

Modellierung und Simulation einer Wasserstoffbetankung und der dazugehörigen Fahrzeugtechnologie

Bachelorarbeit
der Freien Universität Berlin
Fachbereich Physik
von

Felix Hecht
Matrikelnummer: 5318325
geboren am 21.01.1998, Berlin
Physik und Philosophie mit Lehramtsoption

Betreuer

Dipl.-Ing. Jenny Rieck
Prof. Dr. Holger Dau

Berlin, den 15. Dezember 2022

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Abschlussarbeit selbstständig angefertigt habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen (Abbildungen, direkte oder indirekte Zitate) habe ich unter Benennung der Autoren*en und der Fundstelle als solche kenntlich gemacht. Mir ist bekannt, dass die wörtliche oder nahezu wörtliche Wiedergabe von fremden Texten oder Textpassagen ohne Quellenangabe als Täuschungsversuch gewertet wird. Ich erkläre weiterhin, dass die vorliegende Arbeit noch nicht im Rahmen eines anderen Prüfungsverfahrens eingereicht wurde.

Kurzfassung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Bereitstellung von Wasserstoff im ländlichen Individualverkehr. Wasserstoff ist ein umweltfreundlicher Energieträger, welcher in bestehende Infrastrukturen integriert werden kann. Im Fahrzeug entsteht als Nebenprodukt Wasser, wodurch Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor reduziert werden können. Die Nachfrage ist abhängig von der Erreichbarkeit des Treibstoffes, daher ist der Fokus dieser Arbeit der optimierte Betrieb einer Wasserstofftankstelle für verschiedenen Regionen. Es wird gezeigt, wie sich der Wasserstoffverbrauch der Fahrzeuge für verschiedene Regionen verändert. Es konnte gezeigt werden, dass für Fahrzeuge in zentralen und Kleinstädten der Wasserstoffverbrauch auf 100 km höher ist als in Mittelstädten. Um einem wachsenden Bedarf zu verschiedenen Jahreszeiten zu begegnen wird analysiert, inwiefern eine Tankstelle der Mobilität der Regionen durch Variationen der Dimensionierung gerecht werden kann. Es stellt sich heraus, dass mögliche Betriebskonfigurationen mit steigender Anzahl an Zapfsäulen zunehmen und mit höheren Temperaturen abnehmen. Für die Nachfrage an Wasserstoff ergeben sich für die drei Regionen unterschiedliche Dimensionierungen. In der Umgebung der zentralen Stadt kann eine Tankstelle mit einer Zapfsäule einen täglichen Bedarf von $86 \text{ kg} \pm 54 \text{ kg}$ decken, wo hingegen die gleiche Konfiguration in der Kleinstadt nur einen Wasserstoffbedarf von $51 \text{ kg} \pm 29 \text{ kg}$ deckt. Mit einer höheren Umgebungstemperatur dauert auch die Betankung länger, bis zu 173 s bei einer Temperaturdifferenz zweier sonst gleicher Betankungen von 48 °C.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Hintergrund	2
2.1 Wasserstoff	2
2.1.1 Erzeugung	2
2.1.2 Speicherung	2
2.1.3 Bereitstellung	4
2.2 Ländlicher Individualverkehr	4
2.3 Technischer Hintergrund	5
2.3.1 Motor	5
2.3.2 Brennstoffzelle	6
2.3.3 PEMFC-System	7
2.3.4 Batterie und Rekuperation	8
2.3.5 Leistungselektronische Steuerung	9
2.3.6 Gesamtverbrauch	10
2.3.7 Elektrolyseur	10
2.4 Thermodynamischer Hintergrund	10
2.4.1 Erster und zweiter Hauptsatz der Thermodynamik	11
2.4.2 Realgasverhalten	11
2.4.3 Virialgleichung und Van-der-Waals-Gleichung	12
2.4.4 Redlich-Kwong-Gleichung	12
2.4.5 Der Joule-Thomson-Effekt	12
2.4.6 Massen- und Energiebilanzen im Speichertank	13
2.4.7 Verdichtung und Kühlung	15
3 Materialien und Methoden	16
3.1 Modell	16
3.1.1 Betankung	16
3.1.2 Fahrzeug	18
3.1.3 Tankstelle	19
3.2 Implementierung	23
3.3 Simulation	23
4 Resultate	25
4.1 Fahrzeug	25
4.2 Verkehr	29

4.3 Betankung	31
4.4 Tankstelle	35
4.5 Dimensionierungsanalyse	40
5 Diskussion und Limitation	42
6 Zusammenfassung	45
7 Appendix	46
8 Literatur	47

Abbildungsverzeichnis

1	Tabelle für eine T40 Wasserstoffbetankung gemäß SAE J2601 für eine Kapazität von 4 - 7 kg. Hervorgehoben sind die Parameter für eine Betankung bei 25 °C Außentemperatur und einem Anfangsfahrzeugtankdruck von 5 MPa [64][65].	17
2	Für den wasserstoffbasierenden Antrieb zugehörige Komponenten und ihre Verteilung im Fahrzeug. Unter der Komponente thermisches System sind sowohl Pumpe als auch Luftkompressor impliziert. Der Brennstoffzellenstapel ist unter dem Begriff der Abbildung Brennstoffzellen-Tank subsumiert. [67]	19
3	Tankstellenmodell	20
4	Route für Fahrzeuge der zentralen Stadt	21
5	Route für Fahrzeuge der mittleren Stadt	22
6	Route für Fahrzeuge der zentralen Stadt	22
7	Generierung von Variationen der WLTC-Routen	25
8	Batterieleistung und Brennstoffzellensystemleistung für drei verschiedenen Routen	27
9	Zusammenwirken von Batterie-, Brennstoffzellensystem- und Fahrleistung mit der Beschleunigung	28
10	Massenverteilung vor und nach einem Tag fahren und tanken für die zentrale Stadt bei einem Umkreis von 1,5 km	29
11	Uhrzeiten des Fahrens und Tankens für verschiedene Regionen bei einem Umkreis von 1,5 km	30
12	Druckverlauf von Fahrzeug- und Hochdruckbündeltanks bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen	31
13	Massenveränderung im Fahrzeug- und den Hochdruckbündeltanks bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen	32
14	Temperaturänderung im Fahrzeug- und den Hochdruckbündeltanks bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen	33
15	Temperaturänderung im Fahrzeug- und den Hochdruckbündeltanks bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen	34
16	Druckentwicklung der Hochdruckbündel der Tankstelle über einen Tag in der Region Kleinstadt im Bedarfsumkreis von 1,5 km. Die mittlere Außentemperatur beträgt 9,4 °C	36
17	Massenentwicklung der Hochdruckbündel der Tankstelle über einen Tag in der Region Kleinstadt im Bedarfsumkreis von 1,5 km. Die mittlere Außentemperatur beträgt 9,4 °C	37
18	Temperaturentwicklung der Hochdruckbündel der Tankstelle über einen Tag in der Region Kleinstadt im Bedarfsumkreis von 1,5 km. Die mittlere Außentemperatur beträgt 9,4 °C	37

19	Funktionierender Betrieb von Tankstellen für verschiedene Regionen. Dargestellt sind die Abhängigkeiten von täglicher zur Verfügung gestellter Wasserstoffmasse und der täglichen Tankstellen-Gesamtarbeit bei unterschiedlichen Außentemperaturen, Bedarfsumkreisen der Regionen und Zapfsäulen	38
20	Betrieb von Tankstellen für verschiedene Regionen. Dargestellt sind die Abhängigkeiten des möglichen Betriebs, der täglichen Anzahl an Betankungen, ihrer maximalen Dauer einer Stunde und die Anzahl an Fahrzeugen zu dieser Stunde im Verhältnis zu unterschiedlichen Außentemperaturen, Bedarfsumkreisen der Regionen und Zapfsäulen	39
21	Abhängigkeit der möglichen Tankstellenbetriebe und der täglich zur Verfügung gestellten Wasserstoffmasse zur Anzahl an Zapfsäulen	41
22	Leistung der einzelnen Komponenten einer Tankstelle um bei verschiedenen Temperaturen ein Kilogramm Wasserstoff bereit zu stellen	42
23	UML Diagramm	46
24	Toyota Mirai I Spezifikationen	47

Tabellenverzeichnis

1	Distanz und Geschwindigkeit der verschiedenen Routen	21
2	Leistungen der verschiedenen Komponenten auf den Regionsrouten	26
3	Betankungen unterschiedlicher Startmassen bei unterschiedlichen Außentemperaturen. (sortiert nach der betankungsdauer)	35
4	Daten und Ergebnisse eines täglichen Tankstellenbetriebs	36
5	Ergebnisse	43

Abkürzungsverzeichnis

CO ₂	Kohlenstoffdioxid
H ₂	Wasserstoff
wt	Gewichtsanteil [%]
HHV	Brennwert
WLTC-Zyklus	Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle
JTE	Joule-Thomson-Effekt
SOC	State of charge
FC	Fuel-Cell
LOHC	Liquid organic hydrogen carriers
LH ₂	Flüssiger Wasserstoff
ND-Tank	Niederdrucktank (speicher für den Elektrolyseur)

1 Einleitung

Im Dezember 2015 unterzeichneten 195 Länder einen Vertrag, die globale Erwärmung auf maximal 2 Grad Celsius zu begrenzen, um so die nachteiligen Auswirkungen des menschengemachten Klimawandels zu begrenzen [1]. Das verabschiedete 'Übereinkommen von Paris' umfasst außerdem die Erhöhung der Klimaresistenz und die Reduktion von Treibhausgasemissionen (vor allem Kohlenstoffdioxid, Methan, Distickstoffmonoxid) der Vertragspartner. Ferner sollen weitreichend finanzielle Mittel zur klimaneutralen Entwicklung bereitgestellt werden.

Deutschland produzierte im Jahr 2021 761.591.000 Tonnen Treibhausgas [2], ein Anteil von ca. 2 % der globalen Treibhausgasemissionen.[Schluss] Ungefähr 20 % der nationalen Treibhausgasemissionen wird durch den Verkehrssektor produziert, da besonders dieser Sektor von der Gewinnung von Energie durch die Verbrennung fossiler Rohstoffe abhängig ist. Die Entwicklung und der Einsatz alternativer Antriebstechnologien in diesem Bereich ist entscheidend um das 2 Grad Celsius Ziel einzuhalten [3]. Die seit Dezember 2021 regierende Koalition, bestehend aus dem Bündnis 90/ Die Grünen, der FDP und der SPD, setzt in ihrem Koalitionsvertrag unter anderem auf Wasserstoff als Alternative zu fossilen Brennstoffen [4][5]. Die Herausforderungen im Verkehr bestehen neben der ökonomisch und energetischen Gewinnung von Wasserstoff in der Wasserstoffbereitstellung für Fahrzeuge. Hierfür ist sowohl ein flächendeckender Netzausbau in Form von Tankstellen wichtig als auch ein effizienter Verbrauch und Speicherung.

Diese Arbeit befasst sich mit der Frage, inwiefern eine Wasserstofftankstelle zu dimensionieren ist um den Treibstoffbedarf unterschiedlicher ländlicher Wohnregionen abzudecken. Der Dimensionierungsanalyse der Wasserstofftankstelle geht eine Simulation der thermodynamischen Vorgänge des Betankungsprozesses und der Fahrzeugtypen voraus. Die Simulationen bauen auf den Modellen zweier vorangegangen Masterarbeiten auf [6][7].

Diese Arbeit befasst sich zu Beginn mit dem aktuellen Stand der Forschung und Technologie zur Wasserstofferzeugung, -speicherung, -anwendung und dem Wasserstoffnetz. Hierauf folgt die Ausführung der Funktionsweise eines Wasserstoffautos. Im Abschnitt des physikalischen Hintergrunds wird die Thermodynamik formuliert, welche für die Modellbildung des Betankungs- und Kompressionsprozesses notwendig ist. Mithilfe der Modelle zum Fahrzeugtyp und des Betankungs- und Kompressionsprozesses werden unterschiedliche Szenarien einer Wasserstofftankstelle simuliert. Die Resultate werden vorgestellt und im Hinblick auf Fehler einschränkungen und Annahmen diskutiert. Schlussendlich gibt die Dimensionierungsanalyse Aufschluss über Begrenzungen und Auslegung des Betriebs einer Wasserstofftankstelle.

2 Hintergrund

2.1 Wasserstoff

Wasserstoff ist ein Sekundärenergieträger ohne bzw. mit wenig umweltschädlichen Folgen und dem Potential, als genutztes Schlüsselement eine nachhaltige Energiewende herbeiführen zu können [8][9]. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass Wasserstoff aus verhältnismäßig erschwinglichen und umweltfreundlichen Ressourcen gewonnen werden kann sowie der hohen Energiedichte von 141,8 MJ/kg. Zum Vergleich Benzin eine Energiedichte, die nur etwa einem Drittel der des Wasserstoffs entspricht [9][10]. Allerdings ist die auf das Volumen bezogene Energie des Wasserstoffs bei Standardbedingungen nur ungefähr ein 3000stel der volumetrischen Energiedichte von Benzin bei Standardbedingungen, weshalb aufwendige Speicherverfahren notwendig sind [11].

2.1.1 Erzeugung

Für die Spaltung von Wasser durch Elektrolyse wird je nach Elektrolyseverfahren mindestens 25 kWh bis 39,7 kWh zur Erzeugung eines Kilogramms Wasserstoff benötigt.[10] Die Herstellung von Wasserstoff durch die Elektrolyse wird im Abschnitt des technischen Hintergrunds weiter ausgeführt.

Wasserstoff kann nur solange als nachhaltig erachtet werden, wie die Erzeugungsenergie aus erneuerbaren Energien (bspw. Windkraftanlagen) bereitgestellt wird und keine umweltverschmutzenden Materialien (nach ihrem Lebenszyklus beurteilt) in der Wirkungskette zum Einsatz kommen.[8]

Wird die hierfür notwenige Elektrizität aus erneuerbaren Energien bereitgestellt, wird grüner Wasserstoff hergestellt. Durch Methangasreformierung mit Erdgas oder Biogas wird Wasserstoff hergestellt, welcher nach der Farbeinteilung zur Herstellung von Wasserstoff in blauen oder grauen Wasserstoff charakterisiert wird. Die Einteilung erfolgt nach der CO₂ Emission. Blauer Wasserstoff erhält seine Bezeichnung, wenn mehr als 60 % der CO₂ Emission bei der Herstellung reduziert werden. Bei grauem Wasserstoff wird weniger als 60 % der Emissionen reduziert [12][13]. Des Weiteren existieren Vorgehensweisen, welche biologische, photonische oder thermische Energie zur Gewinnung von Wasserstoff nutzen. Der Einsatz dieser Verfahren wird weitestgehend noch erforscht [14][15].

2.1.2 Speicherung

Wasserstoffspeicher werden kategorisiert nach Druckspeicher, Flüssiggasspeicher, Metallhybride, chemischen Hybride und Nanomaterialien [11][16]. schon vorhanden Für ein gutes Speichermedium ist die schnelle Aufnahme und Abgabe des Brennstoffs wichtig. Hohe gravimetrische und volumetrische Energiedichten optimieren den beanspruchten Raum und reduzieren die Gesamtmasse. Derzeitige Speichertechnologien weisen langsame Reaktionszeiten, niedrige Effizienzen und Energiedichten auf. Zudem

kommen aufwendige Katalysatoren, komplexe Kühlsysteme und hohe Betriebsdrücke auf zum Einsatz. Somit besteht ein Entwicklungsbedarf, um diese Nachteile auszugleichen [11].

Bei der Druckgasspeicherung für die Mobilität wird Wasserstoff auf Drücke von 350 bar oder 700 bar komprimiert nach dem Standard der SAE J2600.[18] Es gibt vier verschiedene Tanktypen, zwischen welchen unterschieden wird. Die Simulation dieser Arbeit basiert auf dem Tanktyp I für Betriebsdrücke zwischen 200 bar und 500 bar, sowie dem Tanktyp IV für das Speichern von Wasserstoff bei Drücken von über 1000 bar. Sie unterscheiden sich in ihrem Gewicht, der chemischen Zusammensetzung und ihrer Drucksauslegung [19]. Die hohen Drücke in mobilen Anwendungen werden angestrebt, um die gravimetrische und volumetrische Energiedichte zu maximieren, wodurch Raumbeanspruchung und Gewicht des zugetankten Kraftstoffes (inbegriffen der Speichertopologie) minimiert werden können [11]. Der Toyota Mirai, mit dessen Parametern in dieser Arbeit das Wasserstoffauto simuliert wird, fährt mit einem Drucktank der Klasse IV und einem Betriebsdruck von 700 bar. Die Wasserstoffspeichertopologie hat eine gravimetrische Energiedichte von bis zu 5,7 wt % und eine volumetrische Energiedichte von bis zu $4,9 \text{ MJ l}^{-1}$ [11][20].

Die Werte beziehen sich auf die Verhältnisse von Wasserstoff sowie der Speichertopologie in Gesamtvolume und Gesamtgewicht zum HHV (Brennwert) des gespeicherten Wasserstoffs. Ein Wert von 5,7 wt % der gravimetrischen Energiedichte entspricht der Energie von 5,7 % der Energie des Wasserstoffs eines Kilogramms (also der HHV) pro Kilogramm der durchschnittlichen Gesamtmasse der Speichertopologie.

Wird Wasserstoff auf seine Siedetemperatur bei atmosphärischem Druck gekühlt, was einer Temperatur von -253 °C entspricht, kann er in thermisch isolierten Tanks gespeichert werden. Diese Methode wird als LH₂- oder Flüssiggasspeicherung bezeichnet. Dabei werden gravimetrische Energiedichten von maximal 7,5 wt % erreicht [11]. Die Tanks sind nicht für höhere Drücke ausgelegt, welche entstehen wenn ein minimaler Wärmeaustausch mit der Umgebung stattfindet. Hierzu besitzen sie ein Wasserstoffablassventil, welches jedoch auch zu einer Verringerung des Wirkungsgrad führt (Boil-Off-Effekt) [22][23]. Angewendet wird diese Methode in der industriellen Speicherung und dem Transport von Wasserstoff [24]. Die Kombination aus Kühlung und hohen Drücken verringert den Boil-Off-Effekt, jedoch wird auch die Energiedichte reduziert [25].

Chemische Hybride (oft liquid organic hydrogen carriers (LOHC) genannt) sind aromatische Gruppen, welche den Wasserstoff binden und als Flüssigkeit bei atmosphärischem Druck und Raumtemperatur gespeichert werden können. Sie haben eine gravimetrische Energiedichte zwischen 6 wt% und 8 wt%, welche höher als bei der Kompression ist. Ihr Nachteil ist jedoch die Gefahr einer Spontanreaktion [26][27].

Metallhybride, wie zum Beispiel Magnesium, binden Wasserstoff bei Reaktionen mit hoher Temperatur und haben eine gravimetrische Energiedichte von 7,6 wt % [28]. Die hohe Reaktionsenergie und lang-

same Reaktionskinetik sind von erheblichem Nachteil [29].

Einwändige Kohlenstoffnanoröhren können zum Speichern von Wasserstoff genutzt werden und weisen eine grammimetrische Energiedichte von bis zu 10 wt % bei Raumtemperatur und 10 bar auf [31].

2.1.3 Bereitstellung

[32] zeigt auf, wie eine Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland für verschiedene Regionen aussehen könnte. Salzkavernen und Fernleitungen wären für Regionen mit hoher Betankungsnachfrage geeignet, wohingegen in Regionen mit geringem Wasserstoffbedarf die Lieferung mittels LKW-Lieferungen wirtschaftlich am geeigneten wäre. Durch eine Sektorkopplung mit Elektrizität (bezogen aus Solar- und Windenergie) [33] und Gas, was einer Nutzung bestehender Pipelines entspreche, könnten bis 2050 bis zu 60% der Transportkosten und 95% der CO₂ Emissionen reduziert werden [33]. Ein auf Wasserstoff basierender Flug- und Schienenverkehr wäre ebenso ein wichtiger Schritt der Infrastrukturentwicklung mit Sicht auf die Reduktion von Treibhausgasemissionen [34][35]. Allerdings würde aufgrund der höheren Energiedichten von flüssigem Wasserstoff die Infrastruktur auf LKW-Lieferungen basieren [36]. Wasserstoff im flüssigen Aggregatzustand benötigt anspruchsvolle Technik zur Gewährleistung eines konstanten Druck-Temperatur-Verhältnisses und ist bisher keine zuverlässige Alternative für den Individualverkehr [37].

Wasserstoftankstellen haben gegenüber Tankstellen, die fossile Ressourcen bereitstellen, den Vorteil, den Kraftstoff auch direkt vor Ort mittels Elektrolyse herstellen zu können [38][39]. In Deutschland existieren 91 Wasserstoftankstellen mit einem Angebot von 350 bar für Nutzfahrzeuge und 700 bar für PKWs und Flüssiggas (Stand Juli 2021) - 84 davon werden von H2-Mobility betrieben [5][40]. Angepasst an eine variablen Wasserstoffnachfrage werden vier verschiedene Tankstellengrößen installiert, die für eine durchschnittliche Wasserstoffnachfrage von 150 kg bis 2500 kg ausgelegt sind [41]. Der Wasserstoff wird aus der Elektrizität durch erneuerbare Energien mittels Elektrolyse oder durch Dampfreformierung mit Erd- oder Biogas gewonnen. Via Pipeline, Trailer oder Vorortproduktion gelangt der Wasserstoff anschließend zu den entsprechenden Tankstellen. Die Wasserstoftankstellen, welche das Betanken von PKWs ermöglichen, bestehen aus einem Trailer-Swap oder Elektrolyseur, einer Kompressionseinheit zur Bereitstellung des Betankungsdrucks, einem Mittel- und Hochdruckspeicher, Mess-und Regelungstechnik zur Gewährleistung der Betankung gemäß der weltweiten Norm SAE J2601, einem Kühlaggregat zum Vorkühlen des Treibstoffs und einer Dispensereinheit [41].

2.2 Ländlicher Individualverkehr

Der ländliche Individualverkehr lässt sich nach der Regionalstatistischen Raumtypologie (RegioStaR) und den Mobilitätsdaten des Tabellenbands für die Mobilität in Deutschland (MiD2017) in drei Raumregionen einteilen: zentrale Städte, Mittelstädte und städtischer Raum sowie kleinstädtischer und dörflicher

Raum (nachfolgend als Kleinstadt bezeichnet).[42][43] Entsprechend der drei ländlichen Raumregionen wird der Durchschnittswert der Bevölkerungsdichte der RegioStaR-Werte gebildet um den Vergleich zu den MiD2017-Werten (Mid17) ziehen zu können. Mit den Werten des MiD17 zu Haushaltsgröße (H) in $\frac{\text{Personen}}{\text{Haushalt}}$, Autos pro Haushalt(AH) in $\frac{\text{Autos}}{\text{Haushalt}}$, täglich (Atg), wöchentlich (Aw) und monatlich (Am) genutzten Autos in %, lassen sich mit Gleichung 1 für jede Region die durchschnittlich und täglich gefahrenen PKWs pro km^2 und Region (Atg_{gesamt} in $\frac{\text{Autos}}{\text{km}^2}$) berechnen.

$$Atg_{gesamt} = AA \left(Atg + \frac{2}{7} Aw + \frac{2}{\frac{365}{12}} Am \right) \quad (1)$$

Die Anzahl der verfügbaren Autos (AA) wird wie folgt berechnet:

$$AA = \frac{\rho_{\text{Bevölkerung}}}{H} * AH \quad (2)$$

Um die durchschnittliche Gesamtfahrtstrecke pro Auto und Tag ($sf_{gesamt} [\frac{\text{km}}{d}]$) zu berechnen werden die durchschnittlichen Fahrten pro Tag ($f [\frac{\text{Fahrt}}{d}]$) mit den durchschnittlichen Strecken pro Fahrt ($sf [\frac{\text{km}}{\text{Fahrt}}]$) multipliziert und mit den Werten für die mit dem Auto zurückgelegte berufliche Strecke pro Tag ($sb_{gesamt} [\frac{\text{km}}{d}]$) addiert.

$$sf_{gesamt} = f * sf + sb_{gesamt} \quad (3)$$

Wobei sb mit dem Anteil der Bevölkerung, welche regelmäßig berufliche Wege zurücklegt (Ab [%]), dem Anteil der hierfür ein PKW verwendet ($Ab_{PKW} [%]$) und der Gesamtstrecke des beruflichen Wegs (sb [$\frac{\text{km}}{d}$]) wie folgt berechnet wird:

$$sb_{gesamt} = Ab * Ab_{PKW} * sb \quad (4)$$

2.3 Technischer Hintergrund

In diesem Unterkapitel werden die technischen Komponenten für den Antrieb eines Wasserstofffahrzeugs aufgezeigt sowie die Herstellung von Wasserstoff mittels eines Elektrolyseurs erläutert.

2.3.1 Motor

In Brennstoffzellenfahrzeugen befinden sich Elektromotoren [44]. Die zum Antrieb notwendige Energie wird mir Gleichung 5 berechnet [45].

$$E_{\text{motorbedarf}} = \int (F_{\text{luf}} + F_{\text{steigung}} + F_{\text{rollen}} + F_{\text{beschleunigen}}) v dt \quad (5)$$

Hierbei ist v die Geschwindigkeit und t die Zeit. Die Luftwiderstandskraft F_{luf} , die Reibungskraft beim Rollen F_{rollen} , die Kraft für die Beschleunigung $F_{\text{beschleunigen}}$ und die Hangabtriebkraft F_{steigung} werden

mit den Gleichungen 6 bis 9 berechnet.

$$F_{luft} = \frac{1}{2} \rho A c_w v^2 \quad (6)$$

Mit der Dichte der Luft ρ , der Oberfläche des sich die durch Luft bewegenden Gegenstandes A und dem Luftwiderstandsbeiwert c_w .

$$F_{rollen} = m g c_r \cos(\alpha) \quad (7)$$

Hierbei ist m die Masse, g die Erdbeschleunigung und c_r der Rollwiderstandskoeffizient.

$$F_{steigung} = m g \sin(\alpha) \quad (8)$$

$$F_{beschleunigung} = m a \quad (9)$$

mit der Beschleunigung a.

Der Hilfskomponentenenergiebedarf, welcher sich nach Fahrlicht, Belüftung und dem Anpassen der Innentemperatur richtet wird mit Gleichung 10 berechnet.

$$E_{hilfskomponentenbedarf} = \int P_{hilfskomponentenbedarf} dt \quad (10)$$

Für die niedrigeren Spannungen, welche die Hilfskomponenten benötigen, ist ein zusätzlicher DC-DC Konverter im Fahrzeug verbaut [46]. Somit ergibt sich der Gesamtenergiebedarf eines Fahrzeugs aus:

$$E_{gesamtbedarf} = E_{motorbedarf} + E_{hilfskomponentenbedarf} \quad (11)$$

2.3.2 Brennstoffzelle

Eine Brennstoffzelle ist eine elektrochemische galvanische Zelle, welche durch chemische Reaktionen die in Wasserstoffmolekülen gespeicherte chemische Energie in elektrische Energie umwandeln kann [47]. Wasserstoffmoleküle werden an der Anode unter Abgabe jeweils zweier Elektronen zu Kationen oxidiert. In einer PEM-Brennstoffzelle (Polymerelektrolytbrennstoffzelle, englisch PEMFC) diffundieren die positiv geladenen Protonen durch die protonleitende Membran zur Kathode, wo sie mit einem weiteren Proton und einem Luftsauerstoffatom zu Wasser reagieren. Die Elektronen werden von der Anode abgeführt um am Endverbraucher elektrische Arbeit zu verrichten und reduzieren daraufhin den Sauerstoff an der Kathode. Durch einen schnellen Start, einer hohen Effizienz von bis zu 80 %, einer Leistungsdichte von 93 mWcm^{-2} bis 147 mWcm^{-2} und der niedrigen Arbeitstemperatur zwischen -40°C bis 120°C wird die PEM-Brennstoffzelle bevorzugt in Fahrzeugen eingesetzt [48][49].

2.3.3 PEMFC-System

In einem Wasserstoffauto werden viele Brennstoffzellen verbaut, ihre Gesamtheit wird als Brennstoffzellenstapel bezeichnet [50]. Zusammen mit dem Luftkompressor, der Pumpe für das Kühlwasser und dem Aufwärtswandler zum Erhöhen und Stabilisieren der Ausgangsspannung wird der Brennstoffzellenstapel, unter dem PEMFC-System gefasst, betrachtet [51]. Mit der Gleichung 12 wird die Leistung des Brennstoffzellenstapels $P_{FC.stapel}$ berechnet, unter der Annahme, dass die Abnutzung der einzelnen Brennstoffzellen über die Zeit vernachlässigt werden kann.

$$P_{FC.stapel} = \frac{P_{converter}}{\eta_{converter}} \quad (12)$$

Hierbei ist $P_{converter}$ die Eingangsleistung am Aufwärtswandler und $\eta_{converter}$ der Wirkungsgrad, welcher sich wie in [6] gezeigt wie folgt berechnen lässt:

$$\eta_{converter} = \frac{A_1 - A_2}{1 + \exp\left(\frac{P_{FC.stapel} - x_1}{x_2}\right)} + A_2 \quad (13)$$

mit

$$A_1 = 92,25524; \quad A_2 = 0,95973; \quad x_1 = -429782,77983; \quad x_2 = 55382,34799;$$

Die Werte, welche mit der Gleichung berechnet werden, haben einen Fehler von $\pm 7,91E-6$. Die Effizienz des Brennstoffzellenstapels $\eta_{FC-stapel}$ wird wie in [6] hergeleitet:

$$\eta_{FC.stapel} = y_0 + A \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{P_{FC.stapel} - x_c + \frac{w_1}{2}}{w_2}\right)} \left(1 - \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{P_{FC.stapel} - x_c + \frac{w_1}{2}}{w_3}\right)}\right) \quad (14)$$

mit

$$y_0 = 22,55007; \quad x_c = 63,86124; \quad A = 64,67945; \quad w_1 = 126,60496; \quad w_2 = 1,46478; \\ w_3 = 179,61904$$

Die Werte, welche mit der Gleichung 14 berechnet werden, haben einen Fehler von $\pm 0.03\%$. Die für den Brennstoffzellenstapel notwendige Luft wird mit einem Luftkompressor verdichtet und die absolute Luftfeuchtigkeit erhöht, um die Effizienz zu erhöhen [52]. Die Leistung des Luftkompressors richtet sich

nach der aktuellen Leistung des Brennstoffzellenstapels [6][53]:

$$P_{Luftkompressor} = V_{max} \frac{P_{FC.Stapel}^n}{k^n + P_{FC.Stapel}^n} \quad (15)$$

mit

$$V_{max} = 28382, 25616; \quad k = 203245, 37192; \quad n = 2, 72591$$

Die Pumpleistung zur Kühlung des Brennstoffzellenstapels wird mit Gleichung 15 berechnet [6].

$$P_{Pumpe} = a + b * P_{FC.stapel} \quad (16)$$

wobei

$$a = 19, 41163; \quad b = 0, 00888$$

Der Eigenverbrauch des PEMFC-Systems ergibt sich aus den Leistungen der Subkomponenten und lässt sich mit Gleichung 17 berechnen. Der Wirkungsgrad des Systems wird mit Gleichung 18 berechnet [6].

$$E_{PEMFC.system} = \frac{\int P_{FC.stapel} dt}{\eta_{FC.stapel}} + \frac{\int (P_{Luftkompressor} P_{Pumpe}) dt}{\eta_{FC.stapel} \eta_{converter}} \quad (17)$$

$$\eta_{PEMFC.system} = \frac{\int (P_{FC.stapel} - P_{Luftkompressor} - P_{Pumpe}) dt}{E_{PEMFC.system}} \quad (18)$$

2.3.4 Batterie und Rekuperation

Wasserstofffahrzeuge mit Energiebereitstellung durch ein Brennstoffzellensystem benötigen eine Batterie, welche die Leistungsspitzen während der Beschleunigung ausgleichen kann und die Rekuperationsenergie speichern kann [49][53]. In den Phasen konstanter Geschwindigkeit stellt allein der Brennstoffzellenstapel die Energie für die Bewegung bereit. Die Batterie wird vom PEMFC-System geladen mit einer Effizienz in Abhängigkeit von Gleichung 13 und 14:

$$\eta_{laden, FC-Batterie} = \eta_{converter} * \eta_{FC.stapel} \quad (19)$$

Die Werte, welche mit Gleichung 19 berechnet werden, haben einen Fehler von $\pm 1.83\%$. Die Berechnung des Wirkungsgrades von Auf- und Entladung der Batterie wird mit den spannungsabhängigen Gleichungen 20 und 21 durchgeführt, welche auf dem Modell eines Wasserstoffmüllsammelfahrzeugs basieren [54][55].

$$\eta_{aufladen} = a_{laden} \left\| \frac{P_{batterie}}{E_{batterie}} \right\| + 1 \quad , \text{wenn } P > 0 \quad (20)$$

mit der Leistung der Batterie $P_{batterie}$ [W], der nominalen Kapazität der Batterie $E_{batterie}$ [wh] und dem Lade-Koeffizienten $a_{laden} = -0,0281$.

$$\eta_{aufladen} = a_{entladen} \frac{P_{batterie}}{E_{batterie}} + 0,34 \quad , \text{wenn } P < 0 \quad (21)$$

wobei $a_{entladen} = -0,0281$ der Entlade-Koeffizient ist.

Der Wirkungsgrad der Rekuperation (siehe Gleichung 22) die während des Bremsvorgangs von der Batterie gespeichert werden kann ist von drei Wirkungsgraden abhängig: dem Wirkungsgrad der Transmission, dem des Generators, welcher die mechanische Energie der Transmission in elektrische umwandelt und dem Wirkungsgrad des DC-DC-Konverters (Aufwärtswandler), um die nötige Spannung zur chemischen Energiespeicherung in der Batterie bereitstellen zu können [6].

$$\eta_{rekuperation} = \eta_{generator} * \eta_{transmission} * \eta_{motor} * \eta_{aufwärtswandler} \quad (22)$$

Die Rekuperationsenergie $E_{rekuperation}$ lässt sich mit Gleichung 5 und 23 berechnen.

$$E_{rekuperation} = E_{motorbedarf} \eta_{rekuperation} \quad (23)$$

2.3.5 Leistungselektronische Steuerung

Aufgrund von Schwankungen in Eingangs- und Ausgangsleistung der elektronischen Komponenten des Fahrzeugs ist eine leistungsabhängige Effizienz der Batterie zu ermitteln. Auf dem Modell von Schmidt und Sauer aufbauend [56], wird in [6] ein Modell benutzt, welches nach folgenden Kriterien funktioniert:

$$\begin{aligned} \eta_{LE} &= \frac{p_{out}}{p_{out} + p_{self} + p_{out}v_{loss} + r_{loss}p_{out}^2} \quad , \text{wenn } P < 0 \\ \eta_{LE*} &= \frac{1 + v_{loss}*}{2r_{loss} * p_{in}} + \sqrt{\left(\frac{1 + v_{loss}*}{2r_{loss}} \right)^2 + \frac{p_{in} - p_{self}*}{r_{loss} * p_{in}^2}} \quad , \text{wenn } P > 0 \end{aligned} \quad (24)$$

p_{self} ist der interne Leistungsbedarf, v_{loss} ist der Spannungsverlust durch Transistoren und Dioden, r_{loss} ist der Spannungsverlust durch Ohm'sche Widerstände, p_{in} und p_{out} sind Eingangs- und Ausgangsleistung. Die Parameter sind wie folgt:

$$\begin{aligned}
v_{loss*} &= v_{loss} \\
r_{loss*} &= \frac{r_{loss}}{\eta_{nom}} \\
p_{self*} &= p_{self}\eta_{nom}
\end{aligned} \tag{25}$$

$$\begin{aligned}
v_{loss} &= -0,0025; & r_{loss} &= 0,0309951; & p_{self} &= 0,0000993417; \\
r_{loss*} &= 0,0319; & p_{self*} &= 0,00009656; & \eta_{nom} &= 0,972
\end{aligned} \tag{26}$$

2.3.6 Gesamtverbrauch

Der Gesamtenergieaufwand des Fahrzeugs E_{total} kann wie folgt berechnet werden [6]:

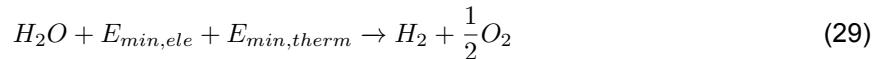
$$E_{total} = \frac{E_{PEMFC.system}}{\eta_{PEMFC.system}} + \frac{E_{Batterie,laden} - E_{Batterie,entladen}}{\eta_{batterie}\eta_{laden,FC_Batterie}\eta_{LE}} \tag{27}$$

Die Masse an Wasserstoff m_{H_2} , welche die Energie bereitstellt, wird mit dem HHV von Wasserstoff und Gleichung 24 wie folgt berechnet:

$$m_{H_2} = \frac{E_{total}}{HHV_{H_2}} \tag{28}$$

2.3.7 Elektrolyseur

Um Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zu spalten bedarf es einer mindestelektrischen Energie, sowie einer mindestthermischen Energie (siehe Gleichung 29) [58].



Wobei $E_{min,ele} = 179.9 \frac{kJ}{mol}$ und $E_{min,therm} = 69.3 \frac{kJ}{mol}$. Durch Irreversibilitäten ergibt sich eine maximale Effizienz von 83% [47]. Die notwendige Energie $E_{Elektrolyseur}$, welche aufzubringen ist um die Masse m_{H_2} Wasserstoff bereitzustellen, wird wie folgt berechnet:

$$E_{Elektrolyseur} = (E_{min,ele} + E_{min,therm}) \frac{m_{H_2}}{M_{H_2}} \frac{1}{\eta_{Elektrolyseur}} \tag{30}$$

M_{H_2} ist die molare Masse von Wasserstoff und $\eta_{Elektrolyseur}$ der Wirkungsgrad des Elektrolyseurs.

2.4 Thermodynamischer Hintergrund

In diesem Unterkapitel werden die thermodynamischen Zustände des Wasserstoffs dargestellt.

2.4.1 Erster und zweiter Hauptsatz der Thermodynamik

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass Energie weder erzeugt noch zerstört werden kann. [59] Energie kann von einer Form in eine andere umgewandelt werden. Betrachtet man ein offenes System, das im Austausch mit der Umgebung ist, bedeutet der erste Hauptsatz der Thermodynamik, dass Energie in Form von Wärme Q, Arbeit W oder Masse m zwischen System und Umgebung ausgetauscht werden kann. Die Energie bleibt in seiner Bilanz konstant. Aufgrund der durch die Massenströme folgenden Verschiebearbeit wird die Enthalpie H anstatt der inneren Energie für offene Systeme genutzt.

$$\frac{dE_{sys}}{dt} = \sum_i \dot{Q}_i + \sum_j \dot{Q}_{t,j} + \sum_e \dot{m}_e (h_e + gh_e + \frac{1}{2}v_e^2) - \sum_a \dot{m}_a (h_a + gh_a + \frac{1}{2}v_a^2) \quad (31)$$

Über die Systemgrenzen geschlossener Systeme findet kein Stoffaustausch statt. Die innere Energie ändert sich durch den Transport von Arbeit und Wärme.

$$dU = dQ + dW \quad (32)$$

Im zweiten Hauptsatz der Thermodynamik wird die Entropie S eingeführt, durch welche alle Prozesse irreversibel sind [59]. Prozesse laufen nur in eine Richtung ab und können nicht umgekehrt werden - es sei denn, die bei dem spontan ablaufenden Prozess entstandene Entropie wird nach außen abgegeben. Die Entropie bleibt bei idealen Prozessen konstant und nimmt bei realen Prozessen proportional zur dissipierten Arbeit zu. Ein offenes System kann Entropie an die Umgebung durch Massen- und Wärmetransport abgeben. Gleichung 33 gibt die Entropieänderung in Abhängigkeit der Wärmeänderung δq , der Änderung der inneren Energie dU und der Temperatur T, sowie des Drucks dp und des Volumens dv an.

$$dS = \frac{\delta q}{T} = \frac{dU + pdv}{T} = \frac{dU - vdp}{T} \quad (33)$$

2.4.2 Realgasverhalten

Wasserstoff weist bei Drücken von bis zu 1000 bar kein Idealgasverhalten mehr auf. Das Realgasverhalten berücksichtigt hingegen die Van-der-Waals-Wechselwirkungen für Moleküle bei hohen Drücken und Temperaturen. Die Ideale-Gas-Zustandsgleichung lässt sich mithilfe des Kompressibilitätsfaktors Z erweitern. Mit der molaren Zahl n und Gas-Konstante R lässt sich die Ideale-Gas-Zustandsgleichung für hohe Drücke wie folgt beschreiben:

$$pV = nRZ(T, p)T \quad (34)$$

2.4.3 Virialgleichung und Van-der-Waals-Gleichung

Die Virialgleichung stellt eine Näherung an reale Gase durch Reihenentwicklung dar [60].

$$\frac{p}{RT} = \frac{B_{1V}(T)}{V_{1m}} + \frac{B_{2V}(T)}{v_m^2} + \dots \quad (35)$$

Wird die Reihenentwicklung nach dem ersten Term abgebrochen, erhält man die ideale Gasgleichung mit $B_{1V} = 1$. B_{2V} ist der zweite Virialkoeffizient, welcher sich aus dem Paarpotential von Teilchen ergibt. Die Van-der-Waals-Gleichung beschreibt reale Gase indem anziehende und abstoßende Kräfte berücksichtigt werden. Mit dem Kohäsionsdruck-Parameter a und dem Kovolumen-Parameter b lautet die Van-der-Waals-Gleichung:

$$p = \frac{nRT}{V - nb} - \frac{n^2a}{V^2} \quad (36)$$

Verbindet man die Virialgleichung und die Van-der-Waals-Gleichung miteinander erhält man die vereinfachte Redlich-Kwong-Gleichung.

2.4.4 Redlich-Kwong-Gleichung

Die Redlich-Kwong-Gleichung ist eine kubische Gleichung, welche basierend auf ihrer Einfachheit, aufgrund von zwei Parametern, zur Beschreibung von Realgasverhalten genutzt werden kann [60]. Sie stellt eine Erweiterung der Van-der-Waals-Gleichung dar. Mithilfe der Bezugnahme von gasspezifischen kritischen Druck p_c und der gasspezifischen kritischen Temperatur T_c in den Gleichungen für den Kohäsionsdruck-Parameter a und den Kovolumen-Parameter b ergeben sich akkurate Werte zur Beschreibung des Realgasverhaltens des Wasserstoffs mit einer Abweichung von 1,6 % für den Druck [7].

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{\sqrt{T}v(v + b)} \quad (37)$$

Die Gleichungen für a und b lauten:

$$a = \frac{1}{9(\sqrt{2}^3 - 1)} \frac{R^2 T_c^2 \cdot 5}{P_c} \quad (38)$$

$$b = \frac{\sqrt{2}^3 - 1}{3} \frac{RT_c}{P_c} \quad (39)$$

2.4.5 Der Joule-Thomson-Effekt

Verringert sich der Druck eines realen Gases, erfolgt eine Temperaturänderung [7]. Wenn ein Gas entspannt wird, nimmt die mittlere kinetische Energie der Teilchen ab indem die Teilchen über ein größeres Volumen verteilt sind. Verteilen sich die Teilchen eines druckgeminderten Gases auf ein größeres Volumen kommt es zu elastischen Stößen. Hierdurch steigt die mittlere kinetische Energie und damit die

Temperatur des Gases. Ob der Effekt der zur Temperaturerhöhung führt oder der Effekt der Temperaturverminderung größer ist lässt sich am Vorzeichen des Joule-Thomson-Koeffizienten μ bestimmen.

$$\mu = -\frac{1}{c_p} \left[v - T \left(\frac{\delta v}{\delta T} \right)_p \right] \quad (40)$$

2.4.6 Massen- und Energiebilanzen im Speichertank

Betrachtet man die Prozesse im Speichertank als quasistationär dadurch, dass sie sich nur langsam vom thermodynamischen Gleichgewicht entfernen, kann jeder Zustand mit einer eigenen Zustandsgleichung ausgedrückt werden [61]. Diese Methode stellt eine Näherung an gekoppelte Differentialgleichungen dar. Die Gleichung für einen Massenaustausch $\frac{dm}{dt}$ eines offenen Systems, jeweils mit den Massen m_1 und m_2 , lässt sich wie folgt berechnen:

$$m_2 = m_1 + \frac{dm}{dt} = m_1 + \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad (41)$$

Wobei \dot{m}_{in} der zuströmende Massenstrom ist und \dot{m}_{out} der austretende. Die Gleichung für die Energiebilanz, wenn ein Massenaustausch stattfindet, lautet wie folgt:

$$\frac{d}{dt}(mu) = \dot{m}_{in}h_{in} - \dot{m}_{in}h_{out} + \dot{Q} \quad (42)$$

\dot{Q} gibt den Wärmeaustausch mit der Umgebung an. Unter der Annahme, dass die Wanddicke vernachlässigt werden kann, lässt sich der Wärmeaustausch mit dem Wärmeleitkoeffizienten des Fluids α_f und der Gesamtoberfläche des Systems A_{sys} wie folgt ausdrücken:

$$\dot{Q} = \alpha_f A_{sys} (T_f - T_{Umgebung}) \quad (43)$$

Der Massenstrom zwischen mindestens zwei Speicherreservoirs ist abhängig von der Druckdifferenz, den thermodynamischen Eigenschaften des Mediums und des geschalteten Systems [7]. Wasserstoff ist idealisiert nicht komprimierbar. Aufgrund des Druckunterschieds zwischen den beiden Speicherreservoirs erfolgt ein Massenstrom in die Richtung des geringeren Drucks:

$$\dot{m} = C \sqrt{2\rho(p_1 - P - 2)} \quad (44)$$

Gleichung 44 hat einen Fehler von $\pm 7,3\%$ [7]. Der Koeffizient C fasst bestimmte Eigenschaften des Ventils zusammen, das zwischen den Reservoirs liegt und den Druckausgleich bzw. den Massenstrom kontrolliert. Mit dem Verhältnis der Masse bei einem vollen Tank m_{m_1} zur derzeitigen Masse m_{m_2} , lässt

sich der State of Charge (SOC) [%] wie folgt berechnen:

$$SOC = \frac{m_{m_2}}{m_{m_1}} \quad (45)$$

Aus dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik für ein adiabates, offenes System und mit der Redlich-Kwong-Zustandsgleichung ist in [7] die Gleichung der Temperaturänderung durch einen Massenstrom hergeleitet:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\frac{m_{in}}{m} (h_{in} - u) - \frac{\delta u}{\delta T} \frac{dv}{dt}}{\frac{\delta u}{\delta T}} \quad (46)$$

mit der der zeitlichen Änderung des molaren Volumens $\frac{\delta v}{dt}$ [$\frac{m^3}{mol*s}$], der Änderung der molaren inneren Energie mit der Temperatur $\frac{\delta u}{\delta T}$ [$\frac{J}{mol*K}$] und dem molaren Volumen $\frac{\delta u}{dv}$ [$\frac{J}{m^3}$];

$$\frac{\delta v}{dt} = V * M_{H_2} * \frac{m_i n}{m^2} \quad (47)$$

$$\frac{\delta u}{\delta T} = \ln \frac{v}{v+b} * \frac{3a}{4b\sqrt{T}} + c_v \quad (48)$$

$$\frac{\delta u}{dv} = \frac{3a}{2\sqrt{T}} \frac{1}{v(v+b)} \quad (49)$$

Die molare innere Energie $u \frac{J}{mol}$ wird wie in [7] durch folgende Formel beschrieben:

$$u = \frac{\ln v - \ln v + b3a}{1b\sqrt{T}} - \frac{\ln v_{ref} - \ln v_{ref} + b3a}{2b\sqrt{T_{ref}}} + I + u_{ref} \quad (50)$$

v_{ref} , T_{ref} und I beziehen sich auf Referenzwerte [62]

Die spezifischen Wärmekapazitäten c_v und c_p werden mit den Gleichungen 51 und 52 berechnet [7].

$$c_p = \frac{\delta(u + pv)}{\delta T}_p \quad (51)$$

$$c_v = \frac{-3a}{4b\sqrt{T}} \ln \frac{v}{v+b} + c_{v,ideal} \quad (52)$$

$c_{v,ideal}$ ist die ideale spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen. Der Massentrom in ein Reservoir führt zu einer Enthalpieerhöhung. Zugleich findet eine Verdichtung der Masse statt, was wiederum eine Temperaturerhöhung zur Folge hat. Wenn das System nicht adiabat ist, muss der Wärmetransport zwischen Medium und Reservoirwand sowie zwischen Reservoirwand und Umgebung betrachtet werden. Die Wandtemperatur lässt sich mit dem Wärmeübergangskoeffizient α_{gas} , der aktiven Masse des Innen- und Außenmaterials der Oberfläche A_T , $m_{in,w}$, bzw. $m_{out,w}$ und der Wärmekapazität $c_{pin,w}$, bzw.

$c_{pout,w}$ in Abhängigkeit des Drucks berechnen:

$$T_W = \frac{\alpha_{gas} A_T (T_gas - T_w) - \alpha_{air} A_T (T_w - T_{umg})}{m_{in,w} c_{pin,w} + m_{out,w} c_{pout,w}} \quad (53)$$

Die Berechnung der Temperaturänderung im Tank hat eine Genauigkeit von $\pm 0,8\%$ [7].

2.4.7 Verdichtung und Kühlung

Die Arbeit w einer isentropen Verdichtung berechnet sich wie in [7] mit Gleichung 54.

$$w = p_1 v_1 \frac{n}{n-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} - 1 \right] \quad (54)$$

wobei n der polytropische Exponent ist. Die Werte, welche mit der Gleichung berechnet werden, haben einen Fehler von $\pm 0,14\%$ [63].

Die Kühlung eines Massenstroms wird wie folgt berechnet:

$$Q_{cool} = \frac{c_p}{M_{H_2}} (T_{masse} - T_{ziel}) * 10^{-3} \quad (55)$$

Mit Gleichung Q_{cool} [kJ/kg] kann die nötige Kühlleistung für einen Massestrom berechnet werden:

$$q_{cool} = Q_{cool} m_{in} \quad (56)$$

3 Materialien und Methoden

In diesem Abschnitt werden die verschiedenen Materialien und Methoden vorgestellt, die für die Modellbildung des Betriebs einer Wasserstofftankstelle essenziell sind. Aufbauend werden die einzelnen Methoden in Python implementiert und in das Gesamtmodell simuliert.

3.1 Modell

Um den Betrieb der Wasserstofftankstelle abzubilden wird das Modell in drei miteinander verbundene Submodelle unterteilt: das Modell des Fahrzeugs, das des Betankungsprozesses und das Modell der Tankstelle sind jeweils eigene Modelle. Diese werden miteinander verbunden, um für den ländlichen Individualverkehr den Betrieb einer Wasserstofftankstelle simulieren zu können.

3.1.1 Betankung

Vor dem Betankungsprozess wird geprüft, wie viel Masse Wasserstoff sich noch im Fahrzeug befindet und wie hoch demnach der Druck im Fahrzeug ist. Auf der Basis der internationalen Bestimmungen SAE J2601 zu Wasserstoffbetankungen (siehe Abbildung 1) wird der Enddruck und der konstante Druck des Tankstroms (APRR für Average Pressure Ramp Rate) vorgegeben, damit es zu keinem Sicherheitsrisiko kommt.

Top-Off Fueling Parameters																		
	APRR [MPa/ min]	Target Pressure P_{target} [MPa]	Target Pressure Top-Off [MPa]	Top- Off APRR [MPa/ min]	Target Pressure, P_{target} [MPa]													
					Initial Tank Pressure, P_o [MPa]													
					0.5-5 (no interpolation)	0.5	2	5	10	15	20	30	40	50	60	70	>70	
Ambient Temperature, T_{amb} [°C]	>50	No Fueling				No Fueling												
	50	5.1	78.2	87.5	2.6		80.8	85.7	86.8	86.5	85.8	85.0	84.0	82.7	81.1			
	45	8.1	76.3	87.5	4.0		81.1	86.9	86.6	86.2	85.3	84.3	83.0	81.6	79.7			
	40	11.5	73.2	87.5	5.4		81.1	86.9	86.4	85.9	84.7	83.5	82.0	80.3	78.3			
	35	12.4	72.9	87.5	5.6	Top-Off Fueling	81.2	86.9	86.4	85.9	84.7	83.4	81.9	80.2	78.2			
	30	15.3	70.6	87.5	6.6	81.0	86.8	86.3	85.6	84.3	82.8	81.2	79.4	77.2				
	25	18.5	69.0	87.4	7.2	81.0	86.8	86.1	85.4	83.8	82.2	80.4	78.5	76.1		No Fueling		
	20	21.8	67.9	87.4	7.6		81.2	86.8	85.9	85.1	83.3	81.5	79.6	77.5	75.1			
	10	28.0	66.3	87.4	9.0		81.2	86.8	85.7	84.7	82.6	80.5	78.3	76.1	73.4			
	0	28.5					78.4	84.6	86.8	85.6	84.4	83.1	80.6	78.1	75.6	73.1		
	-10	28.5					82.2	87.1	86.4	85.2	84.0	82.8	80.4	77.9	75.4	72.9		
	-20	28.5				No Top-Off Fueling	86.0	86.8	86.1	84.9	83.7	82.4	80.0	77.6	75.1	72.7	No Fueling	
	-30	28.5					86.8	86.5	85.7	84.5	83.3	82.1	79.6	77.2	74.9	72.5		
-40	28.5					86.5	86.2	85.4	84.2	83.0	81.8	79.3	77.0	74.6	72.3			
<-40						No Fueling												

Abbildung 1: Tabelle für eine T40 Wasserstoffbetankung gemäß SAE J2601 für eine Kapazität von 4 - 7 kg. Hervorgehoben sind die Parameter für eine Betankung bei 25 °C Außentemperatur und einem Anfangsfahrzeugtankdruck von 5 MPa [64][65].

Wie in Abbildung 2 gezeigt wird ein Fahrzeug aus dem Hochdruckbündel bestehend aus drei Tankbündeln unterschiedlichen Drucks betankt(Kaskadenbetankung), da dies die Kompressionsarbeit verringert [7]. Sind die Parameter Enddruck (Target Pressure) und APRR bestimmt, erfolgt ein Zustrom aus dem Druckbündel niedrigsten Drucks solange der Druck des liefernden Tanks oberhalb des Drucks des Fahrzeugs ist. T40 Betankung bedeutet, dass der Wasserstoff wie in Abbildung 3 veranschaulicht auf -40 °C gekühlt wird bevor er in den Fahrzeugtank strömt. Grund dafür ist der Joule-Thomson-Effekt (JTE)(siehe 2.3.5). Die notwendige Energie für die Kühlung wird mit Gleichung 56 berechnet. Der Massenstrom, welcher sich nach der Druckdifferenz des APRR richtet, wird mit Gleichung 44 berechnet. Durch Änderung der Masse kommt es wiederum zu einer Temperatur- und Druckerhöhung, welche mit der Redlich-Kwong-Gleichung und der Gleichung 46 berechnet wird. Über die Tankwand findet ein Wärmeaustausch mit der Umgebung statt. Dieser wird durch die Gleichung 53 ermittelt. Die Berechnung der Temperatur durch

die verschiedenen Änderungen im System hat eine mittlere Genauigkeit von 0,8 %, die Berechnung des Massenstroms eine Genauigkeit von 7,3 % und die des Drucks eine Genauigkeit von 1,6 %. Die Fehler sind abhängig von der Außentemperatur, da jedoch nicht ausreichend Daten vorhanden waren um sie über ein breites Temperaturspektrum zu definieren, wird ein konstanter durchschnittlicher Wert genommen, welcher sich aus den ermittelten Werten errechnet [7].

Zeitgleich mit der Befüllung des Fahrzeugtanks wird der Austritt von Masse aus dem Kaskadenspeichersystem mit den Gleichungen 39 und 40 berechnet, sowie der Berechnung des JTE.

Hat das Fahrzeug den Zieldruck (siehe Abbildung 1) erreicht, wird der Top-Off-Prozess eingeleitet, um einen zu starken Temperaturanstieg zu verhindern. Die Betankung wird beendet wenn der Fahrzeugtankdruck dem Zieldruck des Top-Off-Prozesses entspricht oder ein SOC von 100 % erreicht ist.

3.1.2 Fahrzeug

Die einzelnen Komponenten eines Wasserstoffautos, wie in Abbildung 2 (bis auf das Getriebe) dargestellt, werden mit den Gleichungen aus dem Theorie Kapitel 2.3 modelliert, um so den realen Verbrauch zu berechnen. Der Gesamtenergieverbrauch aller Komponenten wird mit Gleichung 29 (2.3.6) berechnet. Die Masse an Wasserstoff, welche für diesen Energiebedarf (in Bezug zu einer bestimmten Route - siehe das Modell zur Tankstelle) notwendig ist, wird mit Gleichung 28 berechnet. Der Fehler für die Masse ergibt sich mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung, den Fehlern für die Leistung des Brennstoffzellenstackels, seiner Effizienz und der für die Ladung der Batterie. Die anderen Fehler werden jeweils auf 1 % geschätzt. Die resultierende Gesamtabweichung der Wasserstoffmasse beträgt 2,9 %.

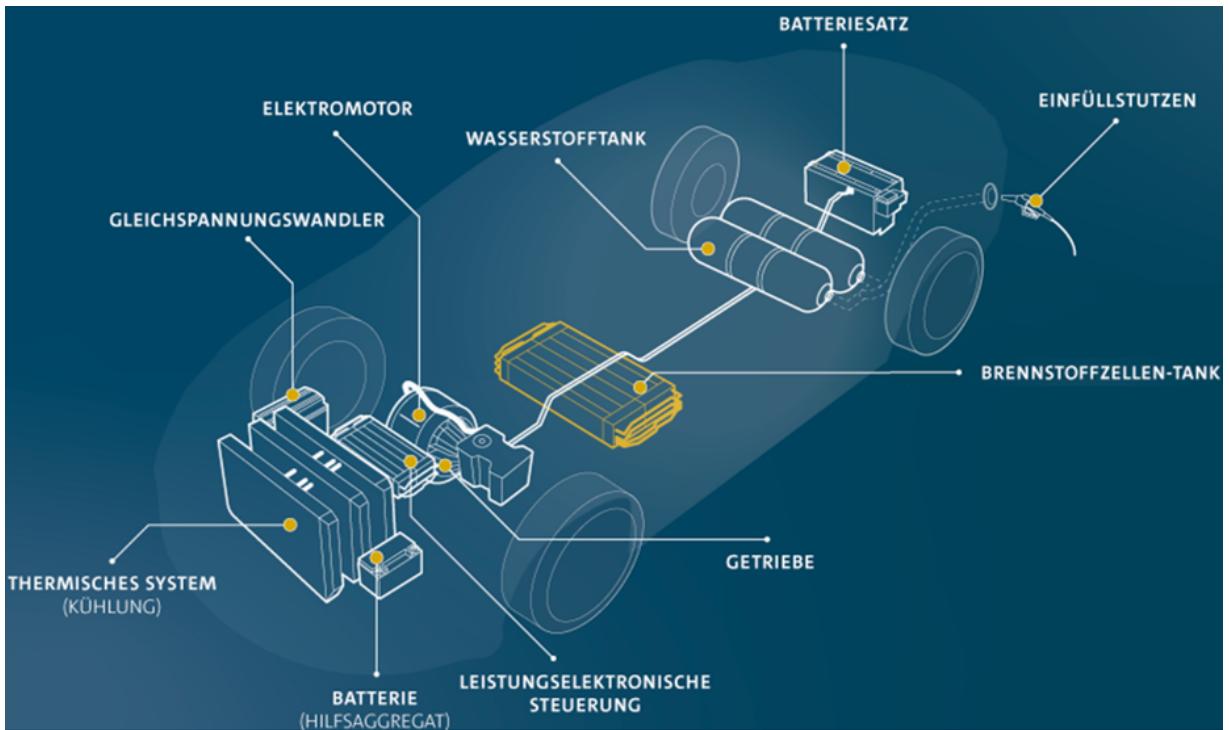


Abbildung 2: Für den wasserstoffbasierten Antrieb zugehörige Komponenten und ihre Verteilung im Fahrzeug. Unter der Komponente thermisches System sind sowohl Pumpe als auch Luftkompressor impliziert. Der Brennstoffzellenstapel ist unter dem Begriff der Abbildung Brennstoffzellen-Tank subsumiert. [67]

3.1.3 Tankstelle

Das Modell der Tankstelle vermittelt zwischen dem Modell der Fahrzeuge und dem der Betankung (siehe Abbildung 3) indem es den Bedarf an Wasserstoff für den Individualverkehr in Abhängigkeit der Zeit prüft und falls ein solcher besteht, die nötige Menge an Wasserstoff bereitstellt. Verfügt die Wasserstofftankstelle über mehrere Zapfsäulen, wird jene angefahren, welche bisher am wenigsten Zeit zum Betanken und Komprimieren benötigte. Wird die Zeit von einer Stunde für eine Zapfsäule überschritten ist die Tankstelle in dieser Dimensionierung nicht fähig den Treibstoffbedarf des Verkehrs zu decken.

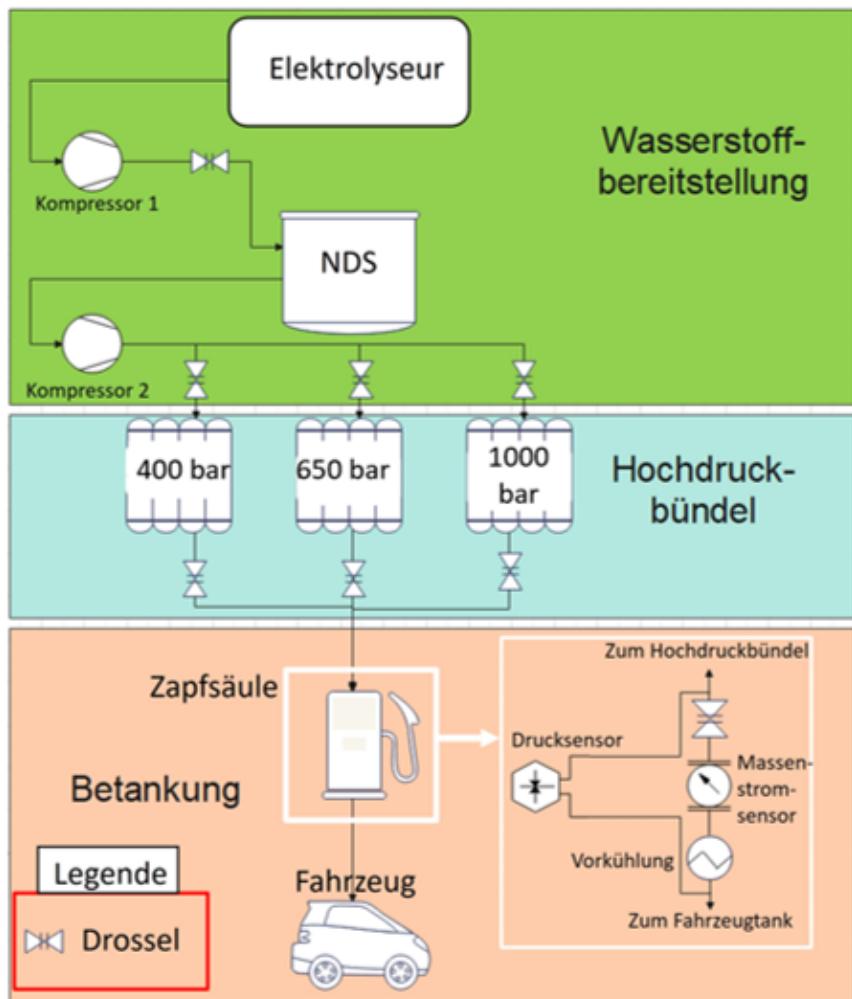


Abbildung 3: Tankstellenmodell

Die Fahrten der Fahrzeuge jeder betreffenden Regionen bestehen aus einer Kombination aus WLTC-Zyklen (Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle) [66], wie in Abbildung 4 - 6 gezeigt und in Tabelle 1 zusammengefasst. Die Gesamtfahrtstrecke wird mit Gleichung 3 berechnet und stellt sich aus den Werten des MiD17 dar [43]. Die erstellten Routen werden den Durchschnittsgeschwindigkeiten angepasst, welche sich aus der durchschnittlich gefahrenen Strecke pro Fahrt und Dauer ergibt. Die zeitliche Verteilung über den Tag wird in Stunden umgerechnet. Die Daten der Bevölkerungsdichte der einzelnen Regionen werden dem Statistischen Bundesamt entnommen. Die gefahrenen Strecken pro Fahrzeug werden gaußverteilt, gewichtet nach den Wahrscheinlichkeiten der Stunden des Tages zu denen gefahren wird. Verschiedene Fahrzeuge jeder Region haben unterschiedlich viele Fahrten zu unterschiedlichen

Uhrzeiten, sodass gemittelt die Durchschnittswerte des MiD17 herauskommen. Getankt wird ab einem Grenzwert des SOC, welcher über die Gesamtzahl an Fahrzeugen gaußverteilt ist. Wenn dieser Wert unterschritten wird, tankt das betreffende Fahrzeug, bevor es eine weitere Fahrt antreten kann. Die Wasserstoffproduktion erfolgt vor Ort durch einen Elektrolyseur um die Gesamtarbeit zur Bereitstellung eines Kilogramm Wasserstoffs zu analysieren.

Die Variation der Umgebungstemperatur wird realisiert durch die Testreferenzjahre des Deutschen Wetter Dienstes. Zur Stadt Eisenach (zentrale Lage), wird aus dem Testreferenzjahr mit dem kältesten Winter und dem mit dem wärmsten Sommer jeweils der maximale, bzw. minimalste Tag gewählt. Für Zwischenwerte werden aus dem normalen Testreferenzjahr ein Tag mit einer Durchschnittstemperatur von 0 °C, einer mit 9,5 °C und einer mit 17,5 °C gewählt [76].

	Distanz [m]	Durchschnittsgeschwindigkeit [m/s]
Zentrale Stadt	20671.4	10.7
Mittelstadt	23901.1	10.8
Kleinstadt	27627.0	12.7

Tabelle 1: Distanz und Geschwindigkeit der verschiedenen Routen

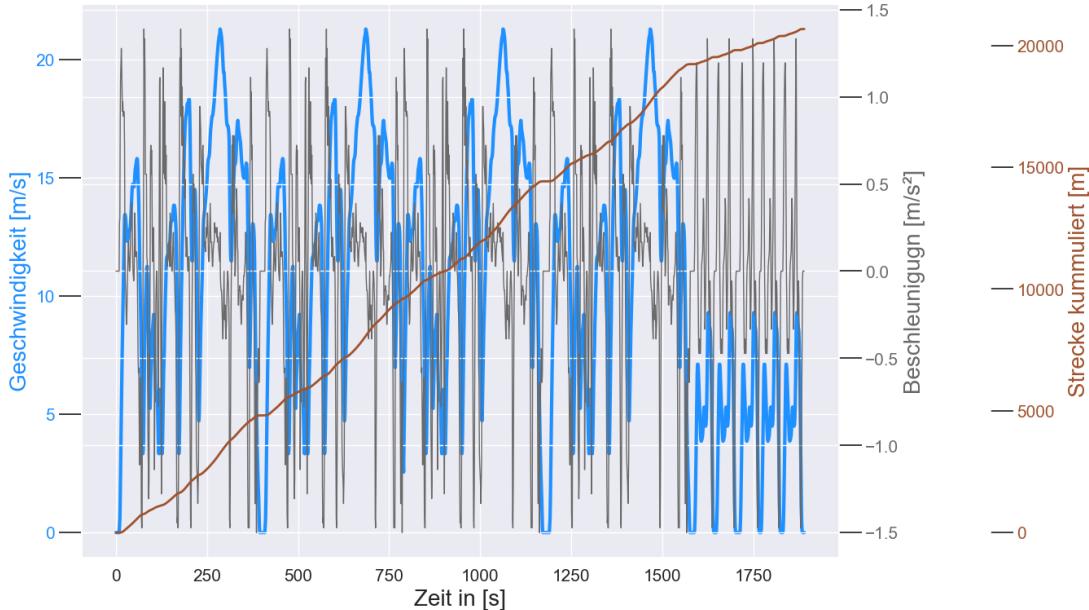


Abbildung 4: Route für Fahrzeuge der zentralen Stadt

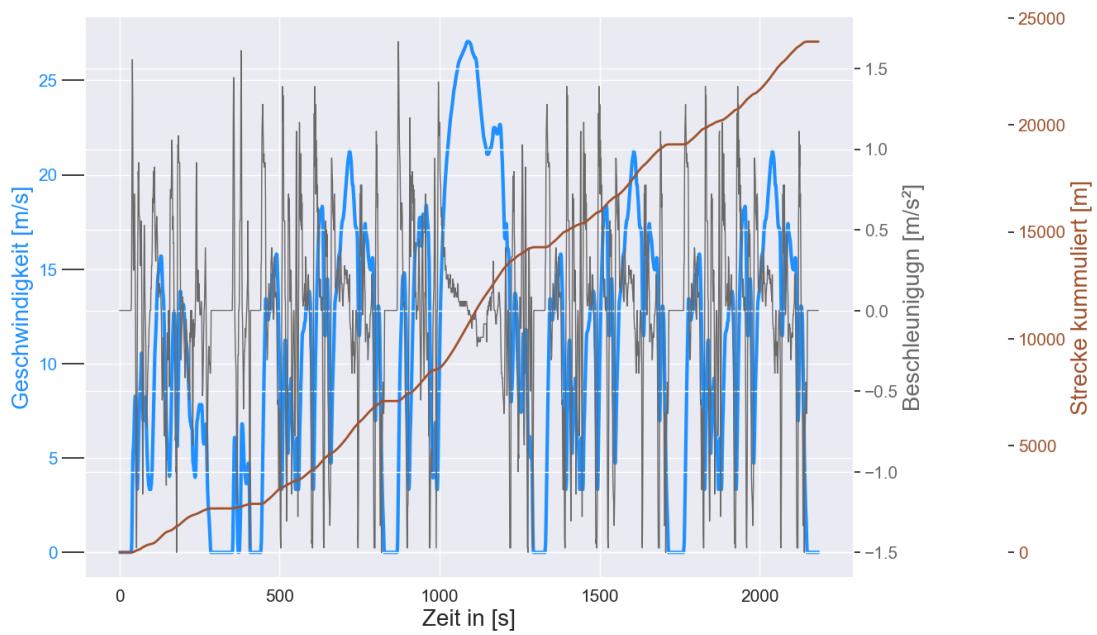


Abbildung 5: Route für Fahrzeuge der mittleren Stadt

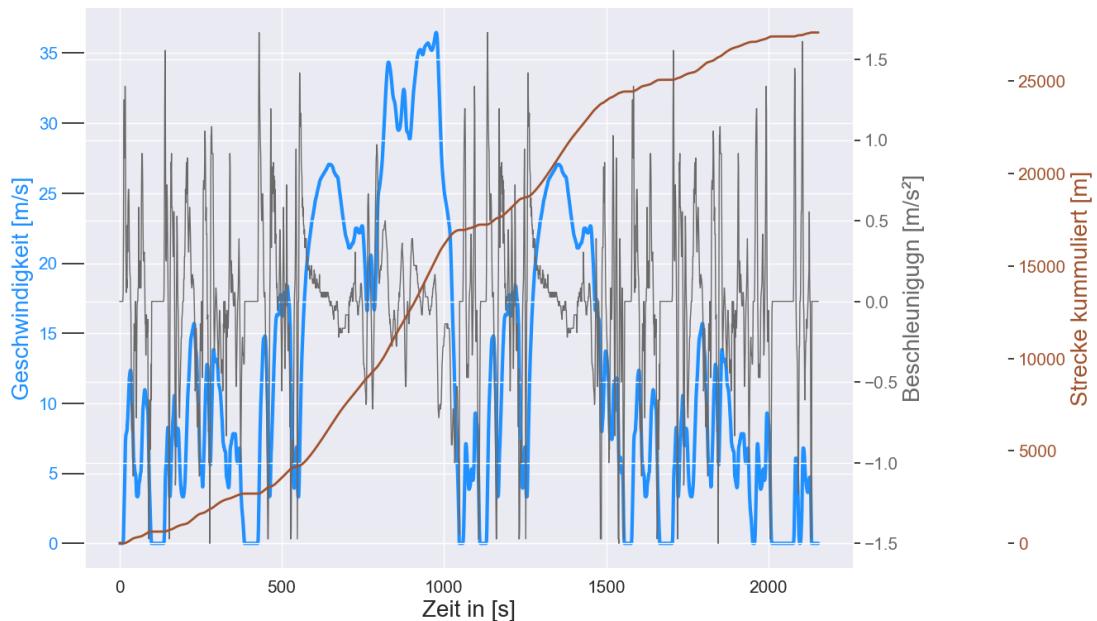


Abbildung 6: Route für Fahrzeuge der zentralen Stadt

3.2 Implementierung

Die Modelle werden in Python übertragen und in dem Programm Pycharm und JupyterNotebook programmiert. Es wird mit den Bibliotheken Numpy, Pandas, Matplotlib, Seaborn und MatlabEngine gearbeitet. Die Klassen werden entsprechend den Fahrzeug-, Betankungs- und Verkehrskomponenten festgelegt (siehe UML- Diagramm im Appendix). Die Fahrzeug-, Verkehrs- und Betankungsklassen laufen in der Klasse der Tankstelle zusammen, welche Werte wie Tankgröße, SOC, oder Fahrprofil ermittelt und zurückgibt.

3.3 Simulation

Zur Analyse des Betriebs einer Wasserstofftankstelle werden vorangestellt einzelne Simulationen durchgeführt. In der Simulation des Fahrzeugs wird der Toyota Mirai I abgebildet, da die Datengrundlage dieses Fahrzeugs detailliert beschrieben ist. (Abbildung im Appendix) Der Verbrauch des Toyota Mirai I für die drei verschiedenen Routen wird anschließend zur Simulation des Verkehrs verwendet. Die Startmassen aller Fahrzeuge ist zwischen 15 und 100 SOC gaußverteilt, die Betankung ist zwischen 15 und 50 SOC gaußverteilt. Für die Simulation der Betankung werden die Parameter für die Tanks der vorangegangenen Masterarbeit [7] entnommen. In der Tankstellensimulation werden für den Verkehr verschiedene Umkreise gewählt, womit die Anzahl an Fahrzeugen und Betankungen steigt. Anschließend wird die Anzahl an Zapfsäulen und Kompressoren sukzessive erhöht. Dies soll Aufschluss zur Dimensionierung einer Tankstelle für verschiedene Wasserstoffbedarfszenarien der drei Regionen geben. Wie im Modell der Tankstelle gezeigt wird jede Dimensionierung bei verschiedenen Umgebungstemperaturen simuliert, um die Arbeit und die möglichen Tankstellenbetriebe über das Jahr einschätzen zu können.

Annahmen:

- Elektrolyseur und Fahrzeug können unabhängig von der Außentemperatur simuliert werden
- An den Ventilen, in den Rohren und bei der Vorkühlung gibt es keinen Druckverlust durch Reibung
- Die Flüchtigkeit von Wasserstoff für einen Tag ist vernachlässigbar
- Der Übergang von einer Region in eine andere bei steigendendem Bedarfsumkreis kann vernachlässigt werden
- Es können nur so lange Fahrzeuge betankt werden und ein Tankstellenbetrieb gewährleistet werden, wie die maximale Summe der Zeit von Kompression und Betankung einer Zapfsäule und des Hochdruckbündels 60min nicht überschreitet
- Der Bedarf an Wasser für den Elektrolyseur kann vernachlässigt werden

- Der Zustand von Wasserstoff in den Tanks kann als quasi-stationär angenommen werden. Daraus folgt, dass auch der Wärmeaustausch mit der Umgebung überall gleich stattfindet
- Der gesamte motorisierte Individualverkehr (ausgenommen Zweiräder) fährt mit Wasserstofftechnologie

4 Resultate

4.1 Fahrzeug

Die WLTC-Routen (Worldwide harmonized Light Duty Test Cycle) wurden an jedem Punkt gestreut, wie in Abbildung 4 gezeigt, um individuelle Fahrten zu generieren. Die WLTC-Routen sind bereits generierte und verifizierte Fahrten um den Verbrauch zu messen, daher wurde sich gegen eine Streuung entschieden. Zudem würde die Rechenzeit für die Simulation jeder einzelnen gefahrener Strecke schnell zunehmen, was einen limitierenden Faktor darstellte.

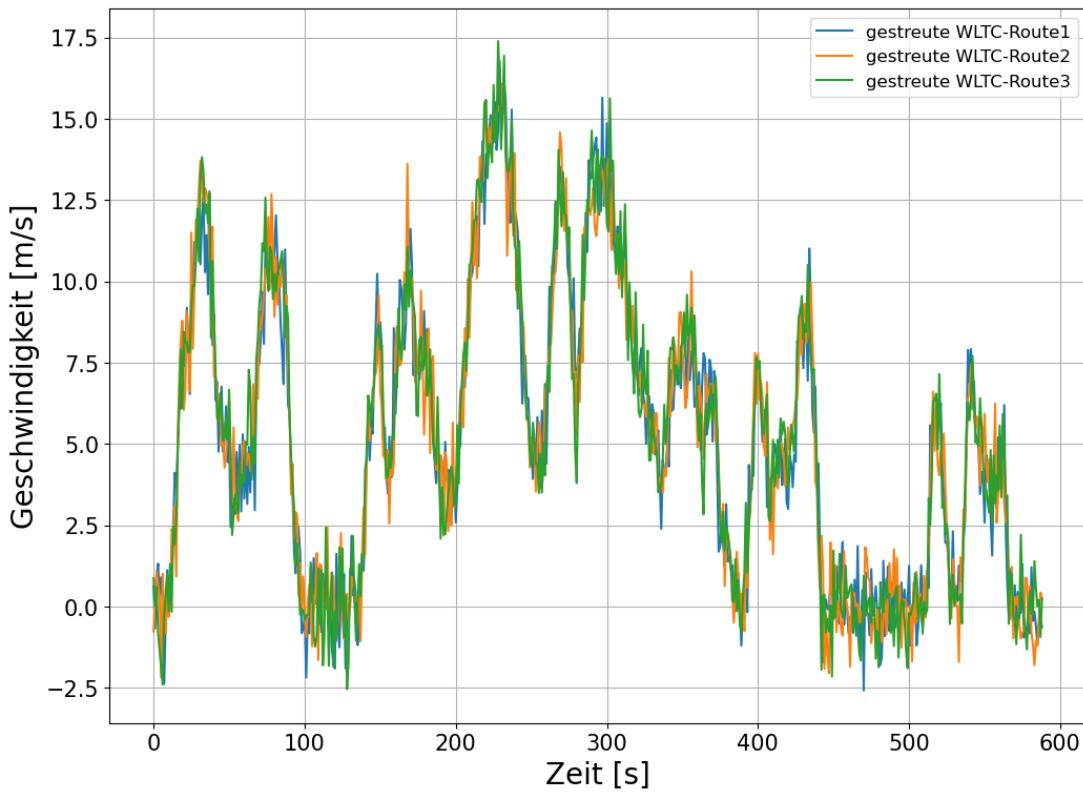


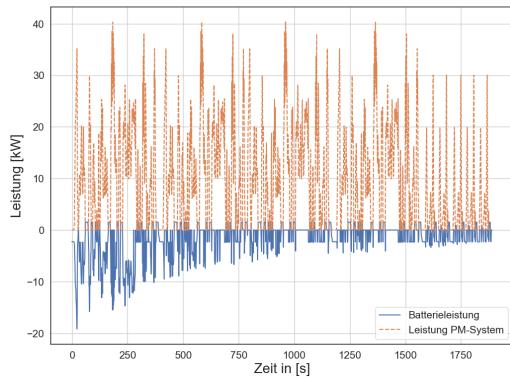
Abbildung 7: Generierung von Variationen der WLTC-Routen

Die Leistung von Batterie und Brennstoffzellensysteme für die drei Routenprofile ist in der Abbildungen 8 gezeigt. Die Batterie ist zur Übersicht auf der x-Achse gespiegelt. Ihre Leistung nimmt mit der Zeit ab. Die Leistung des Brennstoffzellensystems variiert stark mit dem Energiebedarf zur Fortbewegung. Betrachtet man einzelne Zeitabschnitte (Abbildung 9), die im Zusammenhang der nötigen Bewegungsenergie

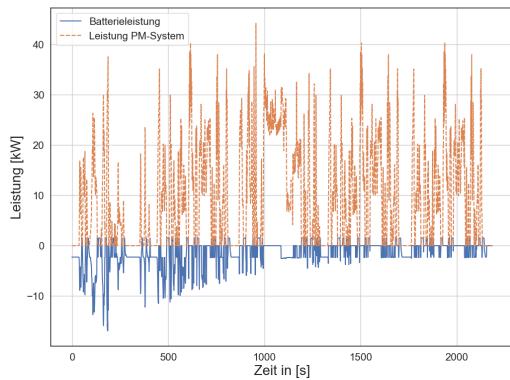
	zentrale Stadt	Mittelstadt	Kleinstadt
Motorleistung [Wh]	4204.65	4779.92	5882.91
Rekuperationsleistung [kW]	142.20	147.71	130.59
Batterieleistung [Wh]	1314.40	1314.40	1319.61
PEMFC-Systemleistung [Wh]	6137.41	6875.90	8441.82
Masse Wasserstoff [kg]	0.156 ± 0.005	0.175 ± 0.005	0.214 ± 0.006
Masse pro 100 km [kg/100 km]	0.754 ± 0.022	0.730 ± 0.021	0.776 ± 0.023

Tabelle 2: Leistungen der verschiedenen Komponenten auf den Regionsrouten

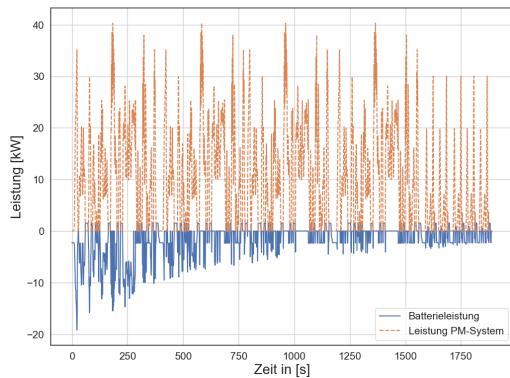
und der Beschleunigung stehen, fällt auf, dass Fahrleistung und Beschleunigung niedriger sind als die Leistung des Brennstoffzellensystems sind. Ist die Beschleunigung negativ wird die Batterie geladen, ist sie positiv, entlädt die Batterie sich.



(a) Batterieleistung und Brennstoffzellensystemleistung für die WLTC-Route der zentralen Stadt

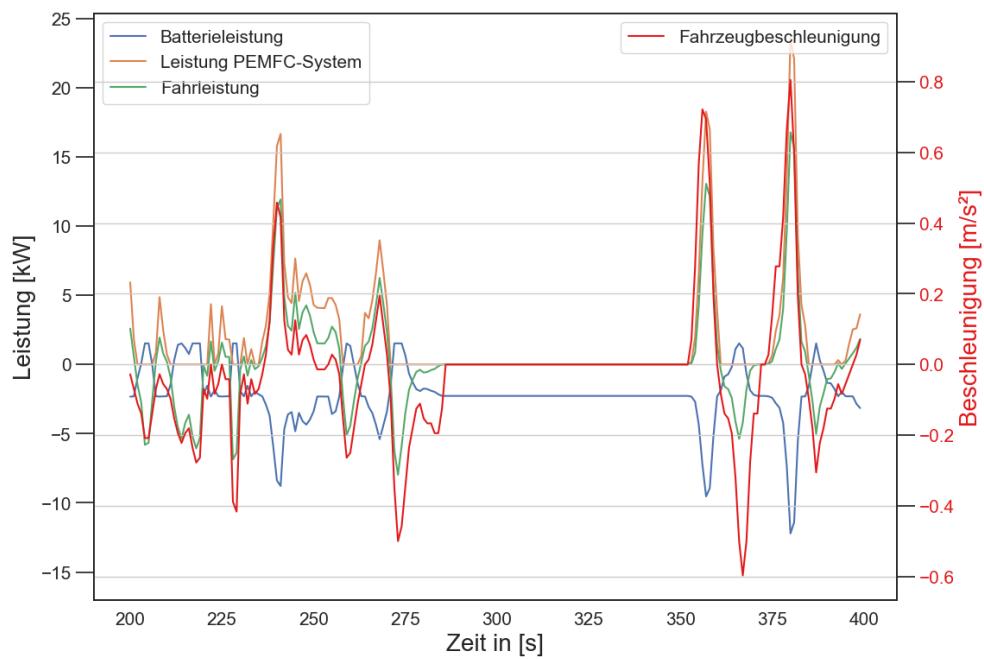


(b) Batterieleistung und Brennstoffzellensystemleistung für die WLTC-Route der mittleren Stadt

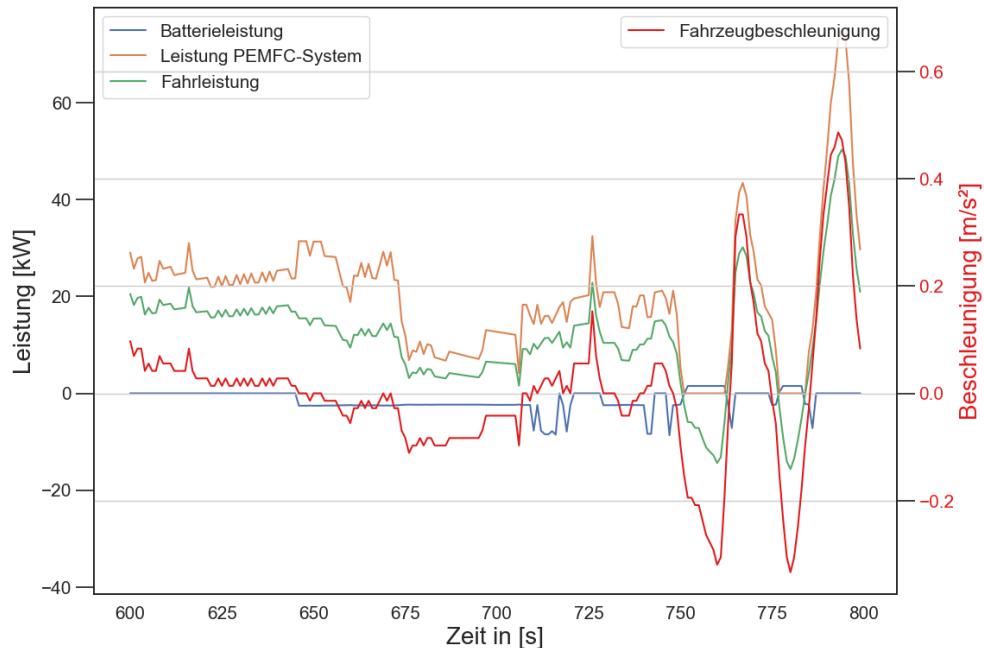


(c) Batterieleistung und Brennstoffzellensystemleistung für die WLTC-Route der kleinen Stadt

Abbildung 8: Batterieleistung und Brennstoffzellensystemleistung für drei verschiedenen Routen



(a) Batterie-, Brennstoffzellensystem-, Fahrleistung und Beschleunigung für einen Zeitabschnitt der WLTC-Route der mittleren Stadt



(b) Batterie-, Brennstoffzellensystem-, Fahrleistung und Beschleunigung für einen Zeitabschnitt der WLTC-Route der kleinen Stadt

Abbildung 9: Zusammenwirken von Batterie-, Brennstoffzellensystem- und Fahrleistung mit der Beschleunigung

4.2 Verkehr

In den Abbildung 10 ist die Massenverteilung über die Fahrzeuge in der zentralen Stadt bei einem Umkreis von 1,5 km vor und nach einem Tag Fahrt einschließlich Tankbefüllung abgebildet. Die durchschnittliche Masse ist um 0,002 kg höher als am Vortag. Es wird in allen drei Regionen zu über 90 % zwischen 5 Uhr morgens und 22 Uhr abends gefahren und getankt (siehe Abbildung 11).

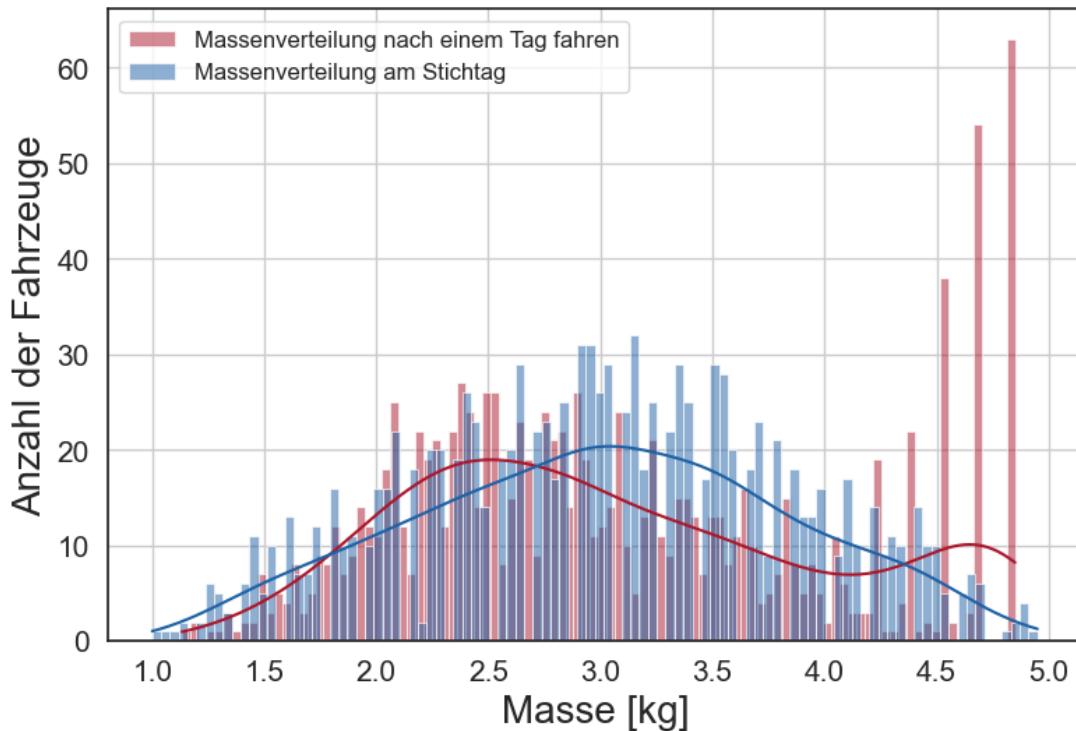
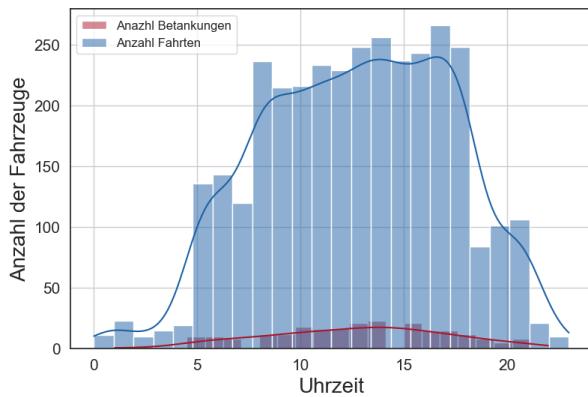
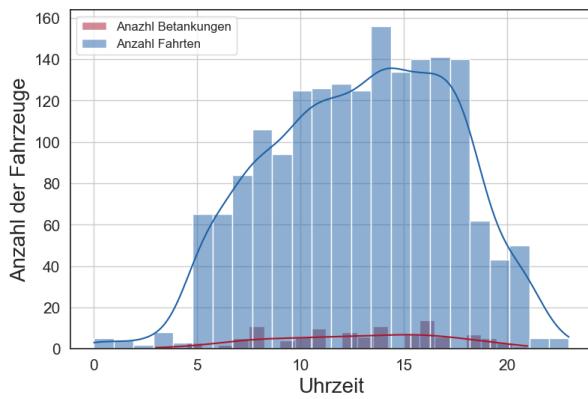


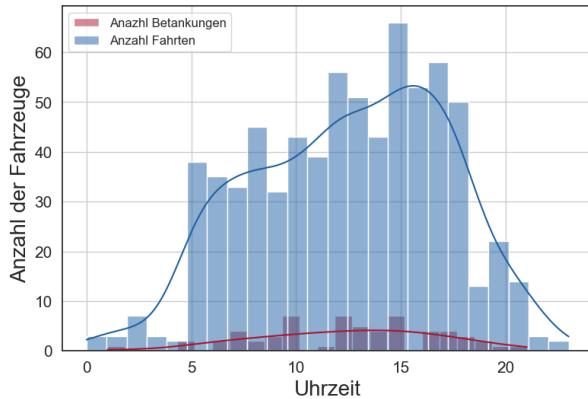
Abbildung 10: Massenverteilung vor und nach einem Tag fahren und tanken für die zentrale Stadt bei einem Umkreis von 1,5 km



(a) Zentrale Stadt



(b) Mittlere Stadt

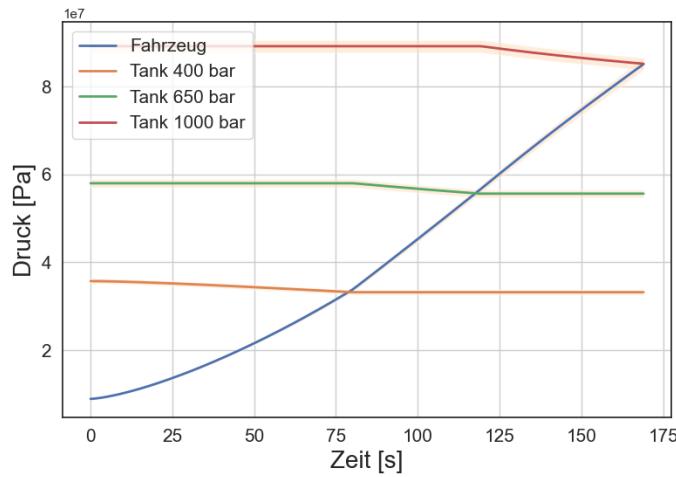


(c) Kleine Stadt

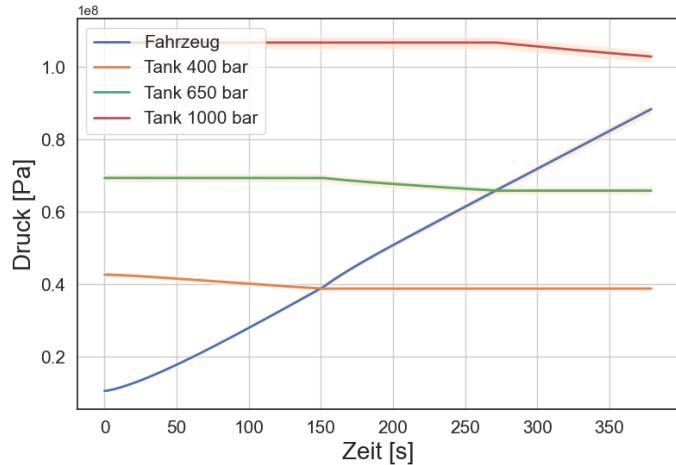
Abbildung 11: Uhrzeiten des Fahrens und Tankens für verschiedene Regionen bei einem Umkreis von 1,5 km

4.3 Betankung

Der Betankungsprozess eines Fahrzeugs bei unterschiedlichen Temperaturen mit der Anfangsmasse 1 kg ist in den Abbildungen 12 bis 15 abgebildet. Die drei unterschiedlichen Tankbündel betanken in der Reihenfolge steigenden Drucks das Fahrzeug.

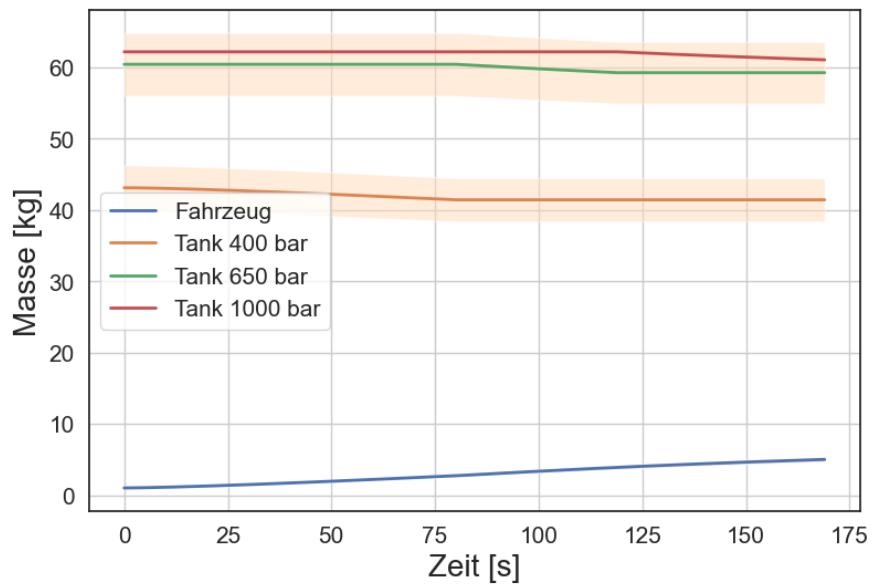


(a) Umgebungstemperatur von -15 °C

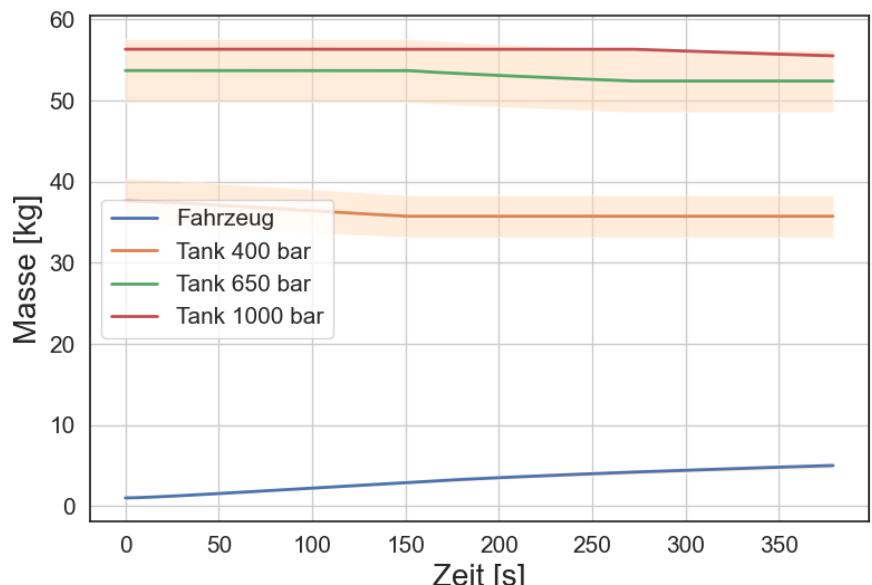


(b) Umgebungstemperatur von 33 °C

Abbildung 12: Druckverlauf von Fahrzeug- und Hochdruckbündeltanks bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen

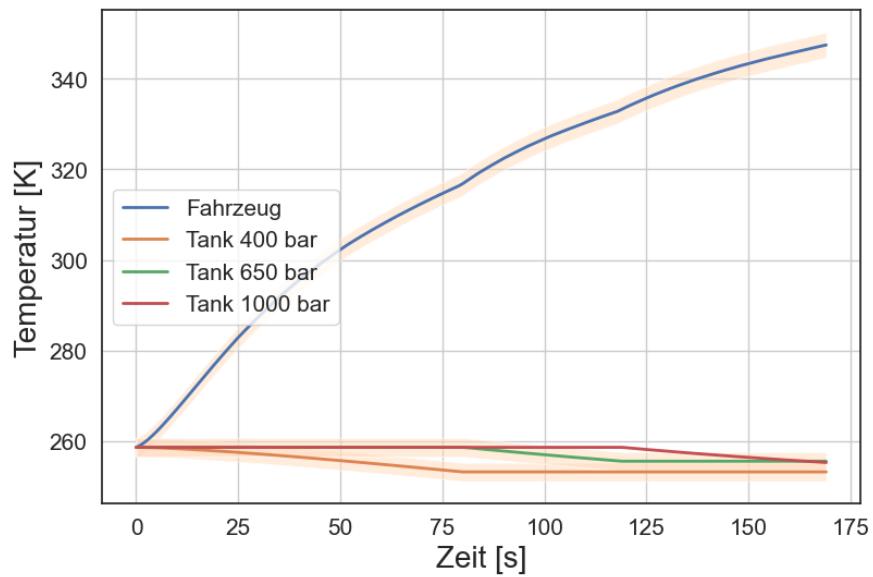


(a) Umgebungstemperatur von -15°C

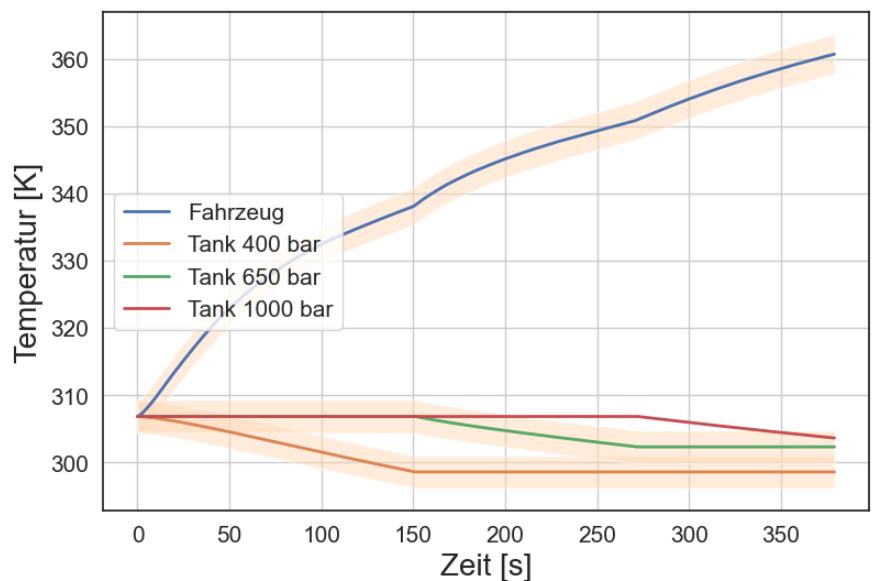


(b) Umgebungstemperatur von 33°C

Abbildung 13: Massenveränderung im Fahrzeug- und den Hochdruckbündeltanks bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen

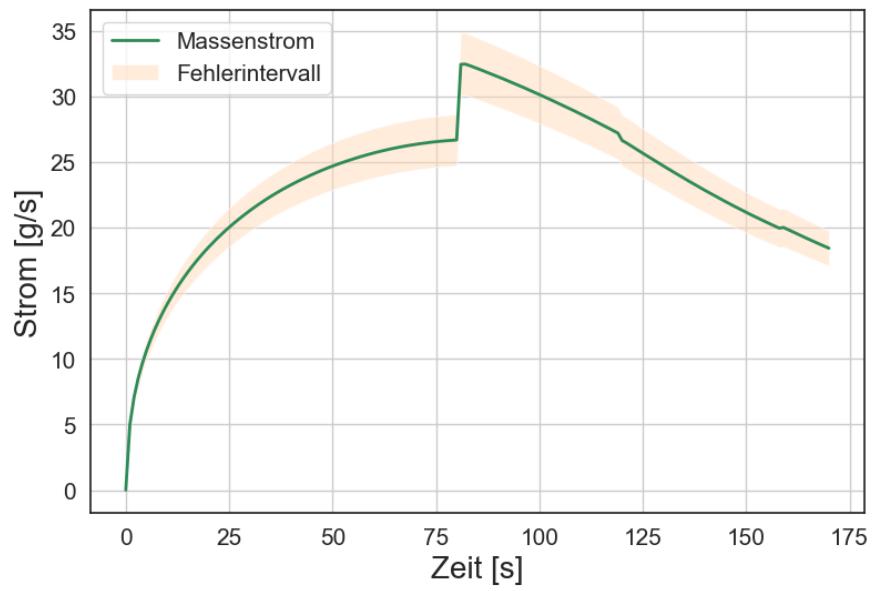


(a) Umgebungstemperatur von -15 °C

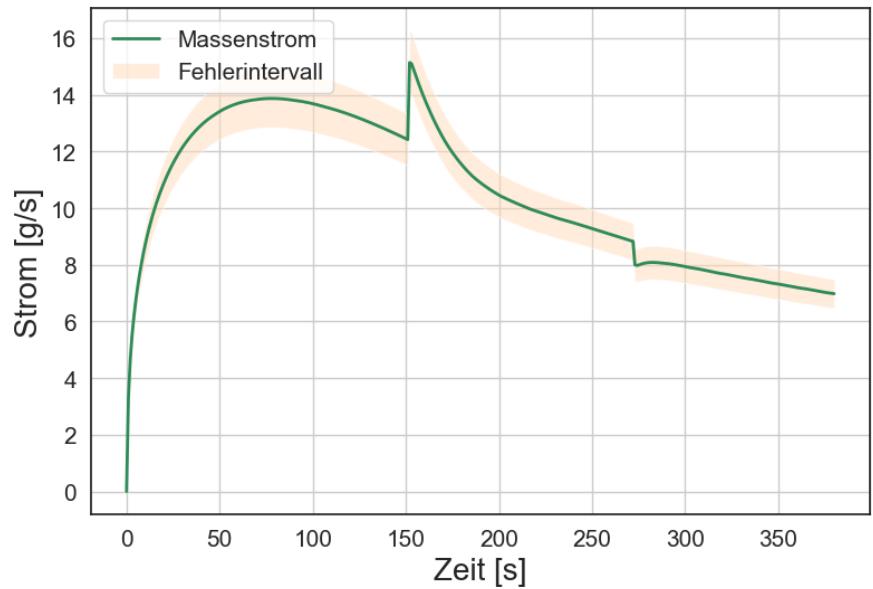


(b) Umgebungstemperatur von 33 °C

Abbildung 14: Temperaturänderung im Fahrzeug- und den Hochdruckbündeltanks bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen



(a) Umgebungstemperatur von -15 °C



(b) Umgebungstemperatur von 33 °C

Abbildung 15: Temperaturänderung im Fahrzeug- und den Hochdruckbündeltanks bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen

Außentemperatur [°C]	Masse [kg]	Betankungsdauer [s]	Kühlleistung [kW]
-14.5	2	103	791.5
0.1	2	104	1267.0
11.5	2	106	1634.0
19.4	2	132	1890.6
-14.5	4	170	1467.5
0.1	4	171	2372.6
11.5	4	174	3073.7
19.4	4	219	3563.6
33.7	2	226	2344.3
33.7	4	380	4447.2

Tabelle 3: Betankungen unterschiedlicher Startmassen bei unterschiedlichen Außentemperaturen. (sortiert nach der betankungsdauer)

4.4 Tankstelle

In den Abbildungen 16 bis 18 ist für einen Datenpunkt der Abbildungen 19 und 20 die Druck-, Temperatur und Massenentwicklungen über die Zeit abgebildet. Die Minima und Maxima kommen durch die Betankungen von Fahrzeugen und das erneute Auffüllen durch den Kompressor zustande. In der Tabelle 4 sind für die Kleinstadt bei einem Umkreis von 1,5 km Eckdaten und Ergebnisse dieses Tankstellenszenarios angegeben. Die Abbildungen 19 und 20 zeigen den Zusammenhang zwischen dem Radius des Bedarfgebiets, der Umgebungstemperatur und den benötigten Zapfsäulen, um eine Betankung zu gewährleisten. Die Temperaturrentwicklung der Tanks ist nur minimal von der Außentemperatur abhängig. Die Temperaturveränderungen kommen durch ein- und austretende Massenströme und den Joule-Thomson-Effekt zustande.

Zapfsäulen	2
Mittlere Außentemperatur	9.4
Fahrzeuge unterwegs	233
Betankungen	40
Längste Betankungen um	19
Dauer gesamt[min]	26.3
Energiebedarf	6029.0
Elektrolyseur [kWh]	
Energiebedarf Kompression [kWh]	542.0
Energiebedarf Massenvorkühlung [kWh]	28.5
Bereitgestellte Masse [kg]	28.5

Tabelle 4: Daten und Ergebnisse eines täglichen Tankstellenbetriebs

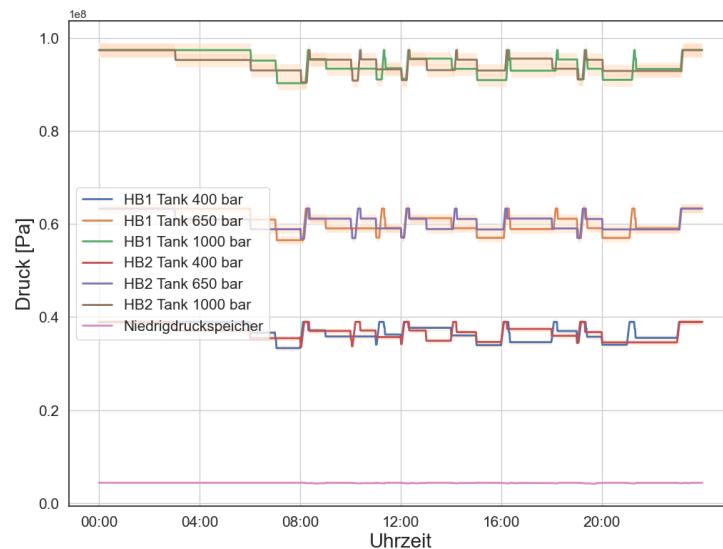


Abbildung 16: Druckentwicklung der Hochdruckbündel der Tankstelle über einen Tag in der Region Kleinstadt im Bedarfsumkreis von 1,5 km. Die mittlere Außentemperatur beträgt 9,4 °C

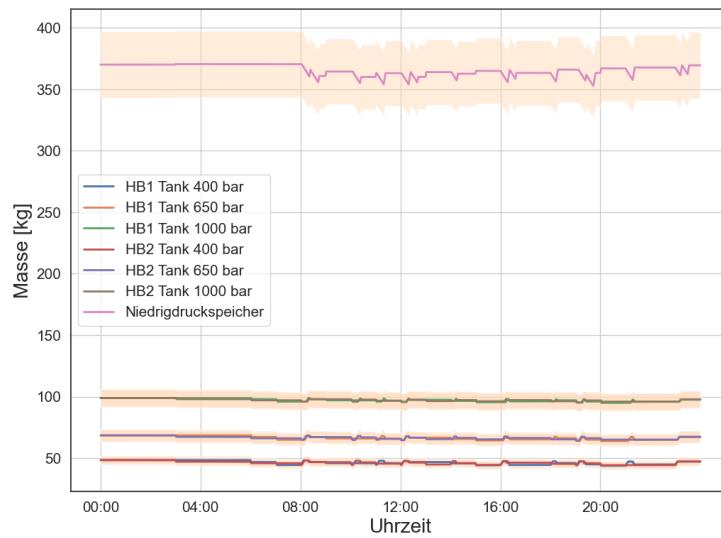


Abbildung 17: Massenentwicklung der Hochdruckbündel der Tankstelle über einen Tag in der Region Kleinstadt im Bedarfsumkreis von 1,5 km. Die mittlere Außentemperatur beträgt 9,4 °C

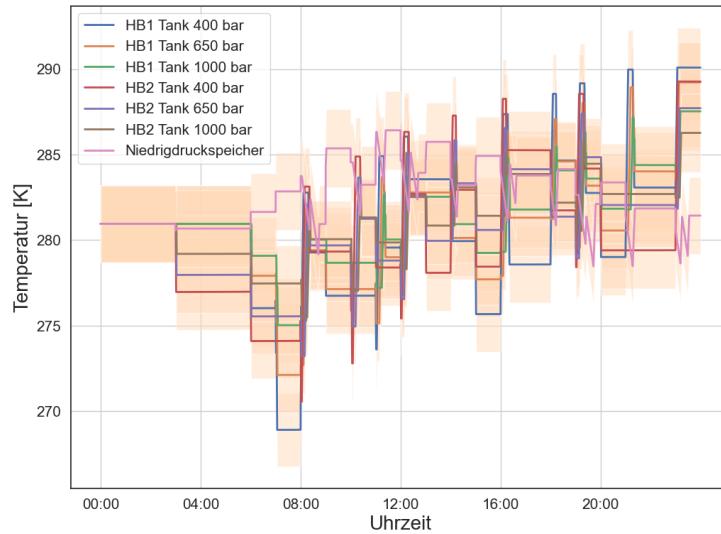


Abbildung 18: Temperaturentwicklung der Hochdruckbündel der Tankstelle über einen Tag in der Region Kleinstadt im Bedarfsumkreis von 1,5 km. Die mittlere Außentemperatur beträgt 9,4 °C

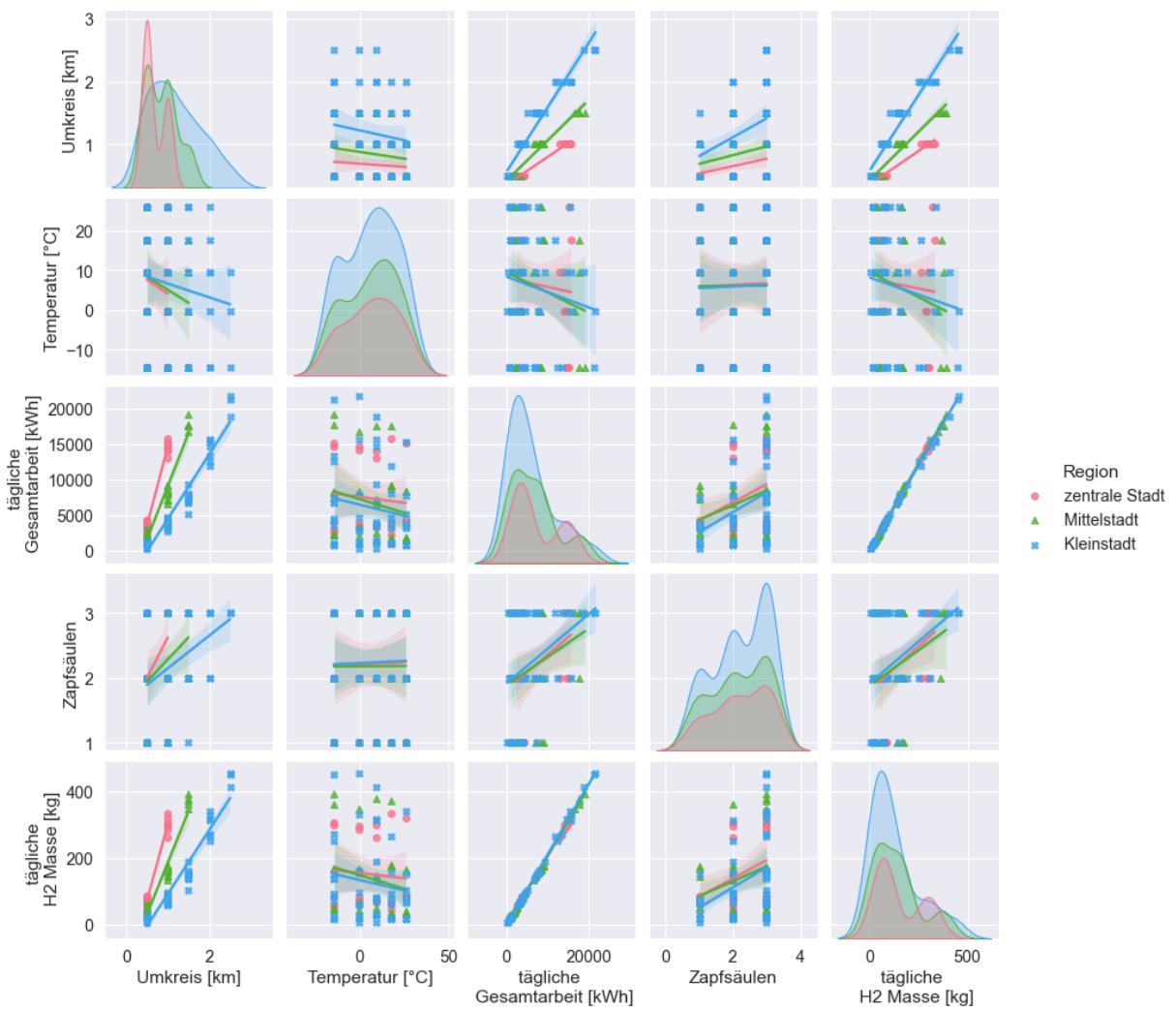


Abbildung 19: Funktionierender Betrieb von Tankstellen für verschiedene Regionen. Dargestellt sind die Abhängigkeiten von täglicher zur Verfügung gestellter Wasserstoffmasse und der täglichen Tankstellen-Gesamtarbeit bei unterschiedlichen Außentemperaturen, Bedarfsumkreisen der Regionen und Zapfsäulen

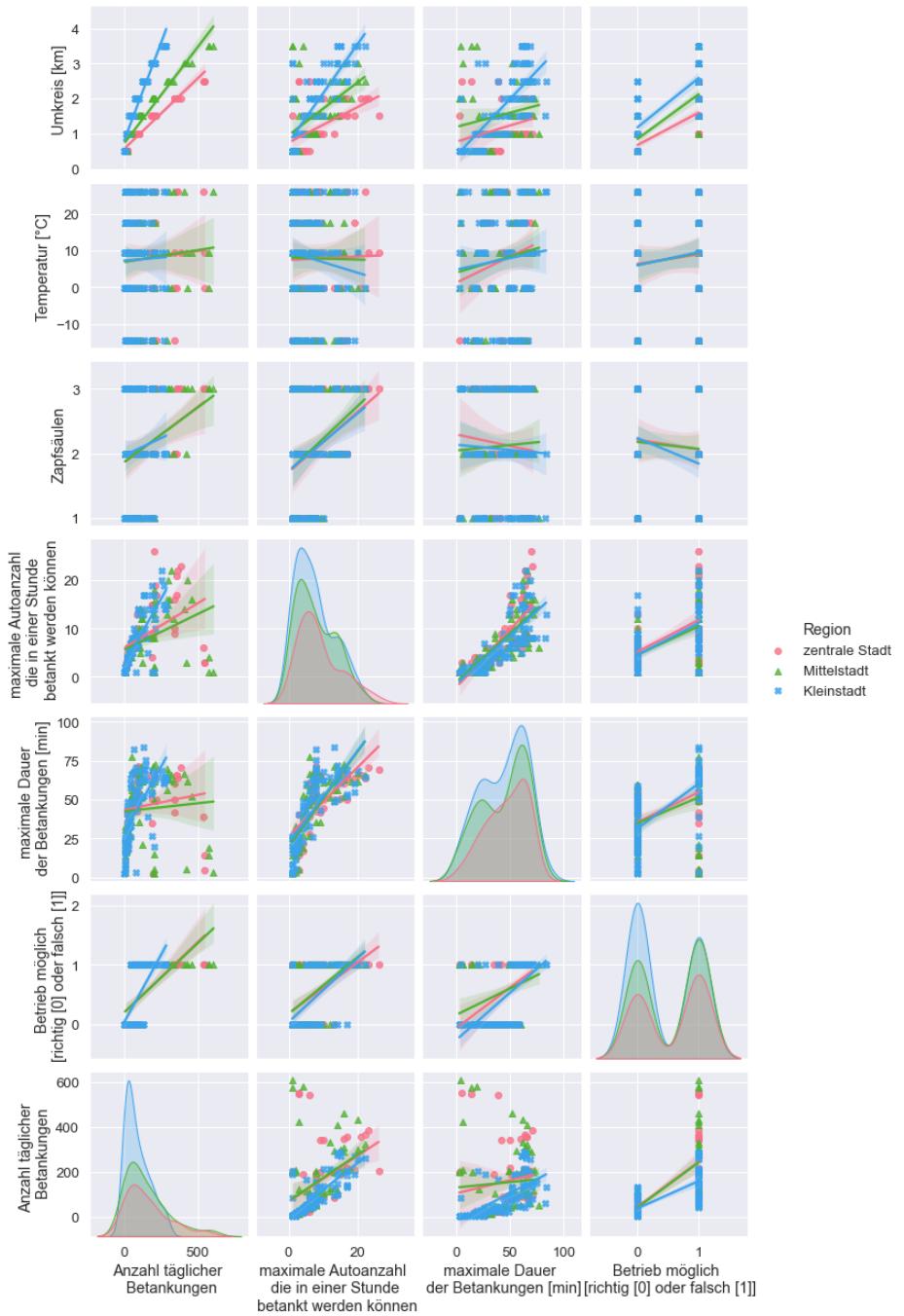


Abbildung 20: Betrieb von Tankstellen für verschiedene Regionen. Dargestellt sind die Abhängigkeiten des möglichen Betriebs, der täglichen Anzahl an Betankungen, ihrer maximalen Dauer einer Stunde und die Anzahl an Fahrzeugen zu dieser Stunde im Verhältnis zu unterschiedlichen Außentemperaturen, Bedarfsumkreisen der Regionen und Zapfsäulen

4.5 Dimensionierungsanalyse

Aus Abbildung 19 kann man schließen, dass ein möglicher Betrieb einer Tankstelle unabhängig von der Region wahrscheinlicher wird für niedrigere Temperaturen, weniger Fahrzeugen, die am gleichen Tag unterwegs sind, einer geringeren Anzahl an Fahrzeugen, welche in einer Stunde tanken möchten. Sind mehr Zapfsäulen vorhanden, steigt die Anzahl an möglichen Betrieben. Mit höheren Temperaturen steigt die maximale Dauer der Betankungen, was wiederum bei gleichen Umkreisen und Zapfsäulen, zu mehr Betriebsabbrüchen führt. Insgesamt ist ein möglicher Betrieb häufiger für die Region der Kleinstadt und am wenigsten häufig für die zentrale Stadt. Nach jeder zweiten bis dritten Betankung müssen die Hochdruckbündel neu gefüllt werden, wodurch eine durchschnittliche Betankung 6 - 10 min dauert. Dies setzt ein Limit von von 6-9 Betankungen pro Stunde und Zapfsäule.

Der Bedarf an Wasserstoffmasse nimmt mit dem Umkreis und somit der Anzahl an Fahrzeugen zu. Am stärksten ist dieser Anstieg für die zentrale Stadt, am niedrigsten für die Kleinstadt. Für alle drei Regionen steigt die Gesamtarbeit der Tankstelle mit der täglich zur Verfügung stellenden Wasserstoffmasse.

Abbildung 20 zeigt die mögliche Betriebsweise und Dimensionierung für unterschiedliche Regionen. Für die zentrale Stadt ist eine Zapfsäule und somit ein Hochdruckbündel ausreichend, bei einer täglich zur Verfügung zu stellenden Wasserstoffmasse von $86 \text{ kg} \pm 54 \text{ kg}$, zwei Zapfsäulen können einen täglichen Wasserstoffbedarf von $140 \text{ kg} \pm 40 \text{ kg}$ decken und drei Zapfsäulen einen Bedarf von $194 \text{ kg} \pm 63 \text{ kg}$. In der Region der Mittelstadt deckt eine Zapfsäule den Wasserstoffmassenbedarf von $87 \text{ kg} \pm 42 \text{ kg}$, zwei Zapfsäulen den Bedarf von $131 \text{ kg} \pm 29 \text{ kg}$ und drei Zapfsäulen einen Bedarf von $174 \pm 63 \text{ kg}$. Für die Region der Kleinstadt deckt eine Zapfsäule den Wasserstoffbedarf von $51 \text{ kg} \pm 29 \text{ kg}$, zwei Zapfsäulen decken den Bedarf von $114 \text{ kg} \pm 23 \text{ kg}$ Wasserstoff, drei Zapfsäulen können einen Bedarf an Wasserstoff von $160 \text{ kg} \pm 51 \text{ kg}$ decken. Der mit der Masse verbundene energetische Aufwand der Komponenten einer Wasserstofftankstelle ist in Abbildung 31 gezeigt. Je nach Region, Umkreis und demnach Wasserstoffnachfrage kann die Tankstelle dimensioniert werden und je nach Saison die nötige Energie veranschlagt werden, welche es braucht den Wasserstoff bereitzustellen.

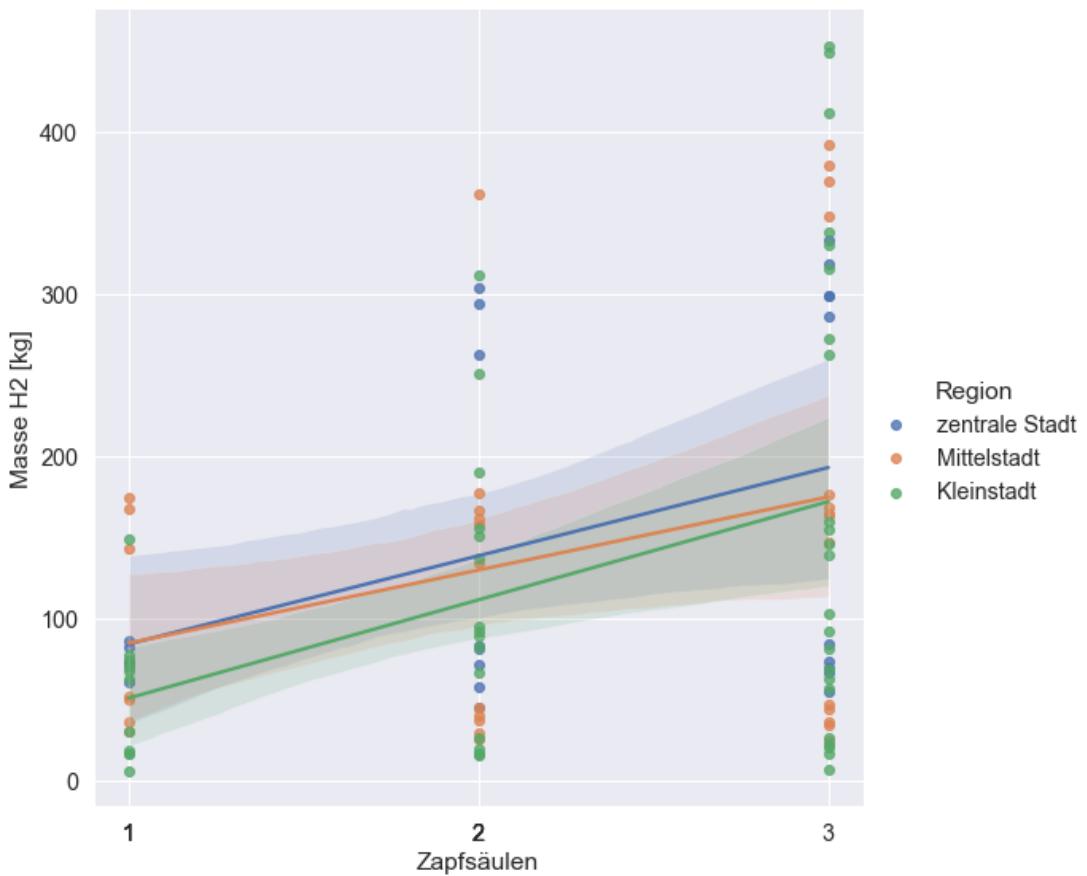


Abbildung 21: Abhängigkeit der möglichen Tankstellenbetriebe und der täglich zur Verfügung gestellten Wasserstoffmasse zur Anzahl an Zapfsäulen

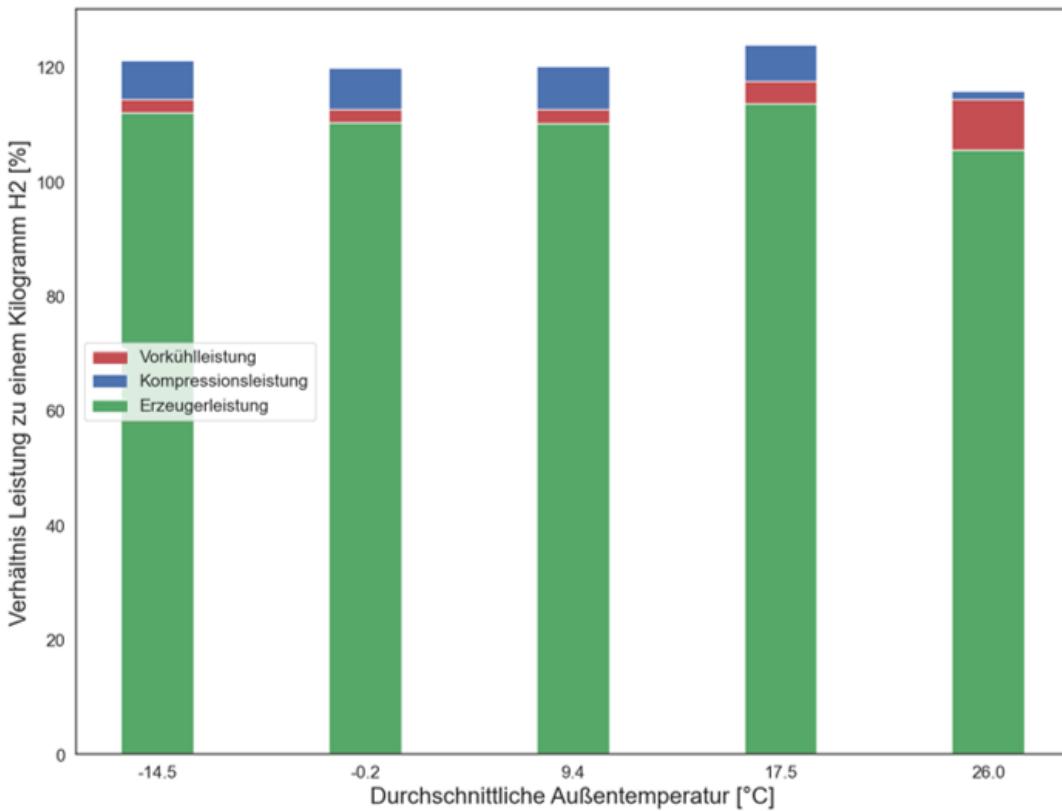


Abbildung 22: Leistung der einzelnen Komponenten einer Tankstelle um bei verschiedenen Temperaturen ein Kilogramm Wasserstoff bereit zu stellen

5 Diskussion und Limitation

Die Werte für die Massenauslegeung sind vergleichbar mit denen des Instituts für Transportation in Kalifornien [68]. Für Regionen niedriger Bevölkerungsdichte ist der tägliche Bedarf von Wasserstoff 0 - 540 kg, sofern der Individualverkehr nahezu vollständig auf den Brennstoffzellenantrieb umgestiegen ist. Die Skalierung einer Wasserstofftankstelle hängt auch mit der Anzahl und der Größe der Wasserstofftanks zusammen [69], wonach die Tankstelle auch hier angepasst werden kann. In [70] wurde sowohl die Größe der Tanks als auch die Anzahl an Zapfsäulen variiert. Die kleine Station mit einer Wasserstoffauslegung von 56 bis 80 $\frac{kg}{Tag}$ ist vergleichbar mit einer hier simulierten Wasserstoffstation mit einer Zapfsäule. Die nächst größere Tankstelle mit einer Wasserstoffauslegung von 168 bis 212 $\frac{kg}{Tag}$ hat nur eine Zapfsäule, ist aber in ihrem Betankungs- und Komprimierungsprozess optimiert. Vergleichbar wären die in dieser Arbeit herausgearbeiteten Stationen mit zwei und drei Zapfsäulen. Die zeitlichen Abfolgen der Hochdruckbündel und ihrer Kompressoren sowie des ND-Tanks mit dem Kompressor und dem Elektrolyseur

	Zentrale Stadt	Mittelstadt	Kleinstadt
Massenauslegung eine Zapfsäule	86 kg \pm 54 kg	87 kg \pm 42 kg	51 kg \pm 29 kg
Massenauslegung zwei Zapfsäulen	140 kg \pm 40 kg	131 kg \pm 29 kg	114 kg \pm 23 kg
Massenauslegung drei Zapfsäulen	194 kg \pm 63 kg	174 \pm 63 kg	160 kg \pm 51 kg
Masse H ₂ pro 100 km [kg/100 km]	0.754 \pm 0.022	0.730 \pm 0.021	0.776 \pm 0.023
Energieaufwand Kompression/ H ₂ - Brennwert [%]	9-10	9-10	9-10

Tabelle 5: Ergebnisse

hat sich im Hinblick auf Betankung und Wiederauffüllung durch den Kompressor als schwierig erwiesen. Zudem nahm die endgültige Simulation für die 315 verschiedenen Szenarien mehr als 48 h Rechenzeit in Anspruch.

Die Kompressionsarbeit an der Tankstelle ist höher als die in den Literaturwerten von 7,98 % [71][72] des Brennwerts von Wasserstoff, wobei darauf hingewiesen wird, dass die Kompressionsarbeit weitaus höher ist, wenn man die Kompressionskühlung miteinbezieht.

Die benötigte Wasserstoffmasse für 100 km, welche aus den Routen resultieren, ist vergleichbar mit denen des ADAC von 0,76 $\frac{\text{kg}}{100\text{km}}$ und liegt damit im ersten Fehlerintervall. In der Mittelstadt wird am wenigsten Wasserstoff auf 100 km verbraucht, die Kleinstadt verbraucht am meisten. Die Ergebnisse deuten auf einen erhöhten Verbrauch bei besonders hohen Geschwindigkeiten sowie einen erhöhten Verbrauch bei niedrigen Geschwindigkeiten und häufigerem Anhalten.

Die Betankung ist im Rahmen der SAE J2601 Richtlinien und lässt sich mit anderen Kaskadenbetankungen wie in [73][74][75] vergleichen. Im Fall der Betankung bei einer Umgebungstemperatur von über 30 ° C überschreitet die Wasserstofftemperatur den Grenzwert von 85 ° C. Um dies zu verbessern sollte die Vorkühltemperatur weiter heruntergesetzt oder die Betankung abgebrochen werden.

Limitation der Ergebnisse:

- Diese Arbeit baut auf anderen Modellen auf, wodurch sich Fehlerfortsetzungen ergeben können. Eine Überprüfung der Ergebnisse mit experimentellen Werten wäre aufschlussreich.
- Es wird ein einstufiger Verdichter verwendet, welcher adiabat arbeitet. Genauere Modelle von mehrstufigen Verdichtern mit Kühlung würden zu akkurateeren Ergebnissen führen.

- Zur Berechnung der Routen und Uhrzeiten des Verkehrs wurde mit dem MiD17 gerechnet, welcher gerundete Werte beinhaltet, weshalb es zu weiteren Rundungsfehlern kommt.
- Die Veränderungen im Verkehr durch vermehrtes Homeoffice oder Onlineshopping seit 2017 wurden nicht betrachtet.
- Da reale Prozesse irreversibel sind wäre eine Exergieanalyse zielführend um genauere Ergebnisse zu erhalten und die Effizienz der einzelnen Prozesse und Komponenten zu überprüfen.
- Der Verkehr beruht auf einer Streuung von Fahrten, Betankungs- und Fahrzeiten. Eine Simulation über einen längeren Zeitraum wäre aussagekräftiger.
- Teilweise mussten Fehler angenommen werden, was zu einer Fehlerfortsetzung führt.
- Die Simulation der Betankung beruht auf einer Engine, die Matlab-Code zu Python-Code kompiliert kompiliert, wodurch Übersetzungsfehler entstehen können.

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der Betrieb einer Wasserstofftankstelle auf Grundlage von bevölkerungs-, betankungs- und fahrzeugspezifischen Eigenschaften für unterschiedliche Umgebungstemperaturen simuliert. Es wurde gezeigt, wie sich der Verbrauch eines Wasserstofffahrzeugs mit Strecke und Geschwindigkeit ändert indem verschiedene Routen auf Grundlage von WLTC-Zyklen erstellt wurden. Die Grenzwerte der Routen für Durchschnittsgeschwindigkeit und Gesamtstrecke entsprechen dem Mobilitätsverhalten in Deutschland. Hierbei weist die Mittelstadt den geringsten Wasserstoffverbrauch auf 100 km auf. Entsprechend differenzierter Treibstoffnachfrage wurde die Betankung durch ein Kaskadentanksystem simuliert. Es zeigte sich für eine Umgebungstemperatur von 33 °C, dass die Betankung für 4 kg Wasserstoff um 173 s länger dauert, als bei einer Umgebungstemperatur von -15 °C. Mit den Ergebnissen der Simulation der Tankstelle lassen sich Aussagen darüber treffen, wie eine Tankstelle der Wasserstoffnachfrage und Umgebungstemperatur entsprechend dimensioniert sein sollte. Dabei ergab sich das eine Tankstelle mit einer Zapfsäule in der zentralen Stadt den täglichen Massenbedarf von $86 \text{ kg} \pm 54 \text{ kg}$ decken kann, wo hingegen eine Zapfsäule in der Region der Kleinstadt nur einen täglichen Massenbedarf von $86 \text{ kg} \pm 54 \text{ kg}$ wird.

7 Appendix

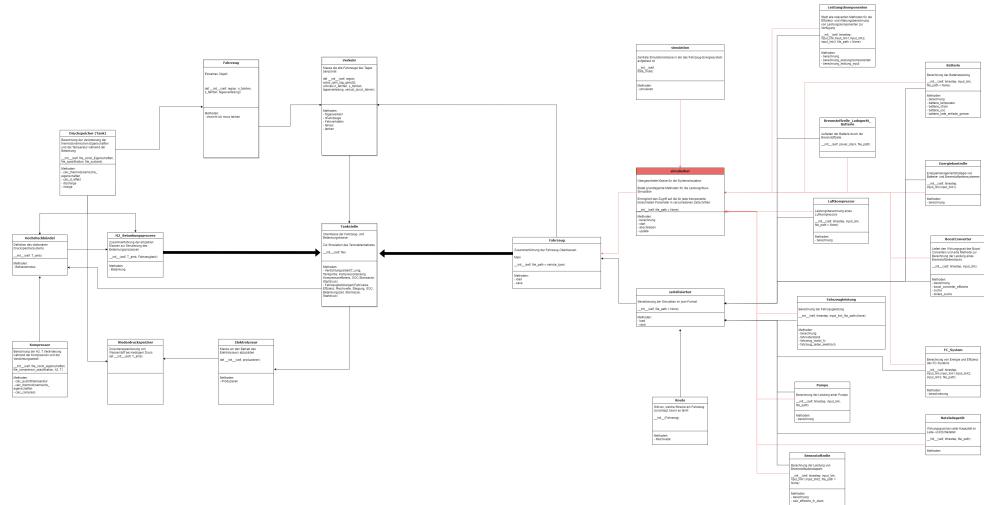


Abbildung 23: UML Diagramm

Parameter	Wert	Einheit	Quelle
Luftwiderstandsbeiwert c_w	0.29	-	[82]
Rollwiderstandkoeffizient c_r	0.012	-	[77]
Steigung alpha	0	°	eigene Annahme
Rotationsträgheitsfaktor	1.1	-	[78]
Fläche Frontal	3.03	m^2	[82]
Hilfsenergie	max. 2kw	kw	[79]
Transmissionseffizient	1,000:1	%	[80]
DC-DC converter Effizienz	95	%	[81]
Maximale Leistung	113 kW	kW	[82]
Kapazität Batterie	1.6 kWh,	kW	[82]
Spannung	245 V DC	V	[82]
Leergewicht	1850	kg	[82]
FC-Leistung	114 kW	kW	[82]
Reifenradius	17 zoll	zoll	[82]
Hinterachsenübersetzung	3,478:1	-	[82]

Abbildung 24: Toyota Mirai I Spezifikationen

8 Literatur

Literatur

- [1] Nations, United: 7. d Paris Agreement. (2015), Dezember. https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en
- [2] Umweltbundesamt: Treibhausgas-Emissionen in Deutschland. (2021). [<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#treibhausgas-emissionen-nach-kategorien>
- [3] Umweltbundesamt: *Klimaschutzbeitrag des Verkehrs bis 2050.* 2016 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/texte_56_2016_klimaschutzbeitrag_des_verkehrs_2050_getagged.pdf#page=110&zoom=100,72,436
- [4] SPD: Koalitionsvertrag 2021-2025. (2020). https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf
- [5] Bundestag, Deutscher: Ergebnis der Förderung von Wasserstoff-Pkws durch die Bundesregierung. In: *Antwort der Bundesregierung* (2021). <https://dserv.bundestag.de/btd/19/317/1931761.pdf>
- [6] Gu, Yuanxin: *Comparative study of fuel-cell and battery-electric waste collection vehicles*, Technischen Universitaet Berlin, Diplomarbeit, November 2021
- [7] Kontogeorgopoulou, Eleni: *Simulation, Optimierung und Bewertung der Speichertopologie fur einen Wasserstoffbetankungsvorgang*, Technischen Universitaet Berlin, Diplomarbeit, Januar 2017

- [8] P.P Edwards, V.L K. ; David, W.I.F: Hydrogen energy. In: *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences* 365 (2007), Februar, S. 1043–1056. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2006.1965>. – DOI 10.1098/rsta.2006.1965
- [9] *Flexibility concepts for the German power supply in 2050.* acatech – National Academy of Science and Engineering (lead institution), German National Academy of Sciences Leopoldina, Union of the German Academies of Sciences and Humanities, 2016 https://energiesysteme-zukunft.de/fileadmin/user_upload/Publikationen/PDFs/ESYS_Position_Paper_Flexibility_concepts.pdf
- [10] Energietabelle für die Umrechnung verschiedener Energieeinheiten und -äquivalente. https://web.archive.org/web/20150509012952/http://www.dvw-info.de/wissen/tabellen/wiss_enr.html
- [11] Züttel, Andreas: Materials for hydrogen storage. In: *materialstoday* (2003), S. 24–33. [http://dx.doi.org/10.1016/S1369-7021\(03\)00922-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1369-7021(03)00922-2). – DOI 10.1016/S1369-7021(03)00922-2
- [12] Rivard, Etienne ; Trudeau, Michel ; Zaghib, Karim: Hydrogen Storage for Mobility: A Review. In: *Materials* (2019). <https://www.mdpi.com/1996-1944/12/12/1973>
- [13] Züttel, Andreas ; Remhof, Arndt ; Borgschulte, Andreas ; Friedrichs, Oliver: Hydrogen: the future energy carrier. In: *Phil. Trans. R. Soc. A* 368 (2010), S. 3329–3342. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2010.0113>. – DOI 10.1098/rsta.2010.0113
- [14] Newborough, Marcus ; Cooley, Graham: Developments in the global hydrogen market: The spectrum of hydrogen colours. In: *Fuel Cells Bulletin* (2020). https://itm-power-assets.s3.eu-west-2.amazonaws.com/Spectrum_of_hydrogen_colours_659e69d2ee.pdf
- [15] Dickel, Ralf: Blue hydrogen as an enabler of green hydrogen: The case of Germany. In: *OIES Paper: NG, No. 159* (2020). <http://dx.doi.org/10.26889/9781784671594>. – DOI 10.26889/9781784671594
- [16] Acaral, Canan ; Dincer, Brahim: Review and evaluation of hydrogen production options for better environment. In: *Journal of Cleaner Production* 218 (2019), S. 835–849. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.046>. – DOI https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.046
- [17] Dawood, Furat: Hydrogen production for energy: An overview. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (2020). <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>. – DOI 10.1016/j.ijhydene.2019.12.059
- [18] Mobilus, SAE: *Compressed Hydrogen Surface Vehicle Fueling Connection Devices J2600201211*. 2015 <https://www.sae.org/standards/content/j2600201211/>
- [19] Wiley-VCH, Weinheim: *Handbook of Hydrogen Storage*. Hirscher, Michael, 2010
- [20] Toyota: Hydrogen storage. https://www.toyota-europe.com/download/cms/euen/ToyotaMiraiFCV_Posters_LR_tcm-11-564265.pdf

- [21] Andres Gonzalez-Garay, Mai B. ; Ordóñez, Diego F. ; High, Michael ; Adam Oxley, Paola A. Sáenz Cavazos Piera Patrizio Nixon Sunny Niall Mac D. Nadine Moustafa M. Nadine Moustafa ; Shah, Nilay: Hydrogen Production and Its Applications to Mobility. 13 (2022), S. 501–528. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-092220-010254>. – DOI <https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-092220-010254>
- [22] Zhou, Li: Progress and problems in hydrogen storage methods. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 9 (2005), S. 395–408. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.05.005> – DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.05.005>
- [23] GuillaumePetitpas: Simulation of boil-off losses during transfer at a LH₂ based hydrogen refueling station. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 43 (2018), S. 21451–21463. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.132>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.09.132>
- [24] Amos, Wade A.: Costs of Storing and Transporting Hydrogen. <https://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25106.pdf>
- [25] Detlef Stolten, Nancy G. Remzi C. Samsun S. Remzi C. Samsun (Hrsg.): *Fuel Cells: Data, Facts, and Figures*. 2016
- [26] V.TchouvelevHirohisaUchida, Marcelo Carmo Alberto Coralli Debabrata Das Paulo Emílio V.de MirandaSergio P.de OliveiraMakoto R.HaradaDavidHartLuigi OsmieriNguyen Q.MinhNewton P.NevesJr.BeatriceSampsonBernardo J.M.SarrufVaishaliSinghStefaniaSpecchiaRobertSteinberger-WilckensDetlefStoltenAndrei ; Miranda, Paulo Emilio V. (Hrsg.): *Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies*. 2018
- [27] Sakamoto, Junji ; Nakayama, Jo ; Nakarai, Toyoaki ; Kasai, Naoya ; Shibutani, Tadahiro ; Miyake, Atsumi: Effect of gasoline pool fire on liquid hydrogen storage tank in hybrid hydrogen–gasoline fueling station. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 41 (2016), S. 2096–2104. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.039>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.039>
- [28] Shrinivasan, Sweta ; Gor, Nikhil ; Sarma, Sankara ; Tatiparti, V: Hydrogen Sorption Mechanism of Magnesium (Hydride). In: *materialstoday: proceedings* 5 (2018), S. 23235–23241. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.11.055>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.11.055>
- [29] Wu, Guangxin ; Zhang, Jieyu ; Li, Qian ; Chou, Kuochih: A new model to describe absorption kinetics of Mg-based hydrogen storage alloys. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (2011). <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.07.026>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.07.026>

- [30] Jingzhu, Li ; Chengshang, Zhou ; Zak, Fang Z. ; Jr., Robert C. B. ; Jun, Lu ; Chai, Ren: Isothermal hydrogenation kinetics of ball-milled nano-catalyzed magnesium hydride. In: *Materialia* 5 (2019). <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100227>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2019.100227>
- [31] Cheng, Jinrong ; Yuan, Xinghong ; Zhao, Li ; Huang, Decai ; Zhao, Min ; Dai, Lei ; Ding, Rui: GCMC simulation of hydrogen physisorption on carbon nanotubes and nanotube arrays. In: *Carbon* 42 (2004), S. 2019–2024. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.04.006>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.04.006>
- [32] Markus Reuß, Martin Robinius Detlef S. Thomas Grube G. Thomas Grube: A hydrogen supply chain with spatial resolution: Comparative analysis of infrastructure technologies in Germany. In: *Applied Energy* 247 (2019), S. 438–453. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.064>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.064>
- [33] Hans Christian Gils, Jens S. Hedda Gardian G. Hedda Gardian: Interaction of hydrogen infrastructures with other sector coupling options towards a zero-emission energy system in Germany. In: *Renewable Energy* 180 (2021), S. 140–156. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.016>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.016>
- [34] J. Hoelzen, et a.: Hydrogen-powered aviation and its reliance on green hydrogen infrastructure – Review and research gaps. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 47 (2022), S. 3108–3130. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.239>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.10.239>
- [35] Zhan Xu, et a.: Techno-Economic Analysis of Hydrogen Storage Technologiesfor Railway Engineering: A Review. In: *Energies* (2022). <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.3390/en15176467>. – DOI <https://doi.org/10.3390/en15176467>
- [36] Yang, Christopher ; Ogden, Joan: Determining the lowest-cost hydrogen delivery mode. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 32 (2007), S. 268–286. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.05.009>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.05.009>
- [37] Wolf, Joachim: Liquid-Hydrogen Technology for Vehicles. In: *MRS Bulletin* 27 (2011), S. 684 – 687. <http://dx.doi.org/DOI:https://doi.org/10.1557/mrs2002.222>. – DOI DOI: <https://doi.org/10.1557/mrs2002.222>
- [38] Tiago Sinigaglia, et a.: Production, storage, fuel stations of hydrogen and its utilization in automotive applications-a review. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (2017), S. 24597–24611. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.063>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.08.063>
- [39] Welder, Lara: Spatio-temporal optimization of a future energy system for power-to-hydrogen applications in Germany. In: *Energy* 158 (2018), S. 1130–1149. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.059>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.059>

- [40] Mobility, H2: *Wasserstofftankstellen in Deutschland*. <https://h2.live/>
- [41] Mobility, H2: Wasserstofftankstelle. https://h2-mobility.de/wp-content/uploads/sites/2/2021/10/H2M_Ueberblick_BetankungsoptionenLNFSNF_TankRast_2021-10-21.pdf
- [42] Bundesamt, Statistisches: RegioStar. (2015). <https://www.destatis.de/DE/Themen/Laender-Regionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Administrativ/15-registar.html>
- [43] Infrastruktur, Bundesministerium für Verkehr und d.: Mobilität in Deutschland - Tabellarische Grundauswertung. (2017). https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/pdf/MiD2017_Tabellenband_Deutschland.pdf
- [44] Chan, C. C.: The State of the Art of Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. In: *Proceedings of the IEEE* 95 (2007). <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2007.892489>. – DOI 10.1109/JPROC.2007.892489
- [45] International, SAE: Modelling of Electric Vehicles using MATLAB/ Simulink. (2020). <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/2020-01-5086/preview/>
- [46] Zhaowen Liang, et a.: Powertrain Design and Energy Management StrategyOptimization for a Fuel Cell Electric Intercity Coach in anExtremely Cold Mountain Area. In: *Sustainability* 14 (2022), S. 11253. <http://dx.doi.org/.https://doi.org/10.3390/su141811253>. – DOI . <https://doi.org/10.3390/su141811253>
- [47] Pilatowsky, et a. I: *Cogeneration Fuel Cell-Sorption Air Conditioning Systems*. 2011 (2)
- [48] Fu-Cheng Wang, et a.: Impacts of power management on a PEMFC electric vehicle. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 39 (2014), S. 17336–17346. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.08.052>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.08.052>
- [49] Bethoux, Olivier: Hydrogen Fuel Cell Road Vehicles: State of the Artand Perspectives. In: *energies* 13 (2020). <http://dx.doi.org/doi:10.3390/en13215843>. – DOI doi:10.3390/en13215843
- [50] Jay T. Pukrushpan, et a.: Modeling and Control for PEM Fuel Cell Stack System. In: *American Control Conference TP09-2*, 2002
- [51] Inc, Elsevier: *PEM Fuel Cell Modelingand SimulationUsing MATLAB*. Colleen Spiegel, 2008
- [52] Hengbing Zhao, et a.: Optimization of fuel cell system operating conditions for fuel cell vehicles. In: *Journal of Power Sources* 186 (2009), S. 408–416
- [53] Kaa, et a. d.: The Battle between Battery and Fuel Cell Powered Electric Vehicles: A BWM Approach. In: *Energies* 11 (2017). <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.3390/en10111707>. – DOI <https://doi.org/10.3390/en10111707>
- [54] Taube, Fabian; Pasemann Andre; Rieck Jenny; Heinrich Tim; Reinking Robin; Behrendt F. Lina; Schmid S. Lina; Schmid: Contribution of waste management companiestowards a flexible energy system using sectorcoupling. (2019). <http://dx.doi.org/DOI:10.14279/depositonce-12171>. – DOI DOI: 10.14279/depositonce-12171

- [55] Fabian Schmid, Jenny Rieck Frank B. Lina Taube T. Lina Taube: Electrification of waste collection vehicles:Techno-economic analysis based on anenergy demand simulation using real-lifeoperational data. (2020). <http://dx.doi.org/DOI:10.14279/depositonce-10708>. – DOI DOI: 10.14279/depositonce-10708
- [56] H Schmidt, D.U. S.: Praxisgerechte Modellierung und Abschätzung von Wechselrichter Wirkungsgraden. (1994). https://www.researchgate.net/profile/Dirk-Uwe-Sauer/publication/274732254_Wechselrichter-Wirkungsgrade_-_Praxisgerechte_Modellierung_und_Abschätzung/links/5675bb5008ae502c99ce09c0/Wechselrichter-Wirkungsgrade-Praxisgerechte-Modellierung-und-Abschaetzung.pdf
- [57] K.W. Harrison, et a.: Hydrogen Production:Fundamentals and Cas StudySummaries. (2010). <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47302.pdf>
- [58] Günter Cerbe, Gernot W.: *Technische Thermodynamik: Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen*. Hanser, 2021 (19)
- [59] Fließbach, Torsten: *Statistische PhysikLehrbuch zur Theoretischen Physik IV*. 2010 (5)
- [60] Redlich, Otto. ; Kwong, J. N. S.: On the Thermodynamics of Solutions. V. An Equation of State. Fugacities of Gaseous Solutions. In: *Chemical Reviews* 44 (1949), S. 233–244. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1021/cr60137a013>. – DOI <https://doi.org/10.1021/cr60137a013>
- [61] Matthias Bartelmann, et a.: *Theoretische Physik*. 2014
- [62] Fernando Olmos, Vasilios I. M.: Hydrogen car fill-up process modeling and simulation. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 38 (2013), S. 3401–3418. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.064>. – DOI 10.1016/j.ijhydene.2012.12.064
- [63] Ichiyanagi, et a. Mitsuhsisa: Performance Evaluation of Model-Based Controller with On-board Poly-tropic Index Prediction Model for Compression Stroke under Steady Driving Condition of CI Engine. In: *Society of Automotive Engineers of Japan* (2019), S. 1508–1514. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.11351/jsaeronbun.50.1508>. – DOI <https://doi.org/10.11351/jsaeronbun.50.1508>
- [64] Krishna Reddi, et a.: Impact of hydrogen SAE J2601 fueling methods on fueling time of light-duty fuel cell electric vehicles. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 42 (2017), S. 16675–16685. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.233>. – DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.233>
- [65] Mobilus, SAE: Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles J2601201612. (2016). <https://www.sae.org/standards/content/j2601201612/>
- [66] UN: Addendum 153 – UN Regulation No. 154, 2021, S. ab 160
- [67] Volkswagen: Wasserstoff oder Batterie. (2019). <https://www.volksvagenag.com/de/news/stories/2019/08/hydrogen-or-battery--that-is-the-question.html>

- [68] Transportation Studies, ITS I.: California Hydrogen Analysis Project Report: The Future Role of Hydrogen in a Carbon-neutral California Synthesis Modeling Report, Spring 2022. (2022). <https://its.ucdavis.edu/wp-content/uploads/hydrogen-study-working-paper-spring-report-18may2022.pdf>
- [69] E. Rothuizen, M. R.: <https://sci-hub.ru/10.1016/j.ijhydene.2013.10.066>. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 39 (2014), S. 582–592. <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.066> – DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.066>
- [70] Fabian Grüger, et al.: Carsharing with fuel cell vehicles: Sizing hydrogen refueling stations based on refueling behavior. In: *Applied Energy* (2018). https://www.researchgate.net/profile/Fabian-Grueger/publication/326461417_Carsharing_with_fuel_cell_vehicles_Sizing_hydrogen_refueling_stations_based_on_refueling_behavior
- [71] Pietro Di Profio, et al.: Comparison of hydrogen hydrates with existing hydrogen storage technologies: Energetic and economic evaluations. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 34 (2009), S. 9173–9180. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.056> – DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.056>
- [72] Jesse Schneider, et al.: <https://sci-hub.ru/https://www.jstor.org/stable/26169058>. (2021). <https://www.jstor.org/stable/10.2307/26169058>
- [73] Lei Xiao, et al.: Effects of pressure levels in three-cascade storage system on the overall energy consumption in the hydrogen refueling station. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 46 (2021), S. 31334–31345. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.007> – DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.007>
- [74] E. Rothuizen, et al.: Optimization of hydrogen vehicle refueling via dynamic simulation. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 38 (2013), S. 4221–4231. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.161> – DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.161>
- [75] E. Rothuizen, et al.: Optimization of the overall energy consumption in cascade fueling stations for hydrogen vehicles. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 39 (2014), S. 582–592. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.066> – DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.066>
- [76] Wetterdienst deutscher: *Daten deutscher Wetterdienst*. <https://kunden.dwd.de/obt/index.jsp>
- [77] Bartłomiej Pałasz, et al.: The determination of the rolling resistance coefficient of a passenger vehicle with the use of selected road tests methods. In: *MATEC* (2019). <https://www.matec-conferences.org/articles/matecconf/pdf/2019/03/matecconfmms1804006.pdf>
- [78] Rotationsträgheitsfaktor: <http://www.thecartech.com/subjects/autoeng/roadloads.htm>. In: *Faktor* <http://www.thecartech.com/subjects/autoeng/roadloads.htm>
- [79] J. Linssen, et al.: Netzintegration von Fahrzeugen mit elektrifizierten Antriebssystemen in bestehende und zukünftige Energieversorgungsstrukturen. In: *Advances in Systems Analyses* 1 (2012). <https://core.ac.uk/download/pdf/34991851.pdf>

- [80] J. Kang, W. Choi H. K.: Development of a control strategy based on the transmission efficiency with mechanical loss for a dual mode power split-type hybrid electric vehicle. In: *International Journal of Automotive Technology* 13 (2012), 825–833. <https://link.springer.com/article/10.1007/s12239-012-0083-7>
- [81] Mobilus, SAE: Development of Boost Converter for MIRAI. In: *Technical Paper* (2015). <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.4271/2015-01-1170>. – DOI <https://doi.org/10.4271/2015-01-1170>
- [82] Toyota: Toyota Mirai Specification. In: *Specs* <https://media.toyota.co.uk/wp-content/uploads/sites/5/pdf/210223M-Mirai-Tech-Spec.pdf>