat. 630,88 kWh	PV 450, Bat. 1063,00 kWh
LKW	1.386.000	3.259.200	3.259.200	3.259.200	3.259.200
PV-Anlage	0	0	126.000	252.000	378.000
Batterie	0	0	60.293	128.162	196.676
Ladesäulen	0	75.182	75.182	75.182	75.182
Summe (TIC) [Mio. €]	**1,386**	**3,334382**	**3,520675**	**3,714544**	**3,909058**

8.3 Betriebskosten

Diesel-/Stromkosten nach Szenarien in Euro.

Jahr	Diesel LKWs	PV 0, Bat. 0	PV 150, Bat. 179,32 kWh	PV 300, Bat. 630,88 kWh	PV 450, Bat. 1063,00 kWh
1	457.460	159.023	121.601	94.930	72.113
2	914.920	318.046	243.203	189.860	144.226
3	1.372.380	477.068	364.804	284.790	216.339
4	1.829.840	636.091	486.406	379.721	288.452
5	2.287.300	795.114	608.007	474.651	360.565
6	2.744.760	9.54.137	729.609	569.581	432.678

7	3.202.220	1.113.159	851.210	664.511	504.792
8	3.659.680	1.272.182	972.812	759.441	576.905

Diesel-/Stromkosten und Betriebskosten nach Szenarien in Euro.

Jahr	Diesel LKWs	PV 0, Bat. 0	PV 150, Bat. 179,32 kWh	PV 300, Bat. 630,88 kWh	PV 450, Bat. 1063,00 kWh
1	541.920	218.145	180.724	154.052	131.235
2	1.083.840	436.290	361.447	308.104	262.470
3	1.625.760	654.434	542.171	462.157	393.705
4	2.167.680	872.579	722.894	616.209	524.940
5	2.709.600	1.090.724	903.618	770.261	656.176
6	3.251.520	1.308.869	1.084.341	924.313	787.411
7	3.793.440	1.527.014	1.265.065	1.078.365	918.646
8	4.335.360	1.745.158	1.445.788	1.232.418	1.049.881

8.4 Total Costs of Ownership

Total Costs of Ownership ohne Wartungskosten in Mio. Euro.

Jahr	Diesel LKWs	PV 0, Bat. 0	PV 150, Bat. 179,32 kWh	PV 300, Bat. 630,88 kWh	PV 450, Bat. 1063,00 kWh
1	1,843	3,493	3,642	3,809	3,981
2	2,301	3,652	3,764	3,904	4,053
3	2,758	3,811	3,885	3,999	4,125
4	3,216	3,970	4,007	4,094	4,198
5	3,673	4,129	4,129	4,189	4,270
6	4,131	4,289	4,250	4,284	4,342
7	4,588	4,448	4,372	4,379	4,414
8	5,046	4,607	4,493	4,474	4,486

Total Costs of Ownership mit Wartungskosten in Mio. Euro.

Jahr	Diesel LKWs	PV 0, Bat. 0	PV 150, Bat. 179,32 kWh	PV 300, Bat. 630,88 kWh	PV 450, Bat. 1063,00 kWh
1	1,928	3,553	3,701	3,869	4,040
2	2,470	3,771	3,882	4,023	4,172
3	3,012	3,989	4,063	4,177	4,303
4	3,554	4,207	4,244	4,331	4,434
5	4,096	4,425	4,424	4,485	4,565
6	4,638	4,643	4,605	4,639	4,696
7	5,179	4,861	4,786	4,793	4,828
8	5,721	5,080	4,966	4,947	4,959