

# **Dimensionierung von Tankstellen an der A96 bei vollständiger Elektrifizierung des derzeitigen deutschen PKW-Straßenverkehrs**

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

**Master of Science**

Fachhochschule Vorarlberg

Energietechnik und Energiewirtschaft, MSc

Betreut von

Dipl.-Ing. Robert Hoschek

Vorgelegt von

B.Eng. Florian Reitmair

Dornbirn, 28. August 2018

## Danksagung

Ich möchte mich zunächst bei allen Personen bedanken, die mich während des Schreibens der Masterarbeit stets aktiv und passiv unterstützt haben. Jedoch möchte ich folgende Personen im Besonderen hervorheben.

Robert Hoschek möchte ich dafür danken, dass er mir dieses Thema aufgrund seiner Eigenbegeisterung zur Elektrifizierung des Straßenverkehrs erst ermöglicht hat. Die vielen hilfreichen Diskussionen zur Eingrenzung der Themenstellung waren des Öfteren sehr zeitintensiv gewesen. Auch während des Schreibens hatte ich stets Deine Unterstützung und konnte meine Fragen via Internet-Telefonie an Dich richten. Herzlichen Dank für eine zeitaufwändige „Fern-Betreuung“.

Des Weiteren danke ich dem Studiengangsleiter Klaus Rheinberger für die stetig erbrachten Bemühungen sowohl während der Masterarbeit als auch während der gesamten zweijährigen Studienzzeit. 2015 konntest Du mich auf der Master and More Messe in Stuttgart überzeugen, ein berufsbegleitendes Fernstudium in Vorarlberg zu beginnen, welches nun mit Abgabe vorliegender Masterarbeit sein Ende finden wird. Herzlichen Dank für die allgegenwärtige Studiums begleitende Unterstützung.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Barbara bedanken, die während der gesamten Zeit des Masterstudiums in guten wie auch schlechten Tagen immerzu Verständnis gezeigt, mir gleichzeitig neuen Mut zugesprochen hat und außerdem ihre künstlerischen Fähigkeiten in diese Arbeit einbringen konnte. Herzlichen Dank für Dein Fingerspitzengefühl und dass Du während der vergangenen zwei Jahre an meiner Seite warst.

München im August 2018  
Florian Reitmair

## Kurzreferat

Dimensionierung von Tankstellen an der A96 bei vollständiger Elektrifizierung des derzeitigen deutschen PKW-Straßenverkehrs

Das Ziel der Masterarbeit ist es, ausgewählte Tankstellen an der A96 unter Voraussetzung einer vollständigen Elektrifizierung des deutschen PKW-Straßenverkehrs analog des heutigen Tankverhaltens zu dimensionieren.

Zu Beginn der Masterarbeit wird die elektrische Leistung berechnet, welche die deutschen PKW bei vollständiger Elektrifizierung des deutschen PKW-Straßenverkehrs benötigen werden. Um das Ergebnis auf Plausibilität überprüfen zu können, wird die Berechnung mit zwei verschiedenen Ansätzen vollzogen. Einerseits werden als Grundlage durchschnittliche Jahresfahrstrecken der Autofahrer/-innen verwendet und andererseits wird über den Primärenergiebedarf, den Fahrzeugbestand und den Wirkungsgraden von Ottomotoren und Elektromotoren die zu bestimmende Leistung berechnet.

Öffentliche Daten aus Verkehrszählungen sollen im weiteren Verlauf der Masterarbeit ausgewertet werden. Unter anderem erfolgt mit diesen Werten eine Modellbildung des Verkehrs, um den Verkehrsfluss mathematisch darzustellen und zu simulieren.

Die Durchführung einer Live-Messung an der Tankstelle Lechwiesen Nord sowie die nachträglich erlangten Daten zum tatsächlich stattgefundenen Verkehrsaufkommen sind für die Auswertung des in AnyLogic hinterlegtem mathematischen Modells essentiell. Auch für die Frage nach den zu tankenden Autos eines bekannten Verkehrsaufkommens sind diese hilfreich.

Zur Bestimmung der Anzahl von Elektrozapfsäulen erfolgt eine iterative Annäherung an die Kurve des Tankverhaltens von Diesel- und Benzinautos. Als abschließendes Ergebnis werden für die Tankstelle Lechwiesen Nord und Lechwiesen Süd jeweils 20 Elektrozapfsäulen gefunden. Für den Autohof Aichstetten ergeben sich unter Berücksichtigung des Verkehrsaufkommens 27 zu installierende Elektrozapfsäulen, sodass ein identisches Tankverhalten von Elektroautos bei vollständiger Elektrifizierung des deutschen PKW-Straßenverkehrs angenommen werden kann.

## Abstract

Siting and sizing of charging stations along the A96 Autobahn assuming complete electrification of current German passenger fleet

The aim of the master thesis is designing filling stations along the A96 Autobahn. It is assumed that the current German passenger fleet has been electrified.

In the beginning of this master thesis electrical power consumed by electrified passenger car road traffic is calculated. The plausibility of the results can be verified by two estimation approaches. First the electrical power is to be calculated based on the average driving distance of German drivers, second the electrical power has to be calculated based on primary energy consumption, vehicle stock and efficiencies of combustion engines and electric motors.

Furthermore public traffic census data are examined to create a mathematical model and simulate different traffic flows.

Live measurement at filling station Lechwiesen Nord and receiving the actual traffic volume data for that day will be useful for evaluating AnyLogic's mathematical model. Moreover the question regarding refuelling cars depending on the traffic flow can be solved.

For determining the number of charging stations an iterative approach has to be used. As a final result 20 electrical charging stations have to be installed each for Lechwiesen Nord and Lechwiesen Süd. At rest area Autohof Aichstetten 27 electrical charging stations have to be considered, so that a nearly similar refilling behaviour of electric and combustion engine cars can be assumed.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>VIII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>IX</b>
<b>Formelverzeichnis.....</b>	<b>X</b>
<b>1 Einleitendes Kapitel .....</b>	<b>1</b>
1.1 Vollständige Elektrifizierung im Jahr 2050 .....	1
1.2 Die Autobahn A96 .....	2
1.2.1 Die Tankstellen an der A96 .....	2
1.2.2 Verkehrszählstellen an der A96.....	3
<b>2 Forschungsfrage.....</b>	<b>5</b>
<b>3 Berechnung elektrischer Leistung von E-Autos .....</b>	<b>9</b>
3.1 Definition der Energiesystemgrenzen .....	9
3.2 Leistungsberechnung über jährliche Fahrstrecken .....	10
3.3 Leistungsberechnung über Jahresenergiebedarf.....	12
3.3.1 Die Zusammensetzung des Verkehrssektors.....	12
3.3.2 Berechnung des Energiebedarfs des gesamten PKW-Straßenaufkommens .....	14
3.4 Vergleich beider Ergebnisse.....	19
<b>4 Persönliche Zählung an der Tankstelle.....</b>	<b>20</b>
<b>5 Annäherung der Verkehrsdichte am 29. April 2018 .....</b>	<b>22</b>
<b>6 AnyLogic Simulation .....</b>	<b>26</b>
6.1 Aufbau der Simulation .....	26
6.1.1 Optischer Aufbau der Verkehrsführung .....	26
6.1.2 Logischer Aufbau der Verkehrsführung.....	27
6.2 Annahmen und Variablen.....	30

---

6.2.1 Tankdauer.....	30
6.2.2 Verkehrsfluss/-aufkommen.....	32
6.2.3 Anzahl der Zapfsäulen.....	35
6.2.4 Wahrscheinlichkeit des Tankens.....	35
6.3 Beschreibung der Simulationsdurchführung.....	40
6.4 Darstellung der Simulationsergebnisse.....	42
6.4.1 Abbiegewahrscheinlichkeit $p(T) = 5,0\%$ .....	42
6.4.2 Abbiegewahrscheinlichkeit $p(T) = 3,75\%$ .....	44
6.4.3 Abbiegewahrscheinlichkeit $p(T) = 2,5\%$ .....	48
6.5 Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Live-Zählung.....	49
<b>7 Auslegung der Elektrozapfsäulen.....</b>	<b>50</b>
7.1 Bestimmung der Anzahl von Elektrozapfsäulen.....	50
7.1.1 Tankstelle Lechwiesen Nord.....	50
7.1.2 Tankstelle Lechwiesen Süd.....	52
7.1.3 Autohof Aichstetten.....	53
7.2 Aufstellung der Zapfsäulen an der Tankstelle Lechwiesen Nord.....	55
<b>8 Zusammenfassung der Ergebnisse.....</b>	<b>57</b>
<b>9 Abschließende Worte.....</b>	<b>58</b>
<b>10 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>60</b>
<b>11 Anhangsverzeichnis.....</b>	<b>63</b>
Anhang.A1. Messtabelle - Lechwiesen Nord vom 29.04.2018.....	63
Anhang.A2. Abbiegewahrscheinlichkeit $p(T) = 10,0\%$ .....	65
Anhang.A3. Abbiegewahrscheinlichkeit $p(T) = 8,75\%$ .....	65
Anhang.A4. Abbiegewahrscheinlichkeit $p(T) = 7,5\%$ .....	66

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bestand an Elektroautos in Deutschland von 2008 bis 2016 .....	1
Abbildung 2: Standorte der zu betrachtenden Tankstellen an der A96 [3] .....	2
Abbildung 3: Modell der A96 mit Tankstellen und Zählstellen [3] .....	4
Abbildung 4: Verkehrszählungsdaten am Messpunkt Landsberg vom 25.02.2015 .....	7
Abbildung 5: Endenergieverbrauch nach Sektoren in Deutschland im Jahr 2016 [23] .....	12
Abbildung 6: Untergliederung des Verkehrssektors nach [24] .....	13
Abbildung 7: Untergliederung des Verkehrssektors nach [25] .....	13
Abbildung 8: Energiefluss Verbrennungsmotor [30] .....	17
Abbildung 9: Tankstelle Lechwiesen Nord zum Zeitpunkt der Zählung .....	20
Abbildung 10: Auswertung aller Tankvorgänge am 29.04.2018 von 13:50 Uhr bis 16:05 Uhr an der Autobahntankstelle Lechwiesen Fahrtrichtung Lindau .....	21
Abbildung 11: Definition Kfz [35] .....	23
Abbildung 12: AnyLogic Verkehrsführung .....	27
Abbildung 13: Logik des simulierten Verkehrsszenarios .....	27
Abbildung 14: Annahme der Tankdauer für Benzin- und Dieselaautos auf Grundlage einer durchgeführten Messung .....	30
Abbildung 15: Wahrscheinlichkeitsverteilung in AnyLogic – triangular(2, 10, 6) .....	31
Abbildung 16: Wahrscheinlichkeitsverteilung in AnyLogic – triangular(15, 45, 30) .....	32
Abbildung 17: Durchschnittliches Verkehrsaufkommen Wochentage 2015 .....	33
Abbildung 18: Durchschnittliches Verkehrsaufkommen Wochenende 2015 .....	34
Abbildung 19: Durchschnittliches Verkehrsaufkommen Ferienbeginn 2015 .....	34
Abbildung 20: Graphische Darstellung des Abbiegevorgangs .....	36
Abbildung 21: Kategorisiertes Verkehrsaufkommen eines durchschnittlichen Wochentags .....	38
Abbildung 22: Kategorisiertes Verkehrsaufkommen eines durchschnittlichen Wochenendtags .....	38
Abbildung 23: Kategorisiertes Verkehrsaufkommen eines durchschnittlichen Tags zum Beginn der Schulferien .....	39
Abbildung 24: Simulationsergebnis für $p(T) = 5,0\%$ .....	43
Abbildung 25: Simulationsergebnis für $p(T) = 3,75\%$ .....	45
Abbildung 26: Wartende Autos zu Beginn einer Tagesstunde [40] .....	46
Abbildung 27: Simulationsergebnis für $p(T) = 2,5\%$ .....	48
Abbildung 28: Iterative Annäherung zur Bestimmung der Anzahl von Elektrozapfsäulen .....	51
Abbildung 29: Sechs Zapfsäulen an der Tankstelle Lechwiesen Süd .....	52
Abbildung 30: Zapfsäulen am Autohof in Aichstetten .....	53
Abbildung 31: Mögliche Verteilstruktur der Zapfsäulen [41] .....	55

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zählstellen entlang der A96.....	3
Tabelle 2: Meilensteinplanung .....	8
Tabelle 3: Analogie von Benzin und Strom .....	9
Tabelle 4: Berechnung des Durchschnittsverbrauch von Elektroautos .....	11
Tabelle 5: Primärenergieverbrauch im Güterverkehr in PJ [24].....	14
Tabelle 6: Primärenergieverbrauch im Personenverkehr in PJ [24] .....	14
Tabelle 7: Anteil des Straßenverkehrs und des Straßengüterverkehrs am Verkehrssektor.....	15
Tabelle 8: Heizwert-Angaben [26].....	15
Tabelle 9: Berechnung des Energieverbrauchs nach Fahrzeug- und Kraftstoffart [27].....	16
Tabelle 10: Berechnung des Energieverbrauchs von Krafträdern .....	16
Tabelle 11: Anteil des PKW-Energieverbrauchs am Energieverbrauch des Straßenverkehrs...	16
Tabelle 12: Stückzahl PKW nach Kraftstoffart [32] .....	18
Tabelle 13: Vergleich der Ergebnisse – elektrische Energie für E-Autos .....	19
Tabelle 14: Auszug der von der ABDSB übermittelten Daten vom April 2018 .....	22
Tabelle 15: Kfz-Verkehrsdaten zum Zeitpunkt der Live-Zählung (Lechwiesen Nord) .....	24
Tabelle 16: Ähnliches Verkehrsaufkommen 2015 im Vergleich zur Live-Zählung .....	25
Tabelle 17: Beschreibung der Symbole in AnyLogic .....	29
Tabelle 18: Zeiträume zur Ermittlung eines durchschnittlichen Verkehrsaufkommens 2015 .....	33
Tabelle 19: Beispiel eines Simulationsergebnisses .....	41
Tabelle 20: Anzahl der tankenden Autos bei $p(T) = 5,0 \%$ .....	44
Tabelle 21: Anzahl der tankenden Autos bei $p(T) = 3,75 \%$ .....	46
Tabelle 22: Anzahl der tankenden Autos bei $p(T) = 2,5 \%$ .....	49
Tabelle 23: Jahresverkehrsaufkommen 2015 Landsberg [5].....	52
Tabelle 24: Quotient Zapfsäulen zu Verkehrsdichte .....	54
Tabelle 25: Vergleich mit Atomkraftwerk.....	58
Tabelle 26: Energieabgabe an einer Elektrotankstelle .....	59



## Abkürzungsverzeichnis

ABDSB.....	Autobahndirektion Südbayern
ADAC.....	Allgemeiner Deutscher Automobil-Club
BASSt.....	Bundesanstalt für Straßenwesen
Kfz.....	Kraftfahrzeug
KfzR1.....	Kraftfahrzeuge Fahrtrichtung München
KfzR2.....	Kraftfahrzeuge Fahrtrichtung Bregenz
LKW.....	Lastkraftwagen
LkwR1.....	Lastkraftwagen Fahrtrichtung München
LkwR2.....	Lastkraftwagen Fahrtrichtung Bregenz
MS.....	Meilenstein
PKW.....	Personenkraftwagen
R1.....	Fahrtrichtung München
R2.....	Fahrtrichtung Bregenz
Ri.....	(Fahrt-)Richtung
SoC.....	State of Charge (Ladestatus eines Elektroautos)
TP.....	Tankplatz
WoTag.....	Wochentag

## Formelverzeichnis

<b>Zeichen</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Seite</b>
$P_{el, E-Autos}$	Elektrische Leistung von Elektroautos	11
$\overline{s_{Autos}}$	Durchschnittliche Fahrstrecke von Autos	11
$k_{Autos}$	Stückzahl von Autos	11
$\overline{v_{E-Autos}}$	Durchschnittlicher Verbrauch von Elektroautos	11
$P_{Ladeverl, \%}$	Ladeverlustleistung in Prozent	11
$\eta_{E-Auto}$	Wirkungsgrad Elektroauto	18
$E_{Fortbewegung}$	Ausschließlich zur Fortbewegung benötigte Energiemenge	18
$AZ$	Anzahl der Tanksäulen	41
$t_D$	Tankdauer	41
$p(T)$	Wahrscheinlichkeit, dass ein Auto von der Autobahn zur Tankstelle abfährt; Abbiegewahrscheinlichkeit	41
$V_d$	Verkehrsdichte, Verkehrsaufkommen	41

# 1 Einleitendes Kapitel

Der Grundgedanke vorliegender Masterarbeit liegt in einem Gedankenspiel, welches in der Vorlesung „Elektrische Energietechnik“ im 2. Semester bei Herrn Robert Hoschek durchgeführt wurde. Hierbei wurde unter stark vereinfachenden Annahmen untersucht, welche Auswirkungen eine vollständige Elektrifizierung aller deutscher zugelassener PKW auf die derzeitige elektrische Energieerzeugung, -beschaffung und -versorgung hätte.

## 1.1 Vollständige Elektrifizierung im Jahr 2050

In einem Zukunftsszenario soll 2050 davon ausgegangen werden, dass der im Jahre 2017 vorherrschende PKW-Straßenverkehr vollständig elektrifiziert ist. Dies bedeutet, dass ca. 46,5 Mio. PKW auf elektrobetriebene Fahrweise umgerüstet werden müssten [1].

In Abbildung 1 ist der Bestand an Elektroautos von den Jahren 2008 bis 2016 veranschaulicht. Diese Balken werden mit einem weiteren Balken im Jahre 2050 verglichen, der das Ausmaß einer vollständigen Elektrifizierung des deutschen PKW-Straßenverkehrs aufzeigen soll. Es wird darauf hingewiesen, dass die Ordinate in nachfolgender Abbildung logarithmisch zur Basis 10 skaliert ist. Dies bedeutet, dass der Balken des Jahres 2050 im Vergleich zu den anderen Balken deutlich imposanter in die Höhe schnellen würde, läge eine lineare Achsenskalierung vor.

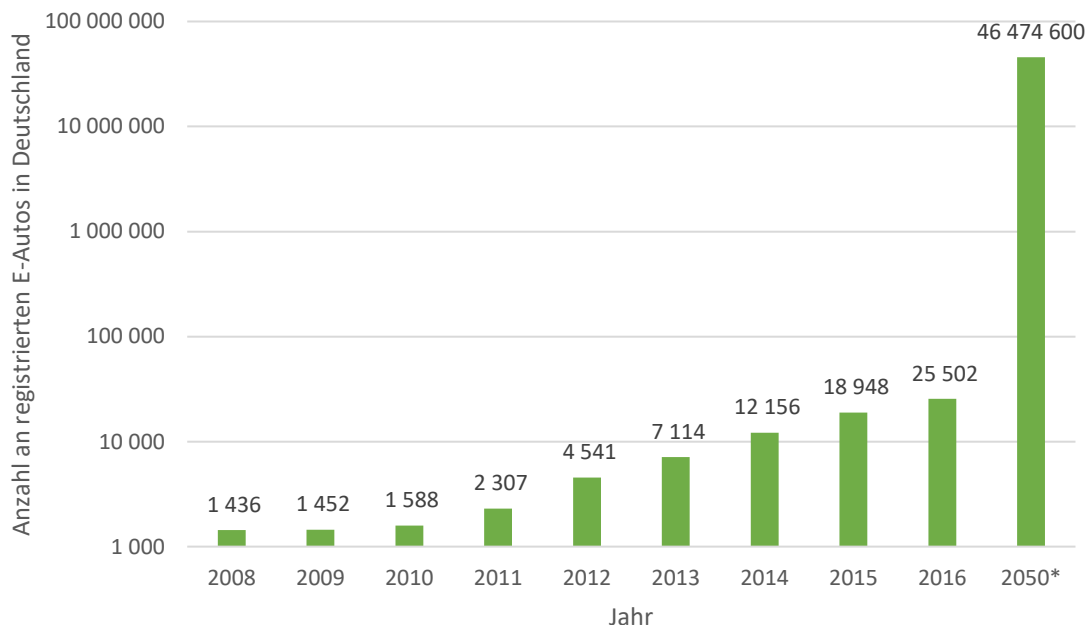


Abbildung 1: Bestand an Elektroautos in Deutschland von 2008 bis 2016

Bei Betrachtung der vollständigen Elektrifizierung werden die bis zum Jahre 2016 zugelassenen Elektroautos vernachlässigt, da diese lediglich einem derzeitigen Anteil an den Gesamtfahrzeugen von 0,1 Prozentpunkten entsprechen [2].

Alle weiteren Berechnungen, die im Umfang dieser Masterarbeit getätigt werden, beruhen auf der Annahme der vollständigen Elektrifizierung des deutschen PKW-Straßenverkehrs.

## 1.2 Die Autobahn A96

Die Bundesautobahn 96 (A96) verläuft zwischen dem Großraum München und der Staatsgrenze zu Österreich bei Lindau. Sie hat eine Länge von etwa 171 km. Nach der österreichischen Grenze geht die A96 nahtlos in die Rheintal-Autobahn A14 über.

### 1.2.1 Die Tankstellen an der A96

Die A96 hat derzeit (2018) nur eine beidseitig bewirtschaftete Tankstelle/Rastanlage in Landsberg am Lech. Für die Fahrtrichtung Lindau heißt die Tankstelle/Rastanlage Lechwiesen Nord und für die Fahrtrichtung München heißt die Tankstelle/Rastanlage Lechwiesen Süd.

Für die Berechnungen in der Masterarbeit soll daher zusätzlich der Autohof Aichstetten betrachtet werden. Dieser kann von beiden Fahrtrichtungen angefahren werden und liegt ca. 800-900 m von der Autobahn entfernt. Nachfolgende Abbildung 2 verdeutlicht auf einer geografischen Karte die Lage der Tankstellen entlang der Autobahn.

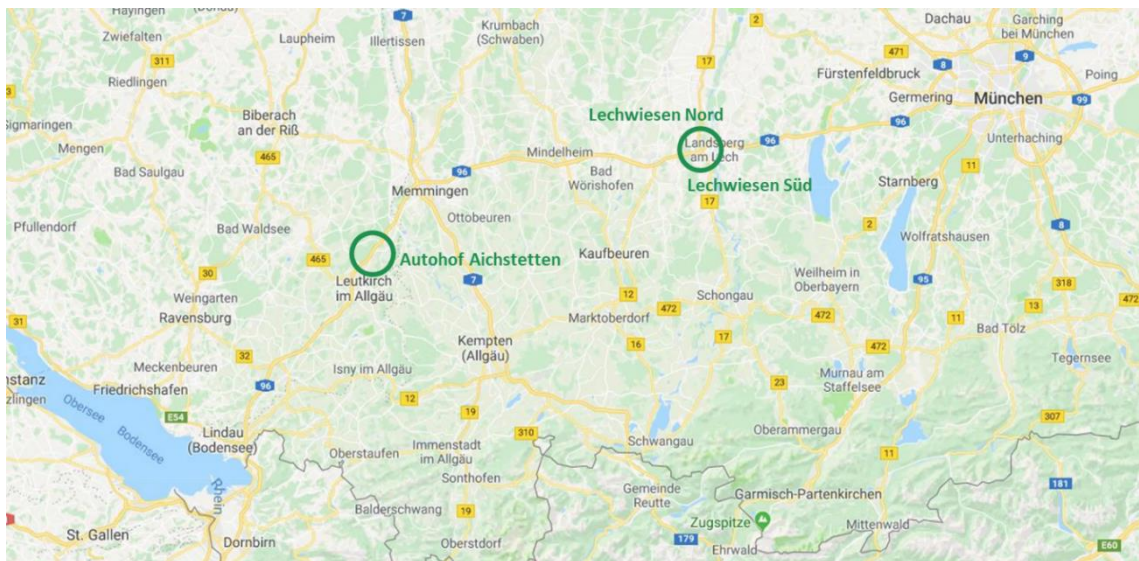


Abbildung 2: Standorte der zu betrachtenden Tankstellen an der A96 [3]

Der im nachfolgenden Kapitel 2 innerhalb der Forschungsfrage formulierte Begriff „Autobahn-Tankstellen an der A96“ meint zu Beginn der zu untersuchenden Fragestellung explizit diese drei Tankstellen respektive Rastanlagen.

Nicht zum Bestandteil der Masterarbeit zu zählen sind alle anderen Tankstellen, die entweder als weitere Autohöfe bezeichnet werden oder die beispielsweise in unmittelbarer Lage neben der A96 an einer Bundesstraße liegen.

## 1.2.2 Verkehrszählstellen an der A96

Während des Verfassens vorliegender Arbeit wird des Öfteren auf Messdaten der A96 referenziert. Diese Daten werden täglich bzw. stündlich von Verkehrsmessstellen aufgenommen und liefern verlässliche Werte für das Verkehrsaufkommen entlang der Autobahn. Der Begriff Verkehrsdichte wird für die Anzahl von PKW verwendet, die innerhalb einer Tagesstunde von einer Messstelle in eine Richtung gezählt werden.

Beispiel: Werden von 3 Uhr bis 4 Uhr nachts 200 PKW, die in eine Richtung fahren, von einer Messtelle aufgezeichnet, so beträgt die Verkehrsdichte zur 4. Tagesstunde 200 PKW pro Stunde.

Entlang der A96 sind mehrere Verkehrsmessstellen vorhanden, die von der zuständigen Autobahndirektion verwaltet werden. Für die bayerischen Streckenabschnitte ist hierfür die Autobahndirektion Südbayern (ABDSB) zuständig. Meistens lassen sich mit Hilfe von im Straßenbelag eingebrachten Induktionsschleifen Informationen über Verkehrsdichte in Abhängigkeit des Wochentags, der Uhrzeit und des Fahrzeugtyps generieren. Die von den Messfühlern aufgenommenen Daten werden monatlich von einem externen Ingenieurbüro ausgewertet und zur Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) übermittelt [4].

Entlang der A96 gibt es derzeit sieben automatische Zählstellen, die in nachfolgender Tabelle 1 aufgelistet sind [5]. Die BASt-Nr. wird von der BASt vergeben und dient einer eindeutigen Zuordnung aller Zählstellen.

Name der Zählstelle	BASt-Nr.	R1 - Fernziel	R2 - Fernziel
München-Laim	9106	München	Memmingen
Gräfelfing	9222	München	Memmingen
Landsberg a. L.-Nord	9136	München	Memmingen
Stetten	9550	München	Memmingen
Leutkirch-West	8041	Memmingen	Lindau
Wangen	8120	Memmingen	Lindau
Lindau	9250	Lindau	Bregenz

Tabelle 1: Zählstellen entlang der A96

Zusätzlich sind eindeutige Richtungsangaben je Zählstelle für die genaue Zuordnung der Verkehrsdaten unabdingbar. Fährt ein Verkehrsteilnehmer/ eine Verkehrsteilnehmerin entlang der Richtung 1, so ist dieser/-e von Lindau nach München unterwegs. Die Fahrstrecke von München nach Lindau wird mit Hilfe von Richtung 2 abgebildet.

Unter Berücksichtigung der Tankstellen und den Messstellen ergibt sich folgende geographische Anordnung, die in Abbildung 3 aufbereitet ist. Die Tankstellen entsprechen hierbei den im Kapitel 1.2.1 zugewiesenen Rastanlagen. Die Zählstellennummern können der Tabelle 1 entnommen werden.

Für die weitere Bearbeitung wird vor allem die Zählstelle in Landsberg in den Fokus gerückt, weil die Daten der Messstelle für die zu treffenden Annahmen und Aussagen

eine hohe Bedeutung haben werden. Die weiteren Zählstellen verhelfen zur Bestimmung des Verkehrsflusses.

Alle verkehrsrelevanten Daten sind auf der Website der Bundesanstalt für Straßenwesen öffentlich zugänglich. Zum Zeitpunkt der Bearbeitung der Arbeit waren Daten bis einschließlich 2016 erhältlich. Neuere Daten wurden bis dato nicht auf der Homepage veröffentlicht [6].

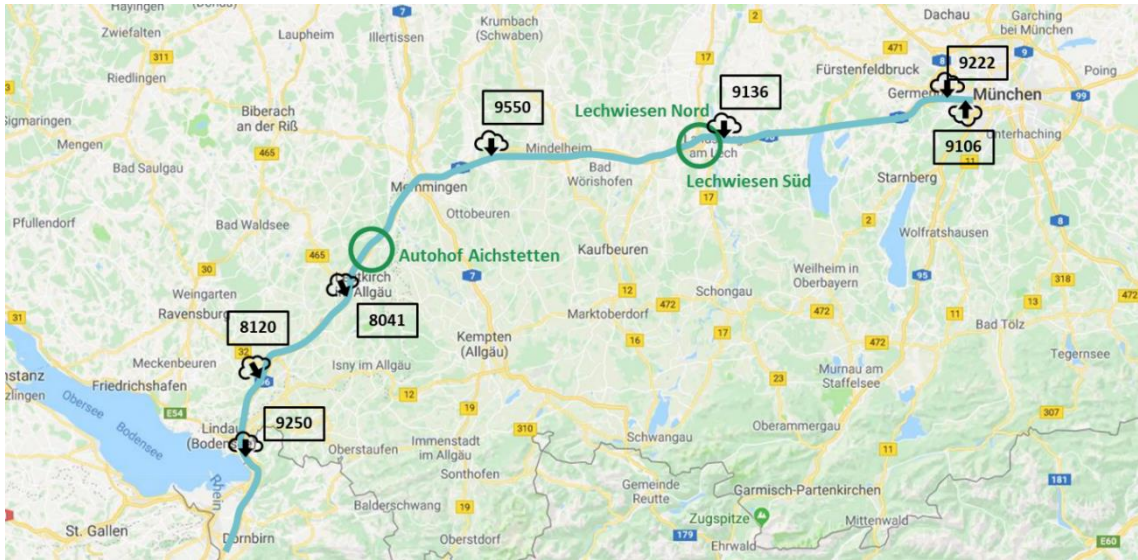


Abbildung 3: Modell der A96 mit Tankstellen und Zählstellen [3]

Abschließend kann festgehalten werden, dass entlang der A96 von Lindau bis München im Umfang dieser Masterarbeit drei Tankstellen bzw. Rastanlagen untersucht werden. Hinzu kommen reale Daten der Verkehrsmessung, die als Grundlage für weitere Berechnungen und Untersuchungen dienen werden.

## 2 Forschungsfrage

Vorliegende Arbeit entspricht im Einklang mit der Forschungsfrage vollumfänglich den Anforderungen der ISMART Kriterien, die nachfolgend dargestellt werden.

### **I wie innovativ**

Bis zu diesem Zeitpunkt ist keine Literatur bekannt, wie Autobahn-Tankstellen im Jahre 2050 bei vollständiger Elektrifizierung des PKW-Straßenverkehrs dimensioniert sein müssen. Bei einer zunehmenden Elektrifizierung der PKW könnte für die Tankstellenbetreiber eine neue Herausforderung hinsichtlich des Angebots ihrer Tankstelle zukommen. Über die Erkenntnisse der Auslegung lassen sich weitere Zukunftsvisionen ableiten.

### **S wie spezifisch**

Ziel dieser Thesis ist im ersten Schritt die Berechnung der elektrischen Leistung des PKW-Straßenaufkommens. Dies soll mit zwei verschiedenen Ansätzen erfolgen, wie sie in Kapitel 3 eingehender beschrieben werden. Im weiteren Verlauf wird die Modellierung des Verkehrsaufkommens im Mittelpunkt stehen. Die Daten, welche den Verkehrsfluss beinhalten, stammen hierbei von der Bundesanstalt für Straßenwesen bzw. von der Autobahndirektion Südbayern (ABDSB). Ziel der Modellierung wird es sein, die Daten des Verkehrsflusses in ein Simulationsprogramm einzugeben, sodass das aktuelle Tankverhalten der Autofahrer/-innen (Benzin und Diesel) auf das Tankverhalten von Elektroautos übertragen werden kann.

Im Weiteren sollen die „Nicht-Ziele“ der Masterarbeit definiert werden. In dieser Masterarbeit liegt das Augenmerk auf dem PKW-Verkehrsaufkommen. Somit werden andere Fortbewegungsmittel wie beispielsweise Busse, LKW, Motorräder etc. von allen Berechnungen und Ergebnissen ausgeschlossen. Eine Untersuchung, wie sich das Mobilitätsverhalten und das Verkehrsaufkommen bis 2050 verändern könnten, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Hiermit können zum Beispiel die Bevölkerungsentwicklung, volkswirtschaftliche Entwicklungen oder Investitionen in den Straßenausbau gemeint sein. Zudem wird angenommen, dass das aktuelle PKW-Verkehrsaufkommen von 2016 vollständig elektrifiziert wird. Dies schließt weitere Annahmen zu Antriebsmöglichkeiten gleichzeitig aus, was heißt, dass beispielsweise keine mit Wasserstoff betriebenen Fahrzeuge oder Dieselfahrzeuge angenommen werden. Man geht von einer Aufteilung 100% elektrisch und 0% andere Antriebsarten für PKW aus.

Ziel dieser Arbeit soll es nicht sein, bei den Tankstellenbetreibern Überzeugungsarbeit zum Ausbau oder zur Renovierung ihrer Tankstelle zu leisten. Diese Arbeit soll des Weiteren auch kein Leitfaden für Tankstellenbetreiber werden, wie sie in den kommenden Jahren bis 2050 ihre Tankstelle umbauen und gestalten sollen, um entlang der Autobahn 96 wettbewerbsfähig bleiben zu können.

**M wie messbar**

In der Masterarbeit sollen vorrangig vier Fragen beantwortet werden. Diese sind derart gestellt, dass sie die Masterarbeit sowohl während der Erstellung als auch nach Fertigstellung hinsichtlich der Zielerreichung und Beantwortung der Forschungsfrage messbar machen.

- Reicht der aktuelle Platzbedarf an Tankstellen aus, um diese sukzessive mit Elektroladestationen auszustatten?
- Kann die zur vollständigen Elektrifizierung des PKW-Straßenverkehrs notwendige elektrische Leistung an den Tankstellen bereitgestellt werden?
- Ist es für Autofahrer/-innen im Jahre 2050 möglich, mit angemessener Wartezeit eine freie Ladestation für ihren PKW zu bekommen?
- Muss es zu einer Umstrukturierung des derzeitigen Tankstellennetzes an der A96 kommen? Falls ja, wie könnte diese Umstrukturierung aussehen?

Zur Beantwortung dieser vier obenstehenden Fragen soll das unter Punkt „S wie spezifisch“ beschriebene Vorgehen verwendet werden. Die Forschungsfrage erfüllt das Kriterium „messbar“, sofern die Fragen im Verlauf der Masterarbeit beantwortet werden können.

**A wie akzeptiert**

Vorab soll die elektrische Leistung des aktuellen PKW-Straßenverkehrs berechnet werden. Dies erfolgt über zwei verschiedene Ansätze: zum einen wird die elektrische Leistung der PKW über die durchschnittliche Fahrdistanz der deutschen Bundesbürger berechnet und zum anderen über den Verkehrssektor der Primärenergie. Eine Berechnung mit zwei unterschiedlichen Ansätzen hat zur Folge, dass die Ergebnisse miteinander vergleichbar gemacht werden können. Somit kann während der Masterarbeit eine Plausibilitätsüberprüfung hinsichtlich der benötigten elektrischen Leistung für den PKW-Straßenverkehr durchgeführt werden.

Zur Beantwortung der Forschungsfrage bedarf es im nächsten Schritt einer logischen Modellierung der Verkehrssituation, welche sich mit Hilfe der Simulationssoftware AnyLogic verwirklichen lässt. Hierbei werden die äußerst genauen Daten der automatischen Verkehrszählstellen derart einbezogen, sodass sich auf die Benutzung von Zapfsäulen an Tankstellen Rückschlüsse ziehen lassen. Hierbei sollen drei Verkehrs-Szenarien abgedeckt und untersucht werden.

- Verkehr am Wochenende
- Verkehr an einem Wochentag
- Verkehr zum Beginn regionaler Ferien



Des Weiteren verhilft die Software AnyLogic zur Veranschaulichung der Ergebnisse, indem die Verkehrsströme bzw. das Fahrverhalten der Autos visualisiert dargestellt werden.

### R wie realistisch

Dem Leser wird bei Lektüre des bisherigen Textes im Jahr 2050 eine vollständige Elektrifizierung des PKW-Straßenverkehrsaufkommen vorweggenommen. Nach heutigem Stand der Technik ist eine vollständige Elektrifizierung durchaus denkbar. Dies soll jedoch nicht Gegenstand der zu untersuchenden Fragenstellung werden, sodass die Frage, ob eine vollständige Elektrifizierung in 2050 überhaupt realistisch sei, bei Durchführung der Masterarbeit als gegenstandslos angenommen werden kann. Es gilt stets die Prämisse, dass der derzeitige elektrische Straßenverkehr 2050 in Deutschland vollständig elektrifiziert sein wird.

Die zur Beantwortung der Forschungsfrage angelegten Verkehrsmodelle sollen den realen Daten möglichst genau angenähert werden. Hierfür werden beispielsweise Verkehrszählungsdaten der BASt verwendet. Diese liefern unter anderem tagesgenaue Verkehrsströme in Abhängigkeit von der Uhrzeit zu verschiedenen Autobahnen und Zählstellen. In nachfolgender Abbildung werden exemplarisch Messwerte eines Tagesverlaufs gezeigt. Diese wurden von einer Messstelle in Landsberg an der A96 an einem Wochentag, dem 25. Februar 2015, aufgenommen.

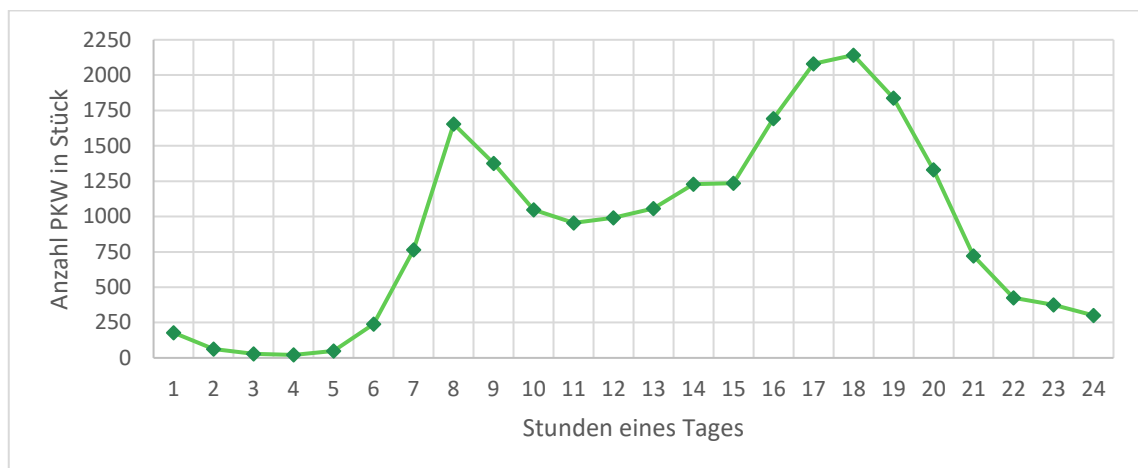


Abbildung 4: Verkehrszählungsdaten am Messpunkt Landsberg vom 25.02.2015

Im Laufe eines Tages wird zu jeder Stunde die Anzahl der gefahrenen PKW dokumentiert. Dabei wird der Tagesverlauf in 24 Segmente (Stunden) aufgegliedert. Hier fallen vor allem die Spitzen zu den Berufsverkehrszeiten um 8 Uhr und um 18 Uhr auf, während in der Nacht von 2 Uhr bis 5 Uhr nahezu kein Verkehrsfluss vorhanden ist.

Auf Basis dieser öffentlich zugänglichen Daten sollen Verkehrsmodelle in AnyLogic simuliert werden, die beispielsweise unter Zuhilfenahme stochastischer Variablen in eine Nutzung von elektrischen Ladestationen an Autobahnen umgerechnet werden können.

Hierbei ist von Vorteil, dass die Daten den Interessierten öffentlich auf der Homepage der BASt zugänglich sind, sodass während der Erstellung der Masterarbeit uneingeschränkt darauf zugegriffen werden kann.

Des Weiteren wird eine punktuelle Live-Zählung an einer Autobahntankstelle durchgeführt. Hierbei soll realitätsnah untersucht werden, welche Zeitdauer ein Tankvorgang (Anfahrt, Tanken, Bezahlen, Abfahrt) in Anspruch nimmt.

### **T wie terminierbar**

Für eine erfolgreiche Abwicklung der Masterarbeit werden Arbeitspakete geschnürt, die jeweils mit einem Meilenstein (MS) abgeschlossen werden. Zur Beantwortung der Forschungsfrage werden insgesamt fünf Meilensteine definiert, welche in nachfolgender Tabelle 2 kompakt dargestellt sind.

MS-Nr.	Beschreibung des MS	MS fällig zum
1	Abgabe Vorversion der Masterarbeit	19.02.2018
2	Situationsbeschreibung	02.04.2018
3	Modellierung des Verkehrsaufkommens	15.06.2018
4	Auswertung der Ergebnisse	12.07.2018
5	Planmäßige Abgabe der Masterarbeit	28.08.2018

Tabelle 2: Meilensteinplanung

Die Masterarbeit wird somit am 28. August 2018 abgeschlossen und bei der Prüfungskommission der Fachhochschule Vorarlberg eingereicht.

### **Resultierende Forschungsfrage**

Aus den vorgestellten ISMART-Kriterien ergibt sich die nachfolgende Forschungsfrage:

*„Wie müssen Autobahn-Tankstellen an der A96 im Jahre 2050 dimensioniert und gestaltet sein, damit der derzeitige deutsche PKW-Straßenverkehr vollständig elektrifiziert werden kann?“*

### 3 Berechnung elektrischer Leistung von E-Autos

Unter Annahme einer bis zum Jahre 2050 vollständigen Elektrifizierung des deutschen PKW-Straßenverkehrs soll in diesem Kapitel die elektrische Leistung berechnet werden, die ausschließlich für die Fortbewegung aller deutschen PKW innerhalb eines Kalenderjahres benötigt wird. Die Berechnungen werden auf Grundlage zweier unterschiedlicher Ansätze durchgeführt, sodass die Überprüfung beider Ergebnisse schlussendlich einen Plausibilitätsvergleich zulässt.

Im ersten Ansatz bildet die durchschnittliche jährliche Fahrstrecke eines in Deutschland zugelassenen PKW die Grundlage. Dem zweiten Ansatz liegt der deutsche Endenergieverbrauch von 2016 zugrunde.

Nichtsdestotrotz handelt es sich bei den folgenden Berechnungen um Abschätzungen, sodass Datensätze aus teils unterschiedlichen Jahren die Grundlage bzw. den Ansatz für fortfolgende Berechnungen bilden.

#### 3.1 Definition der Energiesystemgrenzen

Für die nachfolgende Berechnung der zur Fortbewegung notwendigen elektrischen Leistung ist eine Analogiebetrachtung der zu tankenden Energiemengen unabdingbar. Es werden Energiemengen, die auf Grundlage von Verbrennungsmotoren berechnet wurden, mit Energiemengen, die auf Basis von Elektromotoren berechnet werden, miteinander verglichen.

Ein Vergleich zweier Zahlen aus unterschiedlichen Bereichen der Energiekette soll vermieden werden. Tabelle 3 zeigt eine Analogiebildung der Energiesysteme „Benzin“ und „Strom“ auf.

	<b>Benzin</b>	<b>Strom</b>
<b>Erzeugung</b>	Raffinerie	Kraftwerk
<b>Transport</b>	LKW-Transport zur Tankstelle	Elektrisches Übertragungsnetz
<b>Tankvorrichtung</b>	Zapfsäule	Stromzapfsäule/Wall-Box
<b>Tankvorgang</b>	Tankung eines flüssigen Mediums	Tankung von Elektronen
<b>Getankte Energie</b>	Inhalt im Tank des Autos	Ladung der Batterie

Tabelle 3: Analogie von Benzin und Strom

Diese Analogiebetrachtung ist obligat, da die Energiemenge beim Tankvorgang des mit Benzin angetriebenen Autos identisch bleibt, während für die Aufladung einer Batterie eine höhere Energiemenge nötig ist als schlussendlich in die Batterie geladen wird. Der Unterschied zwischen bereitgestellter Energie und in die Batterie geladene Energie wird als Ladeverlust bezeichnet.

Während des Aufladens der Autobatterie wird aufgrund des inneren Widerstands der chemischen Zellen Wärme freigesetzt [7]. Die Menge der in Wärme umgewandelte

Energie ist unter anderem von der Außentemperatur, der Temperatur der Batterie und dem ohmschen Widerstand (Querschnitt) des Ladekabels abhängig [7].

Bei den nachfolgenden Berechnungen sollen die Ergebnisse am in Tabelle 3 genannten Punkt der Energiekette „Tankvorrichtung“ miteinander verglichen werden. Hier bleiben die Erzeugungskosten, die Transportkosten des Benzins als auch die Übertragungsverluste der elektrischen Leistung bis zur Stromzapfsäule unberücksichtigt. Jedoch dürfen die auftretenden elektrischen Ladeverluste rechnerisch nicht vernachlässigt werden.

### 3.2 Leistungsberechnung über jährliche Fahrstrecken

In diesem Kapitel soll der jährliche Strombedarf auf Grundlage der jährlichen durchschnittlichen Fahrstrecke errechnet werden. Bei dieser Vorgehensweise werden zur Erlangung des Ergebnisses folgende Faktoren miteinander multipliziert:

- Durchschnittliche jährliche Fahrstrecke
- Anzahl der in Deutschland zugelassenen Autos
- Durchschnittlicher Verbrauch der Elektroautos.

Für die durchschnittliche jährliche Fahrstrecke wird der Mittelwert aus dem Jahr 2016 herangezogen. Hier betrug die durchschnittliche jährliche Fahrleistung pro Auto 15'320 km [8]. Zum 01. Januar 2018 beträgt die Anzahl der in Deutschland zugelassenen PKW 46'474'600 Stück [1]. Zur Berechnung des durchschnittlichen Energieverbrauchs von Elektroautos wird der Mittelwert der Testverbräuche der in Deutschland am häufigsten verkauften E-Mobile 2017 herangezogen [9].

In Tabelle 4 sind die erwähnten Autotypen mit den Verbrauchsangaben der jeweiligen Hersteller und den Verbrauchsangaben, die vom ADAC in abgehaltenen Tests ermittelt wurden, gelistet. Sowohl aus den individuellen Verbräuchen der Hersteller als auch aus den in Tests dokumentierten Verbräuchen der zehn einzelnen Autotypen wird ein Mittelwert gebildet. Im Durchschnitt verbraucht ein Elektroauto laut Herstellerangabe 14,2 kWh/100 km. Der ADAC kommt im Zuge seiner Tests auf einen Mittelwert von 19,3 kWh/100 km. Dieser Wert liegt im Mittel knapp 36% über dem von den Herstellern proklamierten und veröffentlichten Wert.

Für die Berechnung der elektrischen Leistung aller Elektroautos soll im Weiteren der sich auf den ADAC-Test beruhende Mittelwert von 19,3 kWh/100 km verwendet werden. Dieser Wert kommt der Realität am nächsten, da die deutsche Automobilindustrie schon seit vielen Jahren mit „Schummelei und jederart Tricks“ die Verbrauchswerte erfolgreich zum Senken bringt [10].

Zusätzlich müssen die in Kapitel 3.1 erwähnten Ladeverluste berücksichtigt werden. Gemäß [7] und [11] können Ladeverluste mit einem Range von zehn bis 30 Prozent angenommen werden. Daher sollen für die Abschätzung der aufzubringenden elektrischen Leistung an der Zapfsäule 20 Prozent elektrischer Ladeverlust angenommen werden. Dies entspricht dem Mittelwert des oben genannten Ranges.

Autotyp	Verbrauch in kWh/100 km Herstellerangabe	Verbrauch in kWh/100 km Testergebnis
Renault Zoe [12]	13,3	20,3
VW Golf [13]	12,7	18,2
Smart Fortwo [14]	15,1	19,2
Kia Soul [15]	14,7	19,4
BMW i3 [16]	12,6	17,4
Tesla S P90D [17]	17,8	24,0
Tesla X	17,5 [18]	25,0 [19]
VW Up [20]	11,7	13,8
Hyundai Ionic [21]	11,5	14,7
Nissan Leaf [22]	15,0	20,5
<b>Mittelwert</b>	<b>14,2</b>	<b>19,3</b>

Tabelle 4: Berechnung des Durchschnittsverbrauch von Elektroautos

Die elektrische Leistung, die in den Autobatterien der Elektroautos abgespeichert werden kann, berechnet sich durch die Multiplikation der durchschnittlichen Fahrstrecke, der Stückzahl an Autos und des durchschnittlichen Verbrauchs der E-Autos. Werden die während der Aufladung einer Autobatterie auftretenden elektrischen Ladeverluste berücksichtigt, ist die an der E-Zapfsäule benötigte elektrische Leistung um 20 Prozent höher. Die Berechnung wird in nachstehender Gleichung 3-1 mathematisch beschrieben.

$$P_{el, E-Autos} = \frac{\overline{s_{Autos}} \cdot k_{Autos} \cdot \overline{v_{E-Autos}}}{1 - P_{Ladevert, \%}} \quad \text{Gleichung 3-1}$$

Mit Einsetzen der oben stehenden Werte erhält man:

$$\begin{aligned} P_{el, E-Autos} &= \frac{15320 \frac{km}{a} \cdot 46474600 \cdot 19,3 \frac{kWh}{100 km}}{1 - 0,2} && \text{Gleichung 3-2} \\ &= 172 \frac{TWh}{a} \end{aligned}$$

Auf Grundlage der jährlichen durchschnittlichen Fahrstrecke der in Deutschland im Jahre 2017 zugelassenen PKW, dem durchschnittlichen Verbrauch von Elektroautos und einem angenommenen Ladeverlustwert von 20 Prozent lässt sich zur Betankung von E-Autos eine jährlich aufzubringende elektrische Leistung von 172 TWh errechnen.

Anmerkung: Im Folgenden werden Energieverbräuche auch in der physikalischen Einheit Joule angegeben. Physikalisch lassen sich die Größen in diesen Einheiten beliebig umrechnen, sodass stets gilt:

$$1 Wh \cong 3600 J \text{ bzw. } 1 TWh \cong 3,6 PJ \quad \text{Gleichung 3-3}$$

### 3.3 Leistungsberechnung über Jahresenergiebedarf

Die im vorherigen Kapitel 3.2 berechnete elektrische Leistung soll in diesem Absatz auf Grundlage eines gänzlich verschiedenen Ansatzes auf Plausibilität überprüft werden.

Mit Hilfe des deutschen Endenergieverbrauchs 2016, des deutschen Fahrzeugbestands 2016 und den Wirkungsgraden von Verbrennungsmotoren und Elektromotoren soll im Folgenden der jährliche Leistungsbedarf von Elektroautos berechnet werden. Im Anschluss an die Berechnungen, können somit zwei Ergebnisse miteinander verglichen werden (Ausblick Kapitel 3.4).

#### 3.3.1 Die Zusammensetzung des Verkehrssektors

Der Endenergieverbrauch betrug im Jahr 2016 in Deutschland 9151 PJ. Dies entspricht etwa 2542 TWh. Der Endenergieverbrauch wird typischerweise sektorenabhängig angegeben. Neben dem Haushaltssektor, dem Bergbausektor und dem Sektor für Gewerbe, Handel und Dienstleistungen gibt es den Verkehrssektor.

In Abbildung 5 sind die in die Sektoren untergliederten Endenergieverbräuche für Deutschland im Jahr 2016 zu sehen. Hierbei beträgt der Energieverbrauch im Sektor Verkehr 2696 PJ, sodass der Verkehrssektor den größten Anteil der vier Sektoren ausmacht. Der Verbrauch von 2696 PJ entspricht einem Anteil am Gesamtenergieverbrauch von knapp 30 Prozent.

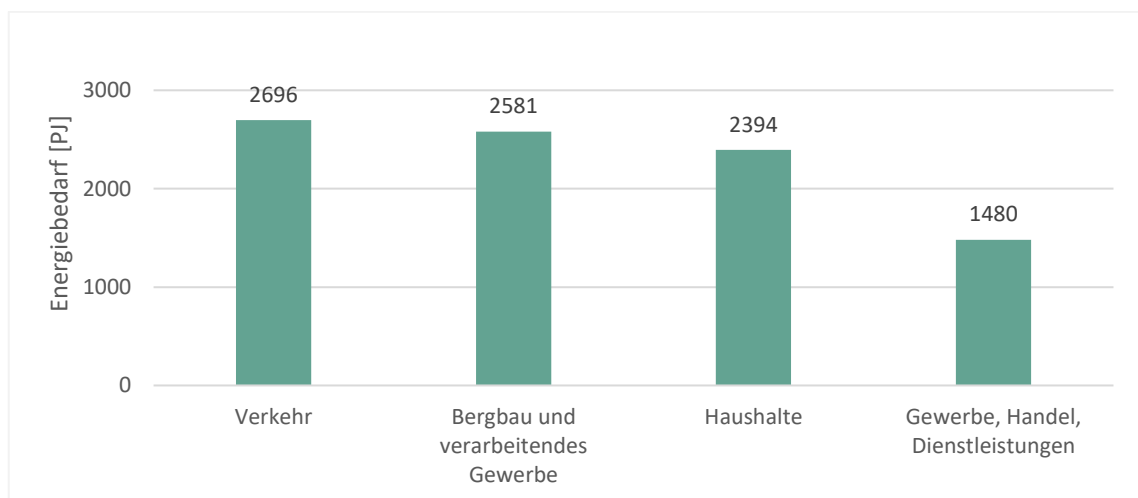


Abbildung 5: Endenergieverbrauch nach Sektoren in Deutschland im Jahr 2016 [23]

Für die weiteren Überlegungen zur Berechnung der Zielgröße ist es notwendig, den Sektor Verkehr in seine Einzelbestandteile zu zerlegen. Somit wird schlussendlich nur der Energiebedarf der auf den deutschen Straßen fahrenden PKW für die weiteren Berechnungsschritte berücksichtigt.

Das Umweltbundesamt untergliedert den Verkehrssektor in Personenverkehr und Güterverkehr. Während beide Kategorien gleichermaßen in den Schienenverkehr und in den Luftverkehr untergliedert werden, kommt beim Güterverkehr zusätzlich noch die

Binnenschifffahrt hinzu. Der Personenverkehr beinhaltet zusätzlich den Straßenverkehr, welcher im Güterverkehr als Straßengüterverkehr definiert ist (vgl. Abbildung 6) [24].

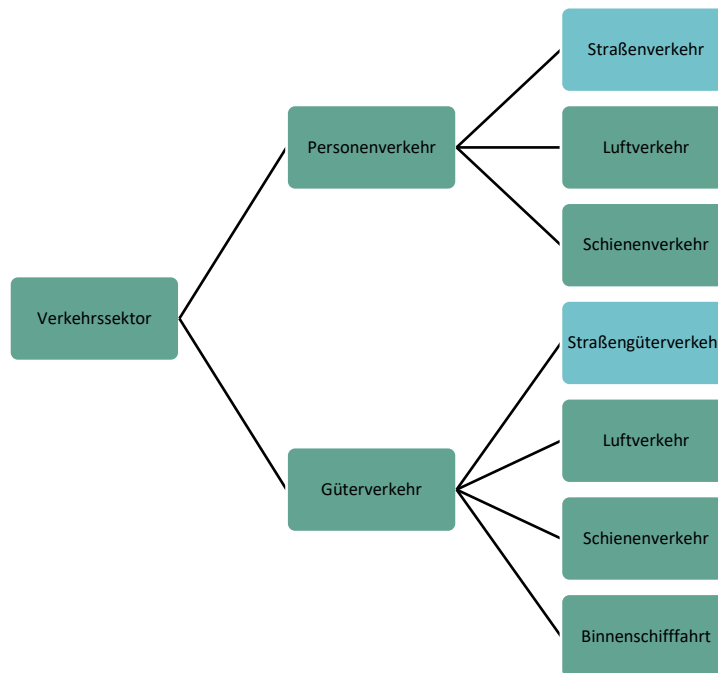


Abbildung 6: Untergliederung des Verkehrssektors nach [24]

Des Weiteren kann der Verkehrssektor gemäß des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur in Schienenverkehr, Luftverkehr, Binnenschifffahrt und Straßenverkehr unterteilt werden. Im Straßenverkehr wird zwischen Personenverkehr und Güterverkehr unterschieden, wobei der Personenverkehr nochmals in Individualverkehr und öffentlicher Verkehr untergliedert werden kann [25]. Abbildung 7 veranschaulicht das eben Beschriebene visuell.

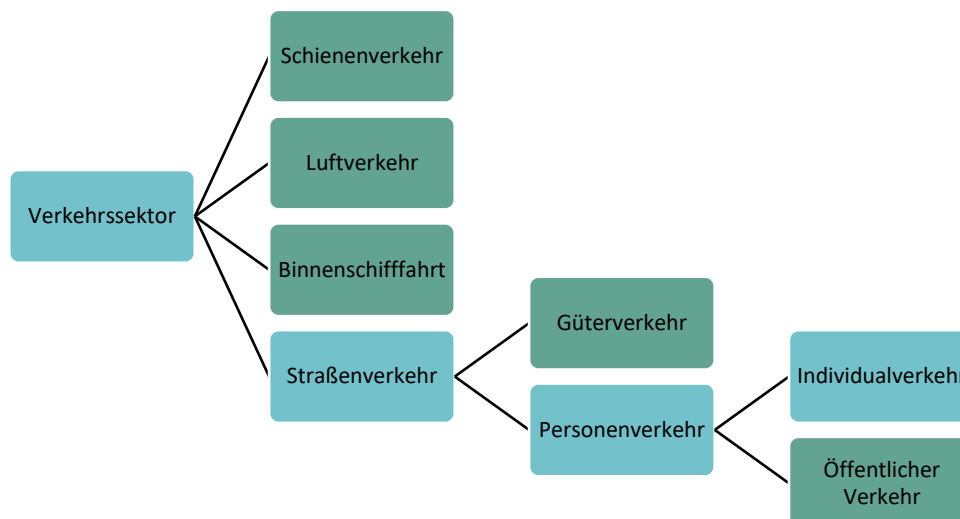


Abbildung 7: Untergliederung des Verkehrssektors nach [25]

Der in der obenliegenden Grafik markierte Pfad zum Individualverkehr ist farblich hervorgehoben, um darzustellen, dass dieser als Teilmenge des Verkehrssektors insbesondere die auf den Straßen fahrenden Privatfahrzeuge aufzeigt.

Die in Kapitel 3.3.2 folgenden Berechnungen beziehen sich auf die in Abbildung 6 dargestellte Definition des Verkehrssektors.

### 3.3.2 Berechnung des Energiebedarfs des gesamten PKW-Straßenaufkommens

Im ersten Schritt zur Ermittlung der elektrischen Leistung des kompletten deutschen PKW-Straßenverkehrsaufkommens muss der prozentuale Anteil der PKW bzw. der absolute Energiebedarf am Sektor Verkehr ermittelt werden.

Hierzu finden sich in der Broschüre „Daten zum Verkehr“, welche vom Umweltbundesamt im Jahre 2012 herausgegeben wurde, Tabellen, in denen der Energieverbrauch nach Personen- bzw. Güterverkehr untergliedert vorzufinden ist. In den nachfolgenden Grafiken Tabelle 5 und Tabelle 6 sind der Primärenergieverbrauch im Güterverkehr bzw. im Personenverkehr der Jahre 1995 bis 2010 dargestellt.

Für die weitere Betrachtung werden ausschließlich Mittelwerte der Jahre 2005 bis 2010 verwendet, da diese einen besseren und somit näheren Realitätsbezug zum Jahr 2016 vorweisen.

Jahreszahl	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Straßengüterverkehr	615	694	716	749	769	761	709	732
Luftverkehr	64	76	91	98	103	107	104	112
Schienenverkehr	45	46	46	48	49	48	39	42
Binnenschifffahrt	31	33	31	31	31	30	26	29
Summe Güterverkehr	756	848	884	926	953	945	878	915

Tabelle 5: Primärenergieverbrauch im Güterverkehr in PJ [24]

Jahreszahl	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Straßenverkehr	1891	1930	1896	1888	1878	1847	1862	1837
Luftverkehr	200	264	303	315	325	326	316	302
Schienenverkehr	121	126	119	117	113	112	110	108
Summe Personenverkehr	2212	2320	2318	2320	2317	2285	2289	2247

Tabelle 6: Primärenergieverbrauch im Personenverkehr in PJ [24]

Im zweiten Schritt gilt es herauszufinden, welchen Anteil die Positionen Straßenverkehr und Straßengüterverkehr am gesamten Endenergieverbrauch des Verkehrssektors haben. Die Summe aus Personenverkehr und Güterverkehr der obenstehenden Tabelle 5 und Tabelle 6 ergibt in Tabelle 7 das Ergebnis für den Verkehrssektor.



Jahreszahl	1995	2000	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Verkehrssektor (Summe Personenverkehr und Güter- verkehr) in PJ	2968	3168	3202	3246	3269	3230	3167	3161
Anteil des Straßenverkehrs und des Straßengüterverkehrs am Verkehrssektor	84,4%	82,8%	81,6%	81,2%	81,0%	80,7%	81,2%	81,3%
Mittelwert der Jahre 2005 - 2010 vom Anteil des Straßen- verkehrs & des Straßengüter- verkehrs am Verkehrssektor					81,2%			

Tabelle 7: Anteil des Straßenverkehrs und des Straßengüterverkehrs am Verkehrssektor

In der dritten Zeile in Tabelle 7 ist der prozentuale Anteil des Straßenverkehrs und des Straßengüterverkehrs am gesamten Verkehrssektor des entsprechenden Jahres aufgelistet. Mittelwertbildung über die Jahre 2005 bis 2010 liefert in Zeile vier einen Wert von 81,2 %. Dies bedeutet, dass gut vier Fünftel des gesamten Verkehrsaufkommens (vgl. Abbildung 6) auf den Straßenverkehr bzw. Straßengüterverkehr entfallen. Die Energieverbräuche der restlichen knapp 20 Prozent entfallen auf Luft- bzw. Schienenverkehr und die Binnenschifffahrt.

Somit reduziert sich der zu berücksichtigende Endenergieverbrauch des Verkehrssektors von ursprünglich 2696 PJ (vgl. Kapitel 3.3.1) um 18,8 Prozentpunkte auf 2189 PJ.

### Anteil des Energiebedarfs der zu betrachtenden PKW

Im nächsten Schritt wird die Tatsache berücksichtigt, dass „ein Stück Auto“ nicht ebenso viel Kraftstoff verbraucht wie „ein Stück LKW“. Daher muss es zur einer Relativierung zwischen den Kraftstoffverbräuchen von unterschiedlichen Fahrzeugarten kommen. Hierbei wird zwischen Fahrzeugbeständen in Deutschland unterschieden, die in Tabelle 9 und Tabelle 10 dargestellt werden.

Um Kraftstoffverbräuche in Energiewerte der physikalischen Einheit Wh umzurechnen, wird der für die jeweilige Kraftstoffsorte gültige Heizwert benötigt. Für die nachfolgenden Umrechnungen werden die in Tabelle 8 definierten Heizwerte verwendet.

Kraftstoffart	Heizwert [kWh/m <sup>3</sup> ]
Diesel	9912
Benzin	8527

Tabelle 8: Heizwert-Angaben [26]

In Tabelle 9 wird der Gesamtverbrauch des Treibstoffes den definierten Kraftfahrzeugklassen zugeordnet. Sowohl bei PKW als auch bei LKW wird zwischen den Treibstoffarten Benzin und Diesel unterschieden. Ziel dieser Tabelle soll die Ermittlung einer vergleichbaren Energiemenge (hier: TWh) sein, sodass der Anteil des Energiebedarfs von PKW am gesamten Straßenverkehr und Straßengüterverkehr berechnet werden kann.

	Kraftstoff- typ	Spritverbrauch [l/100 km]	Durchschnittliche Fahrleistung [1000 km]	Verbrauch gesamt [Mio. l]	Verbrauch gesamt [TWh]
<b>PKW</b>	Diesel	6,8	20,5	18439	183
<b>PKW</b>	Benzin	7,8	11,0	25738	219
<b>LKW</b>	Diesel	18,6	24,9	11463	114
<b>LKW</b>	Benzin	11,5	14,0	202	2
<b>Sattelzugmaschine</b>	Diesel	34,5	90,4	5729	57
<b>Kraftomnibus</b>	Diesel	29,0	42,1	916	9

Tabelle 9: Berechnung des Energieverbrauchs nach Fahrzeug- und Kraftstoffart [27]

Es wird deutlich, dass der Energieverbrauch von PKW im Vergleich zu anderen Fahrzeugklassen mit ca. 400 TWh am höchsten ausfällt. LKW, Sattelzugmaschinen und Kraftomnibusse kommen zusammen nur auf etwa 180 TWh.

Zusätzlich zu obiger Tabelle 9 fallen Krafräder in die Kategorie Straßenverkehr [25]. Daher wird in Tabelle 10 mittels der Anzahl zugelassener Krafräder, des Treibstoffverbrauchs und der durchschnittlichen Fahrleistung ein Verbrauch in Liter bzw. in Terawattstunden berechnet. In Deutschland zugelassene Krafräder benötigen pro Jahr eine Energiemenge von etwa 8 TWh.

	Anzahl [Stück]	Treibstoff- verbrauch [l/100 km]	durchschnittliche Fahrleistung [1000 km]	Verbrauch gesamt [Mio. l]	Verbrauch gesamt [TWh]
<b>Krafräder</b>	4 373 000 [1]	7 [28]	3 [29]	918	8

Tabelle 10: Berechnung des Energieverbrauchs von Krafrädern

In Tabelle 11 werden die Ergebnisse der obigen Tabellen zusammengefasst.

Fahrzeugart	Klassifizierung	Gesamtverbrauch [TWh]	Straßenverkehr und Straßengüterverkehr - Anteil am Gesamtenergieverbrauch
<b>PKW</b>	Straßenverkehr	402	68,0%
<b>LKW</b>	Straßengüterverkehr	115	19,5%
<b>Sattelzugmaschine</b>	Straßengüterverkehr	57	9,6%
<b>Kraftomnibus</b>	Straßenverkehr	9	1,5%
<b>Krafräder</b>	Straßenverkehr	8	1,3%
<b>Summe</b>		591	100%

Tabelle 11: Anteil des PKW-Energieverbrauchs am Energieverbrauch des Straßenverkehrs

Obwohl der Anteil der in Deutschland fahrenden PKW in Bezug zu allen anderen zugelassen Fahrzeugen etwa 82 % beträgt, beläuft sich der prozentuale Anteil der benötigten Energiemenge für diese PKW auf nurmehr 68 %. Der zu berücksichtigende Endenergieverbrauch reduziert sich somit weiter von 2189 PJ (s. Seite 15) um 32,0 Prozentpunkte auf 1489 PJ.

### Verteilung des Kraftstoffenergieverbrauchs eines Fahrzeugs nach Ursachen

Des Weiteren soll die Energiemenge für PKW ermittelt werden, die ausschließlich für die Fortbewegung der Autos benötigt wird. Über die Verteilung des Kraftstoffenergieverbrauchs eines PKW kann letztendlich die zur Vergleichbarkeit mit der Elektromobilität benötigte Energiemenge zur Fortbewegung berechnet werden. Dazu soll der Energiefluss eines PKWs betrachtet werden, der in nachfolgendem Sankey-Diagramm graphisch dargestellt wird (s. Abbildung 8).

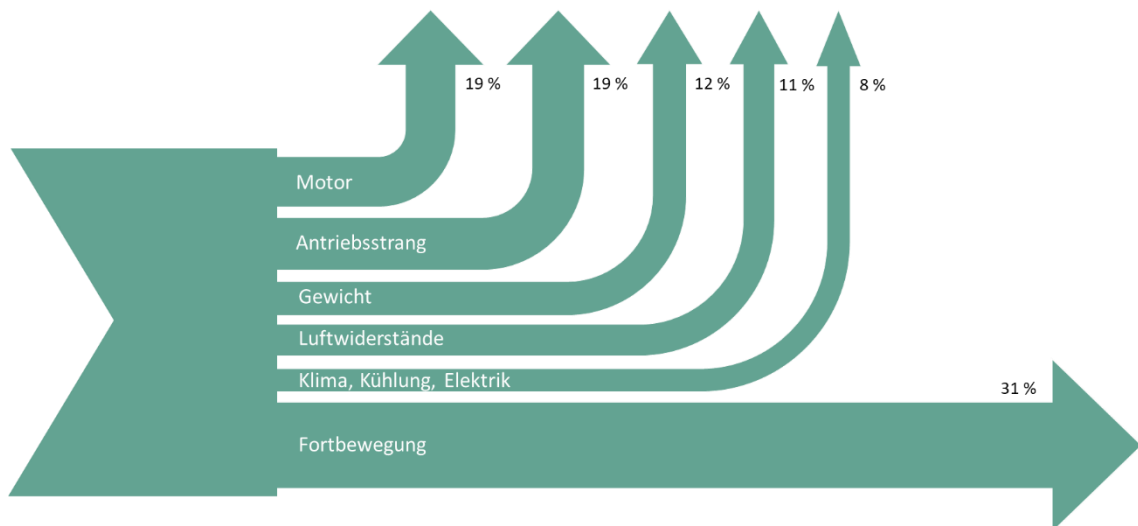


Abbildung 8: Energiefluss Verbrennungsmotor [30]

Die Grafik zeigt auf, dass 69 % der getankten Energiemenge während des Fahrens nicht zum Zwecke der Fortbewegung vom Startort zum Zielort beiträgt. Vielmehr gehen je ein knappes Fünftel der getankten Energie an den Motor bzw. den Antriebsstrang verloren. Weitere Verluste kumulieren sich aufgrund des Gewichts des PKWs, den unvermeidlichen Luftwiderständen sowie den elektrischen Anwendungen bzw. der Klimaanlage zu ca. 30 %, sodass für die Energiemenge zur reinen Fortbewegung ein Wirkungsgrad von 31 % angenommen werden kann.

Hinzukommend soll angenommen werden:

- Der Wirkungsgrad von Fahrzeugen mit Dieselmotoren ist ca. 7 % höher als von Fahrzeugen mit Ottomotoren [31].
- Der eben berechnete Wirkungsgrad zur Fortbewegung soll das arithmetische Mittel aus dem Wirkungsgrad eines Fahrzeugs mit Ottomotor und dem Wirkungsgrad eines Fahrzeugs mit Dieselmotor sein und jeweilige Wirkungsgrade sollen sich um 7% unterscheiden.

Folglich wird berücksichtigt, dass mit Diesel betriebene PKW einen Wirkungsgrad zur Fortbewegung von 34,5 % aufweisen. PKW mit einem Ottomotor besitzen einen Wirkungsgrad von 27,5 %.

Die Verteilung deutscher PKW nach Kraftstoffsorten wird in nachfolgender Tabelle 12 aufgelistet. Hierbei wird zwischen Diesel, Benzin und anderen Treibstoffen (Wasserstoff,

Gas, Strom, etc.) unterschieden. Ferner sind die Anteile der Diesel- bzw. Benzin-PKW an der Gesamtanzahl von Bedeutung.

Klassifizierung PKW 2017	Anzahl [Stück]
Dieselfahrzeuge	15 225 296
Benzinfahrzeuge	30 451 268
Andere	787 313
Gesamtanzahl	46 463 877

Tabelle 12: Stückzahl PKW nach Kraftstoffart [32]

Während der Anteil der Dieselfahrzeuge an den PKW-Gesamtfahrzeugen etwa 32,8 % beträgt, beläuft sich der Anteil der Benzinfahrzeuge am PKW-Gesamtfahrzeugbestand auf etwa 65,5 %.

Die ausschließlich zur Fortbewegung benötigte Energiemenge wird durch die Multiplikation des Wirkungsgrades zur Fortbewegung, des Anteils der jeweiligen Fahrzeugklasse und des zuletzt berechneten Endenergieverbrauchs (s. Seite 16) berechnet.

Für den Bestand an dieselbetriebenen PKW wird eine Energiemenge von 168 PJ berechnet. Es gilt weiterhin zu beachten, dass dieser errechnete Wert ausschließlich für die Fortbewegung aufgebracht wird. Alle zusätzlich auftretenden ungewollten Energieverluste bzw. gewollte Energieumwandlungen sind hierbei schon ausgerechnet. Für die PKW-Benzinflotte ergibt sich eine Energiemenge von 268 PJ.

Für den Gesamtbestand deutscher PKW bedeutet dies, dass jährlich ca. 436 PJ Energie für die Fortbewegung aller PKW bereitgestellt wird. Dies entspricht etwa 121 TWh.

### Berechnung der äquivalenten Energiemenge für Elektroautos

An diesem Punkt der Berechnung wird angenommen, dass die identische Energiemenge für die Fortbewegung aller bis zum Jahre 2050 zugelassenen Elektroautos benötigt wird. Über den Wirkungsgrad der Elektroautos kann auf die tatsächlich benötigte Energiemenge, das heißt die an den Zapfsäulen bereitzustellende elektrische Leistung, geschlossen werden.

Verluste bei Elektroautos entstehen vorrangig beim Laden, in der Leistungselektronik, im Motor und im mechanischen Antriebsstrang. Wird jeweils ein durchschnittlicher Wirkungsgrad von 0,9 angenommen, so ergibt sich ein Gesamtwirkungsgrad von ca.  $0,9^4 = 66\%$  [33].

Wird die zur Fortbewegung benötigte Energie durch den Gesamtwirkungsgrad von Elektroautos dividiert, ist die gesuchte Zielgröße gefunden (vgl. nachstehende Gleichung).

$$P_{el, E-Autos} = \frac{E_{Fortbewegung}}{\eta_{E-Auto}} = \frac{121 \text{ TWh}}{0,66} = 183 \frac{\text{TWh}}{a} \quad \text{Gleichung 3-4}$$

Auf Grundlage des Endenergiebedarfs in Deutschland, ausgewählter Statistiken zum deutschen Fahrzeugbestand, eines angenommenen Wirkungsgrads bei Verbrennungsmotoren und einer Annahme des Wirkungsgrades von Elektroautos lässt sich zur Betankung von E-Autos eine jährlich aufzubringende elektrische Leistung von 183 TWh errechnen.

### 3.4 Vergleich beider Ergebnisse

In Kapitel 3.2 wurde auf Grundlage der durchschnittlichen Fahrstrecke die zur Betankung aller E-Autos notwendige elektrische Energie berechnet. Im darauf folgenden Kapitel 3.3 wurde ebenfalls die elektrische Energiemenge berechnet, die zum Auftanken der gesamten Elektromobilitätsflotte notwendig ist, wobei ein komplett unterschiedlicher Ansatz die Grundlage bildete. In Tabelle 13 werden die Ergebnisse beider Ansätze gegenüber gestellt.

Ergebnisauswertung		Berechnet: Benötigte elektrische Energie für E-Autos [TWh]
Kapitel 2.2	Durchschnittliche Fahrstrecke 15320 km/a	172
Kapitel 2.3	Energiebedarf über Verkehrssektor 2018	183
	Abweichung	6 %

Tabelle 13: Vergleich der Ergebnisse – elektrische Energie für E-Autos

Auffällig ist, dass das Ergebnis bei der zuerst durchgeführten Rechnung niedriger ist als beim zweiten Ansatz. Der Ansatz über den Jahresendenergiebedarf liefert absolut ein um 11 TWh höheres Endergebnis als der Ansatz mit der jährlichen Durchschnittsfahrstrecke. Nichtsdestotrotz weichen beide Ergebnisse prozentual nur 6 % voneinander ab. Daher zeugen beide Ergebnisse von gegenseitiger Plausibilität.

## 4 Persönliche Zählung an der Tankstelle

Am 29. April 2018 wurde eine persönliche Zählung auf dem Areal der Autobahntankstelle Lechwiesen Fahrtrichtung Lindau durchgeführt. Die Zählung erfasst einen Zeitrahmen von ca. zwei Stunden. Es werden Daten von 13:50 Uhr bis 16:05 Uhr erhoben.

Gezählt wurden alle PKW, die zu besagter Zeit zu den Benzin- und Diesel-Zapfsäulen der Rastanlage gefahren sind und betankt wurden. Für jeden Tankvorgang wird die benötigte Zeit erfasst. Mit Abstellen des Motors nach Ankunft des PKWs beginnt die Zeiterfassung. Für das Ende der Zeiterfassung müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein: sowohl die Löschung der digitalen Tankanzeige durch den Tankstellenbediensteten als auch das Wegfahren des PKWs vom Zapfsäulenbereich, sodass ein weiterer PKW zur Zapfsäule heranzufahren kann und unmittelbar mit dem Tanken beginnen kann. Die Reihenfolge beider Voraussetzungen bleibt unberücksichtigt.

Die Tankstelle Lechwiesen Nord verfügt über sechs Zapfsäulen für PKW, deren Anordnung in nachfolgender Abbildung 9 zu erkennen ist. Das Bild entstand während der Durchführung der Messung am 29. April 2018.



Abbildung 9: Tankstelle Lechwiesen Nord zum Zeitpunkt der Zählung

Auf dem Bild ist erkennbar, dass es während des Zeitraums der Zählung zu Wartezeiten an den Zapfsäulen kommt. Dies bedeutet, dass die Nachfrage der von der Autobahn zu den Zapfsäulen abfahrenden PKW während des Messzeitraums größer ist, als das Angebot der vorhandenen Zapfsäulen. Die durchschnittliche Tankdauer der PKW in Kombination mit den vorhandenen Zapfsäulen sorgt dafür, dass es zu Rückstaus kommt und Wartezeiten der Autofahrer/-innen in Kauf genommen werden müssen.

### **Auswertung**

Am 29. April 2018 werden innerhalb des Messzeitraums von 135 Minuten an sechs Zapfsäulen insgesamt 71 PKW-Tankvorgänge gezählt. Hierbei beträgt die durchschnittliche Verweildauer je PKW an der Zapfsäule 6,99 Minuten. Wenn der Messzeitraum in Tagesstunden untergliedert wird, dann wurde von 14 Uhr bis 15 Uhr in der 15. Tagesstunde und von 15 Uhr bis 16 Uhr in der 16. Tagesstunde gemessen. Folglich

tankten an jenem Tag während der 15. Tagesstunde 30 PKW und während der 16. Tagesstunde 35 PKW an den Zapfsäulen der Autobahntankstelle Lechwiesen Nord. Die komplette Tabelle mit allen Ergebnissen ist im Anhang.A1 angehängt.

In folgender Abbildung 10 ist die Anzahl der Tankvorgänge über die Dauer in Minuten dargestellt. Hierbei wird ersichtlich, dass ein Großteil der Autofahrer/-innen zwischen drei und neun Minuten für einen Tankvorgang inklusive des Bezahlens an der Kasse benötigt.

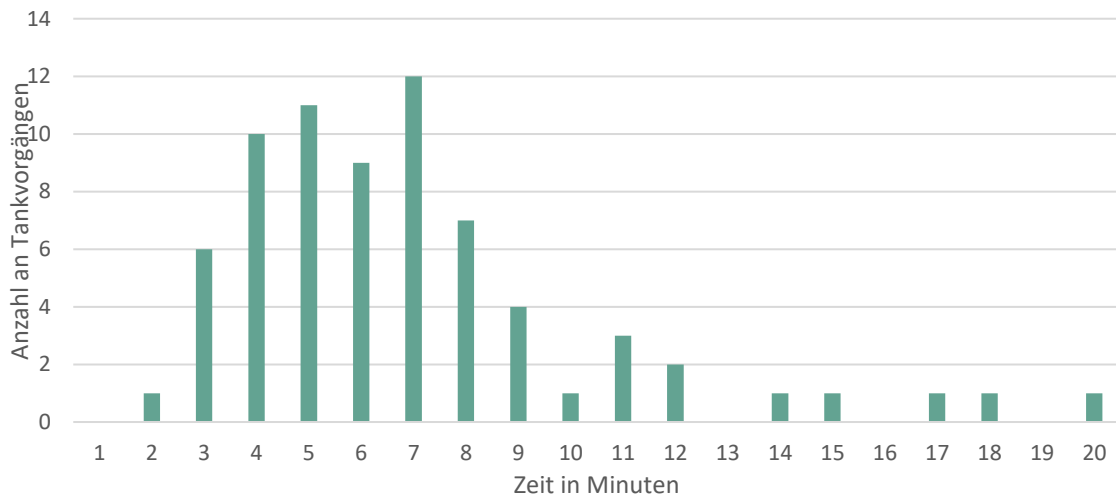


Abbildung 10: Auswertung aller Tankvorgänge am 29.04.2018 von 13:50 Uhr bis 16:05 Uhr an der Autobahntankstelle Lechwiesen Fahrtrichtung Lindau

Die Daten der Zählung eignen sich dafür, eine Annahme zur Tankdauer von PKW an Autobahntankstellen erstellen zu können. Jedoch wird aus der Zählung nicht ersichtlich, wie hoch das durchschnittliche Verkehrsaufkommen an jenem Tag auf der A96 – Fahrtrichtung Lindau entlang der Tankstelle Lechwiesen Nord Nähe Landsberg war. Daher müssen für eine realistische Annahme des Verkehrsaufkommens, welches zu jenen zwei Stunden der Messung vorherrschte, weitere Randbedingungen berücksichtigt werden. Diese werden im Folgenden erläutert.

Der 29. April fällt im Jahr 2018 auf einen Sonntag. Zusätzlich folgt mit dem letzten Tag des Aprils ein sogenannter Brückentag, da der darauffolgende Dienstag, 01. Mai 2018 ein gesetzlicher Feiertag in Deutschland ist. An jenem Sonntag betragen die Temperaturen in Landsberg etwa 25 Grad. Während der erfolgten Zählung schien die Sonne bei nahezu wolkenlosem Himmel [34].

Diese Gegebenheiten sind Indizien dafür, dass das Verkehrsaufkommen auf der A96 an jenem sommerlichen Frühlingstag als erhöhtes angenommen werden kann, denn zusätzlich zum normalen sonntäglichen Verkehrsaufkommen ist ein Reiseverkehr aufgrund des verlängerten Wochenendes anzunehmen. Des Weiteren kann man annehmen, dass der sonntägliche Grundverkehr aufgrund der ersten warmen Temperaturen im Jahr 2018 und des vorherrschend sonnigen Wetters mit „Sonntags-Ausflüglern“ erhöht wird.

## 5 Annäherung der Verkehrsdichte am 29. April 2018

Für einen aussagekräftigen Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Live-Zählung vom 29. April 2018 (vgl. Kapitel 4, S. 20f.) wäre es hilfreich, das stündliche Verkehrsaufkommen in der genannten Zeitspanne am Standort Landsberg/Lech Ost zu kennen.

Hierfür wurde Kontakt mit Frau Spitova von der Autobahndirektion Südbayern aufgenommen, welche stündliche Messwerte für den Monat April 2018 übermittelte.

In nachfolgender Tabelle 14 ist ein Auszug der ersten zehn Stunden des 01. April 2018 dargestellt.

BAST	Datum	WoTag	Stunde	Ri München		Ri Bregenz	
				KfzR1	LkwR1	KfzR2	LkwR2
9550	01.04.2018	So	1	199	7	223	6
9550	01.04.2018	So	2	108	4	116	3
9550	01.04.2018	So	3	92	9	80	4
9550	01.04.2018	So	4	68	5	66	4
9550	01.04.2018	So	5	71	3	85	3
9550	01.04.2018	So	6	114	5	83	7
9550	01.04.2018	So	7	119	5	103	8
9550	01.04.2018	So	8	225	12	237	9
9550	01.04.2018	So	9	427	15	411	10
9550	01.04.2018	So	10	795	12	749	20

Tabelle 14: Auszug der von der ABDSB übermittelten Daten vom April 2018

Die erste Spalte gibt die Zahlenkombination der Messstelle wieder. Durch Verweis auf Tabelle 1 (S. 3) wird ersichtlich, dass es sich hierbei um die Zählstelle Stetten handelt. In den nächsten drei Spalten werden der Tag und der Zeitraum definiert. Abschließend werden für beide Fahrtrichtungen die gezählten Kraftfahrzeuge aufgelistet. Die Spalte der LKW kann vernachlässigt werden.

Diese Tabelle könnte einen Wert für das stündliche Verkehrsaufkommen an der A96 in Landsberg/Lech Ost liefern, sodass ein stichpunktartiger Zusammenhang mit den Live-Daten vom 29. April 2018 und der Abbiegewahrscheinlichkeit hergestellt werden kann. Jedoch gibt es zwei Probleme, die nachfolgend beschrieben werden.

### **Problem 1**










Die oben in Tabelle 14 dargestellten Werte liegen nur für die Messstellen München/Laim (9106), Gräfelfing (9222) und Stetten (9550) vor. Für die Zählstelle Landsberg/Lech (9136) wurde von der ABDSB keine Messtabelle bereitgestellt.



## Problem 2

Die von der ABDSB verschickten Tabellen weisen Zahlen zu den gezählten Kraftfahrzeugen (Kfz) je Richtung auf. In dieser Gruppe der Kfz werden jedoch viele Verkehrsteilnehmer gezählt, die zur Thematik vorliegender Masterarbeit nichtig sind.

Abbildung 11 soll verdeutlichen, welche Fahrzeuge zu den Kfz zählen. Zum Vergleich mit den Simulationsergebnissen wird lediglich die Verkehrsdichte der PKW benötigt, welche eine Teilmenge der Kfz darstellt.

1	2	5+1	8+1		
Kfz	Pkw-ähnlich	nicht klassifizierbare Kfz	nicht klassifizierbare Kfz		
		Pkw-Gruppe		Motorräder	
				Pkw o. Anhänger	
				Lieferwagen o. Anhänger	
	Lkw-ähnlich	Pkw mit Anhänger	Pkw mit Anhänger		
		Lkw > 3,5t o. Anhänger	Lkw > 3,5t o. Anhänger		
		Lkw > 3,5t m. Anhänger / Sattelkraftfahrzeuge	Lkw > 3,5t m. Anhänger		
			Sattelkraftfahrzeuge		
		Busse	Busse		
		} SV			

*SV: Schwerverkehr (Kfz > 3,5t zGG)*

Abbildung 11: Definition Kfz [35]

Folglich bedeutet dies, dass die von der ABDSB übermittelten Kfz-Werte deutlich über dem relevanten PKW-Aufkommen liegen.

Nichtsdestotrotz soll durch einen Vergleich von dem Jahr 2015 und den getroffenen Annahmen versucht werden, sich dem tatsächlichen PKW-Aufkommen vom 29. April 2018 anzunähern.

## Problemlösung

Für das Jahr 2015 liegen Messdaten für alle sieben Zählstellen vor. Es wird die Annahme getroffen, dass sich das Verkehrsaufkommen von 2015 bis 2018 nicht maßgeblich verändert hat. Die für das Jahr 2015 vorliegenden Messdaten enthalten sowohl eine Spalte für die Kfz-Dichte als auch eine Spalte für die Teilmenge der PKW-Verkehrsdichte. Die einzelnen Messwerte sind für alle 365 Tage stundenweise verfügbar, sodass ein Datensatz von 8760 Zeilen je Zählstelle für das Jahr 2015 vorhanden ist.

Es soll nun versucht werden, mit den relevanten und vorhandenen Werten der ABDSB möglichst identische Werte derselben Zählstellen aus dem Jahre 2015 zu finden. Mit diesen Daten probiert man anschließend, auf die PKW-Verkehrsdichte in Landsberg im Jahr 2015 zu schließen. Diese werden wiederum für den anstehenden Vergleich mit der Abbiegewahrscheinlichkeit genutzt.

In Tabelle 15 sind die Daten des Kfz-Verkehrsaufkommens gelistet, welches zum Zeitpunkt der Messung am 29. April 2018 auf der A96 aufgetreten ist. Es sind somit nur die Tagesstunden 15 und 16 berücksichtigt, da die Messung des Tankverhaltens der Autofahrer/-innen von 14 Uhr bis 16 Uhr durchgeführt wurde (vgl. Kapitel 4).

					Ri Bregenz	
BAST	Beschreibung	Datum	WoTag	Stunde	KfzR2	
9106	München/Laim	29.04.2018	So	15	3054	
9222	Gräfelfing	29.04.2018	So	15	2979	
9550	Stetten	29.04.2018	So	15	1364	
9106	München/Laim	29.04.2018	So	16	2938	
9222	Gräfelfing	29.04.2018	So	16	2770	
9550	Stetten	29.04.2018	So	16	1287	

Tabelle 15: Kfz-Verkehrsdaten zum Zeitpunkt der Live-Zählung (Lechwiesen Nord)

Ziel ist es nun, einen Wert für das um Landsberg aufgetretenen PKW-Verkehrsaufkommen zu erhalten, um Rückschlüsse auf die Abbiegewahrscheinlichkeit von PKW-Fahrer/-innen ziehen zu können. Das gesuchte PKW-Verkehrsaufkommen soll mit Hilfe des Verkehrsaufkommen aus dem Jahre 2015 angenähert werden.

Dazu soll im Jahre 2015 jeweils eine Stunde (hh) eines Tages (dd und mm) gefunden werden, die ein ähnliches Kfz-Verkehrsaufkommen aufweist, wie die beiden in Tabelle 15 aufgelisteten Stunden des 29. April 2018. Das ähnliche Verkehrsaufkommen im Jahre 2015 soll mit Hilfe des euklidischen Abstands gefunden werden. Daraus geht hervor, dass mit Hilfe folgender Gleichung das Minimum aller zu berechnenden 8760 Fälle gesucht wird.

Nachfolgende Gleichungen versuchen die Vorgehensweise mathematisch zu beschreiben.

$$A = KfzR2_{9106; 180429; 15} - KfzR2_{9106; 15mmdd; hh} \quad \text{Gleichung 5-1}$$

$$B = KfzR2_{9222; 180429; 15} - KfzR2_{9222; 15mmdd; hh} \quad \text{Gleichung 5-2}$$

$$C = KfzR2_{9550; 180429; 15} - KfzR2_{9550; 15mmdd; hh} \quad \text{Gleichung 5-3}$$

$$\text{Minimum für } \sqrt{A^2 + B^2 + C^2} \quad \text{Gleichung 5-4}$$

Die Durchführung dieser Berechnung soll nicht Bestandteil dieser Masterarbeit sein. Daher wird direkt mit den Ergebnissen weitergearbeitet. Die durchgeführte Berechnung ist in den zur Masterarbeit beiliegenden Datenträgern abgespeichert.

Nach Anwendung der oben beschriebenen vier Gleichungen wird das in Tabelle 16 dargestellte Zwischenergebnis gefunden. Das Verkehrsaufkommen der ersten Stunde der Live-Zählung entspricht näherungsweise dem Verkehrsaufkommen des 01. November 2015 von 15 Uhr bis 16 Uhr und das Verkehrsaufkommen der zweiten Stunde der Live-Zählung entspricht näherungsweise dem Verkehrsaufkommen des 29. August 2015 von 14 Uhr bis 15 Uhr.

					Ri Bregenz	
BAST	Beschreibung	Datum	WoTag	Stunde	KfzR2	
9106	München/Laim	01.11.2015	So	16	3099	
9222	Gräfelfing	01.11.2015	So	16	2974	
9550	Stetten	01.11.2015	So	16	1386	
9106	München/Laim	29.08.2018	Sa	15	2908	
9222	Gräfelfing	29.08.2018	Sa	15	2763	
9550	Stetten	29.08.2018	Sa	15	1288	

Tabelle 16: Ähnliches Verkehrsaufkommen 2015 im Vergleich zur Live-Zählung

Im nächsten Schritt wird das PKW-Verkehrsaufkommen für die beiden in Tabelle 16 aufgelisteten Zeiträume der zur Verfügung stehenden Listen des Jahres 2015 herausgesucht.

Das PKW-Verkehrsaufkommen auf der A96 Fahrtrichtung Bregenz betrug an der Zählstelle Landsberg/Ost am 01. November 2015 von 15 Uhr bis 16 Uhr 1631. Am 29. August 2015 betrug das PKW-Verkehrsaufkommen auf der A96 Fahrtrichtung Bregenz an der Zählstelle Landsberg/Ost von 14 Uhr bis 15 Uhr 1878. Weil beide ermittelten Werte angenäherte Schätzwerte darstellen, soll für den gesuchten Zeitraum am 29. April 2018 für beide Stundenintervalle jeweils der Mittelwert der eben berechneten Verkehrsaufkommen verwendet werden. Der ganzzahlig gerundete Mittelwert beträgt 1755.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Verkehrsaufkommen in den beiden Stunden während der durchgeführten Livezählung auf jeweils 1755 PKW pro Stunde geschätzt werden kann.

## 6 AnyLogic Simulation

Die in Kapitel 4 durchgeführte Live-Messung liefert einen Mittelwert für die durchschnittliche Tankdauer von Benzinautos. Dieser Wert wird nun als Parameter für die kommenden Simulationen genutzt.

Mit Hilfe der frei verfügbaren Software AnyLogic sollen Simulationen zum Tankverhalten von Autofahrern/-innen durchgeführt werden. Ziel der Simulation ist es, das Tankverhalten inklusive der unvermeidbaren Wartezeiten zu Stoßzeiten an den Tankstellen der Benzin- und Diesel-Autos auf das in vielerlei Hinsicht antagonistische Tankverhalten von Elektroautos zu übertragen. Die frei verfügbare Version von AnyLogic ermöglicht eine Simulation des Verkehrsnetzwerks von nur einer Stunde. Daher werden viele Simulationen durchgeführt, die stets die Länge der maximal möglichen Durchführungsdauer aufweisen.

Bei der Betrachtung herkömmlicher Tankweisen und der neu entstehenden Tankweise aufgrund der angenommenen Elektrifizierung des Verkehrs ändern sich einige Parameter. Diese sollten bei der Durchführung der Simulation berücksichtigt werden. Beispielsweise verändern sich in Folge eines Mehrs an Zeit, das für die Ladung der Batterie benötigt wird, auch die Anzahl der Zapfsäulen. Es wird angenommen, dass die Wahrscheinlichkeit der zur Tankstelle abfahrenden Autos gleich bleibt.

Hierbei wird angenommen, dass sich die Kapazität der Elektrobatterien bis zum Jahre 2050 stark verbessern wird, sodass das Thema Reichweite im Umfang dieser Arbeit nicht betrachtet werden soll.

### 6.1 Aufbau der Simulation

Die Simulationsoberfläche in AnyLogic ist für den Anwender zweigeteilt. Es existiert sowohl ein Fenster für die Darstellung der optischen und visuellen Verkehrssituation. Des Weiteren findet man auch einen Bereich für den Aufbau der logischen Zusammenhänge, die mit der erstellten Verkehrssituation erreicht werden sollen.

#### 6.1.1 Optischer Aufbau der Verkehrsführung

Es wird ein Abschnitt einer Autobahn simuliert. Dieser Abschnitt enthält die Verkehrsstrecke der zweispurigen Autobahn, die einspurige Abfahrt zur Tankstelle sowie einen einspurigen Fahrstreifen zum Auffahren auf die Autobahn nach der Benutzung der Zapfsäulen. Der einspurige Abfahrtsstreifen soll somit eine Autobahntankstelle simulieren.

Hierbei ist das Hinzufügen von Parkplätzen obligatorisch/unvermeidbar, denn diese simulieren die Anzahl der Zapfsäulen der Autobahntankstelle. In folgender Abbildung 12 sind sechs Parkplätze berücksichtigt, welche die sechs bestehenden Zapfsäulen für Verbrennungsmotoren der Autobahn Tankstelle Lechwiesen Nord (siehe Abbildung 9) darstellen.

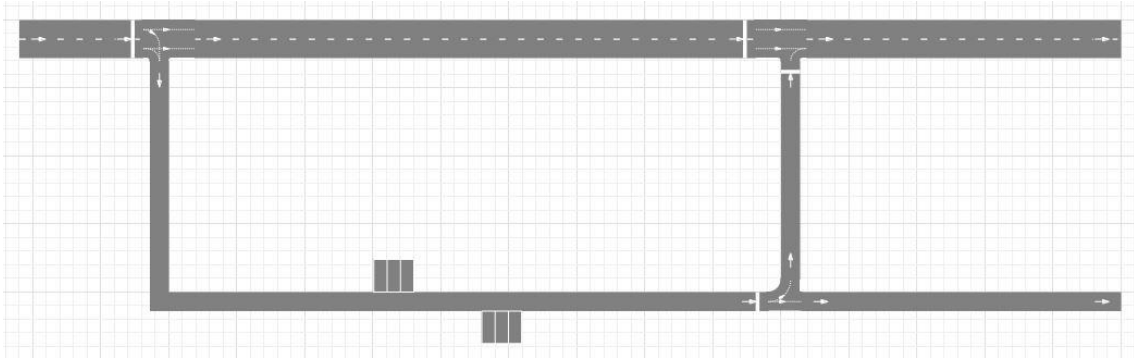


Abbildung 12: AnyLogic Verkehrsführung

Zusätzlich ist eine weitere einspurige Fahrbahn nach den Zapfsäulen-Parkplätzen modelliert, die nicht auf die Autobahn zurückführt. Diesen Fahrstreifen benutzen Autos, die von der Autobahn mit der Absicht zu tanken abfahren, jedoch zum gegenwärtigen Erreichen der Zapfsäulen keinen freien Tankplatz vorfinden, weil alle Tankplätze besetzt sind. Dieser Fahrstreifen ermöglicht das Zählen der Autos, die innerhalb eines zu messenden Zeitraums keinen freien Tankplatz vorfinden und an der Rastanlage auf eine freie Zapfsäule warten müssten. In der Simulation warten die Autos weder vor der Zapfsäule noch auf einen Parkplatz, sondern fahren ohne einen Tankvorgang abzuhalten geradeaus weiter.

### 6.1.2 Logischer Aufbau der Verkehrsführung

Für eine erfolgreiche Durchführung der Simulation muss eine logische Verknüpfung zu der in Abbildung 12 dargestellten Verkehrsführung erstellt werden. In nachfolgender Abbildung 13 ist dieser logische Zusammenhang mit den in der AnyLogic-Bibliothek „Road Traffic“ zur Verfügung stehenden Symbolen dargestellt.

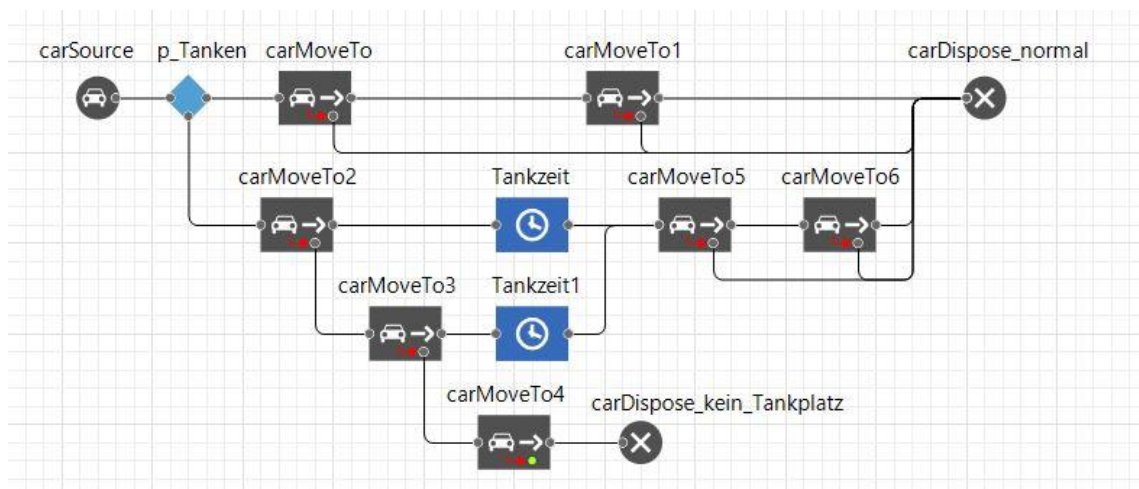


Abbildung 13: Logik des simulierten Verkehrsszenarios

Die auf der Autobahn erzeugten und anschließend fahrenden Autos haben sowohl die Möglichkeit, dem Verlauf der Autobahn zu folgen oder aber die Autobahn zum Tanken zu verlassen. Dieser Entscheidung wird eine Wahrscheinlichkeit (hier:  $p_{\text{Tanken}}$ ) hinterlegt, die im nachfolgenden Kapitel 6.2.4 näher erläutert wird. Folgen die Autos dem

Verlauf der Autobahn und biegen folglich nicht zum Tankstellenareal ab, verschwinden diese am Ende des simulierten Verkehrsnetzwerks wieder. Entschließt sich der Fahrer/ die Fahrerin eines Autos zum Abbiegen und somit zum Auftanken seines/ihrer Automobils, so möchte er in diesem zu betrachtenden Modell mit einer Wahrscheinlichkeit von 100% einen freien Tankplatz vorfinden. Somit bleiben abfahrende Autos unberücksichtigt, die beispielsweise nur zum Rasten oder zur Erholung auf das Tankstellenareal abfahren.

Ist bei der Ankunft eines abgelenkten Autos an der Zapfsäule ein Parkplatz frei, so fährt dieses Auto den Parkplatz an und parkt gemäß einer der Simulationsoberfläche zu übergebenden Verzögerungszeit auf diesem Parkplatz. Dieses Verhalten soll in der Realität einem Tankvorgang entsprechen, wobei die dem Modell hinterlegte Verzögerungszeit der Tankdauer entspricht. Nach Beendigung der Park- bzw. Tankdauer verlässt das Auto den Parkplatz und fährt entsprechend der Einbahnstraßenregelung auf die Autobahn zurück.

Findet ein von der Autobahn auf die Tankstelle abgelenktes Auto keinen freien Parkplatz vor, weil bereits alle Parkplätze von anderen PKW besetzt sind, fährt es nicht mehr auf die Autobahn zurück, sondern fährt auf dem Tankstellenareal geradeaus und auf einer parallel zur Autobahn verlaufenden Straße weiter. Dies hat den Hintergrund, dass die Autos, die keinen freien Tankplatz bei Erreichen der Tanksäulen (Parkplätze) erhalten haben, gezählt werden können. Es wird jedoch aufgrund der in Anylogic unmöglichen Umsetzung darauf verzichtet zu berücksichtigen, dass in der Realität diese Autos warten würden, um den Tankvorgang abzuhalten.

In nachfolgender Tabelle 17 werden die in obiger Abbildung 13 verwendeten Symbole dargestellt und beschrieben.

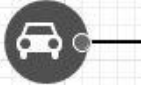



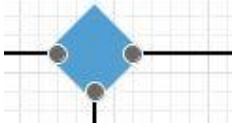
Symbol	Beschreibung
<p>carSource</p> 	<p>Dieses Feld generiert Autos in einem Verkehrsnetzwerk. Im Umfang dieser Masterarbeit erzeugt dieses Feld einen Zusammenhang mit dem Verkehrsfluss, der tatsächlich auf der A96 im Jahre 2015 gemessen wurde. Es können somit stündlich unterschiedliche Verkehrsdichten erzeugt werden.</p>
<p>carMoveTo2</p> 	<p>Dieses Feld weist den erzeugten Autos den Weg entlang der Straßen bzw. lotst die Autos in die als Zapfsäulen zu interpretierende Parkbuchten. Dieser Block ist die Voraussetzung dafür, dass sich die Autos während der Simulation bewegen können.</p>
<p>carDispose</p> 	<p>Dieses Feld lässt die Autos in einem Verkehrsnetzwerk verschwinden. Es wird verwendet, wenn die Autos die simulierte Verkehrswelt durchlaufen haben und eine Weiterführung des Straßenverlaufs keinen weiteren Beitrag zur Simulation liefern würde.</p>
<p>Tankzeit</p> 	<p>Dieses Feld wird zum Hinterlegen einer zeitlichen Verzögerung verwendet. Im zu simulierenden Szenario tritt diese Verzögerung während des Tank- bzw. Ladevorgangs ein. In der Simulation wird dies mit Hilfe eines Parkplatzes und einer Verweildauer dargestellt.</p>
<p>p_Tanken</p> 	<p>Dieses Feld bietet dem ankommenden Auto zwei Möglichkeiten an. Zum einen kann im hier dargestellten Szenario das Auto geradeaus entlang der Autobahn weiterfahren. Zum anderen kann es sich für eine Tankung entscheiden. Hierbei kann eine Wahrscheinlichkeit hinterlegt werden, wie sich die Autos verhalten, die sich dem Kreuzungsbereich annähern.</p>

Tabelle 17: Beschreibung der Symbole in AnyLogic

Es liegen keine Daten darüber vor, mit welcher Wahrscheinlichkeit Autos die Autobahn zum Tanken verlassen. Mit Hilfe des Simulationsnetzwerks soll iterativ herausgefunden werden, welches Tankverhalten am ehesten die Realität widerspiegelt. Hierfür soll das Messergebnis vom 29. April als Vergleich herangezogen werden.

Des Weiteren soll mit Hilfe der Simulation herausgefunden werden, wie viele Zapfsäulen bei vollständiger Elektrifizierung der PKW an einer Tankstelle benötigt werden, um ein identisches Tank- und Warteverhalten, trotz längerer Tankdauer, für die Verkehrsteilnehmer/-innen zu ermöglichen.

Um diese Fragen beantworten zu können, werden die Tankdauer, die Verkehrsdichte, die Wahrscheinlichkeit des Tankens sowie die Anzahl der Zapfsäulen kombiniert, sodass ein umfassendes Portfolio zur Ergebnisauswertung entsteht.

## 6.2 Annahmen und Variablen

In diesen Abschnitt werden die Parameter Tankdauer, Verkehrsfluss/ Verkehrsaufkommen, Anzahl der Zapfsäulen und Wahrscheinlichkeit des Tankens beschrieben.

### 6.2.1 Tankdauer

Die Tankdauer bezeichnet den Zeitraum von der Ankunft eines PKW an der Zapfsäule über dem Tankvorgang selbst, dem Bezahlen an der Kasse bis zum Verlassen des Zapfsäulenbereichs.

Die Tankdauer bleibt zur Erfassung der Simulationsergebnisse für die beiden Unterscheidungen in Benzin- und Diesel-PKW bzw. Elektroautos jeweils stets unverändert.

Die Tankdauer wird als Verzögerungszeit im Simulationsprogramm AnyLogic hinterlegt.

#### 6.2.1.1 Tankdauer der Benzin- und Diesel-PKWs

An die in Abbildung 10 gezeigten Verteilung der Tankdauer in Minuten wird sich in nachfolgender Abbildung 14 mit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung angenähert. Dies wird mit einem schwarzen Dreieck symbolisiert. Für die Wahrscheinlichkeitsverteilung wird die Form eines Dreiecks gewählt, weil diese in AnyLogic im Verzögerungselement (siehe Tabelle 17: Tankzeit) für die Tankdauer hinterlegt werden kann.

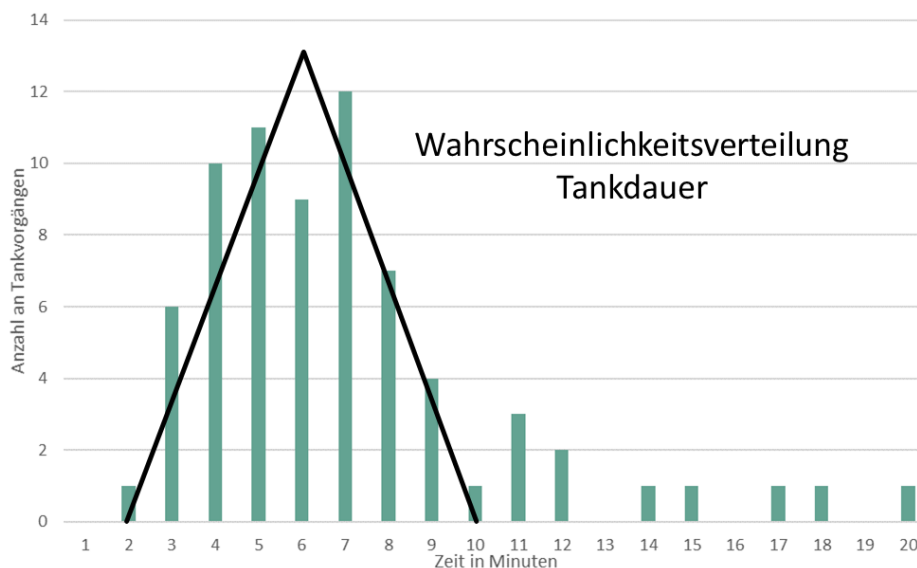


Abbildung 14: Annahme der Tankdauer für Benzin- und Dieselaufos auf Grundlage einer durchgeführten Messung

Wird nur das Hauptfeld der Tankdauer in Abbildung 10 betrachtet und bleiben die wenigen Autofahrer/-innen, die länger als 13 Minuten für eine Tankung benötigten, unberücksichtigt, werden durchschnittlich etwa sechs Minuten pro Tankvorgang benötigt. Dieser Wert wird daher als Mittelwert des Wahrscheinlichkeitsdreiecks angenommen. Das Dreieck soll eine symmetrische Form annehmen, denn auch die von



der Live-Messung ergebenden Werte nehmen ungefähr eine symmetrische Form um die sechs Minuten an.

Die untere Grenze wird mit zwei Minuten definiert, da es ebenso Autofahrer/-innen gibt, die ihr Auto in dieser Zeit volltanken und nach Bezahlen weitergefahren sind. Aufgrund der symmetrischen Auslegung des Dreiecks um den Mittelwert sechs ist die obere Grenze auf zehn Minuten festzulegen.

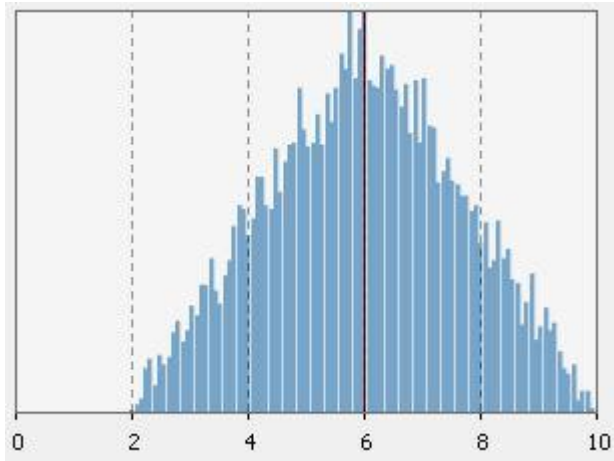


Abbildung 15: Wahrscheinlichkeitsverteilung in AnyLogic –  $\text{triangular}(2, 10, 6)$

In Abbildung 15 ist die in AnyLogic hinterlegte Wahrscheinlichkeitsverteilung dargestellt. Dem Programm wird die Verteilung mit dem Befehl  $\text{triangular}(2, 10, 6)$  übergeben.

### 6.2.1.2 Tankdauer der Elektroautos

Zur Bestimmung der Tankdauer von Elektrofahrzeugen kann im Jahre 2018 auf keine Live-Messung an einer Autobahntankstelle zurückgegriffen werden, da sich der Anteil an Elektrofahrzeugen derzeit unter einem Prozentpunkt der zugelassenen Gesamtfahrzeuge befindet.

Es wird angenommen, dass an Autobahn-Rastanlagen sogenannte Schnell-Ladestationen installiert werden, deren Ladeleistung ca. 50 kW beträgt [36]. Bei geringeren Ladeleistungen vergrößert sich die Ladedauer. Dies würde den Einsatz an Autobahntankstellen nicht nutzer-freundlich gestalten, da für den Fahrer/ die Fahrerin des Autos die Mobilität seines PKWs im Vordergrund stehen soll und nicht eine längere Aufenthaltsdauer aufgrund des Tankvorgangs.

Zur Annahme einer Ladezeit für Elektroautos wird sich eines im Internet aufrufbaren Zeitungsartikels bedient. Darin steht geschrieben, dass die Vollladedauer (100 Prozent SoC) bei öffentlichen Schnell-Ladesäulen etwa 0,5 bis 1 Stunde beträgt [36].

Beim Laden von Elektroautos an Autobahn-Rastanlagen wird angenommen, dass eine Tankung auf ca. 80 Prozent SoC als komfortabler Kompromiss für den Autofahrer/ die Autofahrerin aus Wartezeit und Ladeergebnis darstellt. Da das weitere Aufladen ab 80 Prozent SoC hinaus nicht mehr linear geschieht (Lithium-Ionen-Zellen), sind für die

letzten 20 Prozent längere Wartezeiten nötig, als es die Aufladung der ersten 80 Prozent vermuten lässt [33].

Infolgedessen wird für die Ladezeit von Elektroautos an Autobahntankstellen eine durchschnittliche Ladedauer von 30 Minuten angenommen. Damit eine Vergleichbarkeit zum Verbrennungsmotor besteht, wird auch die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Tankdauer von Elektromotoren als symmetrisches Dreieck in der Simulation hinterlegt.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ladedauer wird zwischen den Grenzen 15 Minuten und 45 Minuten modelliert und lehnt sich an die Zeitspanne der im Zeitungsartikel veröffentlichten Tabelle an. Folglich wird für die am wahrscheinlichsten auftretende Tankdauer zur Erlangung von 80 Prozent SoC 30 Minuten angenommen. Die Wahrscheinlichkeit für Tankdauern bis zu 15 bzw. 45 Minuten nimmt vom Maximalwert linear ab.

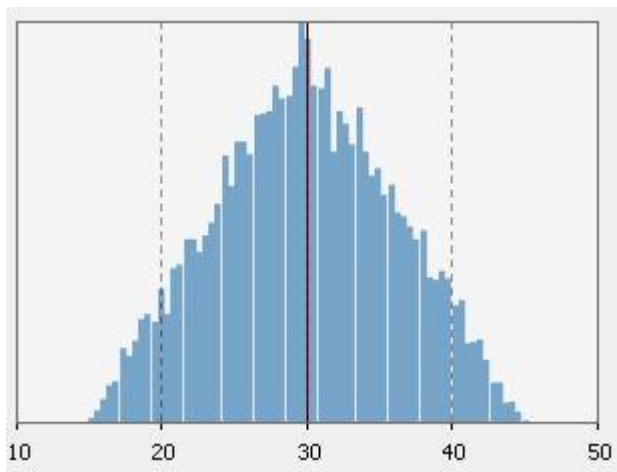


Abbildung 16: Wahrscheinlichkeitsverteilung in AnyLogic –  $\text{triangular}(15, 45, 30)$

In Abbildung 16 wird die in AnyLogic hinterlegte Wahrscheinlichkeitsverteilung graphisch dargestellt. Dem Programm wird die Verteilung mit dem Befehl `triangular(15, 45, 30)` übergeben.

## 6.2.2 Verkehrsfluss/-aufkommen

Die Auslegung von Elektrozapfsäulen an Autobahntankstellen ist abhängig von der Anzahl der PKW, die von der Autobahn mit dem Hintergrund des Tankens abfahren. Des Weiteren ist die Anzahl der zum Tanken abfahrenden PKW abhängig von der stündlichen Verkehrsdichte auf der Autobahn. Daher ist der stündliche Verkehrsfluss ein unabdingbarer Parameter für die Durchführung einer Simulation in AnyLogic.

Der Verkehrsfluss soll im Rahmen zur Beantwortung vorliegender Forschungsfrage bei vollständiger Elektrifizierung im Jahre 2050 identisch zur heutigen Verkehrsdichte angenommen werden. Die stündliche Verkehrsdichte ist damit unabhängig von der Antriebsart der PKW.

Der Verkehrsfluss ist sehr stark vom Wochentag, der Tageszeit und von weiteren Faktoren, wie beispielsweise Brückentage, Ferienbeginn und Wettereinflüsse abhängig.

Automatische Zählstellen (siehe Kapitel 1.2.2) liefern äußerst genaue Werte über das stündliche Verkehrsaufkommen. Die Daten sind auf der Website der BAST abrufbar [37].

Nachfolgende drei Abbildungen (siehe Seite 33) zeigen das stündliche Verkehrsaufkommen an drei verschiedenen zu betrachtenden Verkehrsszenarien:

- Wochentag (siehe Abbildung 17)
- Wochenende (siehe Abbildung 18)
- Ferienbeginn (siehe Abbildung 19)

Für jede Kategorie werden sechs über das Kalenderjahr 2015 verteilte Zeiträume definiert. Die verschiedenen Zeiträume sind in der nachfolgenden Tabelle 18 übersichtlich zusammengefasst.

	Dienstag bis Donnerstag	Samstag und Sonntag	Ferienbeginn
<b>1. Zeitraum</b>	20. bis 22. Januar 2015	24. und 25. Januar 2015	13. Februar 2015
<b>2. Zeitraum</b>	03. bis 05. März 2015	07. und 08. März 2015	27. März 2015
<b>3. Zeitraum</b>	21. bis 23. April 2015	25. und 26. April 2015	22. Mai 2015
<b>4. Zeitraum</b>	14. bis 16. Juli 2015	11. und 12. Juli 2015	31. Juli 2015
<b>5. Zeitraum</b>	20. bis 22. Oktober 2015	17. und 18. Oktober 2015	30. Oktober 2015
<b>6. Zeitraum</b>	08. bis 10. Dezember 2015	05. und 06. Dezember 2015	23. Dezember 2015

Tabelle 18: Zeiträume zur Ermittlung eines durchschnittlichen Verkehrsaufkommens 2015

In den nachfolgenden drei Abbildungen sind jeweils die über diese Zeiträume gemittelten Verkehrsdichten dargestellt. Die jeweiligen Verkehrsdichten wurden an der Messstelle Landsberg aufgezeichnet. Es wird deutlich, dass die Profile für die im Kalenderjahr 2015 ausgewählten Tage sehr unterschiedlich ausfallen, sofern die Tagesstunden zwei bis fünf unberücksichtigt bleiben.

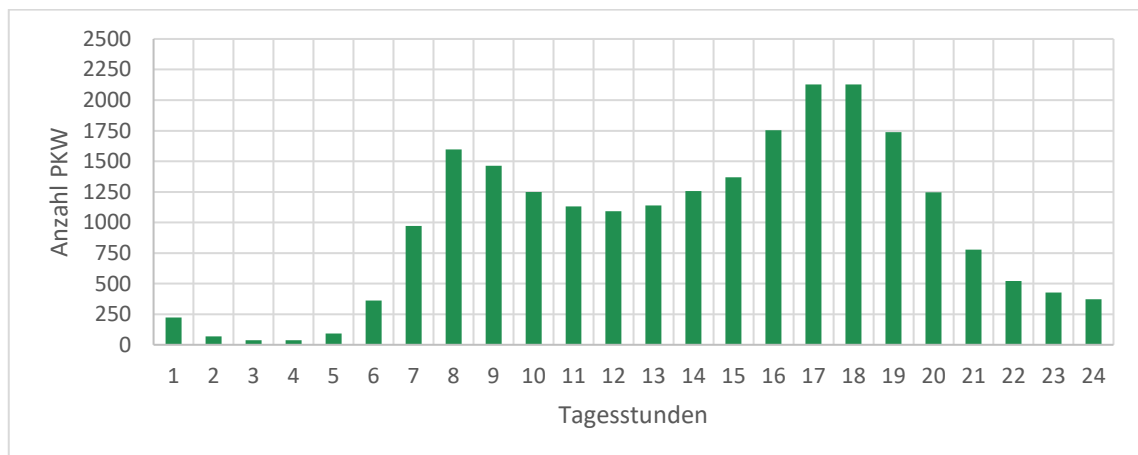


Abbildung 17: Durchschnittliches Verkehrsaufkommen Wochentage 2015

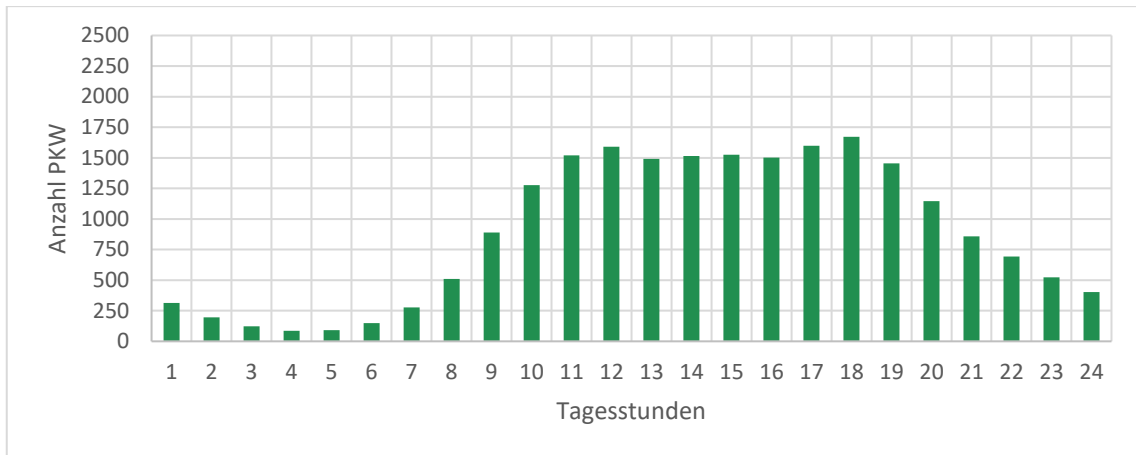


Abbildung 18: Durchschnittliches Verkehrsaufkommen Wochenende 2015

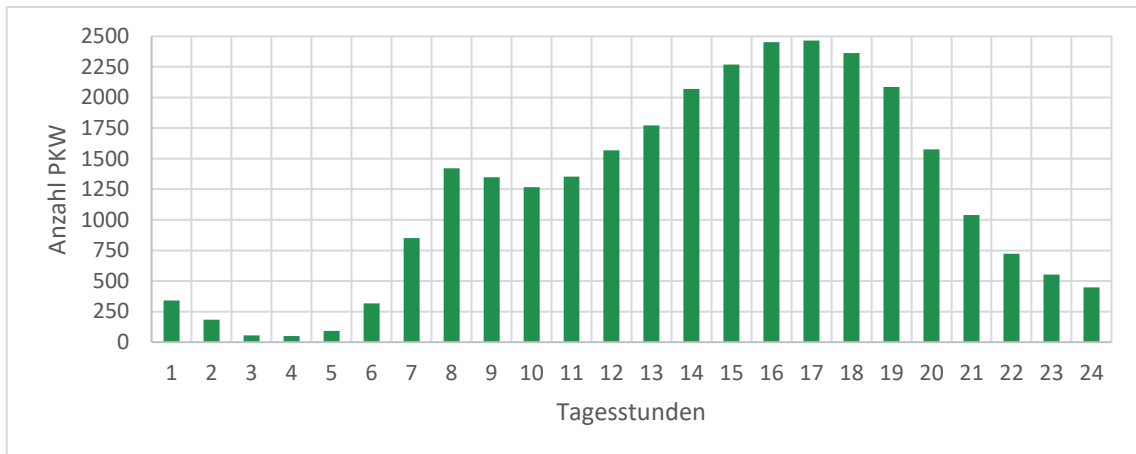


Abbildung 19: Durchschnittliches Verkehrsaufkommen Ferienbeginn 2015

Darüber hinaus wird für die Durchführung der Simulation davon ausgegangen, dass Verkehrsdichten unter 250 PKW pro Stunde vernachlässigt werden können. Es ist davon auszugehen, dass das geringe Verkehrsaufkommen, welches ausschließlich während den Nachtstunden auftritt (vgl. obige Abbildungen), an den Autobahntankstellen keinen Stau verursachen wird.

Verkehrsaufkommen über 2250 PKW pro Stunde werden ebenso bei der Durchführung der Simulation vernachlässigt, weil derartige Peaks nur zu seltenen Ereignistagen im Jahr auftreten. Diese sind Großteils mit den Ferienanfängen der bayerischen Schulferien abgedeckt. Eine Auslegung von Tankplätzen und Zapfsäulen an Tankstellen gemäß dieses Verkehrsaufkommens entspräche einer Überdimensionierung und ist wirtschaftlich gesehen unrentabel für die Tankstellenbetreiber.

Folglich wird die Simulation mit Verkehrsaufkommen von 250 bis 2250 PKW pro Stunde durchgeführt. Es wird eine Schrittweite von 250 angewendet, sodass insgesamt neun verschiedene Szenarien hinsichtlich des Verkehrsaufkommens simuliert werden. Die Verkehrsdichten werden im Simulationsprogramm dem Symbol „CarSource“ (siehe Tabelle 17) übergeben.

### **6.2.3 Anzahl der Zapfsäulen**

Während die aktuelle Anzahl an Zapfsäulen für Diesel- und Benzinautos an den Autobahnstellen durch Abzählen leicht ermittelt werden kann, gestaltet sich die Mengenermittlung von Elektrozapfsäulen umso diffiziler.

#### **6.2.3.1 Benzin- und Dieselaautos**

Für die Simulation werden bei PKW, die von Benzin- und Dieselmotoren angetrieben werden, sechs Zapfsäulen berücksichtigt. Diese Zahl entspricht exakt der Anzahl an verfügbaren Tankstellen auf der Autobahntankstelle Lechwiesen-Nord bei Landsberg.

#### **6.2.3.2 Elektroautos**

Für die Ermittlung der Menge an Elektro-Zapfsäulen ist es hilfreich, das derzeitige Tankverhalten von Diesel- und Benzinautos zu betrachten. Die zu ermittelte Anzahl an Elektro-Zapfsäulen soll den Autofahrern/-innen ein ähnliches Tankverhalten wie bei den Verbrennungsantrieben ermöglichen.

Da eine Live-Messung des Tankverhaltens von Elektrofahrzeugen aus den bereits bekannten und beschriebenen Punkten (siehe Kapitel 6.2.1.2) nicht möglich ist, müssen zur Bestimmung von Elektrozapfsäulen willkürliche Annahmen getroffen werden. Sinn und Zweck der Simulation soll es schließlich sein, die willkürlich getroffenen Annahmen zu bestärken oder zu widerlegen.

Weil die Tankdauer von Elektroautos im Vergleich zu PKW mit Verbrennungsmotoren zunimmt und das Verkehrsaufkommen identisch bleibt, muss sich die Anzahl der Elektrozapfsäulen bei gleichbleibenden Wartezeiten an den Zapfsäulen erhöhen.

Für den ersten Simulationsdurchgang sollen 30 Elektrozapfsäulen für Elektroautos angenommen werden. Nach Überprüfung und Auswertung der Simulationsreihe wird die Anzahl angepasst. Der Parameter der Zapfsäulenanzahl ist derart veränderlich, sodass das Tankverhalten von Elektroautos an das Tankverhalten von Benzinautos angenähert wird. Die Bestimmung der korrekten Anzahl an Zapfsäulen soll durch Beantwortung der Forschungsfrage gefunden werden.

### **6.2.4 Wahrscheinlichkeit des Tankens**

Für die Simulation und zur Dimensionierung der Elektrozapfsäulen ist es von hoher Bedeutung, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein auf der Autobahn fahrendes Auto zur Tankstelle abbiegt (siehe Abbildung 20).

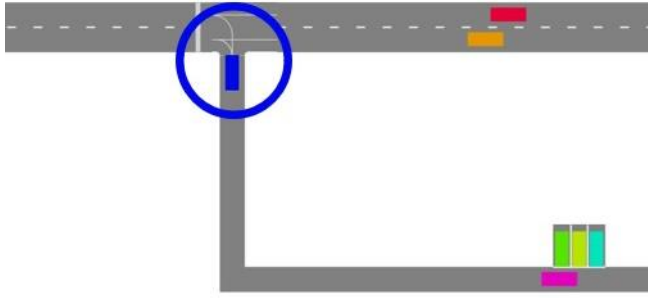


Abbildung 20: Graphische Darstellung des Abbiegevorgangs

Wird die Tankstelle Lechwiesen Nord beispielhaft als Basis herangezogen, wird folglich die Fahrtrichtung von München nach Lindau im Bereich um Landsberg betrachtet. Die Bestimmung bzw. die Vorhersage dieses Parameters ist schier unmöglich, da der Parameter von vielen verschiedenen Faktoren abhängig ist. Hierunter fallen unter anderem folgende Überlegungen:

- Mit welchem Tankinhalt bzw. State of Charge (SoC) ist das Auto losgefahren?
- Wie viele Kilometer hat es seit dem Start bzw. dem letzten Tankstopp zurückgelegt?
- Ist das Auto seit München auf der Autobahntrasse unterwegs oder beispielsweise erst vor Kurzem in Landsberg/Lech Ost auf die Autobahn aufgefahren?
- Wird das Auto nur getankt, wenn der Energieinhalt zur Fortbewegung weniger eines definierten Anteils der vollständigen Füllmenge entspricht?
- Bevorzugt der Fahrer/die Fahrerin einen Tankstopp auf der Autobahn oder fährt er lieber von der Autobahn ab, um günstigeren Treibstoff zu tanken?
- Ist die Fahrt des auf der Autobahn fahrenden PKWs eine beruflich bedingte Fahrt, eine Freizeitfahrt, eine Fahrt zu Ferienbeginn oder eine Kurzstrecke, um Familienangehörige im Nachbarort zu besuchen?





Beispielhaft soll anhand des Reisezwecks die hohe Komplexität zur Wahrscheinlichkeitsermittlung eines Abbiegevorgangs erläutert werden. Hierbei wird das vorherrschende Verkehrsaufkommen nach Reisegrund spezifiziert.

PKW-Fahrten auf Deutschlands Autobahnen sind größtenteils zweckdienlich. Darunter ist zu verstehen, dass Autofahrer/-innen nahezu ausschließlich zur Ausübung eines Nutzens eine Schnellstraße mit einem PKW befahren. Die Benutzung einer Autobahn kann beispielsweise die nachfolgenden Hintergründe haben, die bereits strukturiert nach der Wahrscheinlichkeit der Tageszeitausführung aufgelistet sind [38]:

- Arbeits- bzw. Pendlerweg
- Freizeit, Erholung, Urlaub
- Familienbesuche, Einkaufen, Durchführen eines wöchentlichen Hobbys
- Nachtfahrten, Sonstiges

Die nach Yassir A. kategorisierten Reisegründe sollen auf die von der Zählstelle Landsberg/Ost aufgenommenen Messwerte der A96 angewendet werden. Hierfür werden die Balken der stündlichen Verkehrsdichten in den drei nachfolgenden Abbildungen farbig untergliedert und in Klassen eingeteilt. Die Verläufe der Verkehrsaufkommen sind zu den bereits in Kapitel 6.2.2 gezeigten Verkehrsdichten identisch, sodass jede Abbildung einen für das Jahr 2015 typisch zu charakterisierenden Tag darstellt: Werk- bzw. Wochentag, Wochenendtag, letzter Schultag vor dem Start bayerischer Schulferien. Analog der bereits gezeigten Abbildungen sind auch die Verläufe der Wochentage entsprechend der Zeiträume aus Tabelle 18 gemittelt.

Zusätzlich erfolgt die Klassifizierung des Reisezwecks. Für manche Uhrzeiten können durchaus mehrere Reisezwecke in Betracht gezogen werden. Im Folgenden wird sich stets für den wahrscheinlichsten Reisezweck pro Stunde entschieden [39]. Diese wird gemäß des folgenden Farbspektrums durchgeführt:

- Berufsverkehr                      Rot                      
- Freizeitverkehr                      Gelb                      
- Familienbesuche, Einkaufen      Orange                      
- Nachtverkehr                      Grün                      

Der Klassifizierung Berufsverkehr erfasst Autofahrer/-innen, die werktags zu den morgentlichen und abendlichen Stoßzeiten auf der Autobahn unterwegs sind. Zu jenen Zeiten ist der durchschnittliche Autofahrer für gewöhnlich zu seiner Arbeitsstätte unterwegs.

Freizeitverkehr wird zwischen alltäglich und nicht-alltäglich unterschieden. Unter nicht-alltäglichem Freizeitverkehr fallen beispielsweise die Fahrt aufgrund eines Urlaubs oder eines Tagesausflugs. Während Tagesausflüge meistens an Wochenenden unternommen werden, fallen Urlaubsreisen oftmals auf den Ferienbeginn [39].

Des Weiteren kann der Verkehr zum Zwecke des Einkaufens, privater Erledigungen oder für Familienbesuche untergliedert werden. Diese Fahrten finden zumeist wochentags zwischen den Berufsverkehrsspitzen statt.

Schlussendlich bleibt das nächtliche Verkehrsaufkommen, welches aufgrund der sehr geringen Verkehrsdichte keiner Kategorie zugeordnet werden kann. Daher wird der Nachtverkehr im Umfang vorliegender Arbeit eigens klassifiziert.

Abbildung 21 zeigt das kategorisierte Verkehrsaufkommen eines Wochentags. An jenen Tagen wird tageszeitenabhängig zwischen Nachtverkehr, Berufsverkehr und Hobbyverkehr (Einkaufen/Besuche etc.) unterschieden. Während zwischen den Tagesstunden 7 bis 10 und 15 bis 20 der berufliche Verkehr auf der Autobahn überwiegt, wird die Autobahn zur Mittagszeit voraussichtlich vermutlich überwiegend zum Erledigen privater Angelegenheiten genutzt. Das Verkehrsaufkommen nimmt ab 20 Uhr deutlich erkennbar bis in die Morgenstunden ab.

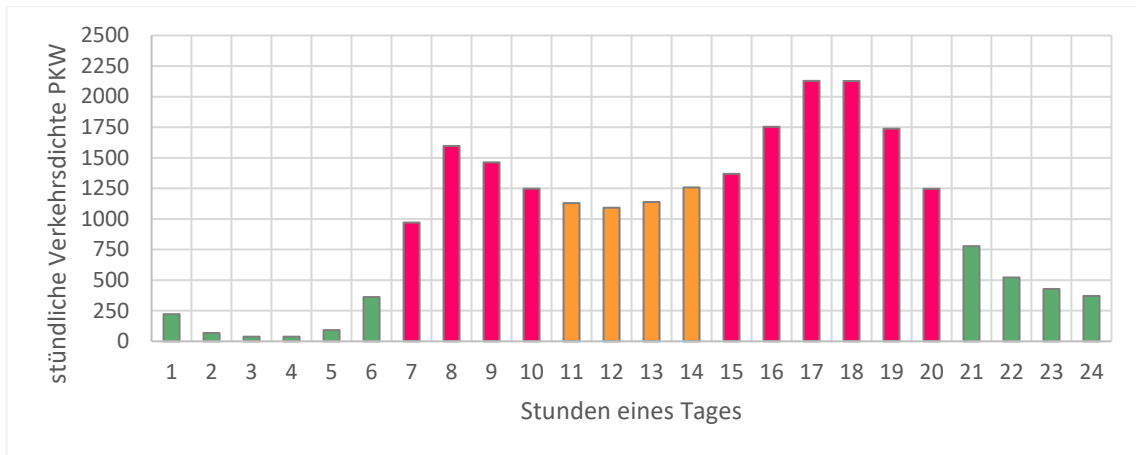


Abbildung 21: Kategorisiertes Verkehrsaufkommen eines durchschnittlichen Wochentags

Das absolute Verkehrsaufkommen am Wochenende liegt deutlich unter den der Wochentage. Es ist auffällig, dass es kaum zu Tagesspitzen am Wochenende kommt. Vielmehr wird gegen 11 Uhr ein Level einer Verkehrsdichte erreicht, welches über mehrere Stunden hinweg gehalten wird. Ganztäglich findet an Wochenenden überwiegend ein Hobby-, Ausflugs- und Freizeitverkehr auf der A96 statt, sodass in Abbildung 22 lediglich zwischen Freizeit- und Nachtverkehr unterschieden wird.

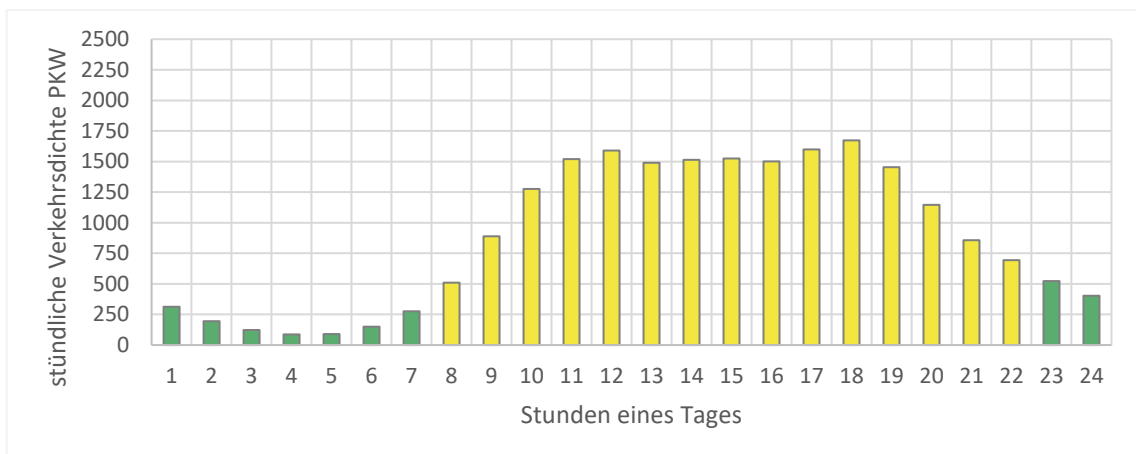


Abbildung 22: Kategorisiertes Verkehrsaufkommen eines durchschnittlichen Wochenendtags

Das in Abbildung 23 dargestellte Verkehrsaufkommen zu Beginn der Ferien erwartet im Vergleich zum Werktags-Verkehr weniger Familienfahrten zwischen den Berufsverkehrsspitzen. Es wird angenommen, dass Arbeitnehmer/-innen vermehrt früher in den Feierabend starten, sodass mehr Zeit für eine Abreise in den Urlaub übrig bleibt. Dies lässt sich am stetigen Anstieg der Verkehrsdichte ab 10 Uhr erklären, sodass ab ca. 15 Uhr mit mehr Freizeitverkehr als Berufsverkehr zu rechnen ist. Zudem nehmen sich einige Arbeitnehmer/-innen an diesem Tag frei, sodass sie bereits ab der Heimkunft der Schulkinder direkt in den Urlaub starten können. Dies zeigt sich daran, dass die Berufsverkehrsspitze morgens kleiner ist, als in obiger Abbildung 21.



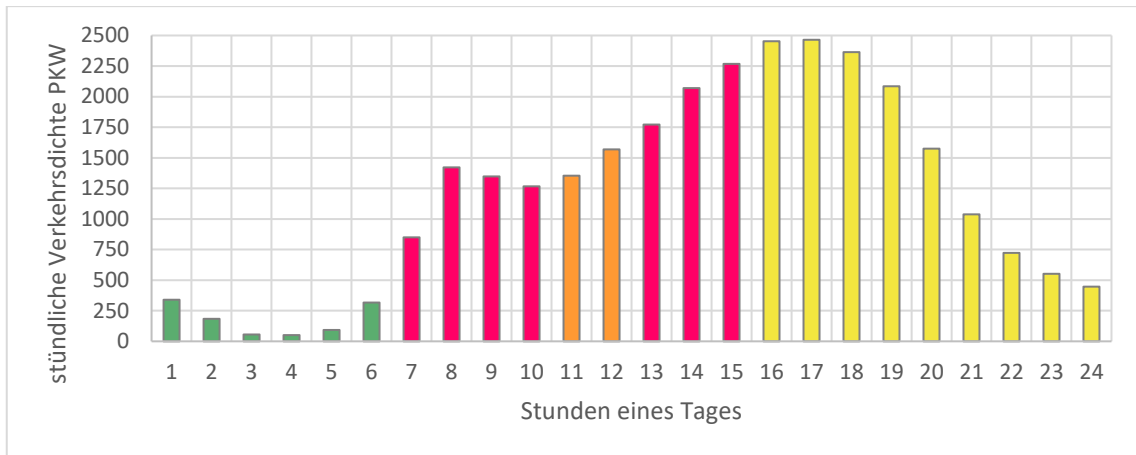


Abbildung 23: Kategorisiertes Verkehrsaufkommen eines durchschnittlichen Tags zum Beginn der Schulferien

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich das Verkehrsaufkommen zum Ferienstart komplex zusammensetzt. Der Berufsverkehr kann zur Mittagszeit durch private Fahrten (z. B. Einkaufen) unterbrochen werden. Zu den Tagesspitzen bis in die Nacht hinein dominiert jedoch aller Voraussicht nach der Ferien- und Urlaubsverkehr.

Es ist anzunehmen, dass sich die Abbiegewahrscheinlichkeiten der einzelnen Reisegründe unterscheiden. Für die Zapfsäulenbelegung an Autobahntankstellen ist die Abbiegewahrscheinlichkeit bei hohen Verkehrsdichten am einflussreichsten. Deshalb kann die Abbiegewahrscheinlichkeit von Nachtfahrten vernachlässigt werden, da hierbei das Verkehrsaufkommen im Vergleich zu den übrigen Tagesstunden derart gering ist und somit höchstwahrscheinlich keine Einflussnahme zu den anderen Zeiten besteht.

Des Weiteren soll angenommen werden, dass die Kombination aus Abbiegewahrscheinlichkeit und Verkehrsaufkommen bei Familienbesuchen und Einkaufsfahrten im Vergleich zu den Verkehrsspitzen der Berufspendler und der Verkehrsdichten von Freizeitfahrten vernachlässigbar ist. Es ist unwahrscheinlich, dass beispielsweise bei Erledigung privater Einkäufe derart oft auf Autobahntankstellen getankt wird, sodass dem starken Verkehrsaufkommen von Berufspendlern bzw. Wochenendausflüglern konkurriert wird.

Bei der Abwägung der kritischeren Abbiegewahrscheinlichkeit von Berufspendlern, die in Abbildung 21 rot dargestellt sind, und Wochenendausflüglern, die in Abbildung 22 gelb dargestellt sind, sollen die folgenden Annahmen getroffen werden.

Die Wahrscheinlichkeit, dass Wochenendausflügler an Autobahntankstellen tanken, ist höher als die Wahrscheinlichkeit, dass Berufspendler an Autobahntankstellen tanken. Dies liegt daran, dass Autos bei längeren Freizeitfahrten am Wochenende auf Autobahnen mehr Strecke zurückgelegt als beispielsweise für kürzere Fahrten ins Büro. Zudem verlassen Berufspendler ihre gewohnte Komfortzone auf dem Weg zur Arbeit nicht. Dies bedeutet, dass sie voraussichtlich eine Tankgewohnheit hinsichtlich der Auswahl der Tankstelle im Laufe der Jahre entwickelt haben. Aus diesem Grund fahren sie vermutlich stets dieselbe Tankstelle an. Es wird angenommen, dass sich die

Autofahrer/-innen, die sich auf dem Arbeitsweg befinden, nach den Gesetzen der Wirtschaft verhalten und möglichst günstig neuen Treibstoff tanken möchten. Weil die Tankstellenpreise auf den deutschen Autobahnen deutlich über den Durchschnittspreisen liegen, tanken Berufspendler tendenziell nicht auf Autobahntankstellen.

Im Gegensatz hierzu ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass Wochenendausflügler auf deutschen Autobahnen (insbesondere der A96) tanken. Hierbei werden tendenziell größere und längere Strecken von den Autofahrern absolviert, sodass deren tägliche Routine und Komfortbereich verlassen wird. Aufgrund der längeren Wegdistanz erhöht sich die Wahrscheinlichkeit des Tankens, sodass Wochenendausflügler auch aus zeitlichen Gründen eher Autobahntankstellen ansteuern werden.

Ferner wird angenommen, dass die Dauerbelastung von Tankstellen an Wochenenden zwischen der 10. und 20. Tagesstunde höher sein wird, als zu den beiden Verkehrsspitzen (8. und 9. Tagesstunde bzw. 17. und 18. Tagesstunde) an Werktagen. Dies liegt auch an der Tatsache, dass die Verkehrsbelastung an Wochenenden tagsüber einen konstanten Wert hält, während sie an Werktagen zwischen den beiden Spitzen wieder abfällt.

Aufgrund dieser vielen unsicheren Annahmen soll innerhalb der Simulationsoberfläche ein willkürlicher Range von Wahrscheinlichkeiten definiert und zur Simulation herangezogen werden. Dieser Range bewegt sich von 2,5 % bis einschließlich 10 % und weist eine Schrittweite von 1,25 % auf. Des Weiteren sollen für Elektroautos dieselbe Abbiegewahrscheinlichkeit aufgrund von Tanken gelten wie für Benzin- und Diesel-PKW.

Nun soll die Wahrscheinlichkeit des Abbiegens der Live-Zählung vom Sonntag, den 29. April 2018 gegenüber gestellt werden, um anschließend sowohl die gemessene als auch die simulierte Verkehrssituation miteinander vergleichen zu können. Außerdem soll die Frage beantwortet werden, ob die zuvor definierten Wahrscheinlichkeiten realitätsnah abgebildet werden können.

### **6.3 Beschreibung der Simulationsdurchführung**

Bei der Durchführung der Simulationen ist zu beachten, dass alle Parameter miteinander kombiniert werden. Die in den Kapitel 6.2.1 bis 6.2.4 beschriebenen Variablen lassen vorerst insgesamt 126 verschiedene Kombinationen zu, da neun verschiedene Verkehrsdichten, zwei unterschiedliche Tankdauern sowie sieben unterschiedliche Wahrscheinlichkeiten des Abbiegens miteinander zu kombinieren sind. Somit werden zunächst 126 Simulationsergebnisse erwartet.

In Abhängigkeit der Plausibilitätsüberprüfung hinsichtlich der Abbiegewahrscheinlichkeit ist nicht ausgeschlossen, dass weitere Kombinationsmöglichkeiten zusätzlich hinzukommen können.

Ein Simulationsergebnis wird umso genauer, je mehr Simulationen zur Ermittlung eines Ergebnisses durchgeführt werden. Zur Ermittlung eines Simulationsergebnisses werden

fünf Simulationen mit dem identischen Variablen-Input durchgeführt. Das Simulationsergebnis wird durch algebraische Mittelwertbildung der fünf Einzelsimulationen gebildet.

Insgesamt wird somit vorläufig 630 Mal das Simulationsfenster in AnyLogic gestartet.

Die nachfolgende Tabelle 19 zeigt eine Übersicht, wie die Ergebnisse einer (von insgesamt 216) Kombination in einer Tabelle festgehalten werden. Für das ausgewählte Beispiel wird die Verkehrsdichte mit 1250 PKW pro Stunde, die Tankdauer mit durchschnittlich sechs Minuten, die Anzahl der Zapfsäulen mit sechs und die Wahrscheinlichkeit, dass ein Auto von der Autobahn zur Tankstelle abbiegt, mit 7,5 % angenommen.

Vd	1250
tD	2,6,10
p(T)	7,5%
AZ	6

Anzahl Simulationen	Vd simuliert	p(T) absolut	p(T) simuliert	PKW o TP	Anmerkung	Datei
1	1157	70	6,1%	24	oben	_201806281248_
2	1203	99	8,2%	47	unten	_201806281248_
3	1192	86	7,2%	39		_201806281314_
4	1260	105	8,3%	54		_201806281348_
5	1158	94	8,1%	46		_201806281402_
Mittelwert	1194	91	7,6%	42		

Tabelle 19: Beispiel eines Simulationsergebnisses

Im Folgenden werden die Spaltenbeschriftungen der Tabelle 19 erklärt.

Anzahl Simulationen	gibt die Nummer von durchgeführten Simulationen bei gleichen Parametern wieder.
Vd simuliert	gibt die simulierte Verkehrsdichte einer durchgeführten Simulation wieder.
p(T) absolut	gibt die absolute Anzahl von PKW an, die von der Autobahn zum Tanken abgefahren sind.
p(T) simuliert	gibt den Quotienten aus p(T) absolut und Vd simuliert wieder.
PKW o TP	gibt die Anzahl der zur Tankstelle abgefahrenen PKW an, die keinen Tankplatz bekommen haben, weil alle Tankplätze bei der Ankunft des PKWs belegt waren.
Anmerkung	Platz für sonstige Anmerkungen; da die Datei 201806281248.alf zwei Simulationsstränge enthält, wird zwischen dem oberen und dem unteren Strang entschieden.

Dateiname gibt den Dateinamen der zur vorliegenden Arbeit beigelegten Simulationsdatei an.

Nach Durchführung aller 1080 Simulationen sind insgesamt 216 vergleichbare Tabellen ausgefüllt. Bei jeder dieser 216 Tabellen hat sich mindestens ein zu kombinierender Parameter verändert, sodass sich eine neue zu simulierende Verkehrssituation ergibt.

## 6.4 Darstellung der Simulationsergebnisse

In vorliegendem Kapitel kommt es zu einer Ergebnisauswertung der durchgeführten Simulationsreihen. Dabei sollen vereinzelt Diagramme herausgegriffen und ausführlich diskutiert werden. Es kann vorweg genommen werden, dass die Wahrscheinlichkeit des Abbiegens eine hohe Einflussnahme auf das zu interpretierende Ergebnis hat.

Primär soll das heutige Tankverhalten der Benzin- und Diesel-PKW analysiert werden. Im folgenden Schritt soll das simulierte Tankverhalten der Elektroautos der Kurve der Verbrennungsmotoren angenähert werden. Dies geschieht ausschließlich mit Veränderung des Parameters „Anzahl der Zapfsäulen“, denn sowohl die Tankdauer sowie Verkehrsdichte, als auch die Abbiegewahrscheinlichkeit sollen gleichbleibend angenommen werden.

### 6.4.1 Abbiegewahrscheinlichkeit $p(T) = 5,0 \%$

Nachfolgendes Diagramm Abbildung 24 liefert einige Informationen zur simulierten Verkehrssituation mit der Abbiegewahrscheinlichkeit 5,0 %.

Auf der Abszisse werden die dem Simulationsprogramm übergebenen Verkehrsdichten eingegeben. Auf der linken Ordinate werden für insgesamt drei Diagrammreihen die Anzahl der PKW in Stück eingetragen. Die Sekundärachse auf der rechten Ordinate zählt ebenso die Anzahl der PKW in Stück, jedoch ausschließlich die tatsächlich simulierte Verkehrsdichte auf der Autobahn. Die tatsächliche simulierte Verkehrsdichte wird mit schwarzen Rauten im Diagramm gekennzeichnet.

Es fällt auf, dass es ab der im Simulationsprogramm hinterlegten Verkehrsdichte von 1750 PKW pro Stunde zu starken Abweichungen zur tatsächlich simulierten Verkehrsdichte kommt. Sollte zum Beispiel eine Verkehrsdichte von 2000 PKW pro Stunde simuliert werden, wurde im Durchschnitt nur eine Verkehrsdichte von 1795 PKW pro Stunde erreicht. Dies lässt vermuten, dass die Simulationssoftware AnyLogic bei zweispurigen Autobahnen ab einer Verkehrsdichte von 1750 PKW pro Stunde in den Sättigungsbereich kommt. Diese Sättigung des Verkehrsaufkommens kann bei allen durchgeführten Simulationen beobachtet werden.

Mit den grauen Punkten wird die absolute Anzahl der PKW, welche die Autobahn aufgrund eines Tankstopps verlassen haben, angegeben. Der Quotient aus der simulierten Verkehrsdichte (schwarze Rauten) und der von der Autobahn abfahrenden Autos (graue Punkte) sollte genau den hier vorgegebenen 5,0 % entsprechen.

Die durchgezogenen Linien weisen den Verlauf der PKW auf, die zur Tankstelle abgebogen sind, jedoch bei Ankunft der Zapfsäulen keinen freien Tankplatz vorfinden konnten. Während die blaue Linie mit den türkisen Quadraten das Verhalten von Benzin- und Diesel-PKW widerspiegelt, zeichnet die dunkelgrüne Linie mit den hellgrünen Dreiecken den Verlauf der Elektroautos ab.

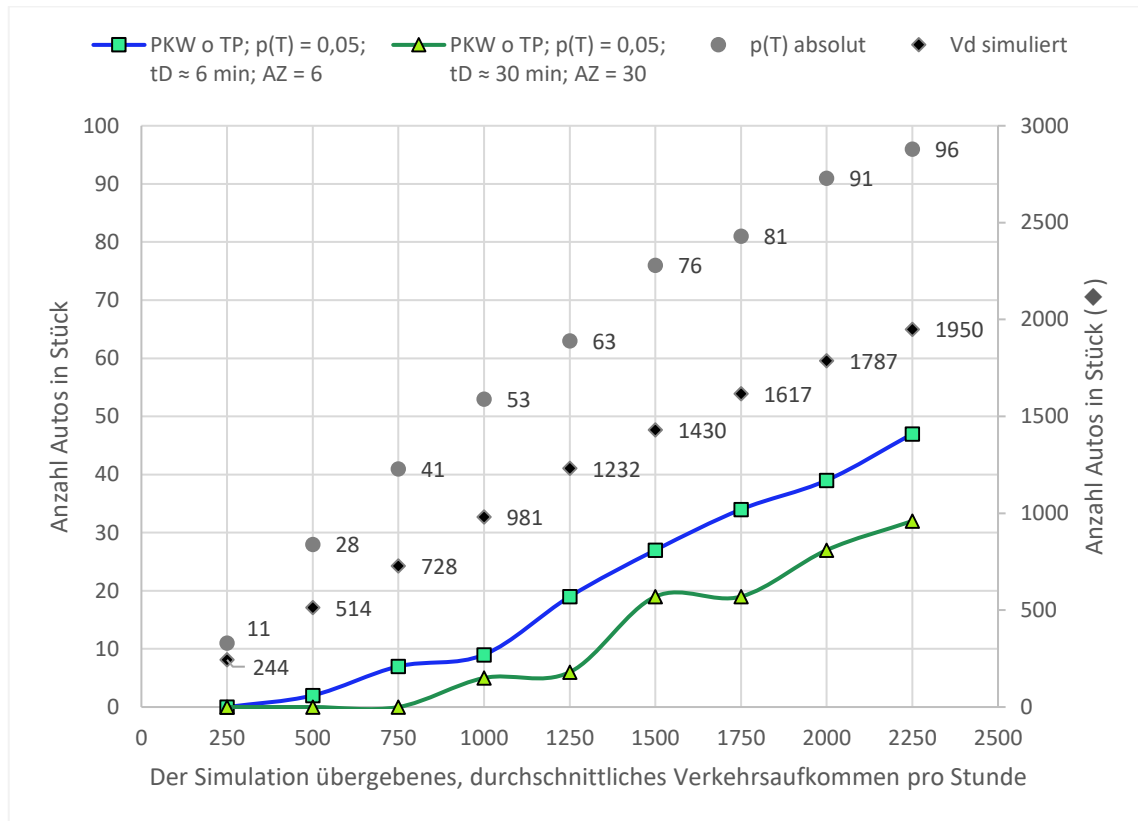


Abbildung 24: Simulationsergebnis für  $p(T) = 5,0 \%$

### Interpretation

Ein Verkehrsaufkommen von ca. 500 Autos pro Stunde wird an Wochentagen, die nicht auf einen Ferienbeginn fallen, spät abends zwischen 22 und 23 Uhr erreicht (vgl. Abbildung 17 und Abbildung 18). Wird angenommen und vorausgesetzt, dass zu diesen abendlichen Zeiten an der Tankstelle keine Wartezeiten aufgrund großen Tankandrangs zu entstehen drohen, sind die zwei PKW, die keinen Tankplatz bei einem Verkehrsaufkommen von 500 Autos pro Stunde erhalten, zu viel.

Des Weiteren liefert das Diagramm die Information, dass bei einem Verkehrsfluss von ca. 1800 PKW pro Stunde und einer angenommenen Abfahrtswahrscheinlichkeit von 5,0 % pro Stunde knapp 40 PKW auf einen Tankplatz warten müssten. Das entspricht alle drei Minuten zwei wartende Autos. Setzt man mit diesem Ergebnis bei Abbildung 17 (S. 33) an, so würde sich in den Tagesstunden 16 bis 19 pro Stunde ein Rückstau von weiteren 40 PKW pro Stunde anbahnen. Dies hätte zur Folge, dass sich bis 20 Uhr ein Rückstau von 160 wartenden PKW gebildet hätte. Dieses Szenario ist ebenso äußerst unrealistisch und utopisch, daher muss die Wahrscheinlichkeit des Abbiegens bei höheren Verkehrsdichten kleiner 5,0 % sein.

Zusätzlich kann aus der Abbildung 24 die Anzahl der getankten PKW ermittelt werden. Wird die Anzahl der PKW, die keinen Tankplatz bekommen haben, mit der Anzahl der abgebogenen Autos subtrahiert, gibt das Ergebnis die Anzahl der Autos wieder, die getankt haben. Diese Ergebnisse werden in Tabelle 20 zusammengefasst.

<b>V<sub>d</sub> - vorgegeben</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>750</b>	<b>1000</b>	<b>1250</b>	<b>1500</b>	<b>1750</b>	<b>2000</b>	<b>2250</b>
<b>p(T) absolut</b>	11	28	41	53	63	76	81	91	96
<b>PKW o TP; p(T) = 0,05; tD ≈ 6 min; AZ = 6</b>	0	2	7	9	19	27	34	39	47
<b>Tankende Autos bei AZ = 6</b>	11	26	34	44	44	49	47	52	49

Tabelle 20: Anzahl der tankenden Autos bei  $p(T) = 5,0\%$

Bei einem hohen Verkehrsaufkommen haben ca. 50 Autos innerhalb einer Stunde an den sechs Zapfsäulen getankt. Das bedeutet, dass im Durchschnitt ca. 9 PKW an einer Zapfsäule innerhalb einer Stunde getankt haben müssen. Folglich beträgt die durchschnittliche Tankzeit (inkl. Bezahlen) eines PKWs ca. sechs bis sieben Minuten. Dies trifft auf die Annahmen zu, die der Simulation übergeben wurden.

Aus der Interpretation des Diagramms kann man den Schluss ziehen, dass eine Abbiegewahrscheinlichkeit von 5,0 % deutlich zu hoch angesetzt ist. Die Betrachtung des Verhaltens der Elektroautos ist somit hinfällig. Des Weiteren ist eine Betrachtung höherer Abbiegewahrscheinlichkeiten irrelevant, da dort die eben beschriebenen Erkennungsmerkmale noch ausgeprägter vorzufinden sind. Die entsprechenden Diagramme hierzu finden sich im Anhangsverzeichnis unter Anhang.A2, Anhang.A3 und Anhang.A4.

#### **6.4.2 Abbiegewahrscheinlichkeit $p(T) = 3,75\%$**

Daher soll im nächsten Schritt das Simulationsergebnis, welches auf Basis der Abbiegewahrscheinlichkeit von 3,75 % erstellt wurde, betrachtet werden. Auch dieses Diagramm unterscheidet sich hinsichtlich formaler Kriterien von seinem Vorgänger nicht. Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 25 dargestellt.

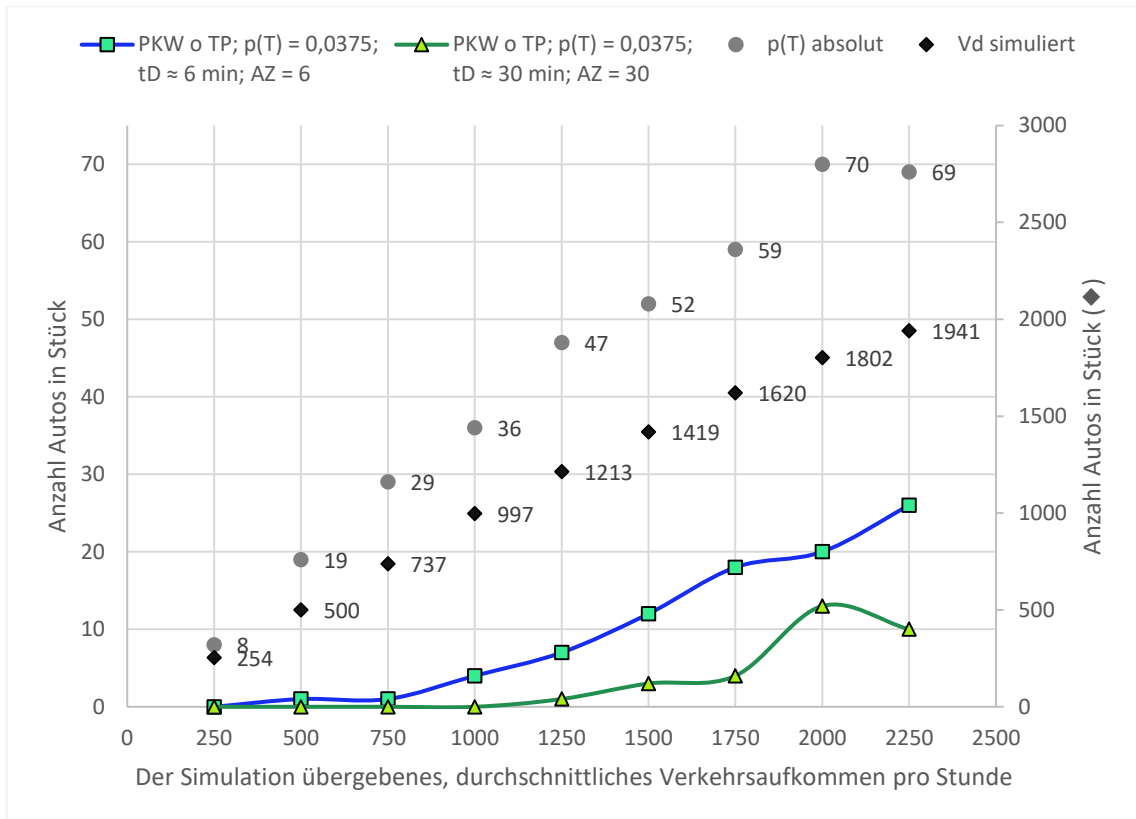


Abbildung 25: Simulationsergebnis für  $p(T) = 3,75 \%$

### Interpretation

Im Vergleich zu den im Kapitel 6.4.1 beschriebenen Vorgänger weist dieses Diagramm vorwiegend bei wenig Verkehr keine Wartezeiten von PKW an den Tankstellen auf. Bei stündlichen Verkehrsaufkommen bis einschließlich 750 PKW pro Stunde fallen für die zur Tankstelle abbiegenden Autos kaum Wartezeiten an. Wird bei größeren Verkehrsaufkommen, wie beispielsweise zum abendlichen Berufsverkehr (wochentags Tagesstunde 16 bis 19) die Wahrscheinlichkeit des Abbiegens mit 3,75 % angenommen, ist mit Wartezeiten bei den Diesel- und Benzin getriebenen Fahrzeugen zu rechnen.

Des Weiteren kann man festhalten, dass sich bei einem Verkehrsaufkommen von ca. 1800 PKW pro Stunde insgesamt 20 ankommende Autos gleichmäßig hinter den besetzten Tankplätzen aufreihen werden. Somit warten pro Stunde - zusätzlich zu den bereits tankenden Autos - ca. drei bis vier Autos an einer Zapfsäule. Dies entspricht annäherungsweise dem Tankverhalten der PKW vom 29.04.2018. Auch hier war auffallend, dass sich hinter jeder Zapfanlage eine Schlange wartender Autos bildete (siehe Abbildung 9, S. 20).

In nachfolgender Tabelle 21 werden die tankenden Autos in Abhängigkeit der an das Simulationsprogramm übergebenen Verkehrsdichten aufgelistet.

Vd - vorgegeben	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250
p(T) absolut	8	19	29	36	47	52	59	70	69
PKW o T; p(T) = 0,0375; tD ≈ 6 min; AZ = 6	0	1	1	4	7	12	18	20	26
Tankende Autos bei AZ = 6	8	18	28	32	40	40	41	50	43

Tabelle 21: Anzahl der tankenden Autos bei  $p(T) = 3,75\%$

Obwohl eine Verkehrsdichte von 2000 PKW pro Stunde vorgegeben wird, wurde nur eine Verkehrsdichte von ca. 1800 PKW pro Stunde simuliert. Diese Verkehrsdichte entspricht in etwa dem Verkehrsaufkommen vom 29. April 2018 (siehe Kapitel 5). Während zu diesem Frühlingstag in der 15. und 16. Tagesstunde ca. 35 Autos zum Tanken kamen, wurden bei einer Abbiegewahrscheinlichkeit von 3,75 % und ebenfalls sechs Zapfsäulen 50 tankende Autos simuliert. Auf den ersten Blick mag die Abweichung groß erscheinen, jedoch kann diese Abweichung relativiert werden.

Die Abweichung kann damit zu erklären sein, dass zu Beginn der simulierenden Stunde in AnyLogic das Verkehrsnetzwerk stets frei von Autos ist. Die entsprechende Verkehrssituation ist in Abbildung 12 dargestellt, sodass weder auf der Autobahn noch an den Zapfsäulen respektive Parkplätzen ein Verkehrsfluss existiert. Diese Anfangsbedingungen entsprechen nicht der Realität. Beispielsweise können bei Anbruch der 15. Tagesstunde immer noch Autos der 14. Tagesstunde an den Zapfsäulen stehen und diese für die ankommenden Autos blockieren, wie es in Abbildung 26 visualisiert dargestellt ist.

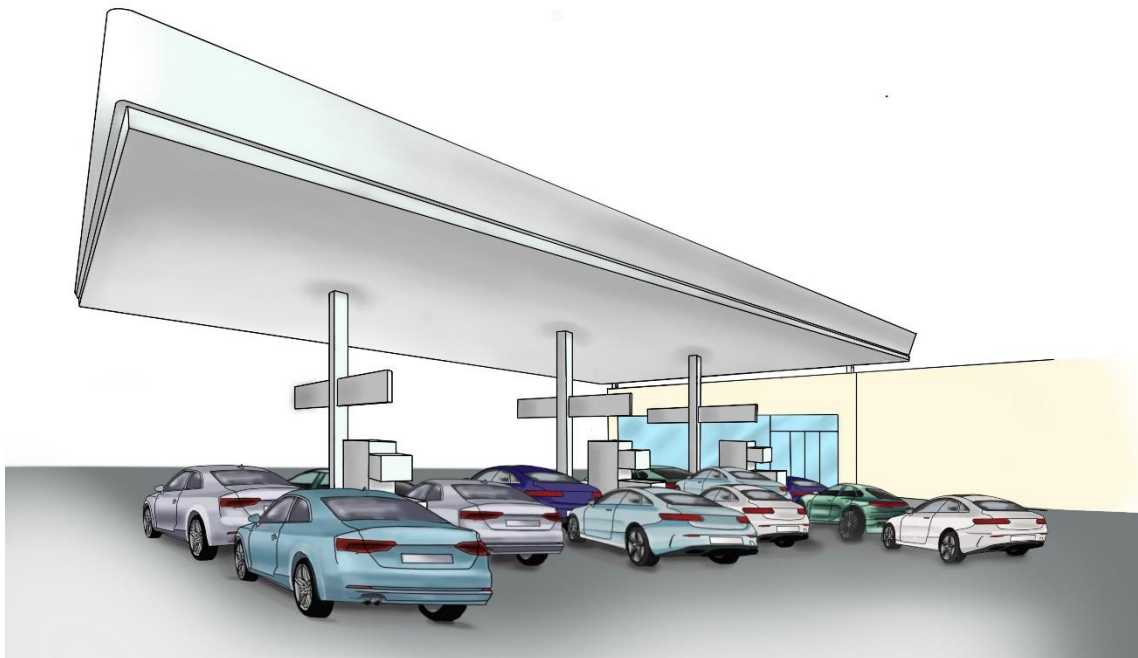


Abbildung 26: Wartende Autos zu Beginn einer Tagesstunde [40]

Ebenso wird der womöglich bereits entstandene Rückstau am Ende einer Tagesstunde ignoriert, obwohl dieser bei einem Verkehrsaufkommen von ca. 1800 PKW pro Stunde durchaus denkbar wäre, denn nach Ablauf der Simulationsstunde bei der zu



untersuchenden Abbiegewahrscheinlichkeit von 3,75 % sind sowohl nahezu alle Zapfsäulen durch tankende Autos besetzt als auch aller Voraussicht nach Rückstauungen an den Zapfsäulen entstanden. Dies wird mit den 20 Autos belegt, die keinen sofortigen Tankplatz erhalten haben. Damit befinden sich hinter jeder Zapfsäule ca. drei bis vier wartende Autos, sofern von einer gleichmäßigen Aufteilung der Autofahrer/-innen ausgegangen wird. Während in AnyLogic ein tankendes Auto zu Beginn der Tagesstunde simuliert wird, wird in der Realität ein PKW ohne Tankplatz gezählt, da dieser womöglich an der Zapfsäule aufgrund des Rückstaus warten muss.

Daher lässt sich schlussfolgern, dass die Anzahl der tankenden Autos aufgrund der fehlenden Anfangsverkehrssituation in AnyLogic um ca. 10 bis 30 Prozent sinkt, während die Anzahl der PKW, die keinen sofortigen Tankplatz bekommen um die identische Anzahl steigt. Der Prozentsatz ist eine weitere Annahme, die sich aufgrund der Gegebenheiten sowie des Tankverhaltens ergibt und nicht bewiesen werden kann.

Wenn bei der Verkehrsdichte von ca. 1800 PKW eine Korrektur aufgrund der Anfangsverkehrssituation von ca. 20 Prozent angenommen wird, so fahren ca. 40 Autos direkt zu den Zapfsäulen. 30 PKW bekommen keinen direkten Tankplatz und müssen dementsprechend warten.

Finden jene Annahmen und Ergebnisse ihre Gültigkeit, so kann angenommen werden, dass am 29. April 2018 eine Abbiegewahrscheinlichkeit von etwa 3,75 % dafür gesorgt hat, dass in der ersten Stunde 30 PKW und in der zweiten Stunde 35 PKW betankt wurden.

### **Anmerkung**

Bei den gezeigten und interpretierten Diagrammen ist auffällig, dass sich die grüne Linie niemals oberhalb der blauen Linie befindet. Dies bedeutet, dass bei identischen Annahmen (Abbiegewahrscheinlichkeit und Verkehrsdichte) Elektroautos häufiger eine freie Zapfsäule vorfinden, als Benzin- und Dieselaautos, sofern die Anzahl der Elektrozapfsäulen mit einer Stückzahl von 30 angenommen und simuliert wird. Die Auslegung der Tankstelle hinsichtlich ausreichender Elektrozapfsäulen erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt.

### 6.4.3 Abbiegewahrscheinlichkeit $p(T) = 2,5 \%$

Im nächsten Schritt soll das Simulationsergebnis, welches auf Basis der Abbiegewahrscheinlichkeit von 2,5 % erstellt wurde, betrachtet werden. In folgender Abbildung 27 ist das dazugehörige Diagramm abgebildet.

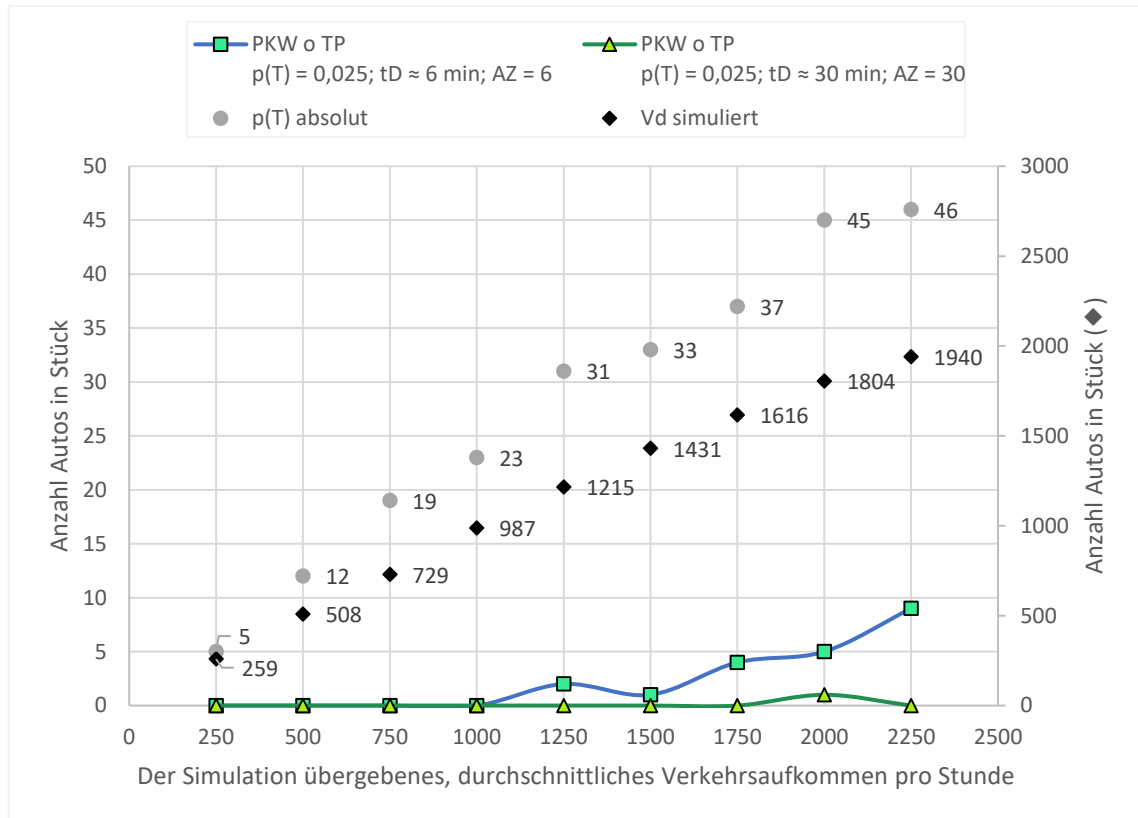


Abbildung 27: Simulationsergebnis für  $p(T) = 2,5 \%$

#### Interpretation

Auffallend ist, dass es unterhalb einer Verkehrsdichte von 1000 PKW pro Stunde zu keinen Wartezeiten an den Zapfsäulen kommt. Dies erscheint für abendliche und nächtliche Tageszeiten sinnvoll und nachvollziehbar zu sein.

In Tabelle 22 werden die tankenden Autos berechnet und gelistet. Dass es bei einer stündlichen Verkehrsdichte von 1800 PKW zu einer kleinen Autoschlange von fünf Autos an den Zapfsäulen kommt, ist bei Berücksichtigung der in Kapitel 6.4.2 getroffenen Aussagen über die Anfangsbelegung der Zapfsäulen wahrscheinlich.

Weil die Belegung der Zapfsäulen zu Beginn der Simulation stark schwanken kann, je nachdem, wieviel „Tankverkehr“ in der vorhergehenden Stunde vorherrschte, ist auch das Simulationsergebnis einer Abbiegewahrscheinlichkeit von 2,5 % ein denkbare Szenario an der Autobahntankstelle Lechwiesen Nord.

Vd - vorgegeben	250	500	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250
p(T) absolut	5	12	19	23	31	33	37	45	46
PKW o TP; p(T) = 0,0375; tD ≈ 6 min; AZ = 6	0	0	0	0	2	1	4	5	9
Tankende Autos bei AZ = 6	5	12	19	23	29	32	33	40	37

Tabelle 22: Anzahl der tankenden Autos bei p(T) = 2,5 %

Wenn hier beispielsweise die Anzahl der tankenden Autos aufgrund belegter Zapfsäulen zu Beginn der Simulationsstunde um 10 bis 15 Prozent nach unten angepasst und gleichzeitig die Anzahl der wartenden Autos erhöht wird, kann ein Ergebnis von etwa 35 tankenden Autos und zehn wartenden Autos verbucht werden. Dies kommt der Live-Messung vom 29. April 2018 ebenfalls sehr nahe.

Des Weiteren fällt bei der Anzahl der tankenden Autos auf, dass es im unterem Bereich der Verkehrsdichte zu keinen Rückstauungen an den Zapfanlagen kommt.

### **Anmerkung**

Wird eine Anzahl von 30 Elektrozapfsäulen angenommen, fällt dem Betrachter des vorliegenden Diagramms auf, dass nahezu jedes Elektrofahrzeug einen sofortigen Anspruch auf einen Tankplatz hat.

## **6.5 Vergleich der Simulationsergebnisse mit der Live-Zählung**

Auf Basis des angenäherten Verkehrsaufkommens ist nachfolgend eine Annäherung der Abbiegewahrscheinlichkeit für den Zeitraum der Live-Zählung möglich.

Gemäß der Niederschrift in Kapitel 5 tankten am 29. April 2018 während der 15. Tagesstunde 30 PKW und während der 16. Tagesstunde 35 PKW an den sechs Zapfsäulen der Autobahntankstelle Lechwiesen Nord (siehe Tabelle Anhang.A1).

Es konnte nicht herausgefunden, wie viele der tankenden Autos zuvor Wartezeiten in Kauf nehmen mussten, jedoch erscheinen die eben in den Kapiteln 6.4.2 und 6.4.3 vorgestellten Ergebnisse plausibel, wenn die Anzahl der tankenden und die Anzahl der abgefahrenen, aber nicht tankenden betrachtet wird.

Bleiben die Anfahrtsbedingungen an den Zapfsäulen unberücksichtigt und wird ein leeres Verkehrsnetzwerk zu Grunde gelegt, berechnet sich für die 15. Tagesstunde eine Abbiegewahrscheinlichkeit von ca. 1,70 % und für die 16. Tagesstunde eine Abbiegewahrscheinlichkeit der PKW von 1,99 %. Hierbei wird jeweils die Anzahl der tankenden Autos durch das in Kapitel 5 angenäherte Verkehrsaufkommen dividiert. Dies bedeutet, dass am 29. April 2018 die auf der Autobahn fahrenden PKW zwischen 14 Uhr und 15 Uhr mit einer Wahrscheinlichkeit von 1,70 % bzw. zwischen 15 Uhr und 16 Uhr mit einer Wahrscheinlichkeit von knapp 2,0 % zum Tanken auf das Tankstellenareal abgefahren sind, wenn angenommen wird, dass alle Zapfsäulen zu Beginn der 15. bzw. 16. Tagesstunde frei gewesen sind. Dies ist jedoch realitätsfern, weswegen mit Hilfe eines Korrekturfaktors in den vorherigen Kapiteln entgegengewirkt wurde.

## 7 Auslegung der Elektrozapfsäulen

Dieses Kapitel dient der Bestimmung der Anzahl der Zapfsäulen für Elektroautos an der Tankstelle Lechwiesen Nord. Die gesuchte Stückzahl an Elektrozapfsäulen soll hierbei iterativ bestimmt werden. Als Referenz zu den aktuellen Tankgewohnheiten wird nachfolgend das Diagramm mit der Abbiegewahrscheinlichkeit 3,75 % (Abbildung 25) herangezogen.

Im Anschluss soll der aktuelle Platzbedarf an der Autobahn-Tankstelle Lechwiesen Nord betrachtet werden. Hier soll die Frage beantwortet werden, ob ausreichend Platzbedarf zur Aufstellung der berechneten Anzahl an Elektrozapfsäulen vorhanden wäre.

### 7.1 Bestimmung der Anzahl von Elektrozapfsäulen

#### 7.1.1 Tankstelle Lechwiesen Nord

Ziel soll es sein, dass die grüne Linie der Elektroautos die blaue Linie der Diesel- und Benzinautos annähert. Als Indikator werden die PKW betrachtet, die bei Ankunft des Tankstellenbereichs keinen freien Tankplatz vorfinden konnten. Stimmt diese Anzahl sowohl bei den Elektroautos mit den E-Zapfsäulen und der Tankdauer von durchschnittlich 30 Minuten als auch bei den Diesel- und Benzinautos mit den sechs Zapfsäulen und einer durchschnittlichen Tankdauer von sechs Minuten überein, ist die richtige Anzahl an Elektrozapfsäulen unter Berücksichtigung aller getroffener Annahmen und Voraussetzungen gefunden.

Die grüne Linie wird der blauen Linie angenähert, indem die Anzahl der Tankplätze für Elektroautos reduziert wird. Diese ist zu reduzieren, da bei den zuvor angenommenen 30 Elektrozapfsäulen weniger Autos keinen Tankplatz bekommen haben als bei den Diesel- und Benzinautos.

Im ersten Schritt wird die Anzahl der Elektrozapfsäulen auf 25 reduziert. Das Ergebnis kann anhand der gestrichelten grünen Linie in der Abbildung 28 abgelesen werden. Es ist erkennbar, dass die blaue Linie durch die gestrichelte grüne Linie angenähert wurde, jedoch bleibt noch ein kleiner Spielraum erkennbar. Dieser soll durch erneute Reduzierung der Elektrozapfsäulen minimiert werden. Daher wird die Anzahl im nächsten Simulationsdurchgang auf 20 verkleinert. Die Kurve der Elektro-PKW, die bei der Anzahl von 20 Zapfsäulen keinen Parkplatz bekommen werden, kann anhand der dunkelgrünen Linie im Diagramm abgelesen werden.

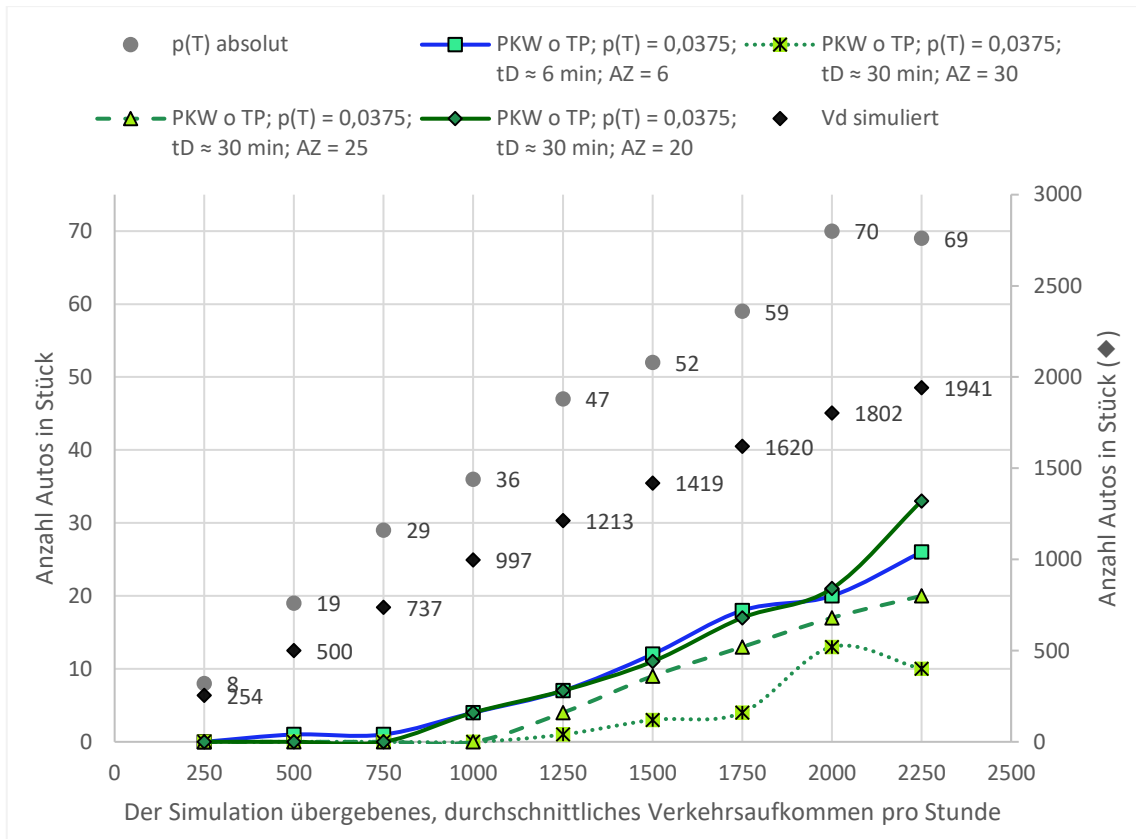


Abbildung 28: Iterative Annäherung zur Bestimmung der Anzahl von Elektrozapfsäulen

Hierbei wird eine hinreichend genaue Übereinstimmung mit der blauen Linie erzielt, sodass bei identischer Abbiegewahrscheinlichkeit über fast alle Verkehrsdichten hinweg ein analoges Tankverhalten zwischen Diesel- und Benzinautos (sechs Tankplätze mit einer durchschnittlichen Tankdauer von sechs Minuten) sowie Elektroautos (20 Tankplätze mit einer durchschnittlichen Tankdauer von 30 Minuten) attestiert werden kann.

### 7.1.2 Tankstelle Lechwiesen Süd

Die Tankstelle Lechwiesen Süd liegt der Tankstelle Lechwiesen Nord gegenüber. Beide sind durch die vierspurige Autobahn voneinander abgetrennt. In nachfolgender Abbildung 29 kann ein nahezu identischer Aufbau zur Tankstelle Lechwiesen Nord festgestellt werden.



Abbildung 29: Sechs Zapfsäulen an der Tankstelle Lechwiesen Süd

Auch an der entgegen-gelegenen Fahrtrichtung gibt es derzeit sechs Zapfsäulen für PKW-Tankkunden. Die Tankdauer wird auf der entsprechend der bereits verwendeten und simulierten Zeit angenommen: durchschnittlich sechs Minuten. Auch das Verkehrsaufkommen unterscheidet sich nur geringfügig zur Gegenrichtung. Das in Tabelle 23 gezeigte Jahresverkehrsaufkommen 2015 liefert für beide Fahrtrichtungen ähnliche Werte, deren Unterschiede sich im Toleranzband von 10 Prozent bewegen und somit keine signifikanten Abweichungen aufweisen.

Verkehrsaufkommen 2015 – Landsberg	
Richtung 1 - Lechwiesen Süd	9 387 929
Richtung 2 - Lechwiesen Nord	8 700 015
Differenz	7 - 8 %

Tabelle 23: Jahresverkehrsaufkommen 2015 Landsberg [5]

Bei Annahme einer identischen Abbiegewahrscheinlichkeit liegen nahezu die gleichen Voraussetzungen vor, auf deren Grundlage die Simulation der Tankstelle Lechwiesen Nord beruht. Daher soll für die Tankstelle Lechwiesen Süd von derselben berechneten Anzahl an Elektrozapfsäulen ausgegangen werden, sodass auch auf der Gegenrichtung bei vollständiger Elektrifizierung des deutschen PKW-Straßenverkehrs von 20 Zapfsäulen anzunehmen sind.

### 7.1.3 Autohof Aichstetten

Die Auslegung der Elektrozapfsäulen am Autohof Aichstetten gestaltet sich ein wenig diffiziler, da beide Fahrspuren auf den Autohof zufahren können. Mit Hilfe der in den vorherigen Kapiteln gewonnenen Erkenntnissen soll auf die Anzahl der Elektrozapfsäulen geschlossen werden, ohne dass eine erneut aufwendige AnyLogic Simulation gestartet werden muss.

Wie in Abbildung 30 zu erkennen ist, befinden sich am Autohof in Aichstetten derzeit acht Zapfsäulen für Diesel- und Benzinautos. Die Tankdauer der Autofahrer wird ebenfalls mit durchschnittlich sechs Minuten angenommen.



Abbildung 30: Zapfsäulen am Autohof in Aichstetten

Das Verkehrsaufkommen auf Höhe des Autohofs ist nicht mit dem Verkehrsaufkommen in Landsberg zu vergleichen, sodass Zählraten einer weiteren Messstelle herangezogen werden müssen. Die nächstgelegene Messstelle ist die Zählstelle Leutkirch (vgl. Abbildung 3 S. 4). Es wird angenommen, dass das an der Zählstelle Leutkirch vorherrschende und gemessene Verkehrsaufkommen mit identischer Wahrscheinlichkeit einen Tankvorgang am Autohof Aichstetten wahrnimmt, wie dies beim Verkehrsaufkommen in Landsberg analysiert wurde. Auch die Abbiegewahrscheinlichkeit soll identisch zur simulierten angenommen werden.

Nachfolgend gibt es zwei Möglichkeiten zur Bestimmung der Elektrozapfsäulen am Autohof in Aichstetten. Die Anzahl der Zapfsäulen kann mit einem Dreisatz bestimmt werden, ohne dass das Verkehrsaufkommen berücksichtigt wird. Wenn auf beiden Tankstellen in Landsberg bei aktuell insgesamt zwölf Zapfsäulen für Benzin- und Dieselaautos 40 neue Elektroladestationen installiert werden müssen, dann müssen in Aichstetten bei derzeitigen acht Zapfsäulen rechnerisch insgesamt 26,7 Zapfsäulen installiert werden. Wird entsprechend auf ganze Zapfsäulen gerundet, bedeutet dies eine

Installation von 27 Zapfsäulen am Autohof Aichstetten bei identischen Annahmen, die an der Tankstelle Lechwiesen Nord simuliert wurden.

Des Weiteren kann die Anzahl der Zapfsäulen am Autohof Aichstetten unter Berücksichtigung des Verkehrsaufkommens berechnet werden. Zur Bestimmung der endgültigen Lösung wurde in Excel eine Zielwertsuche (ZWS) durchgeführt.

Die Vorgehensweise wird zusammen mit Tabelle 24 erläutert. Die Ausgangsdaten werden von der Zählstelle Landsberg und den Tankstellen Lechwiesen Nord und Süd verwendet. Im ersten Schritt wird der Quotient aus der Anzahl der derzeitigen Zapfsäulen und der Jahresverkehrsdichte gebildet. Dieser wird mit einer Million multipliziert, um das Resultat leserlich zu halten. Selbiger Quotient wird mit der Anzahl der ermittelten Elektrozapfsäulen gebildet.

Für die Tankstelle in Aichstetten kann der Quotient mit der derzeitigen Anzahl an Zapfsäulen bereits gebildet werden. Das nächste Ziel ist es nun, die Anzahl der Elektrozapfsäulen für Aichstetten zu finden, sodass die eben berechneten Quotienten von Landsberg und Aichstetten nahezu übereinstimmen. Damit die Quotienten aus Landsberg und Aichstetten miteinander vergleichbar gemacht werden können, müssen sie verknüpft werden. Dies geschieht mit den hier benannten Hilfszahlen. Die Hilfszahl ist das Ergebnis einer Division des Mittelwerts der Quotienten aus Landsberg durch den Quotienten aus Aichstetten. Stimmen beide Hilfswerte überein, ist die korrekte Anzahl an Elektrozapfsäulen für Aichstetten unter Berücksichtigung des Verkehrsaufkommens gefunden. Dies kann beispielsweise unter Zuhilfenahme der Zielwertsuche-Funktion in Excel geschehen.

	Zählstelle Landsberg	AZ	Quotient $AZ / V_d \cdot 10^6$	E-AZ	Quotient $e_{AZ} / V_d \cdot 10^6$
Verkehrsaufkommen 2015 Richtung 1	9 387 929	6	0,64	20	2,13
Verkehrsaufkommen 2015 Richtung 2	8 700 015	6	0,69	20	2,30
	Zählstelle Leutkirch				
Verkehrsaufkommen 2015 Richtung 1	5 616 840				
Verkehrsaufkommen 2015 Richtung 2	5 668 944				
Summe	11 285 784	8	0,71	26,669	2,36
Hilfszahlen ZWS			0,937	1,000	0,937

Tabelle 24: Quotient Zapfsäulen zu Verkehrsdichte

Nach Durchführung der Zielwertsuche wurde als Ergebnis für die Anzahl der Zapfsäulen in Aichstetten 26,7 gefunden. Da dieser Wert exakt dem zuvor ermittelten Wert entspricht, kann man davon ausgehen, dass die Anzahl der derzeitigen Zapfsäulen voraussichtlich darauf ausgelegt wurden, dem Verkehrsaufkommen gerecht zu werden.



Schlussfolgernd wird festgehalten, dass am Autohof Aichstetten 27 Elektrozapfsäulen bei Annahme einer vollständigen Elektrifizierung des deutschen PKW-Straßenverkehrs vorzusehen sind.

## 7.2 Aufstellung der Zapfsäulen an der Tankstelle Lechwiesen Nord

Für die Tankstelle Lechwiesen Nord soll exemplarisch überprüft werden, ob sich eine sukzessive Erweiterung der Elektrozapfsäulen auf dem Tankstellenareal verwirklichen lässt.

Hierzu ist in Abbildung 31 das betreffende Tankstellengelände aus der Luft skizziert. Am unteren Ende des Bildes ist die vierspurige Autobahn erkennbar. Die PKW fahren vom rechten unteren Bildrand auf die Autobahnrastanlage auf und können sich entscheiden, ob sie tanken, rasten oder durchfahren möchten. Wobei sich die Abbiegewahrscheinlichkeit vorliegender Masterarbeit ausschließlich auf die tankenden PKW bezieht. Die beiden länglich schraffierten Flächen stellen LKW-Parkplätze da.

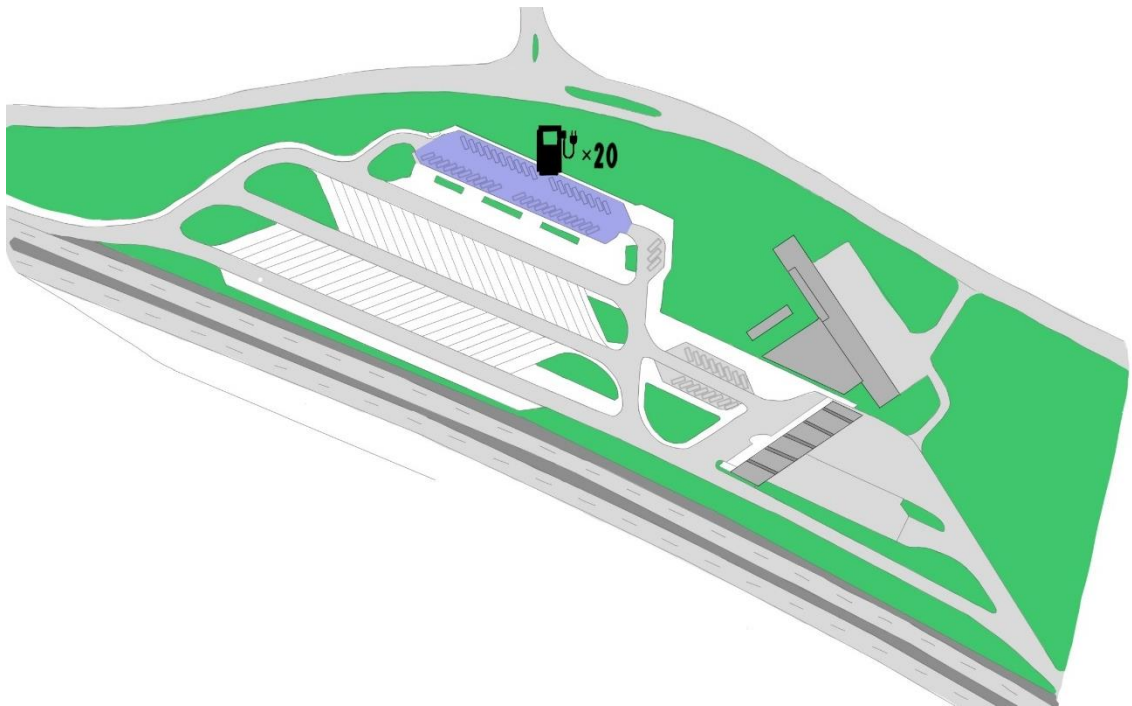


Abbildung 31: Mögliche Verteilstruktur der Zapfsäulen [41]

Im hinteren Areal der Tankstelle befinden sich derzeit 16 PKW-Parkplätze. Theoretisch können diese Plätze zur Installation von Elektrozapfsäulen verwendet werden. Jedoch erscheint die farblich markierte Fläche am oberen Rand des Areals ebenso geeignet für die Aufstellung von Elektrozapfsäulen zu sein. Hier befinden sich derzeit ca. 40 PKW-Parkplätze. Der abgelegene Platz bietet den Vorteil, dass die Zapfsäulen von außerhalb womöglich besser an das Versorgungsnetz angeschlossen werden können. Die Tankplätze liegen direkt neben Grünflächen, welche ggf. zur Sicherheit von spielenden und tobenden Kindern beitragen. Des Weiteren können die Grünflächen zur kurzen Erholung der Autofahrer/-innen während des Tankvorgangs beitragen. Nichtsdestotrotz ist der Weg zum Restaurant und den Sanitäreinrichtungen binnen kurzer Zeit erreichbar.

Abschließend lässt sich festhalten, dass es auf dem Tankstellenareal Lechwiesen Nord derzeit ausreichend PKW-Parkplätze gibt, sodass die Installation von 20 Elektrozapfsäulen kein primäres Platzproblem darstellt. Vielmehr lässt sich die Tatsache diskutieren, wie die elektrische Energie in zukünftigen Szenarien zu den Zapfsäulen transportiert wird.

Kann die Tankstelle zukünftig als autarker „Energieerzeuger“ fungieren und mit Hilfe von Photovoltaik-Anlagen oder Windrädern derart viel Strom produzieren, dass Elektrozapfsäulen bedient werden können oder müssen die Zapfsäulen zwangsläufig an das bestehende Versorgungsnetz angeschlossen werden? Diese Frage ist nicht mehr Bestandteil vorliegender Masterarbeit, jedoch darf mit großer Spannung in die Zukunft geblickt werden und vorausgeschaut werden, wie die kommenden Herausforderungen zur zukünftigen Energieversorgung von elektrifizierten PKW gelöst werden.

## 8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im ersten Teil vorliegender Arbeit wurde anhand zweier verschiedener Ansätze der Bedarf an elektrischer Energie für Elektroautos in einem Szenario mit vollständiger Elektrifizierung des PKW-Verkehrs berechnet. Über die jährliche durchschnittliche Fahrleistung wurden 172 TWh und über den Ansatz des Jahresendenergiebedarfs wurden 183 TWh berechnet. Obwohl beide Ansätze sehr unterschiedlich sind, stimmen die Ergebnisse innerhalb eines zehn prozentigen Toleranzbereichs überein.

Am 29. April 2018 wurde eine private Zählung von Tankvorgängen an der Tankstelle Lechwiesen Nord an der A96 durchgeführt. Dabei wurde den Autofahrer/-innen von Diesel- und Benzinautos eine durchschnittliche Tankdauer von ca. sechs bis sieben Minuten attestiert. Des Weiteren sind die Messergebnisse als Grundlage für die Auswertung der Simulationsergebnisse verwendet worden.

Zusammen mit der Simulationssoftware AnyLogic wurden realistische Verkehrsdaten verwendet, um das heutige Tankverhalten von Diesel- und Benzinautos auf das Tankverhalten von Elektroautos zu übertragen. Hierfür mussten mehrere Annahmen, wie beispielsweise die Tankdauer oder die Abbiegewahrscheinlichkeit von Elektroautos, getroffen werden.

Der Vergleich mit der Live-Zählung vom 29. April lieferte eine Abbiegewahrscheinlichkeit von 3,75 %. Nach dem ersten Simulationsdurchgang mit 30 Elektrozapfsäulen war die Anzahl der PKW, die keinen sofortigen Tankplatz an der Tankstelle bekommen haben, bei den Elektroautos viel geringer als bei den Autos mit Verbrennungsmotoren und den sechs vorhandenen Zapfsäulen. Insgesamt zwei Iterationsschritte sorgten für eine hinreichend genaue Übereinstimmung von PKW, die keinen sofortigen Tankplatz an den Zapfsäulen bekamen. Somit war die Anzahl an Elektrozapfsäulen, die ein analoges Tankverhalten zwischen Elektroautos und Diesel- bzw. Benzinautos ermöglichen, an der Tankstelle Lechwiesen Nord mit 20 Stück gefunden. Geeignete Vergleichsmethoden liefern für die Tankstelle Lechwiesen Süd aufgrund der symmetrischen Verhältnisse ebenfalls 20 Elektrozapfsäulen und für den Autohof Aichstetten 27 Elektrozapfsäulen.

Abschließend wurde anhand des aktuellen Aufstellungsplans der Tankstelle Lechwiesen Nord ein Vorschlag unterbreitet, wie die Elektrozapfsäulen in den derzeitigen Straßenverlauf, in die Parkplatzanordnung sowie in das Erscheinungsbild des Tankstellenareals integriert werden können. Hierbei wurde deutlich, dass die Größe des Tankstellengrundstücks nach heutigem Stand kein Hindernis für die Installation der 20 Elektrozapfsäulen sein würde.

## 9 Abschließende Worte

Das abschließende Fazit soll mit Hilfe zweier Vergleiche gezogen werden und der ersten Fragestellung, welchen Einfluss die sofortige Elektrifizierung aller deutscher PKW auf die heutige elektrische Stromerzeugung hätte. Konkret interessiert die Frage, wie viele zusätzliche Atomkraftwerke zur Erzeugung des Stroms nötig wären, wenn dieser lediglich für die Betankung von Elektroautos Verwendung finden würde.

Zu Vergleichszwecken soll das Kernkraftwerk Grohnde in Deutschland mit einer Leistung von 1360 MW verwendet werden [42]. Es wird von 7 700 Volllaststunden im Jahr ausgegangen [43], sodass die in Tabelle 25 dargestellten Werte ihre Gültigkeit erfahren.

Elektrische Energie für E-Autos [TWh]	183
Atomkraftwerk Grohnde [MW]	1 360
Volllaststunden [h]	7 700
Jahresleistung [TWh]	10,47
<b>Anzahl Atomkraftwerke [Stk.]</b>	<b>17,5</b>

Tabelle 25: Vergleich mit Atomkraftwerk

Mit einer Leistung von 1360 MW und einer Volllaufzeit von 7700 Stunden im Jahr gibt das Atomkraftwerk eine Jahresleistung von ca. 10,5 TWh ab. Wird die Jahresleistung des Kernkraftwerks Grohnde mit der für die Elektroautos benötigten Energie verrechnet, hat dies zur Folge, dass knapp 18 Atomkraftwerke des Typs Grohnde in Deutschland gebaut und betrieben werden müssten, sodass eine vollständige Elektrifizierung des PKW-Straßenverkehrs technisch denkbar wäre.

An dieser Stelle kann nicht abgestritten werden, dass ein Bau von 18 Atomkraftwerken in Deutschland derzeit utopisch ist und voraussichtlich ebenso in Zukunft undenkbar sein wird. Neben baulichen und logistischen Voraussetzungen, müssten hierfür unter anderem die Politik, die Bevölkerung und der Umweltschutz überzeugt werden. Jedoch wurde eindrucksvoll unterstrichen, dass eine vollständige Elektrifizierung des deutschen PKW Straßenverkehrs nicht urplötzlich von jetzt auf gleich geschehen kann, sondern dass der Prozess der Elektrifizierung höchstens sukzessive voranschreiten kann.

Zuletzt soll die Energiebereitstellung an Autobahntankstellen erörtert werden, sodass die zum Auftanken der Elektroautos benötigte Energiemenge bestimmt werden kann. Hierbei ist die Frage von Bedeutung, wie viel zusätzlichen Energieverbrauch eine Tankstelle bei der Betreibung von elektrischen Zapfsäulen zu verbuchen hätte.

Zur Beantwortung der Frage wird von der iterativ bestimmten Anzahl an Zapfsäulen von 20 Stück pro Tankstelle (an der A96) und einer derzeit verfügbaren Ladeleistung von 50 kW je Zapfsäule ausgegangen [44] [45]. Des Weiteren soll eine Auslastung von 55 Prozent im Jahresdurchschnitt angenommen werden. Dieser Wert ist von verschiedenen Faktoren abhängig, beispielsweise von den vom Tankstellenbetreiber angebotenen Freizeitaktivitäten während des Wartens, den sich stündlich ändernden Strompreisen oder der Nachtnutzung der Autofahrer. Die 55 Prozent sollen im Jahresdurchschnitt eine hohe Ausnutzung zur Tageszeit sowie eine geringe Ausnutzung

zu Nachtzeiten suggerieren. In Tabelle 26 sind die Annahmen, auf der die Berechnung beruht, sowie das Ergebnis zusammengefasst.

Anzahl Elektrozapfsäulen [Stk.]	20
Dimensionierung einer Zapfsäule [kW]	50
Jahresstunden [h]	8 760
Auslastung [%]	55
<b>Energiemenge je Tankstelle [GWh]</b>	<b>4,8</b>

Tabelle 26: Energieabgabe an einer Elektrotankstelle

Bei insgesamt 20 Elektrozapfsäulen zu je 50 kW und einer jährlichen Laufleistung von etwa 4800 Stunden werden nur durch das Aufladen von Elektroautos an einer Tankstelle 4,8 GWh Strom verbraucht.

Zum Vergleich: Eine in einem Einfamilienhaus lebende vierköpfige Familie verbraucht ca. 4000 kWh Strom im Jahr [46]. Der Stromverbrauch zum Auftanken von Elektroautos an der Tankstelle unter den genannten Voraussetzungen entspricht somit dem Jahresstromverbrauch von etwa 1200 Einfamilienhäusern. Infolgedessen kann mit identischer elektrischer Energiemenge eine Kleinstadt mit knapp 5000 Einwohnern für den Zeitraum eines Jahres mit Strom versorgt werden.

Trotz dieser Erkenntnisse darf jederzeit kritisch hinterfragt werden, ob die errechnete Anzahl an Elektrozapfsäulen nach Elektrifizierung aller PKW in der Realität ausreichend ist. Hierzu müssten zum einen die Strompreise an den Elektrozapfsäulen an Autobahn-tankstellen ebenso kostenintensiver sein, wie das derzeit die Spritpreise im Vergleich zu anderen Bundesstraßen-Tankstellen sind. Zudem darf das Verkehrsaufkommen nicht signifikant ansteigen, sodass die Berechnungen und Annahmen realistisch bleiben.

Jedoch bleibt auch künftig die Grundsatzfrage der Energieerzeugung bestehen. Aktuell ist das deutsche Hochspannungs- und Mittelspannungsnetz nicht für einen derart hohen Stromverbrauch ausgelegt. Dies wird bereits daran deutlich, dass die aktuelle Anzahl an Kernkraftwerken bei Weitem zu gering für den für die Betankung aller Elektroautos notwendigen Strombedarf ist. Auch diese Herausforderungen sind bis dato nicht geklärt und bedürfen weiterer Handlungsschritte seitens der deutschen Regierung und der Netzbetreiber.

## 10 Literaturverzeichnis

- [1] „Fahrzeugbestand Deutschland 2018 | Statistik“, *Statista*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/4902/umfrage/fahrzeugbestand-in-deutschland/>. [Zugegriffen: 20-Apr-2018].
- [2] „Elektroautos - Anzahl der Neuzulassungen bis 2017 | Deutschland“, *Statista*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/244000/umfrage/neuzulassungen-von-elektroautos-in-deutschland/>. [Zugegriffen: 25-Jan-2018].
- [3] „Karte der A96“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.google.at/maps/@47.8075196,10.6182621,9.75z>. [Zugegriffen: 27-Juli-2018].
- [4] J. Spitova, „Telefonat mit Frau Spitova - Zentralstelle für Informationssysteme (ZIS) bei der Autobahndirektion Südbayern“, 13-Apr-2018.
- [5] „BASt - Automatische Straßenverkehrszählung - Automatische Zählstellen 2016“. [Online]. Verfügbar unter: [http://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Daten/2016\\_1/Jawe2016.html?cms\\_map=1&cms\\_filter=true&cms\\_jahr=Jawe2016&cms\\_land=&cms\\_strTyp=&cms\\_str=A96&cms\\_dtvKfz=&cms\\_dtvSv=](http://www.bast.de/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Daten/2016_1/Jawe2016.html?cms_map=1&cms_filter=true&cms_jahr=Jawe2016&cms_land=&cms_strTyp=&cms_str=A96&cms_dtvKfz=&cms_dtvSv=). [Zugegriffen: 04-Feb-2018].
- [6] „BASt 2017 - Fachthemen - Automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen“. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bast.de/BASt\\_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Verkehrszaehlung.html?nn=1817946](https://www.bast.de/BASt_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Verkehrszaehlung.html?nn=1817946). [Zugegriffen: 27-Juli-2018].
- [7] „Technik im Elektroauto: Verbrauch, Ladeverlust und Wirkungsgrad“, *ecomento.de*, 26-Aug-2014. [Online]. Verfügbar unter: <https://ecomento.de/ratgeber/technik-im-elektroauto-verbrauch-ladeverlust-und-wirkungsgrad/>. [Zugegriffen: 30-Apr-2018].
- [8] WELT, „Man fährt wieder mehr Auto: Jährliche Fahrleistung“, *DIE WELT*, 06-März-2017.
- [9] F. Online, „Die Stromer werden größer“, *FOCUS Online*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.focus.de/auto/news/meistverkaufte-elektroautos-2017-die-stromer-werden-groesser\\_id\\_8322487.html](https://www.focus.de/auto/news/meistverkaufte-elektroautos-2017-die-stromer-werden-groesser_id_8322487.html). [Zugegriffen: 01-Mai-2018].
- [10] NDR, „Abgaswerte: Schummelei jetzt mit staatlichem Segen“. [Online]. Verfügbar unter: </panorama/archiv/2017/Abgaswerte-Schummelei-jetzt-mit-staatlichem-Segen,auto1134.html>. [Zugegriffen: 10-Mai-2018].
- [11] P. Martin, „Elektromobilität und erneuerbare Energien“, Institut für Energie- und Umweltforschung, Heidelberg, Nov. 2017.
- [12] „ADAC Auto-Test Renault Zoe (41 kWh) Intens (mit Batteriemiete)“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/infotestrat/tests/auto-test/detail.aspx?IDTest=5633>. [Zugegriffen: 02-Mai-2018].
- [13] „ADAC Auto-Test VW e-Golf“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/infotestrat/tests/auto-test/detail.aspx?IDTest=5134>. [Zugegriffen: 02-Mai-2018].
- [14] „ADAC Auto-Test smart fortwo coupé electric drive (inkl. Batterie)“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/infotestrat/tests/auto-test/detail.aspx?idtest=5037>. [Zugegriffen: 02-Mai-2018].
- [15] „ADAC Auto-Test KIA Soul EV“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/infotestrat/tests/auto-test/detail.aspx?idtest=5247>. [Zugegriffen: 02-Mai-2018].
- [16] „ADAC Auto-Test BMW i3 (94 Ah)“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/infotestrat/tests/auto-test/detail.aspx?IDTest=5542>. [Zugegriffen: 02-Mai-2018].

- [17] „ADAC Auto-Test Tesla Model S P90D“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/infotestrat/tests/auto-test/detail.aspx?IDTest=5531>. [Zugegriffen: 02-Mai-2018].
- [18] „Technische Daten Tesla Model X seit 2016 | mobile.de“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mobile.de/auto/tesla/model-x/2016/suv/modell/daten-fakten>. [Zugegriffen: 01-Mai-2018].
- [19] F. Online, „Tesla Model X P90D Praxistest“, *FOCUS Online*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.focus.de/auto/elektroauto/praxistest-tesla-model-x-p90d-fuer-diese-power-braucht-man-einen-waffenschein-teslas-riesen-suv-im-alltagstest\\_id\\_6354709.html](https://www.focus.de/auto/elektroauto/praxistest-tesla-model-x-p90d-fuer-diese-power-braucht-man-einen-waffenschein-teslas-riesen-suv-im-alltagstest_id_6354709.html). [Zugegriffen: 04-Mai-2018].
- [20] „ADAC Auto-Test VW e-up!“ [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/infotestrat/tests/auto-test/detail.aspx?IDTest=5046>. [Zugegriffen: 01-Mai-2018].
- [21] „ADAC Auto-Test Hyundai IONIQ Elektro Style“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/infotestrat/tests/auto-test/detail.aspx?IDTest=5605>. [Zugegriffen: 01-Mai-2018].
- [22] „ADAC Auto-Test Nissan Leaf (30 kWh) Acenta (inkl. Batterie)“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/infotestrat/tests/auto-test/detail.aspx?IDTest=5515>. [Zugegriffen: 02-Mai-2018].
- [23] „Energieverbrauch in Deutschland nach Sektoren 2016 | Statistik“, *Statista*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/321069/umfrage/energieverbrauch-in-deutschland-nach-sektoren/>. [Zugegriffen: 12-Jan-2018].
- [24] Umweltbundesamt, „Daten zum Verkehr“, S. 72, 2012.
- [25] „BMVI - Verkehr in Zahlen 2017/2018“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-pdf-2017-2018.html>. [Zugegriffen: 02-Mai-2018].
- [26] „Kraftstoff“, *Wikipedia*. 26-Apr-2018.
- [27] H. Engerer und U. Kunert, „Benzin und Diesel dominieren weiterhin im Straßenverkehr“, DIW Berlin, Berlin, Wochenbericht, Sep. 2015.
- [28] „Benzinverbrauch Motorräder“, *Motorrad-Wiki*. [Online]. Verfügbar unter: <http://motorrad.wikia.com/wiki/Benzinverbrauch>. [Zugegriffen: 20-Apr-2018].
- [29] „Durchschnittliche Fahrleistung von Krafträdern | Statistik“, *Statista*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/251742/umfrage/durchschnittliche-fahrleistung-von-kraftraedern-in-deutschland/>. [Zugegriffen: 20-Apr-2018].
- [30] „Kraftstoffenergieverbrauch bei einem Fahrzeug | Verteilung“, *Statista*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/151775/umfrage/verteilung-des-kraftstoffenergieverbrauchs-bei-fahrzeugen/>. [Zugegriffen: 20-Apr-2018].
- [31] U. Todsén, *Verbrennungsmotoren*. Hanser, 2012.
- [32] „PKW - Bestand in Deutschland nach Kraftstoffarten“, *Statista*, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/4270/umfrage/pkw-bestand-in-deutschland-nach-kraftstoffarten/>. [Zugegriffen: 12-Jan-2018].
- [33] A. Karle, *Elektromobilität Grundlagen und Praxis*, 2. Auflage. Hochschule Furtwangen: Hanser Verlag, 2017.
- [34] „Landsberg am Lech Wetter April 2018 - AccuWeather-Vorhersage für Bayern, Deutschland (DE)“, *AccuWeather*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.accuweather.com/de/de/landsberg-am-lech/86899/april-weather/167633>. [Zugegriffen: 13-Juli-2018].
- [35] Bundesanstalt für Straßenwesen, Hrsg., „Datensatzbeschreibung für richtungsbezogene Verkehrsmengendaten“.
- [36] „Wie lange brauchen Elektroautos beim Laden?“, <https://www.tz.de>, 28-Dez-2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tz.de/auto/ladezeit-elektroautos-lange-dauert-zr-9443581.html>. [Zugegriffen: 24-Juni-2018].

- [37] „BAST 2017 - Fachthemen - Automatische Zählstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen“. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.bast.de/BAST\\_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Stundenwerte.html?nn=1817946](https://www.bast.de/BAST_2017/DE/Verkehrstechnik/Fachthemen/v2-verkehrszaehlung/Stundenwerte.html?nn=1817946). [Zugegriffen: 23-Juli-2018].
- [38] A. Yassir, M. Haytham, und S. Magdy, „Optimal allocation for electric vehicle charging stations using Trip Success Ratio“, Waterloo, Kanada, März 2017.
- [39] ADAC e. V. - Ressort Verkehr, „Freizeitverkehr“, Dez. 2016.
- [40] B. Koch, *Tankstelle*. 2018.
- [41] B. Koch, *Draufsicht Tankstelle Lechwiesen Nord*. 2018.
- [42] „Kraftwerk Grohnde“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.preussenelektra.de/de/unsere-kraftwerke/kraftwerkgrohnde.html>. [Zugegriffen: 31-Juli-2018].
- [43] Agentur für Erneuerbare Energien, „Entwicklung der Volllaststunden von Kraftwerken in Deutschland“, Juni 2013.
- [44] „Ladestations Karte. Finden Sie alle Ladestationen in Europa.“, *Plugsurfing*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.plugsurfing.com/de/privatkunden/ladestations-karte.html>. [Zugegriffen: 31-Juli-2018].
- [45] „E-Tankstellen / Stromtankstellen suchen und finden - e-tankstellen-finder.com“. [Online]. Verfügbar unter: <https://e-tankstellen-finder.com/de/de>. [Zugegriffen: 31-Juli-2018].
- [46] „Durchschnittlicher Stromverbrauch im Haushalt“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.stromspiegel.de/stromkosten/stromverbrauch-im-haushalt/>. [Zugegriffen: 02-Aug-2018].



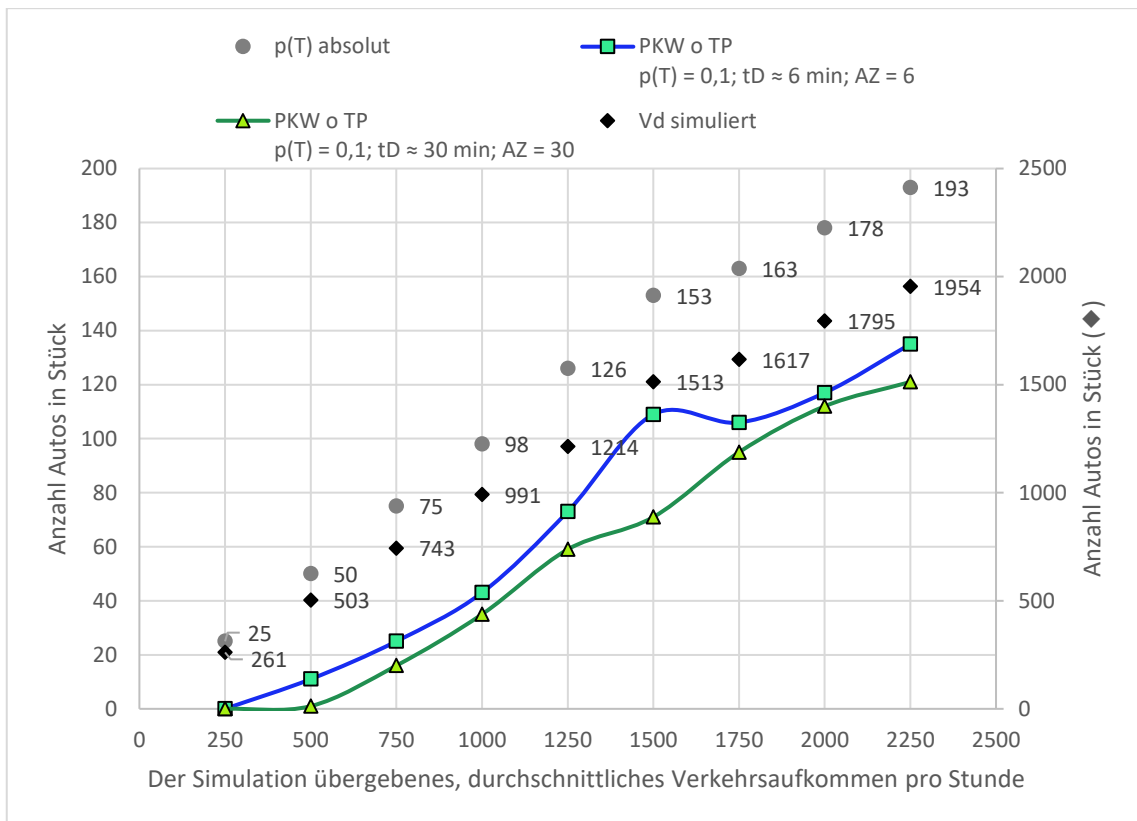
## 11 Anhangsverzeichnis

### Anhang.A1. Messtabelle - Lechwiesen Nord vom 29.04.2018

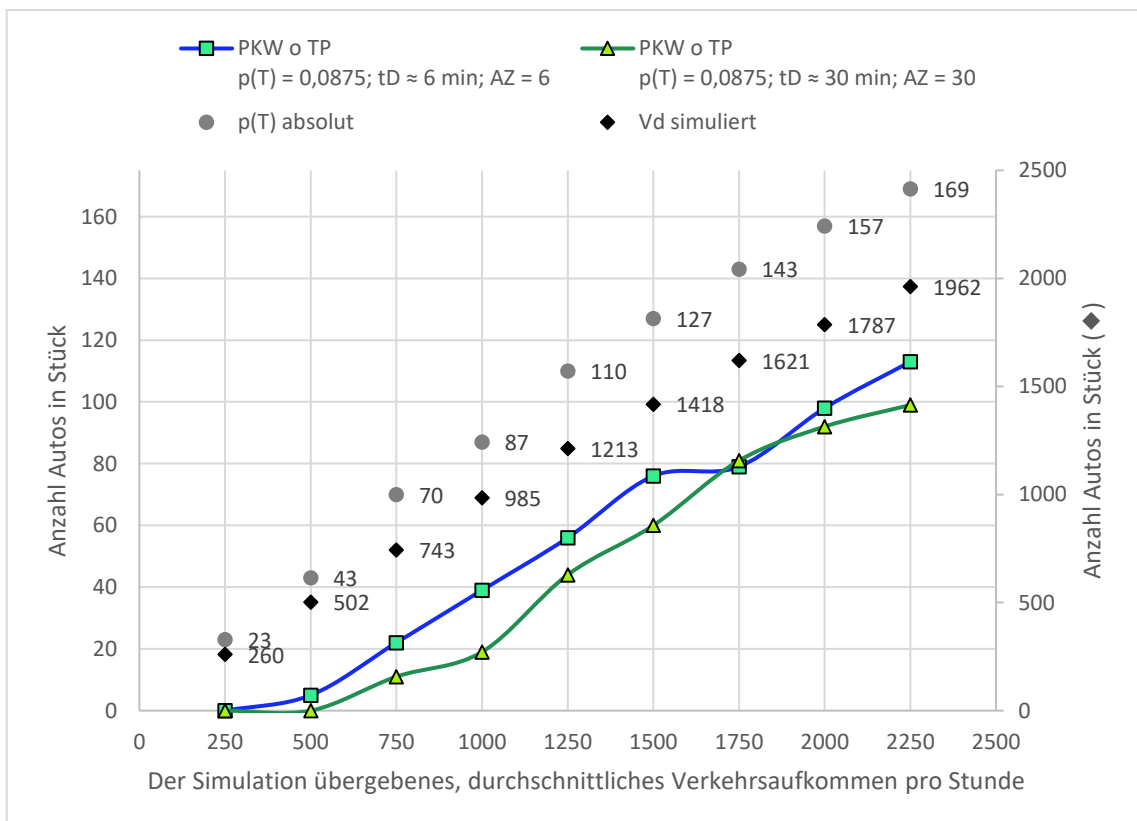
Nr.	Nummer Zapfsäule	Uhrzeit Ankunft	Uhrzeit Abfahrt	Tankdauer [Minuten]	Treibstoff	Füllmenge [Liter]
1	9	13:50	13:53	3	Diesel	37
2	8	13:50	14:05	15	Diesel	76
3	7	13:50	13:54	4	Benzin	30
4	9	13:53	13:57	4	Diesel	50
5	5	13:52	13:56	4	Diesel	14
6	5	13:59	14:06	7	Benzin	43
7	7	14:03	14:07	4	Benzin	31
8	6	13:51	14:11	20	Diesel	20
9	9	14:04	14:08	4	Benzin	18
10	10	14:05	14:13	8	Benzin	19
11	5	14:06	14:13	7	Diesel	31
12	7	14:07	14:14	7	Benzin	33
13	9	14:08	14:13	5	Benzin	19
14	5	14:13	14:17	4	Benzin	36
15	9	14:13	14:27	14	Diesel	70
16	8	14:13	14:20	7	Benzin	37
17	8	14:20	14:25	5	Benzin	37
18	7	14:21	14:27	6	Benzin	42
19	10	14:19	14:26	7	Benzin	37
20	5	14:22	14:27	5	Diesel	70
21	8	14:27	14:36	9	Diesel	54
22	5	14:27	14:34	7	Benzin	29
23	9	14:27	14:30	3	Diesel	14
24	7	14:27	14:34	7	Benzin	15
25	9	14:30	14:33	3	Diesel	7
26	10	14:32	14:49	17	Benzin	54
27	6	14:32	14:41	9	Benzin	31
28	9	14:33	14:39	6	Benzin	46
29	7	14:34	14:45	11	Benzin	39
30	8	14:36	14:47	11	Benzin	19
31	5	14:39	14:47	8	Diesel	18
32	9	14:40	14:46	6	Benzin	32
33	6	14:41	14:47	6	Diesel	58
34	7	14:45	15:03	18	Benzin	70
35	8	15:00	15:03	3	Benzin	23
36	5	14:58	15:04	6	Benzin	43
37	6	15:03	15:07	4	Benzin	33
38	9	15:03	15:08	5	Benzin	35
39	5	15:04	15:08	4	Benzin	39

Nr.	Nummer Zapfsäule	Uhrzeit Ankunft	Uhrzeit Abfahrt	Tankdauer [Minuten]	Treibstoff	Füllmenge [Liter]
40	8	15:03	15:06	3	Diesel	20
41	7	15:05	15:07	2	Benzin	17
42	10	15:06	15:15	9	Benzin	31
43	8	15:06	15:13	7	Benzin	36
44	6	15:07	15:18	11	Benzin	24
45	9	15:10	15:22	12	Benzin	47
46	6	15:18	15:30	12	Benzin	26
47	8	15:18	15:23	5	Diesel	36
48	10	15:20	15:28	8	Diesel	42
49	7	15:22	15:28	6	Benzin	12
50	8	15:23	15:30	7	Benzin	24
51	9	15:24	15:28	4	Benzin	31
52	7	15:28	15:34	6	Benzin	3
53	9	15:28	15:33	5	Benzin	31
54	10	15:28	15:34	6	Diesel	50
55	8	15:30	15:38	8	Diesel	41
56	5	15:33	15:40	7	Benzin	50
57	6	15:34	15:39	5	Benzin	59
58	6	15:40	15:43	3	Benzin	40
59	8	15:38	15:44	6	Benzin	6
60	10	15:39	15:44	5	Benzin	36
61	7	15:45	15:49	4	Diesel	50
62	5	15:45	15:50	5	Diesel	53
63	9	15:46	15:56	10	Benzin	20
64	7	15:49	15:56	7	Benzin	21
65	8	15:49	15:57	8	Benzin	31
66	5	15:50	15:58	8	Diesel	51
67	6	15:52	16:01	9	Benzin	18
68	7	15:56	16:01	5	Benzin	16
69	9	15:56	16:04	8	Benzin	29
70	8	15:58	16:03	5	Benzin	36
71	5	15:58	16:05	7	Benzin	43

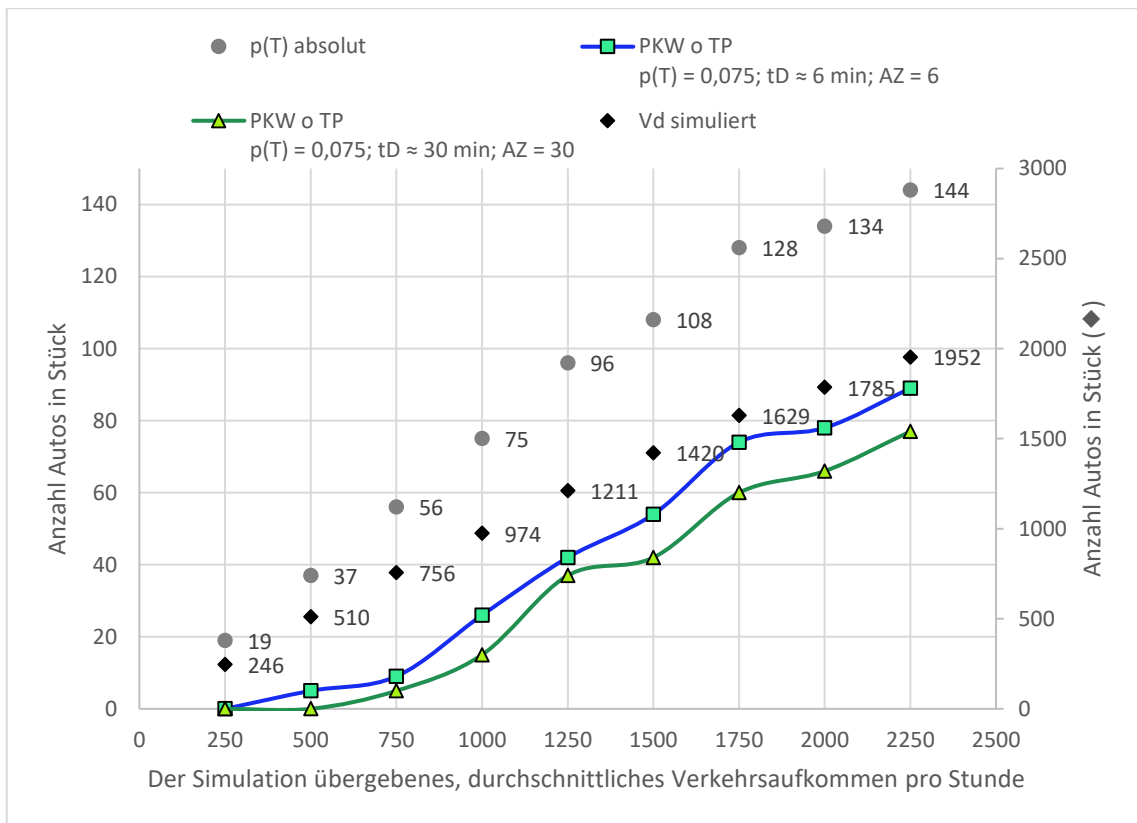
**Anhang.A2. Abbiegewahrscheinlichkeit  $p(T) = 10,0\%$**



**Anhang.A3. Abbiegewahrscheinlichkeit  $p(T) = 8,75\%$**



**Anhang.A4. Abbiegewahrscheinlichkeit  $p(T) = 7,5\%$**



## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich vorliegende Masterarbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Dornbirn, am 28. August 2018

Florian Reitmair