



TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

**Analyse bestehender Batteriewechselsysteme hinsichtlich
Modulaufbau, Fahrzeugintegration und Wechselvorgang sowie
Ableitung eines Umsetzungskonzeptes**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs unter der Leitung von

Univ. Prof. Dr. techn. Bernhard Geringer

und

Projektass. Dr. techn. Werner Tober

E315

Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Thomas Bruckmüller

1127118

Grenzstraße 223, 2231 Strasshof



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology



Institut für Fahrzeugantriebe
& Automobiltechnik

Aufgabenstellung für die Diplomarbeit

Herrn Bruckmüller Thomas, Matrikelnummer: 11 27 118 wird folgende Aufgabe gestellt:

„Analyse bestehender Batteriewechselsysteme hinsichtlich Modulaufbau, Fahrzeugintegration und Wechselvorgang sowie Ableitung eines Umsetzungskonzeptes“

Schwerpunkte:

- Literaturrecherche
- Analyse früherer Batteriewechselsysteme
- Ableitung der Anforderungen an ein Batteriewechselsystem für gemischten (PKW, NFZ, Bus) Lokalverkehr (Batteriekapazität, Batterieleistung, Modulgrößen, Bauraum, Ladezeiten, Ladeleistungen, Ladefrequenzen)
- Identifikation geeigneter Fahrzeuge für eine gemischte Flotte
- Skizzierung der Integrationsmöglichkeiten
- Adaption früherer Batteriewechselsysteme in einem eigenen Konzept

Ein gedrucktes Exemplar und eine Version der Diplomarbeit auf Datenträger sind am Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik der Technischen Universität Wien abzugeben.

Einverstanden:

Thomas Bruckmüller, BSc

Betreuer am Institut:

Dr. Werner Tober

Prof. Dr. Bernhard Geringer
Institutsvorstand

Eidesstattliche Erklärung

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Analyse bestehender Batteriewechselsysteme hinsichtlich Modulaufbau, Fahrzeugintegration und Wechsellvorgang sowie Ableitung eines Umsetzungskonzeptes

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin. Ich erkläre weiters an Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Arbeiten selbständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin/ einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, am 04.09.2016

Thomas Bruckmüller

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Erfolg dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Mein Dank gilt Herrn Projektass. Dr. Werner K. Tober und Herrn Prof. Dr. Bernhard Geringer für die Bereitstellung dieses interessanten Themas und der tatkräftigen Unterstützung und Betreuung während der gesamten Arbeit.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Dr. Peter Prenninger, AVL LIST GmbH, und Herrn Dipl.-Ing. Heimo Aichmaier, Austrian Mobile Power, für die Unterstützung und die zahlreichen Inputs bedanken. In diesem Sinne möchte ich mich auch bei den Mitgliedern von Austrian Mobile Power bedanken.

Ich möchte mich außerdem bei Frau Elisabeth Dörr, Austrian Institute of Technology, für die Unterstützung bei der Recherche und für die Datenbereitstellung bedanken.

Besonderer Dank gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, die mir das Studium ermöglicht und mich bei all meinen Taten unterstützt haben.

Letztlich möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, die mir stets motivierend und unterstützend zur Seite standen.

Kurzfassung

Der momentan vorhandene Trend zu alternativen Antrieben rückt das elektrische Fahrzeug immer weiter in den Vordergrund. Neben den Vorteilen des elektrischen Fahrens, wie der Möglichkeit zu rekuperieren oder der lokal emissionslosen und geräuscharmen Fahrt, sind die Nachteile der geringen Reichweite in Kombination mit der hohen Ladezeit und dem hohen Batteriepreis, Grund für die geringe Verbreitung dieser Antriebsart. Mit höheren Ladeleistungen wird diese Problematik zwar entschärft, jedoch oftmals auf Kosten der Batterielebensdauer. Dabei ist es in den meisten Fällen gar nicht notwendig über eine Batterie zu verfügen, die hunderte Kilometer Reichweite ermöglicht. Trotzdem kann man eine Tendenz zu größeren Kapazitäten erkennen, da auf die Möglichkeit, eine große Strecke zurücklegen zu können, nicht verzichtet werden will. Die Nachteile dieser Methode liegen in den höheren Batteriekosten und dass auch bei kurzen Fahrten sehr hohe Batteriegewichte mitgeführt werden müssen.

Um diese Nachteile zu reduzieren, wäre es auch möglich die entladene Batterie gegen eine extern geladene Batterie zu tauschen. Dies ermöglicht einerseits eine schnelle Weiterfahrt, andererseits kann die Batterie unter schonenden Bedingungen in der Station geladen werden. Es existieren zahlreiche Batteriewechselsysteme mit unterschiedlicher Ausprägung (Studien oder real ausgeführte Konzepte) und Verbreitungsgrad, jedoch haben sich diese bisher nicht durchsetzen können. Insbesondere die Verwendung im gemischten Lokalverkehr, der ein solches System hochfrequentiert benutzen würde, wäre von Vorteil.

In dieser Arbeit werden die bestehenden Batteriewechselsysteme untersucht und die Gründe für die geringe Verbreitung ermittelt. Dazu werden deren Eigenschaften und Aufbau analysiert. Daraus werden die Stärken und Schwächen erfasst sowie das Verbesserungspotential aufgezeigt. Des Weiteren werden die Anforderungen an ein Wechselsystem für eine gemischte Flotte (PKW, NFZ, Bus) für den lokalen Verkehr ermittelt. Basierend auf diesem Anforderungsprofil und den notwendigen Verbesserungen, wird mit einem einfachen Berechnungsmodell eine erste eigene Auslegung zur Beschreibung der erforderlichen Reichweite, Kapazität, Bauform, Konnektivität und dergleichen durchgeführt. Darauf aufbauend wird ein eigenes Konzept entwickelt, dessen Ziel die gemeinsame Verwendung eines Batteriewechselsystems durch verschiedenste Fahrzeugtypen und -anwendungen ist.

Die Analyse der bestehenden Batteriewechselsysteme hat ergeben, dass es eine Vielzahl an Lösungen gibt, die sich teilweise sehr stark voneinander unterscheiden. Dies reicht von der Art des Wechsels, welcher vollautomatisch oder manuell erfolgen kann, bis hin zur Bauweise und Position der Batterie im Fahrzeug. Die Systeme wurden entsprechend der ermittelten Anforderungen an ein solches System bewertet und das Verbesserungspotential aufgezeigt. Dabei hat sich gezeigt, dass sich die Gründe für die geringe Verbreitung von Wechselsystemen nicht auf technische Probleme zurückführen lassen.

Die betrachteten Fahrzeuge wurden auf insgesamt fünf Fahrzeugklassen bzw. -anwendungen beschränkt: PKW (Taxi), leichtes NFZ (kurz), leichtes NFZ (lang), mittelschweres NFZ (lokal), Bus (städtischer Verkehr). Für diese Gruppen wurde ein Anforderungsprofil ermittelt und darauf basierend eine erste eigene Auslegung durchgeführt. Dabei stand eine modulare Bauweise, das heißt die Verwendung mehrerer gleicher Pakete (Taxi 2, Bus 4) für alle Fahrzeugarten, im Vordergrund. Dadurch ergeben sich logistische sowie kostentechnische Vorteile. Des Weiteren wurde eine Lebensdauerabschätzung und eine End-of-Life Betrachtung durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass sich gegenüber einem elektrischen Fahrzeug mit fest verbauter Batterie **erhebliche Lebensdauersteigerungen** durchführen lassen. Zusätzlich konnte in einer ersten Abschätzung gezeigt werden, dass bei reiner Betrachtung der Batterie- und Energiekosten, ein großer Kostenvorteil durch ein Wechselsystem, gegenüber einem konventionellen Antriebskonzept mit Verbrennungsmotor, erzielbar ist. Die Vorteile resultieren, neben der Elektrifizierung des Antriebsstranges, aus der bedarfsgerechten Auslegung der Batterie.

Die Herausforderungen für eine Umsetzung eines solchen Systems liegen vor allem in der Verbreitung des elektrischen Antriebes selbst und in der Standardisierung der Batteriesysteme. Letzteres ist hierbei von großer Bedeutung, da das Fahrzeugdesign und -struktur durch die teilweise großen Batterien maßgeblich beeinflusst wird. Darüber hinaus weisen gemeinsam verwendete Wechselstationen, trotz der Möglichkeit der langsamen Batterieaufladung, hohe infrastrukturelle Anforderungen auf. Um den betrieblichen Ablauf der Benutzer nicht zu stark zu beeinflussen, muss der Wechsel außerdem schnell erfolgen. Eine genaue Positionierung des Fahrzeuges spielt dabei eine wichtige Rolle. Zukünftig wäre es denkbar, dass diese Aufgabe von Fahrerassistenzsystemen übernommen wird.

Methodik

Die methodische Vorgehensweise dieser Arbeit lässt sich in fünf Teilaufgaben gliedern:

1. Grundlegende Erarbeitung der Thematik und Festlegung der Kernaufgaben
2. Ermittlung der notwendigen Daten und Durchführung einer Recherche
3. Auswertung der ermittelten Daten und Ableitung eines Anforderungsprofils
4. Bewertung bestehender Batteriewechselsysteme (BWS) und Feststellung notwendiger Verbesserungen
5. Entwicklung eines BWS-Konzepts und Vergleich mit bestehenden Systemen

Als **erster Schritt** ist es notwendig, die Grundlagen über BWS zu erarbeiten. Darunter fallen unter anderem Begriffsdefinitionen, grundlegende technische Aspekte sowie die Feststellung ob es bereits Arbeiten oder Informationen über BWS gibt. Darauf basierend sollen anschließend die Kernaufgaben der Arbeit festgelegt werden, wobei diese die Aufgabenstellung abdecken müssen.

Nach Festlegung der Kernaufgaben kann mit dem **nächsten Schritt** begonnen werden. Dabei ist zunächst festzustellen, welche Daten für die Erfüllung der Kernaufgaben benötigt werden und wie diese ermittelt werden können. Hierbei stehen vor allem Daten über bestehende BWS und über Fahrzeuge, die dafür möglicherweise geeignet sind, im Vordergrund. Darunter fallen Daten über den Aufbau und die Eigenschaften bestehender Systeme sowie über die Reichweiten- und Energieanforderungen möglicherweise geeigneter Fahrzeuge. Die dafür benötigte Recherche soll mit Hilfe von Veröffentlichungen, Artikeln in Fachzeitschriften, wissenschaftlichen Arbeiten, Firmenangaben, geeigneten Print- sowie Internet-Medien durchgeführt werden. Dabei soll zusätzlich die Zusammenarbeit mit Partnerunternehmen (Austrian Mobile Power, AVL LIST GmbH, AIT und andere) im Vordergrund stehen. Mit fortschreitender Recherche soll außerdem festgestellt werden, ob die zuvor definierten benötigten Daten zweckmäßig sind und gegebenenfalls sollen diese angepasst werden.

Die **dritte Teilaufgabe** beruht auf den Ergebnissen der beiden vorangegangenen Schritte. Um die Anforderungen an ein BWS feststellen zu können, müssen zunächst die gesammelten Daten ausgewertet werden. Daraus sollen die Anforderungen hinsichtlich Reichweite, Kapazität, Bauform, Konnektivität und dergleichen für den gemischten Lokalverkehr abgeleitet werden. Des Weiteren sollen geeignete Fahrzeuge für eine gemischte Flotte identifiziert werden. Im Anforderungsprofil sollen alle

Kenngößen eines BWS festgelegt werden, die für die Entwicklung eines Konzeptes benötigt werden.

Im **vierten Schritt** sollen bereits bestehende BWS analysiert und bewertet werden. Dafür ist die Entwicklung eines Bewertungsschemas notwendig. Mit Hilfe des Schemas sollen Stärken sowie Schwächen festgestellt und daraus notwendige Verbesserungen aufgezeigt werden. Die daraus resultierenden Erkenntnisse sollen in die Entwicklung des eigenen BWS Konzeptes einfließen.

Der **letzte Schritt** der Arbeit ist, ein eigenes BWS Konzept zu entwickeln. Dieses soll basierend auf dem Anforderungsprofil und den notwendigen Verbesserungen erstellt werden. Dafür ist die Erfassung der variablen Kenngößen, wie beispielweise Batteriekapazität, Integration im Fahrzeug, usw. nötig. Anschließend werden diese in sinnvollen Grenzen variiert, um mögliche Kombinationen und deren Auswirkungen auf das Gesamtkonzept festzustellen. Ziel ist es, das Optimum hinsichtlich Reichweite, Kapazität, Batteriemasse, Bauform, Konnektivität und dergleichen für ein gemeinsam verwendetes System zu ermitteln und diese im BWS Konzept umzusetzen. Anschließend soll das entwickelte Konzept mit den bestehenden Systemen entsprechend des zuvor erwähnten Bewertungsschemas verglichen werden. Ziel ist, dass das eigens entwickelte Konzept die Anforderungen besser erfüllt, bzw. dass es deutliche Vorteile gegenüber bestehenden Batteriewechselsystemen aufweist.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Allgemein | 1 |
| 1.2 | Kernfragen | 2 |
| 2 | Bestehende Batteriewechselsysteme | 3 |
| 2.1 | PKW | 3 |
| 2.1.1 | Better Place | 3 |
| 2.1.2 | Tesla Motors | 6 |
| 2.1.3 | BattSwap | 8 |
| 2.1.4 | enerChange | 11 |
| 2.2 | Bus | 12 |
| 2.2.1 | Change it | 12 |
| 2.3 | NFZ | 14 |
| 2.3.1 | Greenway | 14 |
| 2.4 | Gemeinsam verwendete Batteriewechselsysteme | 17 |
| 2.4.1 | DB Tech | 17 |
| 3 | Analyse bestehender Batteriewechselsysteme | 19 |
| 3.1 | Aufbau und Eigenschaften | 19 |
| 3.1.1 | Position im Fahrzeug und Wechselmechanismus | 19 |
| 3.1.2 | Heizung und Kühlung | 23 |
| 3.1.3 | Zentrierung und Connector | 26 |
| 3.1.4 | Paketgestaltung | 30 |
| 3.1.5 | Lebensdauer | 33 |
| 3.2 | Bewertung der bestehenden Batteriewechselsysteme | 41 |
| 3.2.1 | Bewertungsschema | 41 |
| 3.2.2 | Ergebnis und Verbesserungspotential | 42 |
| 4 | Anforderungsprofil | 46 |
| 4.1 | PKW | 46 |
| 4.2 | Bus | 50 |
| 4.3 | Nutz- und Sonderfahrzeuge | 53 |
| 5 | Eigenes Konzept | 55 |
| 5.1 | Grundlegende Überlegungen | 55 |
| 5.2 | Grobauslegung | 56 |
| 5.2.1 | Berechnungsmodell | 56 |
| 5.2.2 | Einfluss der Innenraumheizung und -klimatisierung | 58 |

| | |
|---|-----------|
| 5.2.3 Lebensdauerabschätzung..... | 61 |
| 5.2.4 Benötigte Reichweite | 64 |
| 5.2.5 Ergebnisse | 65 |
| 5.2.6 Beispielstation..... | 74 |
| 5.3 Aufbau des Batteriewechselsystems..... | 76 |
| 5.3.1 Abmessungen und Position im Fahrzeug..... | 76 |
| 5.3.2 Heizung und Kühlung..... | 79 |
| 5.3.3 Paketgestaltung und Connector | 80 |
| 5.3.4 Fahrzeugpositionierung und Wechselmechanismus | 83 |
| 5.4 End of Life Betrachtung..... | 85 |
| 5.5 Bewertung des eigenen Konzepts..... | 86 |
| 6 Abschließende Aspekte und Ausblick | 88 |
| 7 Zusammenfassung..... | 90 |
| 7.1 Beantwortung der Kernfragen | 90 |
| 7.2 Fazit | 92 |
| 8 Literaturverzeichnis | 93 |
| 9 Anhang..... | 99 |
| 9.1 Bewertungen bestehender Systeme | 99 |
| 9.2 Bewertung des eigenen Konzepts..... | 106 |
| 9.3 Batterieberechnung..... | 107 |

1 Einleitung

1.1 Allgemein

Die Ursprünge des elektrischen Fahrens reichen bis in das 19. Jahrhundert zurück. Genauso wie heute, hatten auch damalige Elektrofahrzeuge den Nachteil der geringen Reichweite und der relativ hohen Ladedauer. Um diese Problematik zu verbessern, wurde 1896 das erste Fahrzeug mit einer austauschbaren Batterie entwickelt. Die Idee des Batteriewechsels ist also keineswegs neu. [1]

Auch bei heutigen elektrischen Fahrzeugen sind große Batterien schwer, teuer und für die meisten Fahrten gar nicht notwendig. Damit auch äußerst selten vorkommende, längere Fahrten abgedeckt werden können, gibt es trotzdem den Bedarf nach großen Reichweiten. Außerdem ist die Ladezeit für viele Anwendungen zu lange, was die Tendenz zu größeren Kapazitäten, und somit zu geringerem Nachladebedarf fördert. Für einen hochfrequentierten Betrieb, wie das im öffentlichen Verkehr der Fall ist, stellt auch dies keine befriedigende Lösung dar. Wäre die Ladedauer wesentlich kürzer (in der Größenordnung der Auftankzeit eines konventionellen Fahrzeuges), so könnte auf große Batterien verzichtet und dafür öfter zwischengeladen werden. Diese Überlegungen und der derzeit wachsende Trend zum elektrischen Fahren hat die Idee des Batteriewechsels erneut aufleben lassen.

Zunächst soll definiert werden, was unter einem Batteriewechselsystem verstanden wird: Als Batteriewechselsystem (BWS) wird in dieser Arbeit ein elektrochemisches Speichersystem in einem elektrischen Fahrzeug bezeichnet, dessen (entladener) Speicher aus dem Fahrzeug entfernt und durch einen anderen (geladenen) Speicher ersetzt werden kann. Diese Definition umfasst sämtliche fahrzeugseitige Komponenten, die für die Speicherung elektrischer Energie direkt verantwortlich sind sowie alle Hilfssysteme, die dafür notwendig sind. Darunter fallen unter anderem die Batterie selbst, das Gehäuse, der mechanische sowie elektrische Connector, die Batterieheizung bzw. -kühlung und auch Zwischenspeicher wie Supercaps (falls vorhanden). Zu bemerken ist, dass die genannten Komponenten nicht gänzlich wechselbar sein müssen. Der austauschbare Teil des BWS betrifft lediglich den elektrochemischen Hauptenergiespeicher. Externe Systeme, wie Wechsellvorrichtungen in Gebäuden und dergleichen, werden dem BWS nicht zugeordnet.

1.2 Kernfragen

Um die wichtigsten Erkenntnisse, die aus der Arbeit hervorgehen sollen, abzudecken, ist es zweckmäßig Kernfragen zu formulieren. Die Beantwortung der Kernfragen kann daher als Ziel betrachtet werden. Die Beantwortung der Fragen erfolgt nicht zwingend in der unten angeführten Reihenfolge, da diese teilweise voneinander abhängig sind.

Welche bestehenden BWS gibt es?

Zunächst sollen bestehende Systeme recherchiert und analysiert werden. Da es eine Vielzahl an verschiedenen Systemen mit unterschiedlichsten Eigenschaften und Bauformen gibt, ist es anschließend nötig diese entsprechend zu bewerten und die Stärken sowie Schwächen herauszufinden. Des Weiteren sollen die notwendigen Verbesserungen ermittelt werden.

Was muss ein BWS können?

Hier steht vor allem der Betrieb einer gemischten lokalen Flotte im Vordergrund. Um diese Kernfrage zu beantworten müssen alle notwendigen Parameter für einen solchen Betrieb ermittelt werden. Darunter fallen die Fahrtstrecken, der Verbrauch, Besonderheiten, Gemeinsamkeiten, usw. Im Zuge der Beantwortung dieser Frage soll sich daher ein Anforderungsprofil an ein entsprechendes BWS ergeben.

Welche Fahrzeuge sind für ein BWS geeignet?

Damit das Anforderungsprofil ermittelt werden kann, ist zunächst eine Auswahl an zu untersuchenden Fahrzeugen zu treffen. Anschließend stellt sich die Frage, welche davon für ein gemeinsam verwendetes BWS geeignet sind. Das Anforderungsprofil sowie der Vergleich mit bestehenden BWS soll eine Antwort für diese Kernfrage liefern.

Wieso haben sich BWS nicht durchgesetzt?

Bisher haben sich derartige Systeme, vor allem im gemischten Lokalverkehr, nicht durchgesetzt. In dieser Arbeit sollen die Gründe dafür ermittelt werden.

Wie sieht ein verbessertes BWS aus?

Sind alle anderen Kernfragen beantwortet kann man sich nun die Frage stellen, wie ein verbessertes BWS auszusehen hat. Zusammen mit dem Anforderungsprofil und den notwendigen Verbesserungen soll ein eigenes Konzept skizziert werden. Dieses Konzept soll abschließend einer Bewertung unterzogen werden.

2 Bestehende Batteriewechselsysteme

Die Recherche hat ergeben, dass eine Vielzahl von Batteriewechselsystemen, mit unterschiedlichsten Eigenschaften und Bauformen sowie Verbreitungsgrad, existiert. Je nach Verwendungszweck lassen sich die Systeme in BWS für PKW, Bus oder NFZ einteilen. In diesem Kapitel soll eine Auswahl davon vorgestellt werden, wobei der Aspekt darauf gelegt wurde, möglichst unterschiedliche Systeme zu zeigen um verschiedenste Stärken und Schwächen ermitteln zu können.

2.1 PKW

Bei den PKW wurden die Wechselsysteme von Better Place, Tesla Motors, BattSwap und enerChange genauer betrachtet.

2.1.1 Better Place

Das Unternehmen Better Place war wohl der bekannteste und am stärksten verbreitete Anbieter von Batteriewechselsystemen und -stationen, ehe es im Mai 2013 Insolvenz anmeldete. Grund dafür soll einerseits das eingeschränkte Kundeninteresse und andererseits die mangelnde Unterstützung der Autohersteller sein. [2] Zusammen mit Renault und Nissan wurde ein gemeinsames BWS entwickelt und im Renault Fluence Z.E. und anderen verbaut. Das Unternehmen konzentrierte sich vor allem auf die Märkte in Israel und Dänemark. [3] Das System wurde häufig durch Taxi-Unternehmen genutzt [4], [5]. In [Abbildung 1](#) ist die Wechselstation von Better Place und der Renault Fluence Z.E. zu sehen. In weiterer Folge sollen die Details des BWS anhand dieses Fahrzeuges erläutert werden.



Abbildung 1 – Better Place Batteriewechselstation mit Renault Fluence Z.E. [6]

Der Renault Fluence Z.E. verfügt über eine Lithium-Ionen-Batterie, die direkt hinter der Hinterachse eingebaut ist. In Abbildung 2 ist das Batteriepaket dargestellt. Es verfügt über eine nutzbare Kapazität von 22 kWh (bei 25 °C) und besteht aus 48 in Serie geschalteten Modulen, wobei jedes Modul aus 2 parallel und 2 seriell geschalteten Zellen (2P 2S) besteht, was in Summe eine Anordnung von 2P 96S ergibt. Eine Zelle hat eine nominelle Kapazität von rund 32,5 Ah und eine nominelle Spannung von 3,75 V. Das Gesamtgewicht des Moduls beträgt 290 kg, die Paketspannung liegt zwischen 240 und 403 V. [7]



Abbildung 2 – Batteriepaket des Renault Fluence Z.E. [8]

In Abbildung 3 ist der Aufbau des Batteriepakets zu sehen. Das Paket verfügt über eine Luftkühlung. Während der Fahrt wird das Paket vom Fahrtwind gekühlt, was nach Angaben von Renault (nach [9]) wegen des Aluminiumgehäuses ausreichend ist. Bei Aufladung in der Wechselstation wird das Paket mit bis zu 35 kW geladen. Der dafür benötigte Luftmassenstrom beträgt 500 kg/h bei einer Temperatur von 5 °C. Eine Besonderheit stellt die Kühlung während einem Ladevorgang an der Steckdose (Batterie im Fahrzeug) dar. Hier wird ein Kühlungssystem mit Peltier-Elementen verwendet, damit die niedrige Ladetemperatur gewährleistet werden kann. [7]

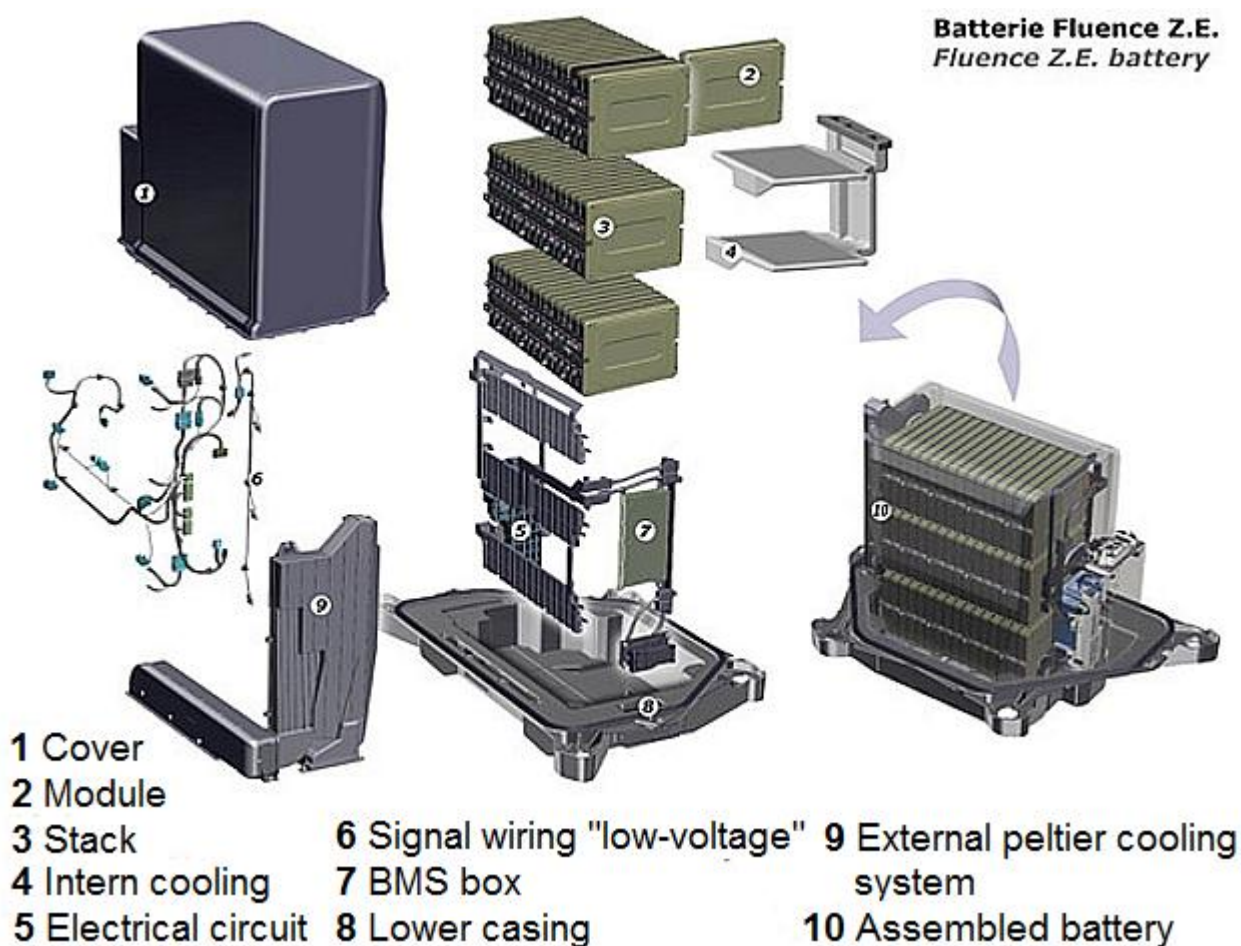


Abbildung 3 – Aufbau des Renault Fluence Z.E. Batteriepakets, eigene Darstellung [10]

Der Wechselvorgang erfolgt beim BWS von Better Place von unten. Das Paket wird dabei mit Hilfe einer Hebevorrichtung, die der Bomben-Ladevorrichtung von F16-Flugzeugen nachempfunden sein soll, in und aus dem Fahrzeug gehoben [11]. Dies soll nach [12] in rund einer Minute möglich sein, die tatsächliche Wechseldauer beträgt allerdings nach [13] mit fünf Minuten deutlich mehr. Der Wechselmechanismus erfolgt also unterirdisch, trotzdem verfügen die Wechselstationen über ein Nebengebäude.

Der mechanische Connector besteht aus der Zentrierung und der Fixierung des Pakets. Die Zentrierung des Pakets beim Wechsel erfolgt über zwei zylindrische Bolzen, die am Anfang eine kegelige Form aufweisen (siehe [Abbildung 4](#) Mitte links). Die mechanische Fixierung des Pakets erfolgt über vier Verdrehmechanismen, die nach der Positionierung des Pakets gedreht und somit verschlossen werden. In [Abbildung 4](#) (rechts und links) sind zwei der vier mechanischen Fixierungen zu sehen. [14]

Der elektrische Connector liegt, so wie alle anderen Batterieteile (inklusive Kühlung), in einem abgedichteten Raum. Der Connector befindet sich in [Abbildung 2](#) auf der rechten

Seite, auf halber Höhe. In Abbildung 5 links ist der Connector aus Abbildung 2 vergrößert dargestellt. Rechts davon ist der Connector ohne Gehäuse zu sehen. Hier ist vor allem der grüne Datenstecker interessant. Damit dieser ordnungsgemäß verbunden wird, muss die Zentrierung des Pakets bzw. des Steckers sehr genau erfolgen. Die beiden Bohrungen mit Senkung rechts und links (Abbildung 5 rechts) sind wahrscheinlich genau dafür verantwortlich. Die beiden orange ummantelten Kontakte neben dem Datenstecker dürften die Hauptpole der Batterie sein. [15]



Abbildung 4 – Mechanischer Connector des Renault Fluence Z.E. Batteriepakets [14]



Abbildung 5 – Elektrischer Connector des Renault Fluence Z.E. Batteriepakets [8] [15]

2.1.2 Tesla Motors

Einer der bekanntesten Hersteller von elektrischen Fahrzeugen ist Tesla Motors. Für das Tesla Model S wurde ein BWS entwickelt und bei einer Veranstaltung demonstriert (siehe Abbildung 6). In weiterer Folge wurde das System versuchsweise für einige bestehende Kunden zur Verfügung gestellt. Der Betrieb wurde jedoch mit der
September 2016

Begründung, dass seitens der Kunden kein Interesse bestehe, wieder eingestellt. Das mangelnde Interesse der Kunden wird von Tesla Motors damit begründet, dass eine Aufladung mit dem „Supercharger“ (Schnelladesystem von Tesla) auf 80 % in knapp 40 Minuten erzielbar ist. Dieser Ladevorgang soll für die meisten Tesla-Kunden ausreichend sein. [16]



Abbildung 6 – Tesla Motors Batteriewechsel beim Tesla Model S [17]

Der Wechsel des Batteriepakets erfolgt wie auch bei Better Place von unten. Die Positionierung des Fahrzeuges erfolgte bei der Vorstellung mit Hilfe von Führungsschienen auf dem Boden und einer leichten Erhöhung in Fahrtrichtung als Endanschlag. Der Wechsel dauerte bei der Vorstellung rund 1,5 Minuten. Für ein zukünftiges BWS wäre eine Positionierung mit Hilfe der bereits vorhandenen teilautonomen Fahrerassistenzsysteme von Tesla Motors denkbar. [18]

Eine Besonderheit des Tesla Model S stellt das Batteriekonzept dar. Die Batterie besteht aus tausenden Rundzellen mit dem Formfaktor 18650, die in mehrere Module unterteilt sind. In Abbildung 7 ist das geöffnete Batteriepaket zu sehen. [19] Die Module sind mit Hilfe von Kühlschleifen, die durch jedes Paket verlaufen, flüssigkeitsgekühlt. Die Kühlschleifen sind in Abbildung 7 in goldener Farbe zwischen den Rundzellen zu erkennen. Abbildung 8 zeigt ein Bild aus einem Patent von Tesla Motors. Die Kühlschleifen sind im Bereich der Zellen gewellt ausgeführt, was die großflächige Berührung der Zellen und somit eine gute Wärmeleitung sicherstellt. [20]



Abbildung 7 – Geöffnetes Batteriepaket des Tesla Model S [19]

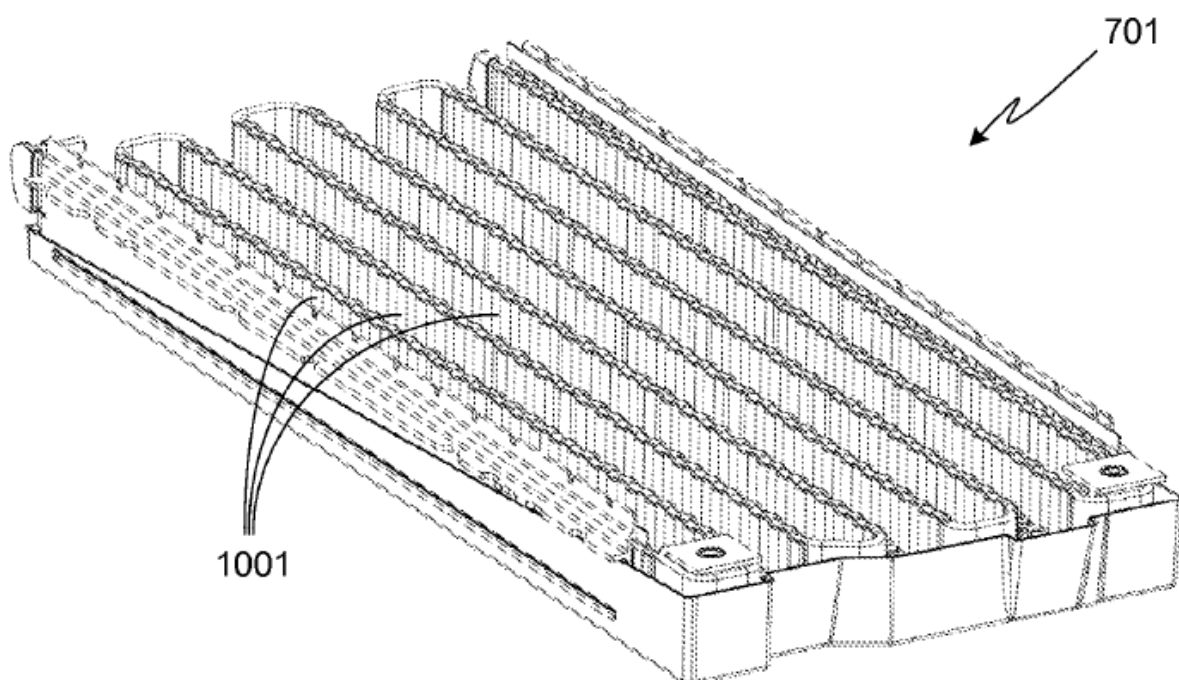


Abbildung 8 – Kühlschleifen des Tesla Model S [20]

Über den elektrischen und mechanischen Connector des Pakets ist nichts bekannt, jedoch wird dieser aufgrund des erforderlichen Schnellverschlusses für die Flüssigkeitskühlung relativ aufwendig ausfallen.

2.1.3 BattSwap

BattSwap Inc. ist ein US-amerikanisches Unternehmen mit Hauptsitz in Menlo Park, California. Das Unternehmen ist auch in Darmstadt, Deutschland (BattSwap DE GmbH) vertreten. [21]

Das BWS von BattSwap ist aufgrund seiner Gestaltung interessant. In [Abbildung 9](#) ist das Batteriepaket und die Wechsellvorrichtung von BattSwap zu sehen. Auffallend ist die längliche Pyramidenform des Pakets, welche für eine relativ einfache Zentrierung des Pakets im Fahrzeug sorgt. Über die Anordnung der Zellen im Paket ist nichts bekannt, diese wird jedoch durch die schräge Bauform beeinflusst sein. [21]

Das Paket ist der Länge nach ins Fahrzeug integriert und nimmt dafür den Platz im Mitteltunnel ein. Die Positionierung des Fahrzeuges (im Demonstrationsvideo ein umgebauter Skoda Octavia) erfolgt mit Hilfe von runden Führungsschienen, die die Räder an der Innenseite führen. Der Endanschlag erfolgt über eine Erhöhung auf der rechten Seite (in Fahrtrichtung), gegen die das Rad anfährt. In [Abbildung 9](#) sind die Führungsschienen (weiß) zu sehen. [21]



Abbildung 9 – Batteriepaket und Wechsellvorrichtung von BattSwap [21]

Über den mechanischen Connector gibt es keine direkte Information, jedoch lässt sich aufgrund der abgenützten Stellen über den seitlichen Ausnehmungen in der Wand des Pakets schließen, dass hier die mechanische Sicherung liegt (siehe [Abbildung 10](#) links). Diese könnte als Hakenmechanismus ausgeführt sein, da beim Wechsellvorgang die Batterie samt Fahrzeug zuerst angehoben (Haken wird entsichert) und anschließend das Paket entnommen wird. [21]

Die elektrische Verbindung wird über die beiden oben liegenden Stecker bewerkstelligt. Diese bestehen aus zwei einfachen Hauptverbindungen (seitlich) und einem mittleren, etwas komplexeren, Stecker. Die beiden Verbindungen sind in Abbildung 10 rechts dargestellt. Wie auch bei Better Place dürfte es sich hierbei um die beiden Hauptpole der Batterie und den Datenstecker handeln. [21]



Abbildung 10 – Mechanischer (links) und elektrischer (rechts) Connector von BattSwap [21]

Der Wechselmechanismus von BattSwap verfügt über Rollen (siehe [Abbildung 11](#)), die eine Bewegung des Pakets in Längsrichtung ermöglichen. Diese sind wahrscheinlich für die einfache Verwahrung bzw. die Entnahme des Pakets aus einer Lagervorrichtung vorgesehen. Der Hebemechanismus ist mechanisch als Kreuz ausgeführt. [21]

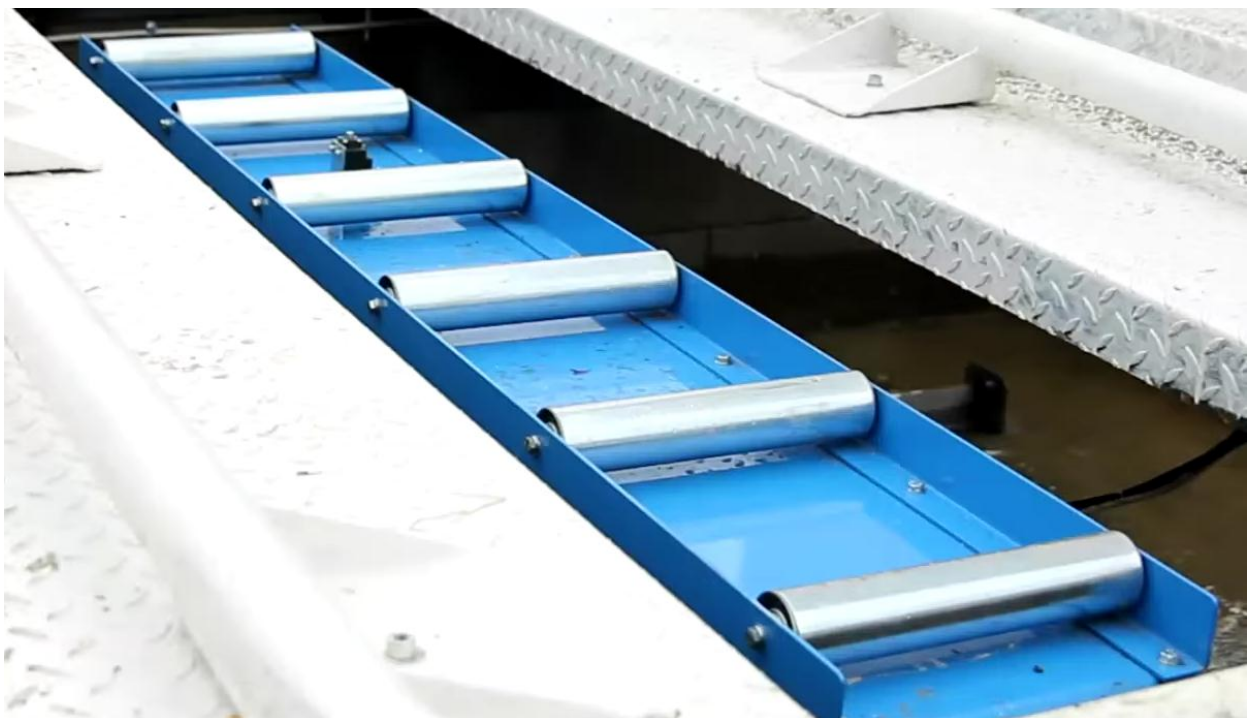


Abbildung 11 – Wechselmechanismus mit Rollen von BattSwap [21]

2.1.4 enerChange

Das BWS von enerChange existiert in mehreren Varianten, wovon jene vorgestellt werden soll, die sich am meisten von den anderen BWS unterscheidet. Besonders interessant ist das Wechselsystem mit Roboterarm. Dieses soll für maximale Kompatibilität zwischen verschiedenen Fahrzeugen sorgen, da so ein großer Teil der Einbaupositionen und Batterieformen abgedeckt werden kann. In Abbildung 12 ist das BWS von enerChange zu sehen. Eine weitere Besonderheit ist, dass beim gezeigten Fahrzeug die Batterien hinten angeordnet sind. [22]

Eine Zentrierung über ausgeprägte Abschrägungen ist aufgrund des Roboterarms nicht erforderlich. Eine spezielle Positionierung des Fahrzeuges, so wie dies bei den vorherigen BWS erforderlich war, entfällt ebenfalls. Wie das Robotersystem arbeitet, das heißt mit welchen Sensoren, bzw. wie die Führung der Batterie zum Fahrzeug hin funktioniert, ist nicht bekannt. Die Funktionsweise der mechanischen Fixierung des Pakets ist ebenfalls unbekannt. [22]

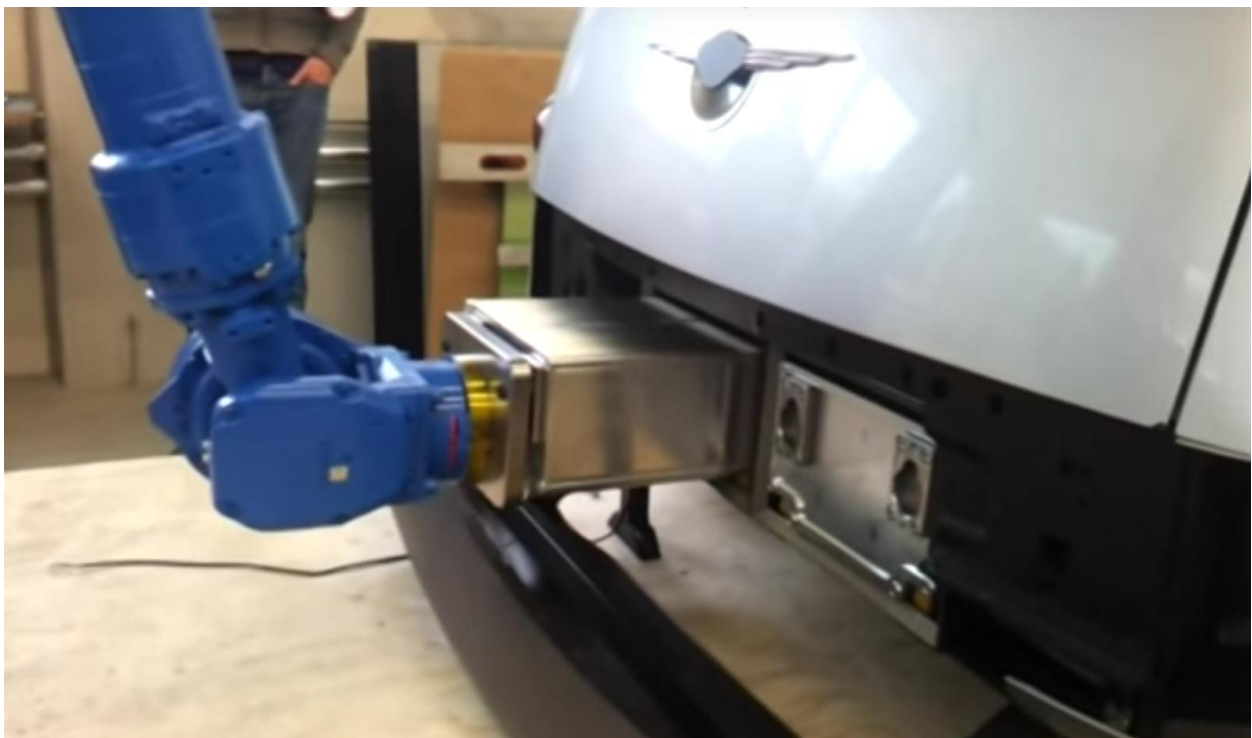


Abbildung 12 – Roboterarm des BWS von enerChange [22]

In Abbildung 13 ist ein CAD-Modell des elektrischen Connectors dargestellt. In dieser Form (Stecker) befindet sich der Connector in der Ladevorrichtung bzw. im Fahrzeug, das Batteriepaket verfügt über die Gegenseite (Buchse). Die vier großen Stifte könnten hier wieder die Hauptpole der Batterie sein. Die kleineren sechs Stifte in der Mitte

können für den Datentransfer zuständig sein. Zusätzlich zur vorhandenen seitlichen Führung des Pakets verfügt der Stecker über eine eigene Zentriervorrichtung (siehe Abbildung 13 rechts und links). [22]

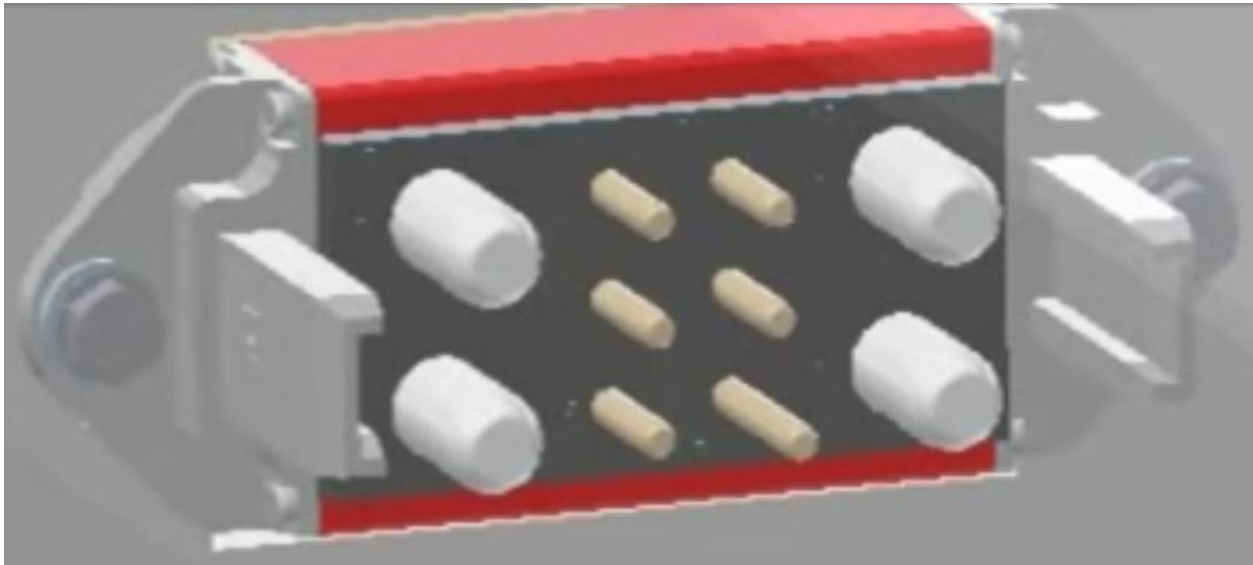


Abbildung 13 – Elektrischer Connector von enerChange [22]

2.2 Bus

Bei den Wechselsystemen für Autobusse soll nachfolgend das System von Change it vorgestellt werden. Das System von DB Tech soll wegen seiner Anwendung in einer gemischten Flotte erst in Kapitel 2.4.1 gezeigt werden.

2.2.1 Change it

Das BWS von Change it ist ein Konzept für Autobusse im Stadtverkehr (München, Deutschland). Das System verfügt über eine Batterie auf dem Dach, das Wechselsystem ist demnach überirdisch und arbeitet mit einem Greifarm, der von oben den Batteriewechsel durchführt. Die Wechseldauer beträgt maximal 3 Minuten. Die Batterielagerung wird ebenfalls direkt über der Fahrbahn vorgenommen. Wegen der obenliegenden Position wird angegeben, dass das Gewicht der Batterie 600 kg nicht überschreiten sollte. In [Abbildung 14](#) ist die Wechselstation samt Bus zu sehen. [23]

Das System soll zwischen 1,49 (niedrige Passagierzahl) und 2,26 kWh/km (hohe Passagierzahl mit 6 kW Heizung) verbrauchen. Damit kann eine Reichweite von 32,2 bzw. 21,2 km erzielt werden. Wegen des unbekanntenen SOC-Bereichs der Batterie kann aus diesen Daten nicht direkt auf die Batteriegröße geschlossen werden. [23]



Abbildung 14 – Wechselstation und Bus von Change it [23]

Eine Besonderheit des Systems ist der Einsatz von Ultracaps zum Dämpfen von Leistungsspitzen. Damit die Batterie weniger Energiedurchsatz erfährt, werden zum Rekuperieren Ultracaps eingesetzt. Die somit gespeicherte Energie wird direkt zum Beschleunigen wiederverwendet, was die Batterie entlastet. Dies reduziert außerdem den Energieverbrauch, da der Wirkungsgrad von Kondensatoren im Allgemeinen besser ist als der von Batterien. Die Verbrauchsreduktion soll ca. 14% betragen. In Abbildung 15 sind die Leistungskurven der Batterie bei einem typischen Fahrzyklus einmal ohne (oben) und einmal mit (unten) Ultracaps dargestellt. Man sieht, dass die Rekuperation die Batterie bei der Verwendung von Ultracaps überhaupt nicht belastet und dass die Leistungsspitzen beim Beschleunigen geglättet werden konnten. [23]

Um einem hochfrequentierten Betrieb gerecht zu werden, verfügt das BWS von Change it über, nach eigenen Angaben, hoch entwickelte Lithium-Metalloxid/Titanat Batterien, die bei 37 °C, 1C-Rate und 100% DOD über eine Zyklenlebensdauer von 8000 (bis 80% der Nennkapazität erreicht ist) verfügen. Bei dieser Angabe ist jedoch der tatsächliche Betrieb der Batterie nicht berücksichtigt. Auch die kalendarische Lebensdauer der Batterie ist nicht zu aufzufinden. Des Weiteren wird nicht miteinbezogen, dass der Einsatz von Ultracaps die Lebensdauer beeinflusst (näheres dazu in Kapitel 3.1.5). [23]



Abbildung 15 – Batterieleistung ohne (oben) und mit (unten) Ultracaps von Change it [23]

2.3 NFZ

Bei den BWS für Nutzfahrzeuge soll nachfolgend das System von Greenway gezeigt werden. Das System von DB Tech wird, wie bereits erwähnt, in Kapitel 2.4.1 behandelt.

2.3.1 Greenway

Greenway ist ein slowakisches Unternehmen, das BWS für leichte NFZ anbietet. [24] Je nach Ausführung des Fahrzeuges beträgt die Nutzlast zwischen 1,6 und 1,3 t und das Ladevolumen zwischen 7 und 16 m³ (inverse Korrelation). Es werden zwei Batteriegrößen, 38 und 59 kWh Kapazität mit 480 bzw. 640 kg Masse, angeboten. Die Reichweite wird je nach Fahrzeug und Batterie zwischen 120 und 140 km (38 kWh) bzw. 180 und 220 km (59 kWh) angegeben. [25]

Im Gegensatz zu den bereits vorgestellten Fahrzeugen, wird der Wechsel bei Greenway manuell mit Hilfe eines eigenen Gabelstaplers durchgeführt. Die Batterie wird dabei durch die seitliche Türöffnung in den Laderaum des Fahrzeuges eingeschoben.

Die Wechseldauer wird je nach Erfahrung des Anwenders zwischen 5 und 7 Minuten beziffert. Im Demonstrationsvideo war der Wechsel in unter 5 Minuten vollzogen. In Abbildung 16 ist der Batteriewechsel zu sehen. [26], [27]



Abbildung 16 – Batteriewechselsystem (59 kWh, 200 km) von Greenway [26], [28]

Die mechanische Führung des Pakets beim Wechseltvorgang erfolgt über seitlich angebrachte Schienen, die sowohl auf dem Stapler, als auch im Fahrzeug bzw. in der Ladestation vorhanden sind (siehe Abbildung 17 rechts Mitte und links unten). Das Paket verfügt über Rollen, die es in den Schienen führen. Damit das Batteriepaket vom Stapler an das Gegensystem (Fahrzeug oder Ladestation) übergeben werden kann, müssen diese zuerst gegeneinander ausgerichtet werden. Dafür wird der Stapler zuerst über das Niveau des Gegensystems angehoben, die seitlich angeordneten Haken werden richtig positioniert und anschließend wird der Stapler abgesenkt, wodurch die Haken mit dem Gegensystem verbunden werden. Damit ist die Ausrichtung vollzogen, das Paket kann nun händisch in das Gegensystem geschoben werden. In Abbildung 18 ist der ausgerichtete Stapler mit bereits eingeschobenem Batteriepaket zu sehen. Das Fahrzeug muss für den Wechsel keine besondere Position einnehmen. Es muss lediglich genug Platz zur Bedienung des Staplers vorhanden sein. Das Entfernen des Pakets aus dem Fahrzeug oder der Ladestation funktioniert analog. [26]

Über die Heizung und Kühlung des Pakets ist nichts bekannt, jedoch verfügt das Paket über Lüftungsschlitze (siehe Abbildung 17 oben). Die Abwärme der Batterie wird daher direkt in den Laderaum geleitet. [26]



Abbildung 17 – Batteriepaket von Greenway beim Wechsellvorgang [26]



Abbildung 18 – Ausrichtung des Staplers beim Batteriewechsel von Greenway [26]

Am unteren Ende in der Mitte des Pakets (siehe Abbildung 17) sind der elektrische (Mitte, teilweise rot) und mechanische (rechts und links davon) Connector dargestellt. Die mechanische Sicherung des Pakets funktioniert einerseits über den rechts und links vom elektrischen Connector angebrachten Einschnappmechanismus, der nur elektronisch gelöst werden kann. Andererseits ist auf der Rückseite des Pakets ein manuell zu betätigender Hebel angebracht, der das Paket zusätzlich sichert. [26]

2.4 Gemeinsam verwendete Batteriewechselsysteme

An dieser Stelle soll das System von DB Tech vorgestellt werden, welches sowohl bei Bussen als auch bei Nutzfahrzeugen eingesetzt wird.

2.4.1 DB Tech

DB Tech ist ein chinesisches Unternehmen, das ein gemeinsames BWS für Busse und leichte Nutzfahrzeuge herstellt. In [Abbildung 19](#) und [Abbildung 20](#) ist das BWS für die beiden Fahrzeugvarianten zu sehen. [29]

Eine Besonderheit des Systems stellt das modulare Batteriekonzept dar. Das BWS besteht nicht aus einem einzigen Paket, sondern aus vielen einzelnen Modulen, die nach Bedarf entweder für den Bus oder in einer geringeren Anzahl für das leichte NFZ verwendet werden können. Eine weitere Besonderheit ist die Position bzw. der Wechsel der Batterie. Je nach Fahrzeug ist das Paket seitlich bzw. beim Bus hinten verbaut, wobei der Wechsel der Batteriepakete von der Seite erfolgt. [29]



Abbildung 19 – BWS von DB Tech für Busse [29]



Abbildung 20 – BWS von DB Tech für leichte Nutzfahrzeuge [29]

Der Wechsel wird in einer Halle durchgeführt, in der auch die Pakete in regalartigen Aufbauten lagern. Im Boden der Halle sind Schienen verbaut, auf denen der Wechselmechanismus fahren kann. Das Paket wird vom Wechselapparat aus dem Regal entnommen und anschließend auf Schienen zum Fahrzeug befördert. Dort wird das Paket seitlich in das Fahrzeug eingebaut. In [Abbildung 21](#) ist die Wechselstation dargestellt. [29]

Über den mechanischen Connector ist nichts bekannt. Dieser wird aber aufgrund der Einbaulage und äußeren Abdeckung relativ einfach aufgebaut sein. Die Zentrierung des Pakets dürfte über Führungsschienen im Fahrzeug realisiert werden. Des Weiteren gibt es keinen Hinweis auf eine Heizung bzw. Kühlung des Pakets im Fahrzeug.



Abbildung 21 – Batteriewechselstation von DB Tech [29]

Die beiden Seiten des elektrischen Connectors (Fahrzeug- bzw. Batterieseite) sind in Abbildung 22 oben und unten zu sehen. Der Connector ist vergleichsweise simpel aufgebaut und verfügt über eine geringe Anzahl an Pins. Die beiden äußersten (links und rechts) Stecker dürften aufgrund ihrer Größe die Hauptpole der Batterie sein.



Abbildung 22 – Elektrischer Connector von DB Tech (beide Seiten) [29]

3 Analyse bestehender Batteriewechselsysteme

Die vorgestellten BWS weisen teilweise große Unterschiede aber auch einige Gemeinsamkeiten auf. Im folgenden Kapitel sollen der Aufbau und die Eigenschaften analysiert und bewertet, sowie Tendenzen ermittelt werden. Um die Analyse durchführen zu können, werden in jedem Unterpunkt die jeweiligen Anforderungen an ein BWS ermittelt. Anschließend wird jedes BWS entsprechend der Analyse bewertet, wobei die Bewertung die Stärken und Schwächen jedes Systems aufzeigen soll.

3.1 Aufbau und Eigenschaften

Der Aufbau bzw. die Eigenschaften der BWS werden nachfolgend in fünf Teilbereiche gegliedert und getrennt betrachtet, wobei es natürlich teilweise zu einem gegenseitigen Einfluss kommt.

3.1.1 Position im Fahrzeug und Wechselmechanismus

Die gezeigten BWS verfügen über äußerst unterschiedliche Positionen und Wechselmechanismen. Während Tesla Motors, Better Place und BattSwap auf die Position im Fahrzeugunterboden setzen, wird bei Change it das BWS am Dach verbaut. Bei Greenway nimmt das Paket eine nahezu zentrale Position ein. Bei DB Tech wird das Paket seitlich bzw. beim Bus auch hinten positioniert. Beim BWS von enerChange

war die Batterie ebenfalls hinten aufzufinden, wobei diese wegen des Roboterarms auch woanders verbaut werden könnte. Es ist daher keine klare Tendenz zu einer bestimmten Lösung zu erkennen.

Nachfolgend sollen die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Positionen diskutiert werden. Zunächst ist festzustellen, dass die Position im Fahrzeug verschiedene Kriterien unterschiedlich beeinflussen kann. Diese Einflüsse sollen separat erfasst werden, daher wird die Batterieposition für

- den Wechsel,
- die Crashesicherheit,
- die Fahrdynamik

getrennt analysiert. Diese drei Kriterien werden für ein BWS als essentiell betrachtet.

Für den **Wechsel** ist jene Position die beste, die den Wechsel einfach, schnell, kostengünstig und sicher ermöglicht. Des Weiteren spielt auch die Verwahrung des Pakets in der Wechselstation eine wichtige Rolle. Auch betriebliche Kriterien müssen bei der Position des Pakets berücksichtigt werden.

Bei einer Positionierung der Batterie auf dem Dach oder unter dem Fahrzeug, müssen teilweise große vertikale Wege zurückgelegt werden, welche wegen den hohen Batteriemassen zu einem aufwändigerem Wechselmechanismus führen. Wird die Batterie seitlich, hinten oder vorne positioniert, kann diese waagrecht entfernt werden, was sich positiv auf den Wechselmechanismus auswirkt.

Die anschließende Verwahrung des Pakets ist bei der seitlichen Entnahme jedoch möglicherweise problematisch. Zwar ist die Verwahrung aus technischer Sicht relativ einfach zu gestalten, jedoch ist es kaum möglich, die Wechselzeit für betriebsrelevante Aufgaben zu nutzen. So verhindert der seitliche Wechsel, beispielsweise bei einem Bus, das gleichzeitige ein- und aussteigen von Passagieren. Einerseits besteht die Gefahr des Einklemmens beim Wechselvorgang, andererseits wird eine derartiger Wechsel wahrscheinlich in einer Halle durchgeführt (wie bei DB Tech), in die ein Fahrgast keinen Zutritt hat. Für leichte NFZ ist dies ähnlich problematisch, da während des seitlichen oder hinteren Wechsels möglicherweise die Beladung des Fahrzeuges behindert wird.

Anders ist dies bei einem unterirdischen bzw. beim Wechsel von oben. Hier können während des Wechsels sehr wohl Passagiere ein- und aussteigen bzw. die Fracht in das leichte NFZ geladen werden. Hier ist jedoch festzuhalten, dass beim Wechsel von oben (wie bei Change it) stets gewährleistet sein muss, dass die Batterien gegen

hinunterfallen gesichert sind. Genauso muss beim unterirdischen Wechsel ein Verschluss der Öffnung im Boden, oder eine umfangreiche Absperrung vorhanden sein, damit niemand in die unterirdische Wechselstation hineinfällt. Die Verwahrung der Pakete ist beim Wechsel von oben nur beschränkt möglich, da der Platz nur begrenzt vorhanden ist bzw. weil sonst größere überirdische Bauten errichtet werden müssen. In Abbildung 14, dem BWS von Change it, ist dies zu sehen. Der Wechsel von unten erfordert eine relativ teure unterirdische Wechselstation, jedoch ist die Verwahrung der Batterien technisch so einfach zu lösen wie bei der seitlichen Entnahme.

Beim BWS von Greenway befindet sich das Paket direkt im Laderaum und muss daher aus diesem entfernt werden, was speziell bei einem vollbeladenen Fahrzeug zu Problemen bzw. Verzögerungen führen könnte, weil der Weg zur Batterie erst freigemacht werden muss. Ein derartiger Wechsel ist daher jedenfalls zu vermeiden.

Aus Sicht der **Crashsicherheit** ist für die Batterie jene Position zu bevorzugen, die bei einem Unfall die geringste Wahrscheinlichkeit einer Beschädigung der Batterie ermöglicht. Es ist daher zunächst zu ermitteln, welche Position dafür die geeignetste ist. In Abbildung 23 ist die Häufigkeiten der Anstoßrichtungen beim PKW zu sehen. Daraus lässt sich direkt ableiten, dass eine Position der Batterie im Frontalbereich ausgeschlossen ist. Die Wahrscheinlichkeit, die Batterie bei einem Crash zu beschädigen, ist dabei viel zu groß. Auch die hintere und seitliche Positionierung des Pakets ist nicht ideal. Ein Überschlag tritt nur äußerst selten auf, daher wäre eine Positionierung am Dach aus Sicht der Crashsicherheit denkbar.

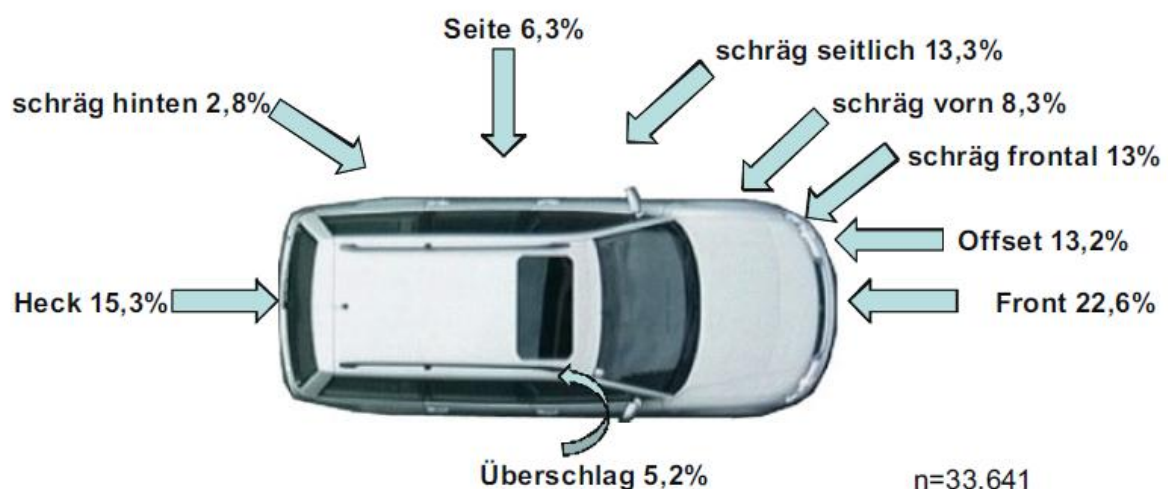


Abbildung 23 – Häufigkeit der Anstoßrichtungen für PKWs [30]

Bei allen gezeigten Aufprallarten ist die Position im Fahrzeugunterboden klar die sicherste, da diese bei Frontal-, Heck- und Seitencrash bei guter Positionierung unbeschädigt bleibt. Beim Überschlag ist die Position im Fahrzeugunterboden ebenfalls als sicherer zu bewerten als die auf dem Dach. Was bei diesen Überlegungen nicht berücksichtigt wurde, ist das Überfahren von Hindernissen. Die Position im Fahrzeugunterboden ist dafür jedenfalls als kritisch anzusehen, jedoch ist diese im Vergleich zu den anderen Positionen trotzdem zu präferieren. Diese Betrachtungen können qualitativ auch auf den Bus bzw. das leichte NFZ umgelegt werden. [30]

Aus Sicht der **Fahrdynamik** ist jene Position von Vorteil, die eine gleichmäßige Achslast ermöglicht und den Schwerpunkt so niedrig wie möglich hält.

Dafür ist die Position der Batterie im Fahrzeugunterboden äußerst gut geeignet, da der Schwerpunkt dadurch tiefst möglich liegt und die Gewichtsverteilung nahezu beliebig gesteuert werden kann. Die Position hinten bzw. vorne ist nur dann gut geeignet, wenn die Batterie als Gegengewicht beispielsweise für den Antrieb wirken soll, der sich auf der gegenüberliegenden Seite befindet. Die Position an der Fahrzeugseite (beispielsweise bei Bussen) ist aus fahrdynamischer Sicht nur dann unproblematisch, wenn die Batterie niedrig genug verbaut (Schwerpunkt) und die gleichmäßige Achselastverteilung gegeben ist. Die Batterie auf dem Dach zu montieren ist aus fahrdynamischer Sicht äußerst schlecht. Zwar lässt sich damit die Achslastverteilung noch einfacher regulieren als im Fahrzeugunterboden, allerdings ist die Anhebung des Schwerpunktes durch eine derartige Positionierung speziell beim PKW inakzeptabel.

Die Position im Fahrzeug beeinflusst auch maßgeblich den eingesetzten Wechselmechanismus. Bei Better Place, Tesla Motors und BattSwap wird der Wechsel von unten durchgeführt, daher wird eine Hebevorrichtung benötigt, die große Lasten vertikal befördern kann. Auch für den seitlichen Wechselvorgang ist ein gewisses Hebevermögen erforderlich, da die Pakete meistens gestapelt (in Regalen oder dergleichen) gelagert werden.

Der Wechselmechanismus wird außerdem von der Positionierung des Fahrzeuges bestimmt. Im Fall von Better Place, Tesla Motors und BattSwap erfolgt die Positionierung über Führungsmechanismen im Boden, daher ist der Wechselmechanismus relativ einfach zu gestalten. Diese Art der Positionierung hat allerdings den Nachteil, dass die unterstützten Fahrzeugtypen beschränkt sind. Für eine gemischte Flotte (z.B. Bus und PKW) ist eine Positionierung über Führungsschienen

jedenfalls problematisch. Der seitliche, hintere (bzw. vordere) und der dachseitige Wechsel ermöglichen eine vergleichsweise einfache Positionierung. Für maximale Kompatibilität ist ein Roboterarm (wie von enerChange) zwar eine gute Möglichkeit, allerdings ist dieser sicherlich die teuerste und aufwändigste Variante. Außerdem können damit, zumindest in der Ausführung von enerChange, keine unterirdischen Wechsel durchgeführt werden.

Die vorgestellten BWS verfügen fast alle über automatisierte Wechselmechanismen. Eine Ausnahme davon stellt das BWS von Greenway dar, bei dem der Wechsel manuell vollzogen wird. Dieser Wechselmechanismus ist zwar der einfachste und kostengünstigste, jedoch für einen hochfrequentierten Betrieb nicht geeignet. Eine Automatisierung ist zur Minimierung der Wechselzeit jedenfalls zu bevorzugen.

Zusammenfassend lässt sich daher feststellen, dass die Position der Batterie im Fahrzeugunterboden zu bevorzugen ist. Diese bietet den besten Kompromiss zwischen den Kriterien Wechsel, Crashesicherheit und Fahrdynamik, und ermöglicht die oben erwähnte betriebliche Nutzung des Fahrzeuges während des Wechsels, was speziell für den Autobusverkehr von Bedeutung ist. Für die tatsächliche Anwendung ist noch zu überprüfen, ob die Batterie im Unterboden ausreichend Platz findet. Speziell bei Niederflurbussen könnte diese Position zu einer unzulässigen Erhöhung des Fahrzeugbodens führen.

3.1.2 Heizung und Kühlung

In diesem Abschnitt soll die Heizung bzw. Kühlung der Batterie analysiert werden. Zunächst ist festzuhalten, dass ein BWS einem hochfrequentierten Betrieb unterliegt. Es wird daher in der nachfolgenden Abschätzung davon ausgegangen, dass die Batterie homogen temperiert aus der Wechselstation in das Fahrzeug gelangt. Lange Standzeiten des Fahrzeuges (mit Batterie) im Freien werden nicht berücksichtigt.

Um die Anforderungen an die Kühlung festzustellen, lässt sich zunächst mit einem einfachen thermodynamischen Modell eine Abschätzung durchführen. Betrachtet man die Batterie als einen homogenen Block mit der Masse m und der Wärmekapazität c , so lässt sich bei vorgegebener entstehender Batteriewärme Q_{Batt} und gewünschtem Temperaturunterschied ΔT , die benötigte Kühlung Q_{Ab} abschätzen. Der erste Hauptsatz

$$Q_{Batt} + Q_{Ab} = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (1)$$

liefert die Gleichung zur Berechnung der abgeführten Wärme und unter Berücksichtigung der Kühldauer t_{Ab} , die benötigte Kühlleistung

$$P_{Ab} = \frac{Q_{Batt} - m \cdot c \cdot \Delta T}{t_{Ab}} \quad (2)$$

Die entstehende Batteriewärme lässt sich mit der Kapazität des Pakets und dem Batteriewirkungsgrad berechnen. In Kapitel 5.2 wird eine Grobauslegung für ein eigenes BWS Konzept durchgeführt. Die detaillierten Ergebnisse dieser Berechnung können Anhang 9.3 entnommen werden. Unter relativ schneller Entladung und der Einhaltung eines engen Temperaturfensters (siehe Kapitel 3.1.5), erhält man mit den Zahlenwerten aus der Grobauslegung

$$Q_{Batt} = 22 \text{ kWh} \cdot 0,06 = 4752 \text{ kJ},$$

$$m = 176 \text{ kg},$$

$$c = 0,7 \text{ kJ/kgK} \quad [31], [32],$$

$$\Delta T = 10 \text{ K} \quad \text{bei } t_{Ab} = 1 \text{ h}^1$$

die benötigte Kühlleistung pro Paket

$$P_{Ab} = 978 \text{ W}. \quad (3)$$

Bei diesem einfachen Ansatz ist ein Wärmeübergang an den Grenzen des Moduls zur Umgebung nicht berücksichtigt. Des Weiteren ist die Entladezeit mit einer Stunde sehr kurz gewählt worden, wodurch die Leistung ebenfalls sehr hoch ausfällt. Es lässt sich daher sagen, dass die tatsächliche Leistung noch geringer ausfallen wird, was den Schluss zulässt, dass eher keine leistungsstarke Kühlung erforderlich ist.

Für die Heizung ist der Wärmeübergang zur Umgebung entscheidend, daher kann man mit einem einfachen Modell mit stationärem Wärmeübergang die abgegebene Leistung abschätzen. Um einen geringeren Wärmeübergang zu erzielen, ist es nötig das Paket entsprechend zu isolieren. Die abgegebene Leistung durch die Isolierschicht, bzw. die mindestens benötigte Heizleistung berechnet sich näherungsweise durch

$$P_{Ab} = \lambda \cdot \frac{A}{l} \cdot \Delta T \quad (4)$$

und ergibt sich mit den Zahlenwerten

¹ Bei 1C (Ent-)Ladung und einer Ausgangstemperatur von 20 °C bei $T_{\max} = 30 \text{ °C}$

$$\lambda = 0,04 \text{ W/mK [33]},$$

$$A = 1 \text{ m}^2 \text{ }^2),$$

$$l = 1 \text{ cm} \text{ }^3),$$

$$\Delta T = 45 \text{ K} \text{ }^4)$$

zu

$$P_{Ab} = 180 \text{ W}. \quad (5)$$

Es ist zu bemerken, dass hierbei nur die Leistung durch die Isolierschicht berücksichtigt wurde. Außerdem wird davon ausgegangen, dass sich die Temperatur des Pakets dabei nicht ändert, was in der Praxis kaum auftritt. Die errechnete benötigte Heizleistung liegt bei Weitem unter der Verlustleistung (Wärmeabgabe) der Batterie (1.260 W bei 1h Entladedauer), daher lässt sich sagen, dass eher eine Kühlung als eine Heizung benötigt wird. Betrachtet man eine höhere Entladedauer von beispielsweise 7 Stunden, so wird eine Verlustleistung von 180 W erreicht, das heißt es werden in diesem Modell weder Kühlung noch Heizung benötigt. Es ist daher trotzdem notwendig, insbesondere bei längerer Benutzung bzw. unter niedriger Last, eine Heizvorrichtung vorzusehen. Die benötigte Heizleistung fällt jedoch gering aus, daher kann diese auch mithilfe des Innenwiderstands der Batterie erfolgen.

Was bei beiden Betrachtungen nicht berücksichtigt wurde, ist die Temperaturverteilung im Paket. Diese kann an manchen Stellen sehr wohl kritisch werden. Dieses Problem wurde in [34] für eine austauschbare Batterie untersucht. Das Ergebnis der Untersuchung ist die Empfehlung einer Flüssigkeitskühlung, damit lokale Temperaturspitzen vermieden werden. Aus technischer Sicht wäre daher eine Flüssigkeitskühlung zu bevorzugen, allerdings muss auch berücksichtigt werden, dass damit der Paketaufbau und der Connector wesentlich aufwändiger werden. Außerdem entsteht aufgrund der Kühlflüssigkeit ein zusätzlicher Wartungsaufwand (Flüssigkeit selbst und Dichtungen).

Um diesen Aufwand zu reduzieren würde sich eine Luftkühlung besser eignen. Hier wird kein spezieller Connector bzw. Abdichtung benötigt. Die Dichtheit des Systems ist zwar erstrebenswert aber im Falle einer undichten Stelle ist das Kühlmedium Luft unproblematisch. Um die Problematik der lokalen Spitzentemperaturen zu verringern, könnte man beispielsweise die Paketdicke reduzieren und somit die Distanz jeder Zelle zur Luftkühlung vermindern.

² Abschätzung der Modulfläche, die im Kontakt zur Umgebung steht

³ Abschätzung der Dicke des isolierenden Materials

⁴ Temperaturdifferenz ausgehend von 25 °C und $T_{\min} = -20 \text{ °C}$

Manche bestehende BWS verfügen über gar keine erkennbare Kühlung, was aufgrund der oben genannten Überlegungen nicht unbedingt abwegig ist. Der Aufwand würde sich hier auf ein Minimum reduzieren. Die Batterielebensdauer ist jedoch maßgeblich von der Temperatur abhängig, daher sollte nicht gänzlich auf eine Heizung bzw. Kühlung verzichtet werden. Um die Lebensdauer der Batterie zu verbessern, sollte das Paket überwacht und kontrolliert beheizt oder gekühlt werden. [35]

Eine andere Möglichkeit zur Kühlung besteht mit Hilfe von Peltier-Elementen, so wie dies beim BWS von Better Place im Renault Fluence Z.E. der Fall ist (siehe Kapitel 2.1.1). Dieses System ist zwar relativ einfach, jedoch liegt der Wirkungsgrad von Peltier-Elementen bei rund 10-15 % des Carnot-Wirkungsgrades und ist daher nicht besonders effizient. Eine Kühlung mit einem derartigen System stellt demnach einen zusätzlichen Energieverbrauch dar und ist somit bei elektrischen Fahrzeugen im Allgemeinen zu vermeiden. [36]

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für den hochfrequentierten Betrieb eines BWS nur eine geringe Heiz- bzw. Kühlleistung benötigt wird. Es sollte aber nicht gänzlich auf ein derartiges System verzichtet werden, da dadurch die Lebensdauer der Batterie negativ beeinflusst wird. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass vom typischen Betrieb (ständiger Wechsel) abgewichen wird (beispielsweise längere Stehzeit über Nacht). Für solche Fälle sollte eine entsprechend leistungsstarke Temperierung vorhanden sein, damit auch dieser Fall abgedeckt werden kann. Aus Sicht der Lebensdauer sollte das Paket in einem engen Temperaturfenster um 25 °C gehalten werden (siehe auch Kapitel 3.1.5). Aufgrund des geringen Aufwandes und der ausreichenden Kühlleistung stellt die Luftkühlung den besten Kompromiss dar. Des Weiteren ist eine nach außen hin gute Isolierung des Pakets empfehlenswert.

3.1.3 Zentrierung und Connector

Für die ordnungsmäßige mechanische und elektrische Verbindung des Batteriepakets mit dem Fahrzeug sind eine präzise Zentrierung beim Wechsel, ein ausreichend fester mechanischer Connector sowie eine gut leitender und fixierter elektrischer Connector erforderlich. Der Zentrierung des Pakets geht eine ausreichend genaue Positionierung des Fahrzeuges voraus, die bereits in Kapitel 3.1.1 erwähnt wurde. Ist das Fahrzeug in der richtigen Position, so wird das Paket dem Fahrzeug zugeführt. Hat das Paket das Fahrzeug erreicht, muss dieses so weiterbewegt werden, dass eine sichere Verbindung durch den mechanischen bzw. elektrischen Connector hergestellt werden kann.

Unter Betrachtung der bestehenden BWS, kann die Zentrierung entweder über das Gehäuse des Pakets, über den Wechselmechanismus selbst oder mit Hilfe eigener Zentrierbolzen durchgeführt werden. Auch mehrere Zentrierarten können gleichzeitig verwendet werden.

Die Zentrierung über das Gehäuse ist eine sehr einfache Methode und ermöglicht eine geringe Genauigkeit des Wechselapparates. Das BWS von BattSwap verfügt über eine sehr ausgeprägte Pyramidenform, die eine derartige Zentrierung darstellt. Durch die großen Schrägen wird aber der Batterieaufbau negativ beeinflusst (siehe Kapitel 3.1.4 für Details).

Wird das Paket mithilfe des Wechselmechanismus selbst zentriert, so muss dieser sehr genau arbeiten, was den Aufwand erhöht. Das BWS von enerChange verfügt über einen Roboterarm, der genau diese Aufgabe übernimmt. Wie bereits mehrmals erwähnt, ist diese Lösung sehr aufwändig und daher eher ungeeignet. Die anschließende mechanische Führung erfolgt gleitend am Gehäuse. Beim BWS von Greenway wird die Zentrierung manuell mit Hilfe von Haken und Schienen am Wechselstapler durchgeführt. Die mechanische Führung wird hier mit Rollen gelöst, damit das Paket händisch manipulierbar ist. Diese Methode ist zwar sehr einfach, jedoch aufgrund der manuellen Tätigkeit nicht für einen hochfrequentierten Betrieb geeignet.

Das Batteriepaket kann auch mithilfe eigener Zentrierbolzen in Position gebracht werden. Voraussetzung dafür ist die einigermaßen genaue Positionierung durch den Wechselmechanismus, was diesen wiederum aufwändiger werden lässt. Das BWS von Better Place arbeitet mit dieser Zentrierart. Die Zentrierbolzen verfügen im Einlaufbereich über eine kegelige Form (Spitze gerundet), die die Zentrierung ermöglicht. Der Vorteil dieser Zentrierart liegt in ihrer hohen Genauigkeit.

Des Weiteren kann der Zentrierbolzen gleichzeitig als mechanischer Connector dienen. In [Abbildung 24](#) sind die mechanischen und auch elektrischen Connectoren von KJ Group (links) und Key Power (rechts) dargestellt. Diese beiden BWS wurden, wegen der geringen Unterschiede zu den bereits vorgestellten bestehenden BWS, bisher nicht erwähnt. Die beiden Systeme weisen eine Zentrierung und Fixierung durch kegelig angeschliffene Bolzen auf. Der mechanische Connector arbeitet beim BWS von XJ Group mit Hilfe der ausgeprägten Rillen im Bolzen. Bei Key Power wird der spitze Bolzen verdreht und die eingefräste Nut mit einem Gegenstück verbunden. [29]

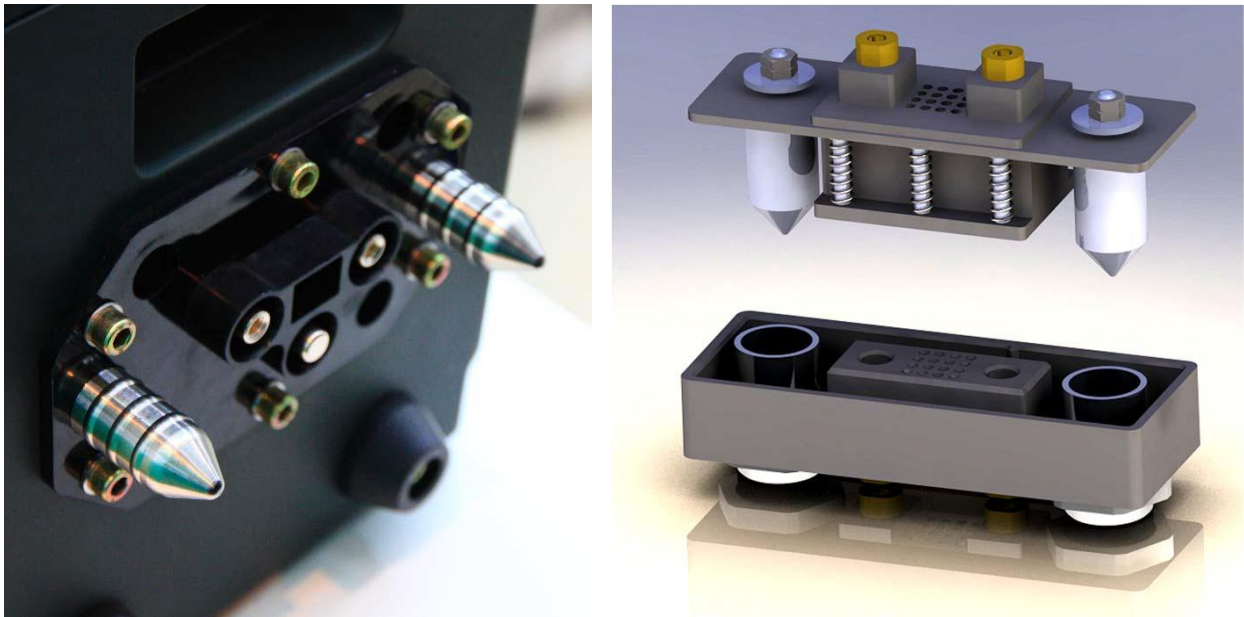


Abbildung 24 – Connector von XJ Group (links) und Key Power (rechts) [29]

Die mechanische Sicherung kann auch separat zur Zentrierung erfolgen. So wird der mechanische Connector beim BWS von Better Place durch einen Verdrehmechanismus realisiert. Dieser muss aufgrund des Einbaus von unten zusätzlich das Gewicht der Batterie tragen können. Dieser Connector erfordert außerdem eine genaue Zentrierung der Batterie, damit der Verschluss problemlos verdreht werden kann. Diese ist durch die kegelig angeschliffenen Bolzen gegeben.

Der Connector von BattSwap funktioniert wahrscheinlich über ein Verhakungssystem, was eine einfache Realisierung darstellt. Durch die pyramidenförmige Zentrierung sitzt das Paket außerdem relativ fest. Dadurch und durch den Hakenmechanismus wird keine besondere Genauigkeit in diesem Bereich benötigt. Der Connector muss lediglich die vertikale Position sichern und keine seitliche Fixierung übernehmen.

Das BWS von Greenway verwendet einen elektronisch gesteuerten Mechanismus und eine zusätzliche manuell zu bedienende Sicherung. Wie bereits erwähnt, ist der manuelle Vorgang nicht optimal, allerdings ist die zusätzliche elektronische Freigabe des vorderen Einrastmechanismus zu erwähnen. Diese Maßnahme erhöht die Sicherheit gegen fehlerhafte Handhabung und wurde daher trotz des sonst manuellen Wechselvorganges verwendet.

Über den mechanischen Connector von Tesla Motors ist nichts Weiteres bekannt, jedoch wird dieser aufgrund der vorhandenen Flüssigkeitskühlung relativ komplex ausfallen. Die Dichtheit des Systems muss jederzeit gewährleistet sein. Des Weiteren darf während des Wechselvorganges keine Flüssigkeit austreten, weswegen ein entsprechender Verschlussmechanismus für das Kühlsystem verbaut sein muss.

Der elektrische Connector verbindet einerseits die Hauptpole der Batterie und Datenpins, die für die Überwachung und Regelung der Batterie nötig sind. Die Batterie kann entweder über den Stecker oder die Buchse verfügen. Bei den meisten vorgestellten Systemen befindet sich aber die Buchse in der Batterie (Better Place, BattSwap, enerChange, Greenway, Key Power). Oftmals verfügt der elektrische Connector noch über eine eigene Zentrierungsmaßnahme oder die Paketzentrierung selbst ist dem Connector sehr nahe platziert. Dies hat den Zweck den einwandfreien elektrischen Kontakt zu sichern.

Bei Better Place ist eine separate Zentrierung für diesen Zweck vorhanden. Diese ist auch notwendig, da der Datenstecker mit sehr feinen Pins versehen ist und sonst nicht richtig verbunden werden kann. Dies stellt eine relativ komplexe Lösung dar, jedoch können dadurch viele Pins in kompakter Bauweise verbunden werden.

Bei BattSwap kommt ebenfalls ein kompakter Datenstecker zum Einsatz. Die Hauptpole befinden sich direkt daneben und könnten bei einem kegeligen Einlauf des fahrzeugseitigen Gegenstücks ebenfalls zentrierende Wirkung haben. Zu bemerken ist, dass beim BWS von BattSwap zwei gleiche Stecker vorhanden sind. Welcher Zweck damit verfolgt wird, ist nicht bekannt, jedoch sollte aus Kostengründen prinzipiell auf doppelte Ausführungen verzichtet werden.

Beim BWS von enerChange kommt ebenfalls eine eigene Zentrierung des elektrischen Connectors zum Einsatz, jedoch sind hier die Pins deutlich größer und in geringerer Anzahl ausgeführt. Auffallend sind bei diesem System die vier groß ausgeführten Hauptpole. Der Grund dafür konnte nicht festgestellt werden. Auch hier ist zu bemerken, dass doppelte Ausführungen idealerweise vermieden werden sollten.

Das BWS von DB Tech verfügt über einen sehr einfachen elektrischen Connector. Dieser verwendet kein konventionelles Stecksystem, sondern erzeugt den Kontakt über einfache axiale Berührung der Pins. Diese Ausführung ist zwar äußerst simpel, jedoch ist ein derartiger Aufbau anfällig auf schlechten Kontakt durch beispielweise Verschmutzung der Pins. Des Weiteren ist die Kontaktfläche kleiner, was sich negativ auf den Stromübergang auswirkt.

Eine Besonderheit des Connectors von Key Power sei an dieser Stelle noch erwähnt. Dieser verfügt über eine gefederte Steckverbindung, was zwar etwas komplexer, jedoch für den kontinuierlichen Kontaktaufbau vorteilhaft, ist.

Für die mechanische und elektrische Verbindung sowie Zentrierung des Fahrzeuges existiert eine Vielzahl an Lösungen. Es lässt sich daher diesbezüglich kein eindeutiger

Trend ableiten. Es lässt sich aber feststellen, dass das Zusammenspiel der Komponenten funktionieren muss.

Ein einfach gestalteter Wechselmechanismus bedeutet in den meisten Fällen, dass die Zentrierung auf das Paket verlagert wird. Eine Zentrierung durch das Gehäuse stellt eine sehr einfache Methode dar, jedoch muss der elektrische und mechanische Connector dafür geeignet sein. Eine genauere Zentriermethode stellt die Zentrierung mit kegelig einlaufenden Bolzen dar, wobei hier wiederum der Wechselmechanismus bereits eine gewisse Genauigkeit aufweisen muss.

Der mechanische Verschluss sollte einfach aber fest gestaltet sein. Der Verdrehmechanismus von Better Place stellt dafür eine gute Lösung dar, die Genauigkeit der Zentrierung und Positionierung muss allerdings gegeben sein. Ein Verschluss durch Haken, wie dies bei BattSwap der Fall sein dürfte, ist aus dieser Sicht einfacher.

Die elektrische Verbindung ist maßgeblich von der Positionsgenauigkeit des Pakets abhängig. Wird ein Stecker mit vielen Pins verwendet, so wie es bei Better Place der Fall ist, wird eine genaue Positionierung benötigt. Eine gesonderte Zentrierung für den elektrischen Connector könnte dafür erforderlich sein. Wird der elektrische Connector einfach gestaltet, ähnlich dem von DB Tech, so ist eine spezielle Zentrierung nicht unbedingt erforderlich. Um dem Nachteil der geringeren Kontaktfläche entgegen zu wirken, könnte der Connector zum Beispiel flacher und größer ausgeführt werden. Um den einwandfreien Kontakt zu sichern, könnte dann ein gefederter Connector zum Einsatz kommen.

3.1.4 Paketgestaltung

In diesem Kapitel soll der innere Aufbau des Pakets, das heißt die Anordnung der Zellen und der Heizung bzw. Kühlung, die kompakte Bauweise, sowie die äußere Form des Pakets und deren Auswirkungen behandelt werden.

Grundsätzlich gilt, dass das Paket einfach, kompakt und für den Wechsel praktisch gestaltet sein sollte. Dies beginnt bereits bei der Zellanordnung und zugehörig dazu auch bei der Anordnung der Kühlkanäle, falls vorhanden. Zunächst ist zwischen runden und quaderförmigen Zellen zu unterscheiden. Pouch-Zellen werden den quaderförmigen Zellen zugezählt, da sie meistens in kleine Module mit eigenem Gehäuse in dieser Form zusammengefasst werden. Der Vorteil von quaderförmigen Zellen (wie beim BWS von Better Place) ist die gute Platzausnutzung und die damit verbundene bessere Dichte. Tesla Motors benützt trotzdem Rundzellen, auch wenn diese Leerräume im

Paket zur Folge haben. Grund dafür ist die bereits vorhandene Massenproduktion, die die Zellen preislich günstig macht.

Es soll anhand einer kurzen Berechnung der Nachteil der Leerräume gezeigt werden. In Abbildung 25 sind drei Rundzellen (rot) in einer dichtest gepackten Anordnung dargestellt. In der Mitte bildet sich ein unbenützter Leerraum (gelb), der sich mit Hilfe simpler Geometrie berechnen lässt. Nach einigen Umformungen ergibt sich für den Leerraum bezogen auf die Dreiecksfläche die Gleichung

$$1 - \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{3}} = 9,3 \% . \quad (6)$$

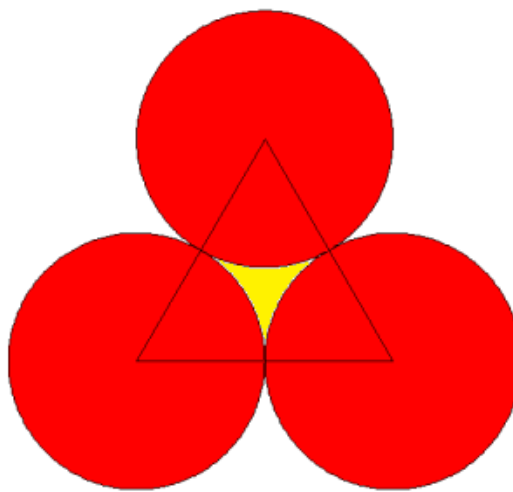


Abbildung 25 – Rundzellen (rot) mit Leerraum (gelb), geänderte Darstellung [37]

Bei gleichen Zelleigenschaften verfügt daher die Rundzellenanordnung um eine 9,3% geringere Energie- sowie Leistungsdichte (bezogen auf das Volumen).

Die Anordnung der Heizung bzw. Kühlung ist bei Rundzellen aufwändiger. Entweder müssen die Kanäle geschwungen ausgeführt werden, wie dies in Kapitel 2.1.2 beim Patent von Tesla Motors der Fall ist, oder die Zellen werden nur linienförmig berührt, was sich äußerst negativ auf den Wärmeübergang auswirkt. Bei quaderförmigen Zellen ist dies nicht der Fall. Die Heiz- bzw. Kühlleitungen berühren die Zellen an großen Flächen und können gerade und daher sehr einfach ausgeführt werden.

Für die einfache Gestaltung des Pakets ist es von Vorteil, so wenige Einzelteile wie möglich vorzusehen. Dies ist aus Sicht des Zusammenbaus und der Wartung vorteilhaft. Außerdem sind das Balancing und die Überwachung der einzelnen Zellen

bei einer geringeren Anzahl einfacher und kostengünstiger ausführbar. Das Konzept von Tesla Motors (tausende einzelne Rundzellen) ist in dieser Hinsicht sehr ungünstig. Die Bauweise des Pakets von Better Place, mit 48 Modulen zu je 4 Zellen (insgesamt 192 Zellen), ist diesbezüglich besser.

Die äußere Form des Pakets spielt einerseits für den Wechsel eine Rolle, andererseits ist dadurch die Integration in das Fahrzeug stark beeinflusst. Die Anforderungen an das Fahrzeug spielen dafür, zusammen mit den bereits in Kapitel 3.1.1 behandelten Batteriepositionen (Position im Unterboden zu bevorzugen), eine große Rolle.

Für den PKW muss beispielsweise eine Position und eine Bauform gewählt werden, die den Innenraum des Fahrzeuges nicht zu stark beeinflusst. Des Weiteren soll auch der Kofferraum so wenig wie möglich vom Paket reduziert werden.

Für LNFZ gilt ähnliches, allerdings liegt hier das Hauptaugenmerk auf dem Laderaum. Dieser soll so wenig wie möglich beeinträchtigt werden, da dieser (beispielsweise aus Sicht eines Lieferanten) direkt für den Umsatz bzw. Gewinn verantwortlich ist.

Für Autobusse ist der Batteriebauraum aufgrund seiner Größe eher unkritisch, jedoch sollte unbedingt berücksichtigt werden, dass es teilweise besondere Anforderungen gibt. So müssen beispielweise Niederflurfahrzeuge über ein gewisses Minimalniveau verfügen, das durch eine im Unterboden eingebaute Batterie nur schwierig erreicht wird. Eine mögliche Abhilfe wäre beispielsweise die Einstiegsbereiche normal (dünner Boden) auszuführen und in den anderen Bereichen eine größere Bodendicke (mit kontinuierlichem Anstieg) vorzusehen. Damit wäre die Position im Unterboden noch eingeschränkt möglich.

Die Anforderungen bezüglich Bauform des Pakets sind also bei den gezeigten Fahrzeugtypen ähnlich. Diese Überlegungen führen zu dem Schluss, dass die Paketform jedenfalls dünn sein sollte. Ein solches Paket ist beim BWS von Tesla Motors zu finden. Durch die geringe Dicke ist jedoch die Breite und Länge des Pakets beachtlich, was sich negativ auf den Wechselmechanismus auswirkt. Die Pakete von Change it und DB Tech sind zwar flach gebaut, jedoch für die PKW Anwendung im Unterboden bereits zu dick. Zwischen diesen beiden Beispielen ist daher ein Kompromiss zu finden.

Das Paket von BattSwap ist für das verwendete umgebaute Fahrzeug vorteilhaft, da hier der Mitteltunnel benützt werden kann. Für ein neu konzipiertes Fahrzeug ist diese

Bauform aber eher suboptimal. Die Zellanordnung im Paket von BattSwap ist zwar nicht bekannt, jedoch wird diese von den schrägen Wänden jedenfalls negativ beeinflusst. Es entstehen dadurch Leerräume, weil die Zellen eine gewisse Dicke aufweisen und höchstwahrscheinlich über keine Pyramidenform verfügen. Die längliche Bauform des Pakets verstärkt diesen Effekt noch, da bei einem wesentlich breiteren Paket die Leerräume am Rand weniger ins Gewicht fallen würden. Es ist daher festzustellen, dass schräge Wände am Rand, im Sinne eines einfachen Wechsels (siehe Kapitel 3.1.3), sehr wohl akzeptiert werden können, wenn das Paket über entsprechende Abmessungen verfügt.

Die Form der Batterien von Better Place und Greenway ist aus Sicht der oben genannten Kriterien als äußerst unvorteilhaft zu bewerten. Bei Greenway sieht man die Problematik der Laderaumreduktion besonders deutlich.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass quaderförmige Zellen den Rundzellen aus technischer Sicht vorzuziehen sind. Aus wirtschaftlicher Sicht könnten aber auch Rundzellen verwendet werden, sollte der Preisvorteil den anderen Aufwänden überwiegen. Eine geringe Anzahl an Zellen ist anzustreben. Die Bauform der Pakete sollte möglichst flach, jedoch nicht zu breit bzw. lang ausfallen, damit die Position im Unterboden des Fahrzeuges ermöglicht werden kann und der Wechselmechanismus einfach ausfällt. Schrägen im Randbereich können im Sinne des einfachen Wechsels toleriert werden, auch wenn diese Leerräume verursachen.

3.1.5 Lebensdauer

Für jedes elektrische Fahrzeug, und daher auch für ein BWS, ist die Lebensdauer der Batterie einer der wichtigsten wirtschaftlichen und technischen Faktoren. BWS haben hierbei den Vorteil, dass Batterien am Ende ihrer Lebensdauer einfach aus der Wechselstation entfernt werden können, was sich bei elektrischen Fahrzeugen mit fest verbauter Batterie aufwändiger gestaltet. Für die Analyse bestehender BWS ist auch die Kenntnis der Einflüsse der verwendeten Komponenten auf die Lebensdauer notwendig. Es sollen daher an dieser Stelle die grundsätzlichen Einflüsse auf die Lebensdauer beleuchtet werden. Da diese Thematik äußerst umfangreich und stark von den tatsächlich vorhandenen Betriebsbedingungen abhängig ist, sollen hier nur einige ausgewählte Zusammenhänge, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, gezeigt werden.

Zunächst lässt sich die Lebensdauer einer Batterie durch zwei Alterungserscheinungen beschreiben. Ein Teil betrifft die bloße Alterung der Zellen über Zeit, ohne dabei die Nutzung der Batterie zu berücksichtigen. Dieser Teil wird als kalendarische Lebensdauer bezeichnet. Der zweite Teil entsteht durch die zyklische Verwendung der Batterie, unabhängig vom zeitlichen Aspekt, und wird als Zyklenlebensdauer bezeichnet. Für eine Anwendung im Fahrzeug müssen die beiden Aspekte stets gemeinsam betrachtet werden. [38] Diese unterliegen verschiedensten Faktoren, vor allem an aber

- der Temperatur [38],
- dem Lade-/Entladestrom und dessen Verlauf [38],
- dem Ladezustand (State of Charge = SOC) [35],
- dem verwendeten Bereich, sowohl von Größe (z.B. $\Delta \text{SOC} = 10 \%$) als auch Lage (z.B. 10 – 20 % oder 50 - 60 %) [39],
- der Verwendung von Rekuperation. [35]

Die Alterung der Batterie ist durch den Verlust von Kapazität und Leistung sowie vom Anstieg des Innenwiderstandes geprägt. Als Lebensdauerende (End of Life = EOL) wird üblicherweise der Zeitpunkt betrachtet, bei dem noch 80 % der Nennkapazität der Batterie vorhanden sind. Nachfolgend sollen daher die Einflüsse auf den Kapazitätsverlust gezeigt werden. [38]

Die kalendarische Lebensdauer ist im Wesentlichen von der Temperatur und vom Ladezustand SOC abhängig. In Abbildung 26 sind die Ergebnisse eines ca. 5 Monate dauernden Versuches dargestellt.

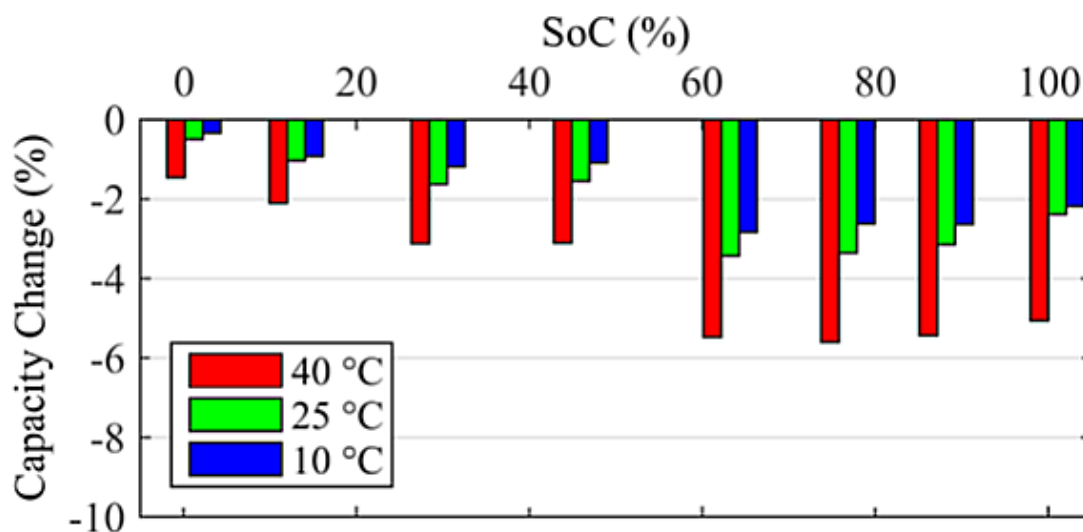


Abbildung 26 – Kapazitätsverlust in Abhängigkeit von Temperatur und SOC [35]

Man sieht deutlich, dass ein höherer Ladezustand zu einem erhöhten Kapazitätsverlust führt. Des Weiteren ist zu erkennen, dass sich erhöhte Temperaturen negativ auf den Kapazitätsverlust auswirken, wobei der Unterschied zwischen 10 und 25 °C im Vergleich zu 40 °C eher gering ausfällt. [35]

Für ein BWS liegt daher der Schluss nahe, dass die Lagerung des Pakets, sofern dies betrieblich möglich ist, stets bei geringem Ladezustand und bei niedriger Temperatur zu erfolgen hat. Es könnte daher beispielsweise bei geringer Benutzung (in der Nacht) nur eine Teilladung der meisten Batterien erfolgen und erst wenn diese benötigt werden (mit einem entsprechenden zeitlichen Puffer) eine Fertigladung vollzogen werden.

Die Zyklenlebensdauer wird von allen oben genannten Faktoren beeinflusst. Der Einfluss des Ladestroms ist in [Abbildung 27](#) zu sehen. Bei geringen Ladeströmen ($I_t = 1,25$ entspricht Ladung mit 1,25C) wird das EOL bei wesentlich höheren Zyklenzahlen erreicht, als dies bei höheren Strömen der Fall ist. Eine langsame Ladung mit geringem Strom ist daher jedenfalls zu empfehlen. Trotzdem werden in vielen Fällen bei elektrischen Fahrzeugen Schnellladungen durchgeführt, da die Wartezeit sonst zu lange wäre. Hier erkennt man einen deutlichen Vorteil von BWS. Durch den schnellen Wechselvorgang wird einerseits die Wartezeit kurz gehalten, gleichzeitig kann das Paket anschließend langsam geladen werden um die Lebensdauer hoch zu halten. [40]

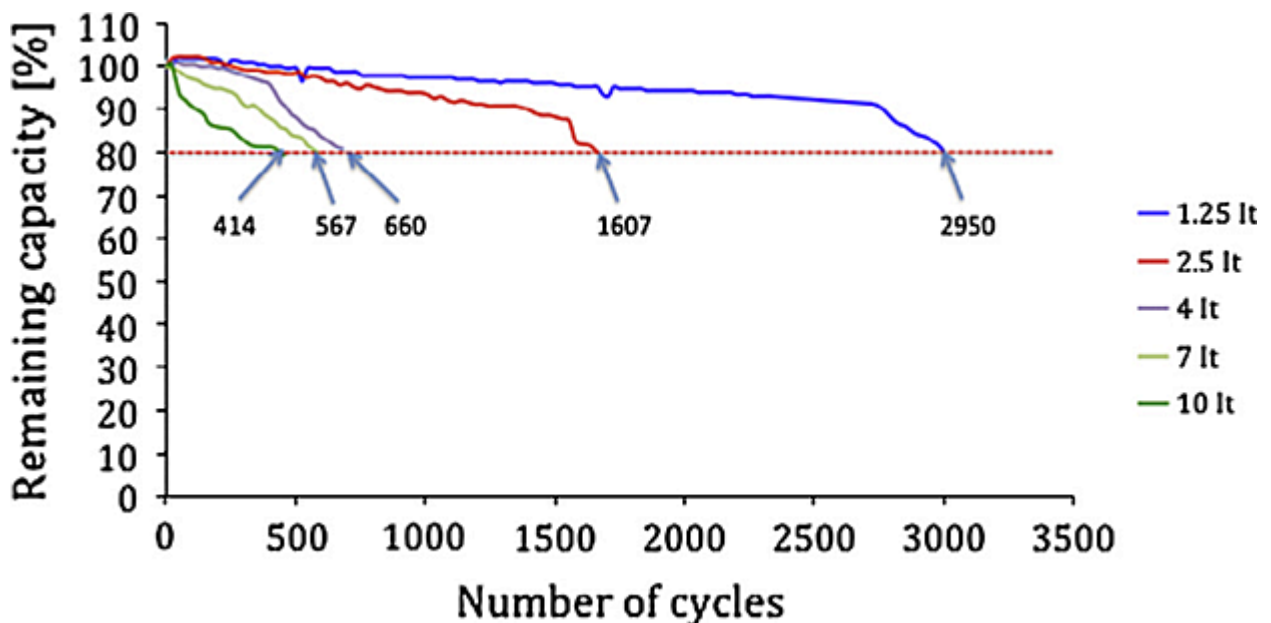


Abbildung 27 – Kapazität über die Zyklenzahl in Abhängigkeit vom Ladestrom [40]

Ein weiterer wichtiger Einflussfaktor ist der benützte Entladebereich der Batterie (Depth of Discharge = DOD). In [Abbildung 28](#) ist dieser Zusammenhang dargestellt. Wird die

Batterie immer voll entladen und anschließend wieder voll aufgeladen, das heißt 100 % DOD, so ist eine sehr geringe Zyklenzahl möglich. Bei einer Verkleinerung dieses Bereichs auf beispielsweise die Hälfte (z.B. 25 - 75 %, DOD = 50 %), kommt es nicht nur zu einer Verdoppelung der Zyklenzahl (was demselben Energiedurchsatz entsprechen würde), sondern zu einer deutlich größeren Steigerung. Im gezeigten Diagramm erhöht sich die Zyklenzahl um das 5- bis 6-fache. Das bedeutet, dass bereits mit einer geringen Verkleinerung des Nutzungsbereichs deutliche Verbesserungen bei der Zyklenlebensdauer möglich sind. [40]

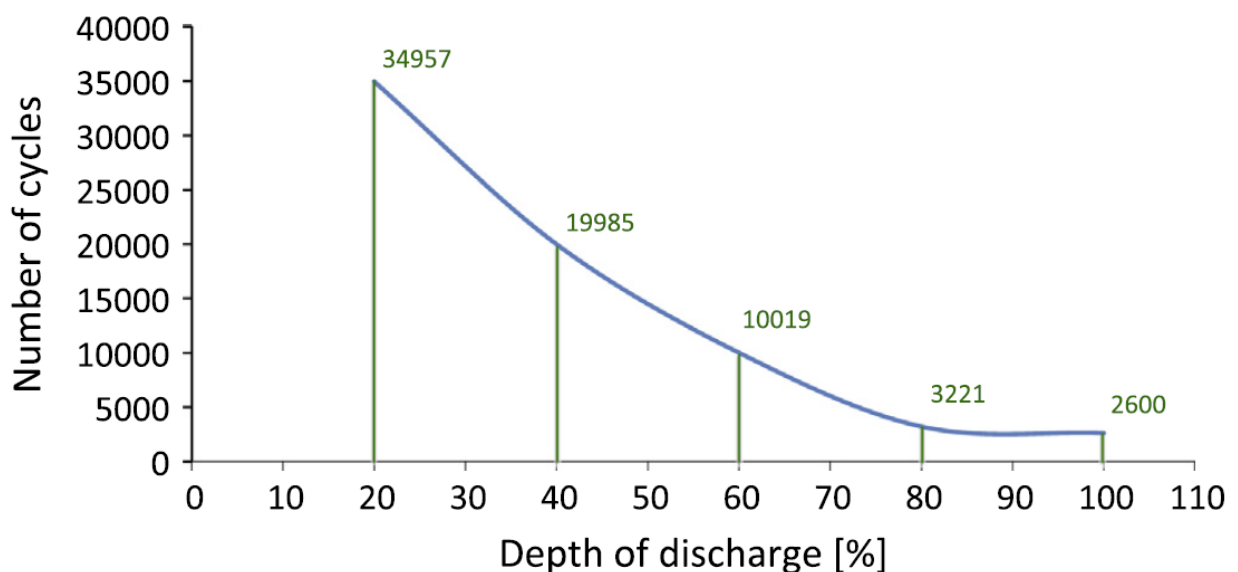


Abbildung 28 – Zyklenzahl in Abhängigkeit vom benützten Bereich (DOD) [40]

Fahrzeugbatterien werden üblicherweise nie vollständig ent- bzw. geladen. Insbesondere bei schnellladefähigen Batterien werden nur sehr kleine DOD-Bereiche verwendet. Dies hat den Hintergrund, dass der Zyklenzahlverlust durch den hohen Ladestrom mithilfe eines kleinen DOD-Nutzungsfensters kompensiert werden soll. Der Nachteil dieses Konzeptes liegt im unbenützten, teilweise beträchtlichen Gewicht der Batterie, das trotzdem mitgeführt werden muss. Ein Beispiel dafür ist das Autobussystem EDDA, entwickelt vom Fraunhofer Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI. Dieses verfügt über eine 86 kWh Batterie mit einem Gewicht von 1300 kg (inkl. Kühlung). Das benützte Kapazitätsfenster beträgt 30 kWh, die Ladeleistung beträgt bei Pulsladung 700 kW (15 s) und bei Schnellladung 250 kW (6 min). Man sieht, dass für einen kurzzeitigen hohen Ladestrom von über 8C bzw. bei Schnellladung knapp 3C, ein DOD-Fenster von rund 35 % benötigt wird. Das bedeutet gleichzeitig, dass knapp 850 kg unbenützt mitgeführt werden. [41]

Nicht nur die Größe des DOD-Benutzungsfensters hat einen Einfluss auf die Lebensdauer, sondern auch dessen Lage (das heißt der verwendete SOC-Bereich). In [Abbildung 29](#) ist der Einfluss verschiedener SOC-Bereiche auf die Zyklenzahl bei einer DOD-Nutzung von 10 % dargestellt. Interessant hierbei ist, dass sowohl die Nutzung von hohen als auch von niedrigen SOC-Bereichen einen negativen Einfluss auf die Zyklenlebensdauer hat. Wird die Batterie bei mittlerer Ladung betrieben, zum Beispiel bei 45 - 55 %, so ergibt sich damit eine höhere Zyklenlebensdauer. [39]

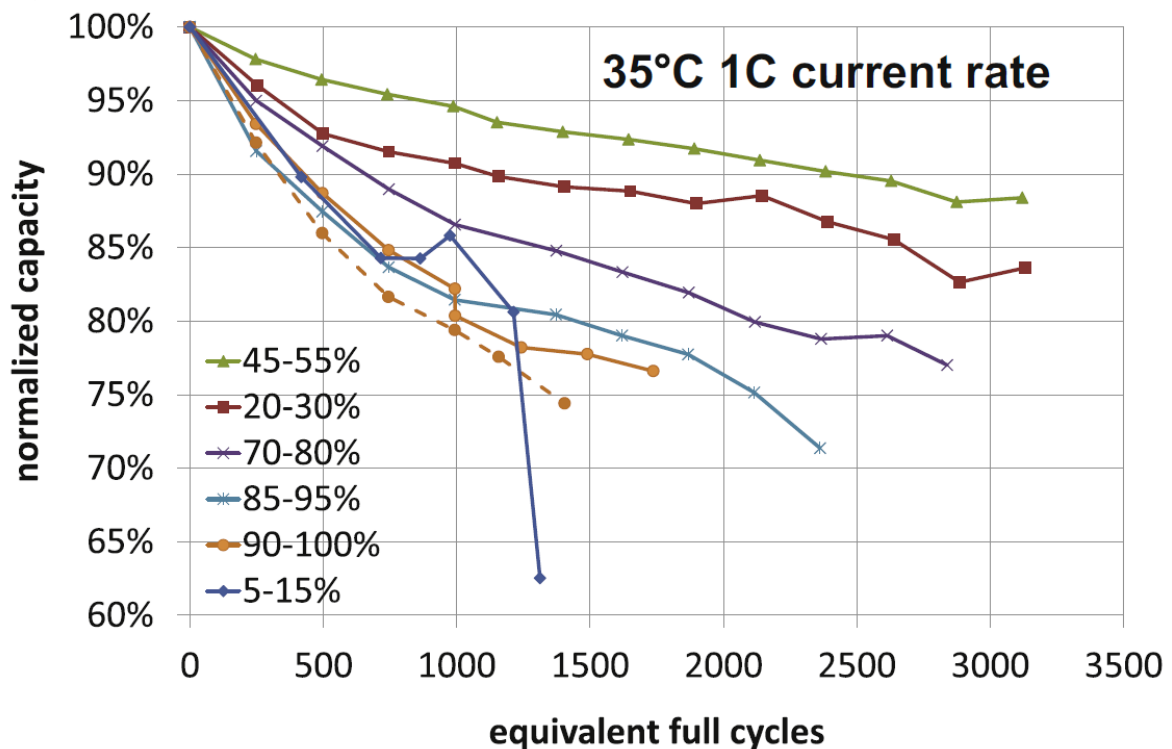


Abbildung 29 – Kapazität über die Zyklenzahl in Abhängigkeit vom SOC-Bereich [39]

Wie auch bei der kalendarischen Lebensdauer, spielt auch bei der Zyklenlebensdauer die Temperatur eine große Rolle. Aufgrund der langen Versuchsdauern lässt sich die Zyklenlebensdauer nicht vollständig getrennt von der kalendarischen Lebensdauer betrachten. In [Abbildung 30](#) ist die Kapazität in Abhängigkeit vom Ladungsdurchfluss (entspricht Zyklenzahl) bei unterschiedlichen SOC aufgetragen. Der Einfluss der Temperatur ist ebenfalls abgebildet, wobei die strichlierten Linien den kalendarischen Lebensdaueranteil darstellen. Mit I_{re} wird der Rekuperationsstrom bezeichnet, Details dazu werden im nachfolgenden Absatz behandelt. Interessant ist hierbei, dass die Kapazität mit zunehmenden SOC bei niedrigeren Temperaturen sehr stark abnimmt. Bei hohen und mittleren Temperaturen sieht man den geringsten Kapazitätsverlust durch Zyklieren (Abstand zwischen strichlierter und durchgezogener Linie) beim

mittleren SOC-Bereich, was dem bereits zuvor beschriebenen Zusammenhang entspricht. Werden Zyklen- und kalendarische Alterung zusammen betrachtet, ergibt sich für den günstigsten Betriebsbereich eine Temperatur von 25 °C bei niedrigem bis mittlerem SOC. Für ein BWS kann man daher ableiten, dass der Fahrbetrieb bei eben diesem Bereich erfolgen sollte. Die Lagerung sollte, wie bereits oben erwähnt, bei eher niedrigem SOC-Bereich und bei 25 °C oder weniger erfolgen. [35]

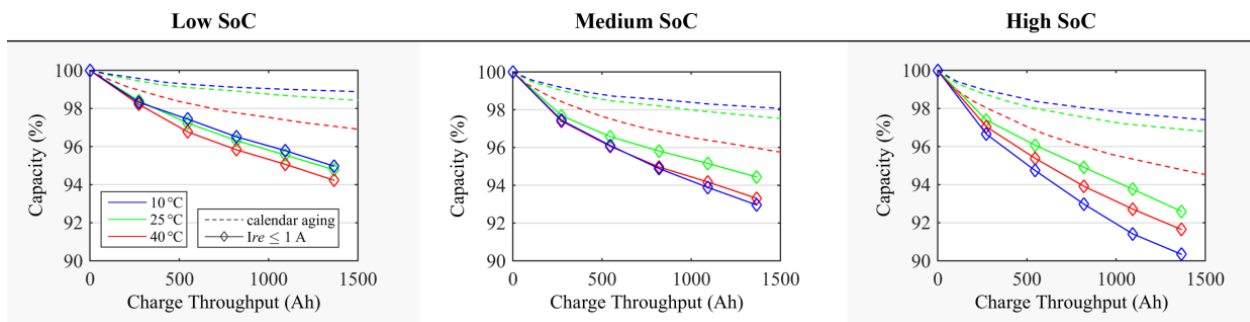


Abbildung 30 – Einfluss der Temperatur auf die Kapazität bei verschiedenen SOC [35]

Zuletzt soll der Einfluss der Rekuperation auf die Lebensdauer gezeigt werden. In [Abbildung 31](#) ist das verwendete Lastprofil zur Ermittlung dieses Einflusses dargestellt. Je nach Rekuperationsstärke werden für den Strom I_{re} dabei die Werte 0, 1, 2 und 4 A verwendet. [35]

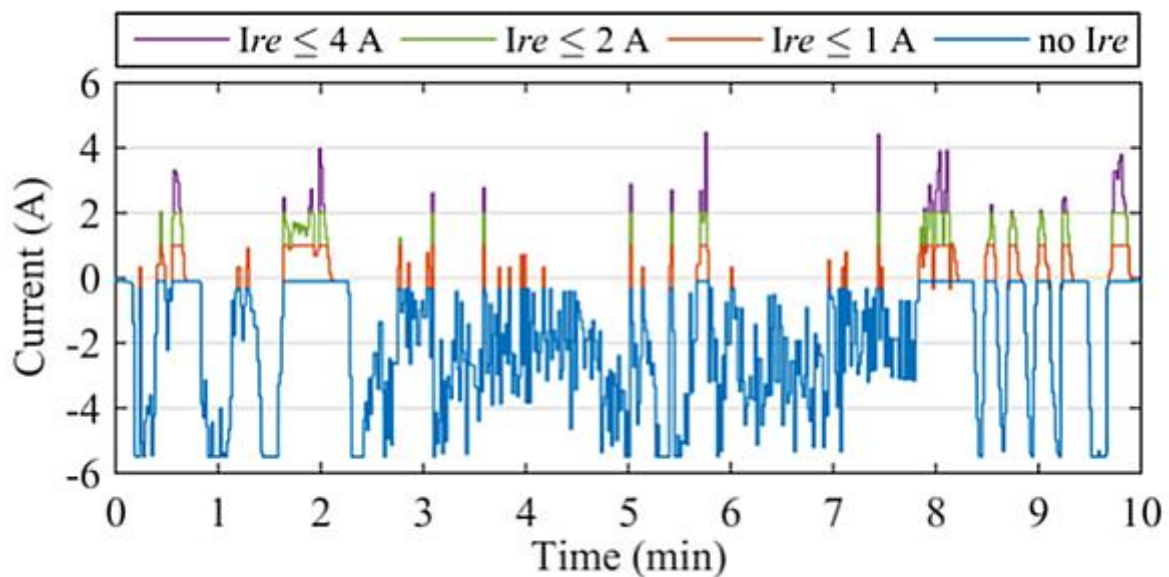


Abbildung 31 – Lastprofil mit unterschiedlichem regenerativen Bremsstrom [35]

In Abbildung 32 ist das Ergebnis der Untersuchung dargestellt. Horizontal sind Diagramme mit von links nach rechts steigendem SOC-Level zu sehen. Vertikal findet man von oben nach unten sinkende Temperaturen. Zusätzlich sind in jedem Diagramm die vier verschiedenen Stromstärken abgebildet. Die strichlierte Linie zeigt wieder den Anteil der kalendarischen Lebensdauer. Bei diesen Diagrammen zeigt sich, dass das regenerative Bremsen keine Reduktion der Lebensdauer zur Folge hat. Im Gegenteil, speziell für hohen SOC und niedrige Temperatur sieht man, dass sich durch Rekuperieren eine Erhöhung der Lebensdauer erzielen lässt. Auch für den bereits angesprochenen günstigen Bereich bei 25 °C und niedrigem bis mittlerem SOC lässt sich dieser Trend feststellen. [35]

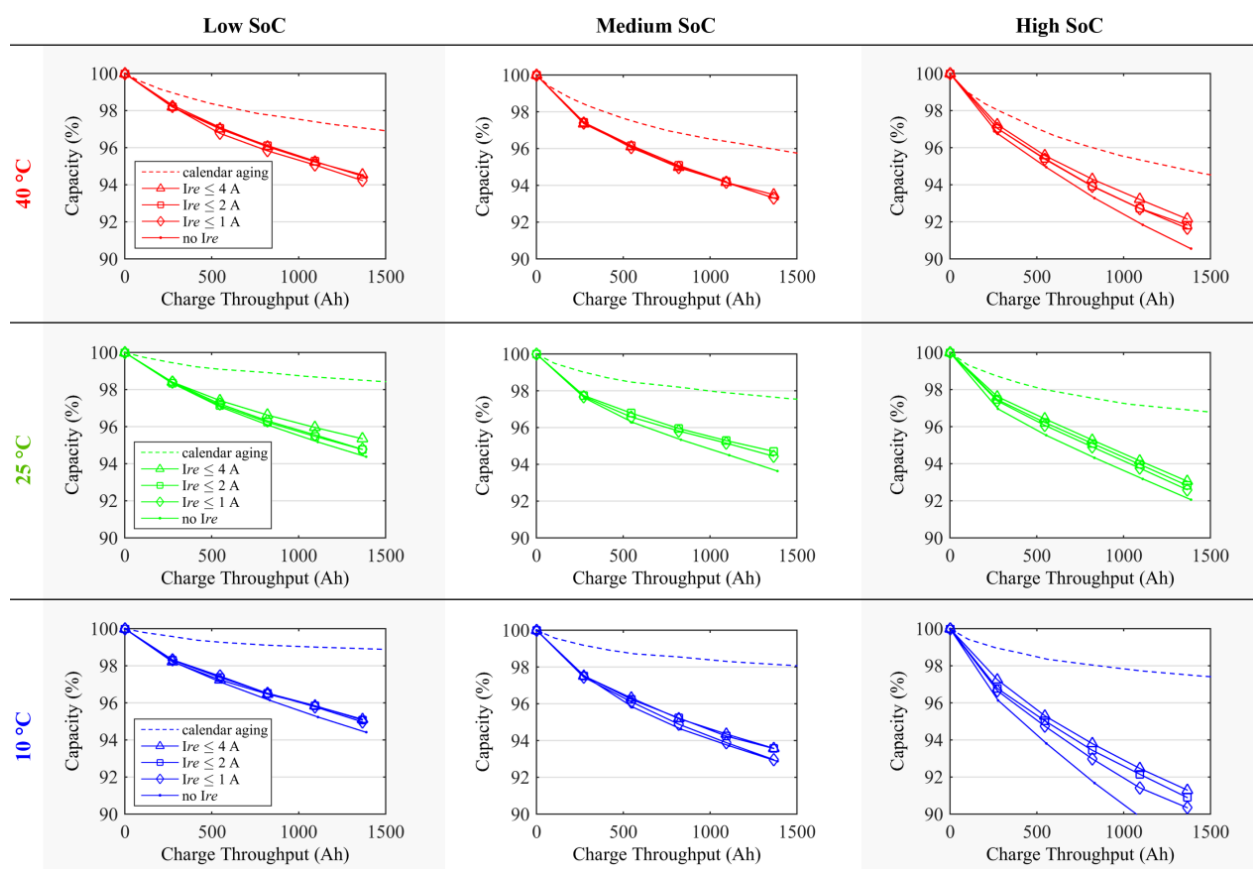


Abbildung 32 – Einfluss der Rekuperation bei verschiedenen Betriebsbedingungen [35]

Dies lässt den Schluss zu, dass für elektrische Fahrzeuge einerseits aus Sicht des Energieverbrauchs, andererseits aus Sicht der Batterielebensdauer, immer die regenerative Bremse mit höchstmöglichem Strom verwendet werden sollte. Die Batterie wird durch die Vermeidung von Rekuperation nicht geschont, das Gegenteil ist der Fall. Das BWS von Change it verfügt über ein System mit Ultracaps, das die Bremsenergie aufnehmen und beim Beschleunigen wieder verwenden soll. Dieses System ist aus

energetischer Sicht (Wirkungsgrade besser) zwar günstig, jedoch aus Sicht der Lebensdauer nur begrenzt sinnvoll. Die Aufnahme der Bremsenergie durch Ultracaps ist nicht empfehlenswert, das Vermeiden der Stromspitzen beim Beschleunigen macht aber aus Sicht der Lebensdauer durchaus Sinn. Welcher Effekt stärker ist, müsste für eine konkrete Anwendung im Detail untersucht werden. Eine ausschließliche Verwendung der Ultracaps zum Beschleunigen (Vermeiden von Spitzen) wäre aus Sicht der Lebensdauer durchaus günstig, jedoch muss dann die Ladung des Kondensators durch die Batterie erfolgen, was die Betriebsstrategie kompliziert macht und den Wirkungsgrad wiederum verschlechtert. Des Weiteren muss das Mehrgewicht durch die Ultracaps mitgeführt werden. Es liegt daher der Schluss nahe, dass auf ein derartiges System in einem BWS eher verzichtet werden sollte. [35]

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die Einflüsse auf die Batterielebensdauer vielfältig sind und im Detail von der tatsächlichen Anwendung abhängen. Es lassen sich trotzdem einige Tendenzen ableiten, die die Verlängerung der Lebensdauer eines Pakets ermöglichen.

Die Batterie sollte im Fahrbetrieb stets bei rund 25 °C und in einem SOC-Bereich rund um 50% betrieben werden. Damit dieser Betrieb möglich ist, ist ein häufiger Wechsel der Batterie und eine ausreichende Heizung bzw. Kühlung des Pakets im Fahrzeug jedenfalls zu empfehlen. Lange Standzeiten des Pakets im Fahrzeug, besonders bei hohem SOC, sind unbedingt zu vermeiden.

In der Wechselstation sollte das Paket bis maximal 25 °C temperiert und bei minimalem SOC gelagert werden. Eine Lagerung bei Umgebungsbedingungen wie bei Change it, oder in einfachen Regalen in einer Halle, wie bei DB Tech, sollte im Sinne der guten Temperierung vermieden werden. Die benötigte Temperierung lässt sich in derart großen Gebäuden wohl eher schwierig bewerkstelligen. Die unterirdische Lagerung, die sich bei einem Wechsel von unten anbietet, ist daher zu bevorzugen.

Die Ladung des Pakets sollte erst direkt vor der Entnahme erfolgen, was sich in der Praxis teilweise schwierig gestalten lässt. Bei niedrigem Betrieb, wie beispielsweise in der Nacht, könnte aber trotzdem auf diese Ladestrategie (mit ausreichendem zeitlichem Puffer) zurückgegriffen werden.

Das DOD-Nutzungsfenster sollte nur so groß sein, wie dies für den Betrieb notwendig ist. Ein kleineres DOD-Fenster ermöglicht eine wesentlich höhere Zyklenlebensdauer, für den Fahrbetrieb ist dieses jedoch aufgrund des hohen unbenützten Batteriegewichts eher suboptimal. Für die Anwendung im BWS wäre es daher sinnvoll einen relativ

großen DOD-Bereich zuzulassen, damit auch größere Reichweiten mit sinnvollen Batteriegewichten erzielt werden können. Zusätzlich sollte das Paket aber so oft wie es der Betrieb zulässt getauscht werden, weil damit der tatsächlich benutzte Bereich wiederum kleiner ausfällt und die Zyklenlebensdauer steigt.

Ein BWS verfügt daher grundsätzlich über das Potential eine wesentlich höhere Lebensdauer zu erzielen, als ein Fahrzeug mit festverbauter Batterie.

3.2 Bewertung der bestehenden Batteriewechselsysteme

Nach der vorherigen Analyse sollen die BWS entsprechend bewertet werden. Dabei ist es weniger relevant, welches BWS eine gute oder schlechte Bewertung erreicht. Es sollen durch die Bewertung lediglich Stärken und Schwächen aufgezeigt werden, so wie dies bereits in Kapitel 3.1 teilweise erfolgt ist, damit diese später bei der Erstellung des eigenen Konzepts berücksichtigt werden können.

3.2.1 Bewertungsschema

Um die Bewertung der gezeigten BWS strukturiert und transparent zu gestalten, war es notwendig ein entsprechendes Bewertungsschema zu entwickeln. Die Bewertung des Pakets wurde in 18 Kriterien zerteilt. Diesen Kriterien wurde eine Wertigkeit von 3 (sehr wichtig) bis 1 (weniger wichtig) entsprechend ihrer Relevanz zugeordnet (siehe auch Tabelle 1). Je nachdem wie gut die genannten Kriterien erfüllt werden, sind nun Punkte von 1 bis 5 entsprechend des umgekehrten Schulnotensystems (5 Punkte = sehr gut, 1 Punkt = schlecht) vergeben worden. Sind zu einem Kriterium keine Informationen bekannt, so wurde dieses mit 0 bewertet. Die Gewichtung erfolgte nun mit Multiplikation von Wertigkeit und Punktezahl. Dies wurde für alle Kriterien durchgeführt. Um den Erfüllungsgrad (Ergebnis) zu ermitteln, wurden nun die errechneten gewichteten Werte aufsummiert und durch die maximal erreichbare gewichtete Punktezahl dividiert. Hierbei wurden die nicht vorhandenen Daten derart berücksichtigt, dass die erreichbare Punktezahl entsprechend reduziert wurde. Dies hat den Zweck, dass ein BWS, über das wenig bekannt ist, nicht systembedingt schlechter bewertet wird. Das Ergebnis ist nun der Erfüllungsgrad der vorhandenen Informationen in Prozent. Durch die nicht vorhandenen Daten ergibt sich eine gewisse Ungenauigkeit des Ergebnisses. Diese wird durch die Validität des Ergebnisses ausgedrückt. Des Weiteren lässt diese Ungenauigkeit eine gewisse Schwankungsbreite des Ergebnisses zu, welche ebenfalls errechnet wurde.

Tabelle 1 – Bewertungskriterien und Gewichtung für BWS

| Wertigkeit | Kriterium | technisch/wirtschaftlich |
|------------|--|----------------------------|
| 3 | Investitionskosten BWS | wirtschaftlich |
| 3 | Gewicht | technisch & wirtschaftlich |
| 3 | Volumen | technisch & wirtschaftlich |
| 3 | Investitionskosten Wechselstation | wirtschaftlich |
| 3 | Lebensdauer | technisch & wirtschaftlich |
| 3 | Wechseldauer | technisch & wirtschaftlich |
| 2 | Reichweite pro Wechsel | technisch & wirtschaftlich |
| 2 | Gemischte Flotte | wirtschaftlich |
| 2 | Bauform | technisch |
| 2 | Wechselstation | technisch |
| 2 | Position im Fahrzeug f. Wechsel | technisch |
| 2 | Wechselmechanismus | technisch |
| 1 | Connector | technisch |
| 1 | Zellanordnung/Paketgestaltung | technisch |
| 1 | Position im Fahrzeug f. Crashesicherheit | technisch |
| 1 | Position im Fahrzeug f. Dynamik | technisch |
| 1 | Heizung/Kühlung Batterie | technisch |
| 1 | Alternative Aufladung möglich | technisch & wirtschaftlich |

Die gezeigten Kriterien sollen nicht nur in ihrer vorhandenen Ausführung berücksichtigt werden, sondern sollen auch in Hinblick auf ihr Potential für ein verbessertes Konzept bewertet werden. Es werden daher beispielsweise für das Gewicht und das Volumen nicht die absoluten Zahlen verwendet, da Fahrzeuge mit großen Kapazitäten automatisch schlechter bewertet würden. Aus diesem Grund werden die entsprechenden spezifischen Werte verwendet und das Potential zusätzlich qualitativ bewertet (z.B. Leerräume reduzieren die Bewertung des Volumens, da es noch Potential zu höherer Dichte gibt).

3.2.2 Ergebnis und Verbesserungspotential

Die Bewertungen der einzelnen Systeme sind dem Anhang 9.1 zu entnehmen. In Kapitel 3.1 sind die Entscheidungsgrundlagen dafür erläutert worden. Auf eine detaillierte Diskussion der Bewertungen wird aber aufgrund des Umfangs, den eine solche Analyse mit sich bringen würde, verzichtet. In Abbildung 33 sind die zusammengefassten Ergebnisse der BWS-Bewertung zu sehen. Die blauen Balken symbolisieren das Ergebnis (Erfüllungsgrad), die schwarzen Bereiche eröffnen die

Schwankungsbreiten. Die Zahlenwerte über den Balken zeigen die Validität der Ergebnisse. Diese ist beim Beispiel Better Place aufgrund der vollständigen Bewertung bei 100 %, deswegen ist hier auch der Schwankungsbereich nicht vorhanden. Der Mittelwert der Bewertungen liegt bei rund 70 %. Das Maximum erreicht das BWS von Tesla Motors mit 88 %, das Minimum das BWS von Better Place mit 58 %. Aufgrund der teilweise großen Schwankungsbreiten ist diese Reihung aber von eher untergeordneter Bedeutung.

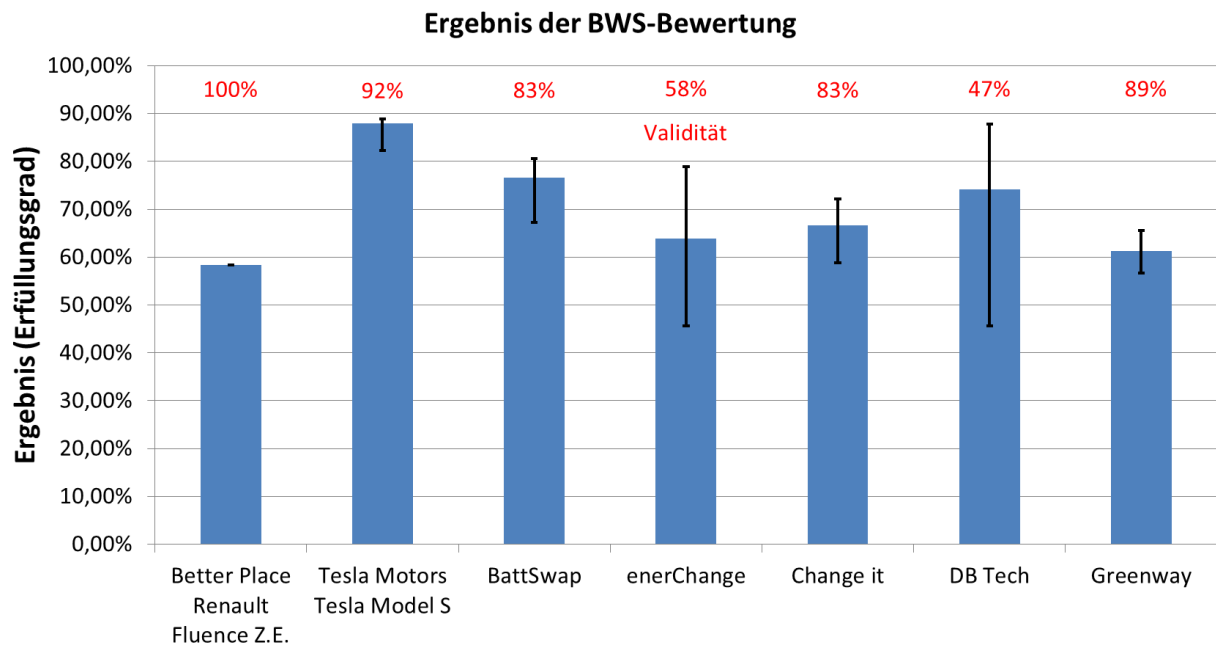


Abbildung 33 – Ergebnis der BWS-Bewertung

Um mögliche Verbesserungspotentiale aufzuzeigen, wurde in Abbildung 34 die durchschnittliche Bewertung der einzelnen Kriterien aufgelistet, wobei nur Bewertungen größer null (d. h. vorhandene Daten) berücksichtigt wurden. Daraus lässt sich schließen, ob bei einzelnen Kriterien deutliche Stärken bzw. Schwächen vorhanden sind. Als Entscheidungshilfe zur Bestimmung des Verbesserungsbedarfs wurden zwei Bewertungsniveaus festgelegt. Alle Kriterien, die unterhalb der schwarzen strichlierten Linie (3,5) bewertet wurden, werden als zumindest verbesserungswürdig betrachtet. Alle Kriterien, die unterhalb der roten Markierung (2,5) liegen, sind unbedingt zu verbessern. Es ist bei der Auswahl von Verbesserungsmaßnahmen zusätzlich die Wertigkeit der einzelnen Kriterien zu berücksichtigen.

Die zumindest verbesserungswürdigen Kriterien sind die Investitionskosten in die Wechselstation, die Wechseldauer, die Bauform der Batterie, die Position im Fahrzeug für die Crashesicherheit sowie für die Dynamik.

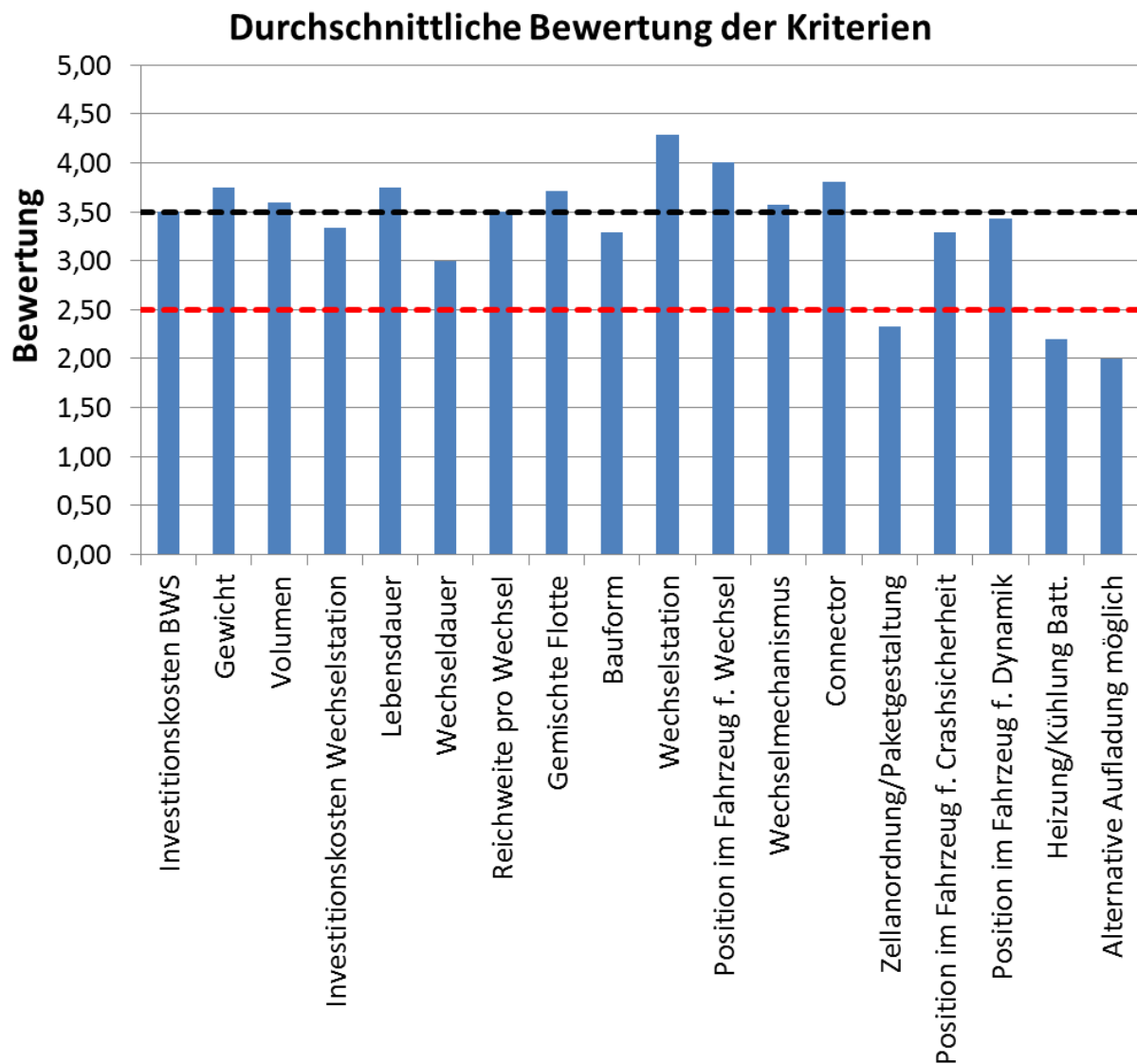


Abbildung 34 – Durchschnittliche Bewertung der Kriterien

Die hohen Investitionskosten der Wechselstation lassen sich auf zwei Gründe zurückführen. Da unter den vorgestellten BWS einige über einen unterirdischen Wechselmechanismus verfügen, und dieser jedenfalls kostenintensiver ist als ein gleichwertiger überirdischer, fällt die Bewertung dieses Punktes eher schlechter aus. Dies soll nicht bedeuten, dass auf einen unterirdischen Wechsel verzichtet werden soll, da dieser viele andere Vorteile mit sich bringt und daher höhere Investitionskosten toleriert werden könnten. Ein weiterer Grund liegt im aufwändigen Wechselmechanismus von enerChange. Obwohl der Wechsel überirdisch erfolgt, was prinzipiell kostengünstig wäre, wird das System wegen des aufwändigen Roboterarmes bezüglich Investitionskosten in die Wechselstation mit einem Punkt bewertet. Dieser Ausreißer verringert daher die Durchschnittsbewertung deutlich.

Die Wechseldauer ist für einen hochfrequentierten Betrieb bei einigen BWS viel zu lange. Die tatsächliche Wechseldauer von 5 min beim BWS von Better Place sowie der

manuelle Wechsel von Greenway, ebenfalls 5 min, wurden beide mit einem Punkt bewertet. Zwar benötigt ein konventionelles Fahrzeug mit Verbrennungsmotor auch in etwa diese Zeit um zu tanken, jedoch ist mit einem Tank eine wesentlich höhere (praktische) Reichweite erzielbar als mit einem elektrischen Fahrzeug. Um den Betrieb so wenig wie möglich zu beeinflussen, ist daher eine niedrigere Wechseldauer zu empfehlen. Das BWS von BattSwap ist mit einer Wechselzeit von 30 s sehr schnell und wurde daher mit fünf Punkten bewertet.

Die Bauform der Pakete ist teilweise suboptimal. Die Pakete von Better Place und Greenway wurden aufgrund der voluminösen Bauweise, die den Koffer- bzw. Laderaum verringert, mit einem Punkt bewertet. Bei BattSwap kommt es aufgrund der ungünstigen Größenverhältnisse in Verbindung mit den ausgeprägten Schrägen zu einem negativen Einfluss auf die Paketgestaltung. Daher wurde diese Bauform mit zwei Punkten bewertet. Eine flache Bauweise, wie dies bei Tesla Motors der Fall ist, erfüllt dieses Kriterium am besten, daher wurden hier fünf Punkte vergeben.

Aus Sicht der Dynamik und der Crashesicherheit ist in Kapitel 3.1.1 die Position im Unterboden bewertet worden, so wie dies bei Tesla Motors und BattSwap der Fall ist (jeweils Bewertung mit fünf Punkten). Da die vorgestellten BWS teilweise über äußerst ungünstige Batteriepositionen verfügen, wie beispielsweise Change it (auf dem Dach) oder enerChange (hinten), kommt es hier zu einer im Durchschnitt schlechteren Bewertung.

Die unbedingt zu verbessernden Kriterien sind die Zellanordnung bzw. Paketgestaltung, die Heizung und Kühlung sowie die Möglichkeit einer alternativen Aufladung.

Über die Zellanordnung und Paketgestaltung sind nur von wenigen bestehenden BWS Informationen vorhanden. Die Gestaltung des Pakets von Tesla Motors wurde aufgrund der Leerräume, die sich prinzipiell bei Rundzellen ergeben, und der aufwändigen Kühlschleifen, mit einem Punkt bewertet. Wie bereits erwähnt ergibt sich beim BWS von BattSwap wegen der äußeren Abmessungen eine schlechte Paketgestaltung bzw. Zellanordnung, daher die Bewertung mit zwei Punkten. Die innere Gestaltung des Pakets von Better Place ist an sich in Ordnung, die aufrechte Anordnung ist aber wie bereits erwähnt unvorteilhaft.

Viele Pakete verfügen über keine oder eine ineffiziente Kühlung (Peltier Elemente von Better Place). Eine Kühlung bzw. Heizung ist aus Lebensdaueraspekten aber jedenfalls zu empfehlen. Eine Flüssigkeitskühlung, wie bei Tesla Motors, ist aus dieser Sicht sehr gut, jedoch für den Wechsellvorgang aufwändig (Connector), und daher nicht unbedingt

empfehlenswert. Eine Luftkühlung sollte bei einem BWS mindestens vorhanden sein. Bei vielen BWS gibt es keinen Hinweis auf eine alternative Auflademöglichkeit (z. B. Konduktiv) oder die Aufladung erfolgt unter ungünstigen Bedingungen (Peltier Elemente). Ein einigermaßen leistungsstarker Stecker (z. B. Drehstromanschluss) und eine angemessene Kühlung sollten auch bei einem Fahrzeug mit BWS vorhanden sein. Dies stellt einen relativ einfach zu verbessernden Punkt dar und sollte jedenfalls durchgeführt werden.

4 Anforderungsprofil

Für den Betrieb einer gemischten lokalen Flotte mit einem BWS ist es notwendig, die Anforderungen für eine solche Verwendung zu kennen. Das Anforderungsprofil besteht dabei im Wesentlichen aus den Parametern

- benötigte Reichweite pro Wechsel,
- Stehzeit des Fahrzeuges (für Wechsel relevant),
- Energieverbrauch des Fahrzeuges,
- sonstiges bzw. Besonderheiten der Anwendung.

Die Ermittlung des Anforderungsprofils wurde für PKW, Bus sowie Nutz- und Sonderfahrzeuge getrennt durchgeführt. Die möglichen Anwendungsbereiche von BWS sind unter den genannten Fahrzeugtypen sehr breit gestreut, daher wurde nachfolgend für jeden Fahrzeugtyp eine spezielle Anwendung untersucht, die für einen gemischten Betrieb in Frage kommt.

4.1 PKW

Die Anwendungsbereiche von PKW sind sehr vielfältig und die Anforderungen, insbesondere bei privater Nutzung, schwierig zu erfassen. Besonders interessant ist ein BWS für kommerzielle Zwecke, da dadurch einerseits der im Betrieb kostengünstige elektrische Antrieb genutzt werden kann und der Nachteil der langen Ladezeit wegfällt. Diese Fahrzeuggruppe wurde daher auf den Personentransport, speziell auf die Benützung als Taxi, eingeschränkt. Um die benötigte Reichweite pro Wechsel bzw. Batterieladung zu ermitteln, ist es einerseits notwendig die Distanz pro Taxifahrt zu kennen. Andererseits wird die Gesamtstrecke innerhalb einer Taxischicht benötigt. Dabei ist es zweckmäßig die relative Häufigkeit der Distanzen zu verwenden, da diese ein besseres Bild bietet als ein Durchschnittswert, der möglicherweise von Ausreißern beeinflusst ist.

Für die Ermittlung des Anforderungsprofils wurden Daten aus den Städten Hamburg [42] und Wien [43] betrachtet. In Abbildung 35 ist die Distanz der einzelnen Taxitouren in Hamburg dargestellt. In Abbildung 36 sind die Daten für Wien zu sehen. Bis auf den Anteil der kurzen Strecken sieht der Verlauf ähnlich aus. Auffallend ist, dass die Distanzen in Hamburg deutlich kürzer sind als in Wien. So sind in Wien nur 69 % der Fahrten kleiner als 15 km, während in Hamburg damit über 95 % abgedeckt sind.

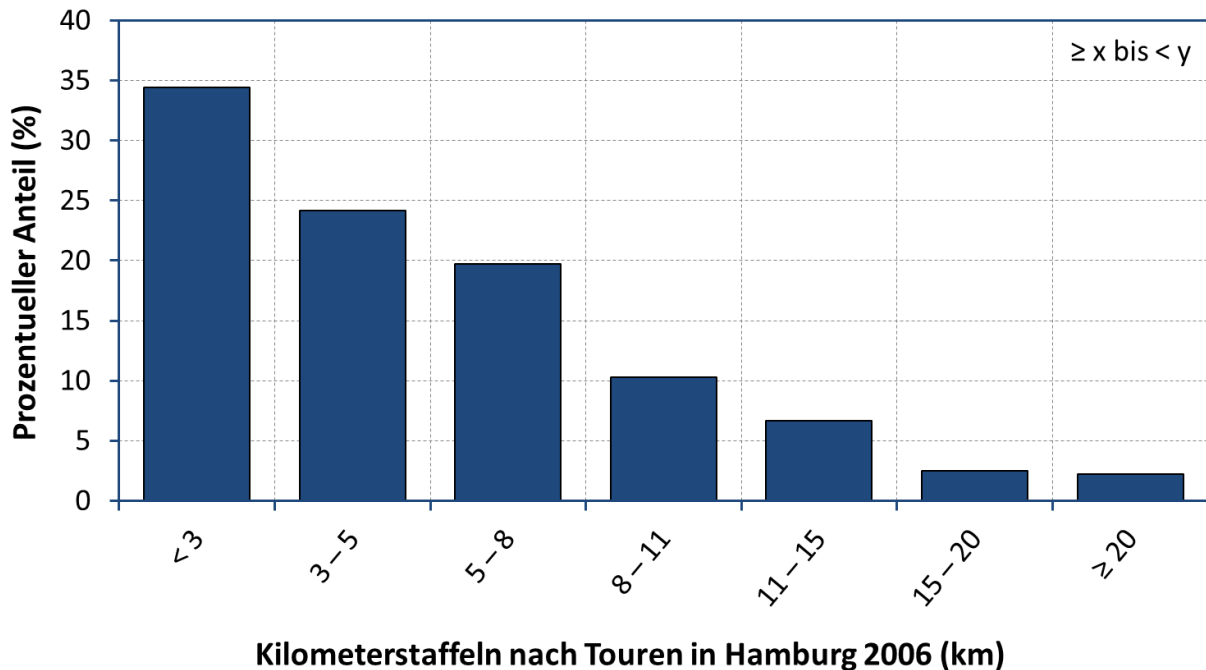


Abbildung 35 – Distanz der einzelnen Taxitouren in Hamburg, eigene Darstellung [42]

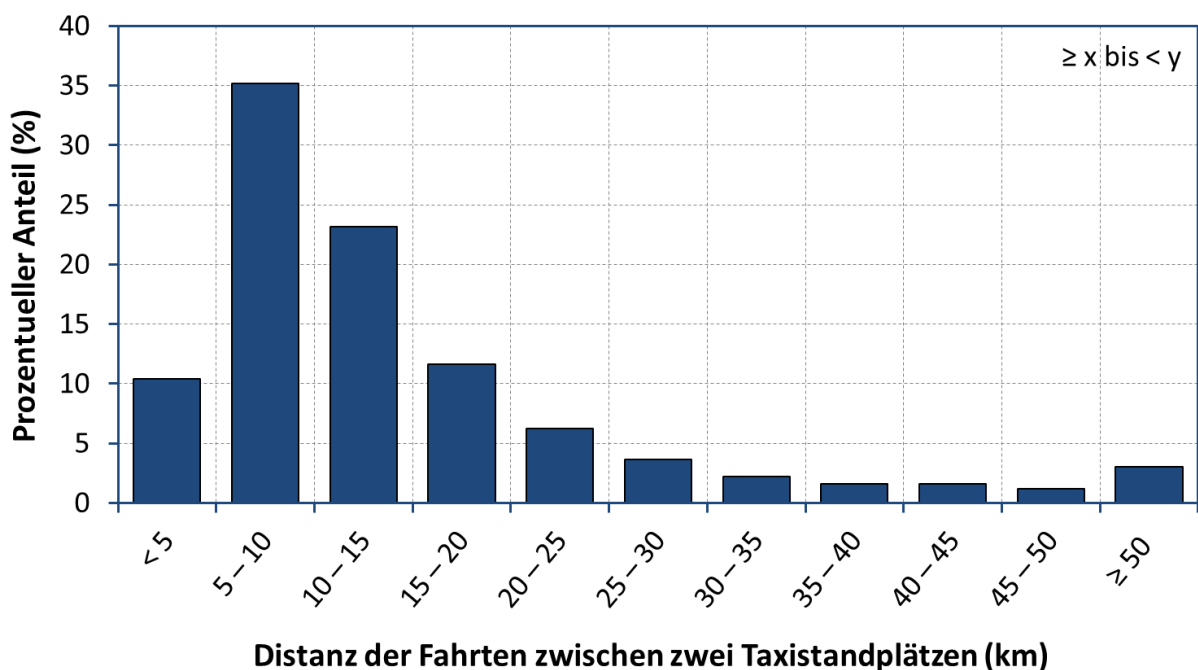


Abbildung 36 – Distanz der einzelnen Taxitouren in Wien (Projekt ZENEM) [43]

Die Verteilung der Distanzen über eine Schicht in Hamburg sieht man in [Abbildung 37](#). Eine Schicht in Hamburg ist nicht eindeutig festgelegt, die Mehrzahl davon dauert aber zwischen 8 und 12 Stunden. [42] Beim Projekt ZENEM wurden die Schichten selbst nicht erfasst, daher wurde hier für einen Vergleich auf die Distanz der Wegeketten zwischen 11 und 13 Stunden (eine Schicht dauert normalerweise 12 Stunden) zurückgegriffen. [43] In [Abbildung 38](#) ist diese Verteilung abgebildet. Die Distanzen in Hamburg und Wien sind ähnlich verteilt (überwiegender Teil in der Mitte), jedoch sieht man auch hier wiederum Unterschiede in der Größe der Distanzen. In Hamburg sind rund 84 % der Schichtdistanzen kürzer als 200 km, in Wien sind mit dieser Distanz nur ca. 64 % abgedeckt.

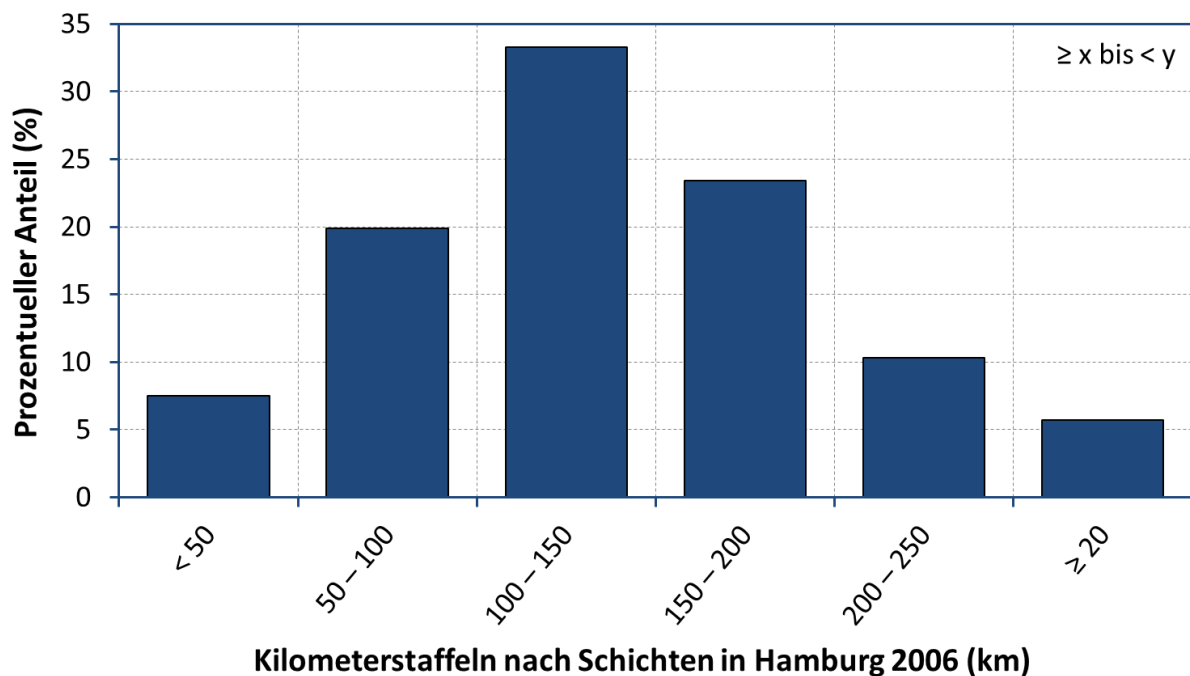


Abbildung 37 – Distanz innerhalb einer Taxischicht in Hamburg, eigene Darstellung [42]

Aus diesen Verteilungen lässt sich nun der Schluss ziehen, dass für die meisten Fahrten nur sehr geringe Distanzen nötig sind. Da für einen effizienten Taxibetrieb jedoch nicht nach jeder Fahrt ein Wechsel vollzogen werden kann, müssen trotzdem größere Reichweiten zur Verfügung stehen. Mit höherer Reichweite steigt jedoch das Batteriegewicht, was sich gerade bei einem BWS vermeiden ließe. Es muss daher ein Kompromiss in der Reichweite pro Wechsel festgelegt werden. Hierfür könnte man eine Schicht betrachten und die darin maximal tolerierbare Wechselanzahl ermitteln. Die Anzahl der Wechsel pro Schicht sollten für eine konkrete Anwendung zusammen mit den entsprechenden Taxibetreibern festgelegt werden. Für diese Arbeit wurde die

Anzahl mit 1 bis 2 Wechsel pro Schicht eher konservativ abgeschätzt. Besser wäre ein häufigerer Wechsel.

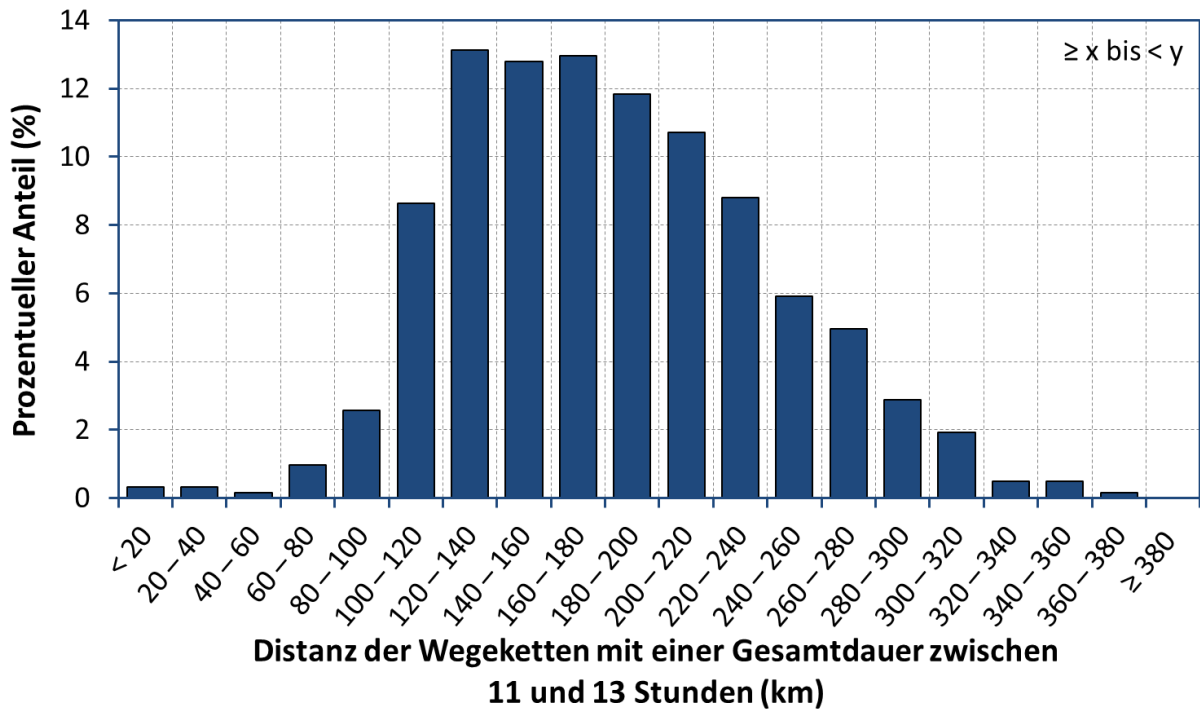


Abbildung 38 – Gesamte Distanz zwischen 11 und 13 h in Wien (Projekt ZENEM) [43]

BWS verfügen neben dem Vorteil des schnellen Wechsels aber auch über den Nachteil, dass eine Wechselstation, im Vergleich zu einer konventionellen konduktiven Ladestation, sehr hohe Investitionskosten hat. Daher stellt sich die Frage, ob ein BWS für den Taxibetrieb überhaupt notwendig ist.

Ein Indikator dafür ist die Taxistehzeit. Diese ist für Wien in [Abbildung 39](#) in zu sehen. Aus diesem Diagramm können mehrere Schlüsse gezogen werden. Einerseits sind über 92 % der Stehzeiten größer als 5 Minuten, die Wechselzeit ist daher für Taxis nicht kritisch. [43]

Andererseits sieht man, dass Taxis teilweise eine lange Zeit am Taxistehplatz verbringen. So sind über 40 % der Stehzeiten größer als 20 Minuten. In dieser Zeit könnte das Fahrzeug natürlich konduktiv über eine Standard- oder Drehstromsteckdose geladen werden, da auch die einzelnen Distanzen kurz und hohe Ladeströme daher nicht unbedingt notwendig sind. Da Taxis aber oftmals am Straßenrand aufgereiht stehen und nachrücken müssen sobald das erste Fahrzeug losfährt, ist eine konduktive Lösung nicht zielführend. Induktive Lösungen an jedem Taxistehplatz und in jedem Taxi zu verbauen ist relativ aufwändig. Es könnte daher die Überlegung angestellt werden, ob eine oder mehrere zentral gelegene Wechselstationen für eine größere Taxianzahl

nicht bereits kostengünstiger wäre. Diese Stationen könnten auch von anderen Fahrzeugen, eben im bereits angesprochenen gemischten Betrieb, genutzt werden. [43] Im Taxibetrieb muss das Fahrzeug jederzeit ideal temperiert sein, da dies sowohl von den Fahrern als auch von den Kunden verlangt wird. Die teilweise langen Stehzeiten bedeuten daher auch, dass über diese Dauer das Fahrzeug weiter klimatisiert bzw. beheizt werden muss. Für die Auslegung des BWS ist daher neben dem Fahrbetrieb auch dieser Fall zu berücksichtigen.

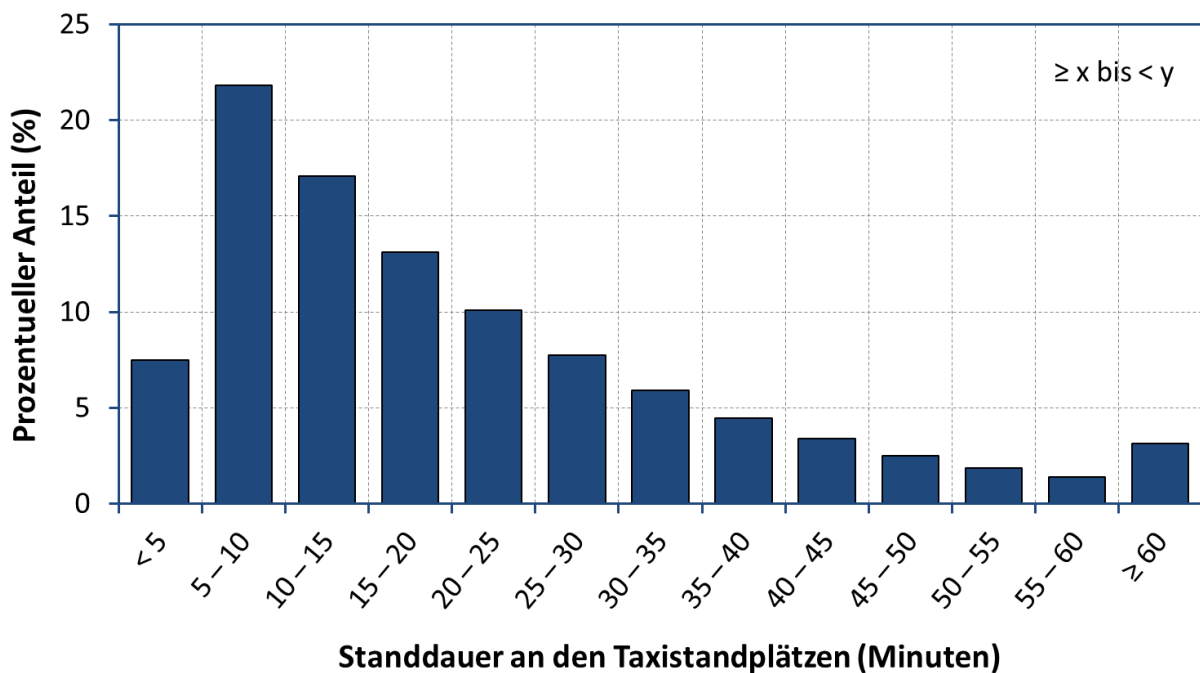


Abbildung 39 – Stehzeit der Taxis an den Standplätzen in Wien (Projekt ZENEM) [43]

4.2 Bus

Der Autobusverkehr lässt sich in Stadt-, Überland- und Fernverkehr einteilen. Der Betrieb mit einem BWS ist am ehesten für den lokalen bzw. städtischen Verkehr interessant, da bei diesem die zurückgelegten Distanzen vergleichsweise kurz sind und somit eine Batterielösung überhaupt erst möglich ist. Des Weiteren ist der Fahrzyklus eines Stadtbusses von vielen Beschleunigungs- und Bremsvorgängen geprägt, was den Einsatz eines elektrischen Antriebes prinzipiell sinnvoll macht. Es wurde daher nachfolgend nur der öffentliche Stadtverkehr für die Verwendung eines BWS untersucht.

Die Anforderungen an einen Bus im öffentlichen Stadtverkehr sind durch den detailliert geplanten Betrieb relativ einfach zu ermitteln. In Zusammenarbeit mit einem öffentlichen Verkehrsunternehmen einer Großstadt wurde der Fahrplan des Busverkehrs analysiert.

Für die Arbeit wurde nur der Verkehr tagsüber und an Wochentagen berücksichtigt, da dieser den normalen Busverkehr am besten repräsentiert und Ausreißer wie Nacht- oder Sonderbusse nicht enthalten sind. Die Ergebnisse der Analyse sollen nachfolgend diskutiert werden.

Zunächst lässt sich die Verteilung der Daten entweder nach Linien oder nach Bussen (Fahrzeugen) ermitteln, da nicht jede Linie über dieselbe Anzahl an Bussen verfügt. Die Verteilung der Distanzen wurde aus dem Fahrplan ermittelt und ist für eine Strecke, das heißt von Endstation A zu Endstation B, in Abbildung 40 (nach Linien) und Abbildung 41 (nach Bussen) zu sehen.

km Verteilung nach Linien (1 Strecke)

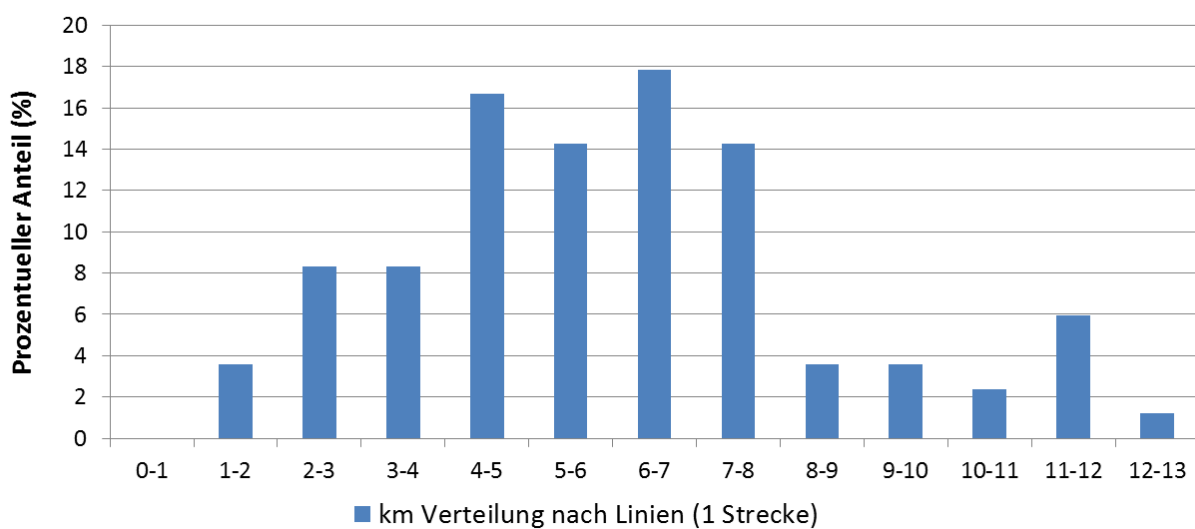


Abbildung 40 – Verteilung der Distanzen über eine Strecke nach Linien [44]

km Verteilung nach Bussen (1 Strecke)

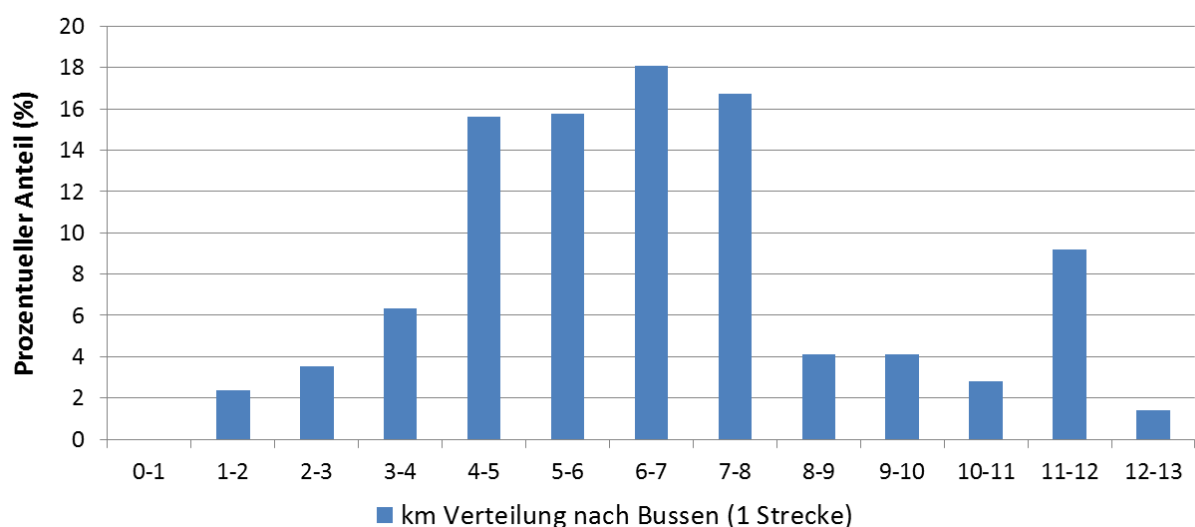


Abbildung 41 – Verteilung der Distanzen über eine Strecke nach Bussen [44]

Die Verteilung von Linien und Bussen ist sehr ähnlich. Auffallend ist, dass ab einer Distanz von 8 km ein Einbruch in der Verteilung zu sehen ist. Rund 83 % der Linien- bzw. 78 % der Busdistanzen betragen 8 km oder weniger. Ein BWS könnte daher für diesen Anteil ausgelegt werden und somit rund 80 % des Verkehrs abdecken. Eine Auslegung auf höhere Distanzen erhöht die Abdeckung nur gering, daher lässt sich die Distanz von 8 km als eine Art Auslegungsgrenze betrachten.

Um die Bedeutung der Wechselzeit abschätzen zu können, wurden auch die planmäßigen Stehzeiten in der Endstation aus dem Fahrplan analysiert. In [Abbildung 42](#) (nach Linien) und [Abbildung 43](#) (nach Bussen) ist die Verteilung der Stehzeiten zu sehen.

min Stehzeit Verteilung nach Linien

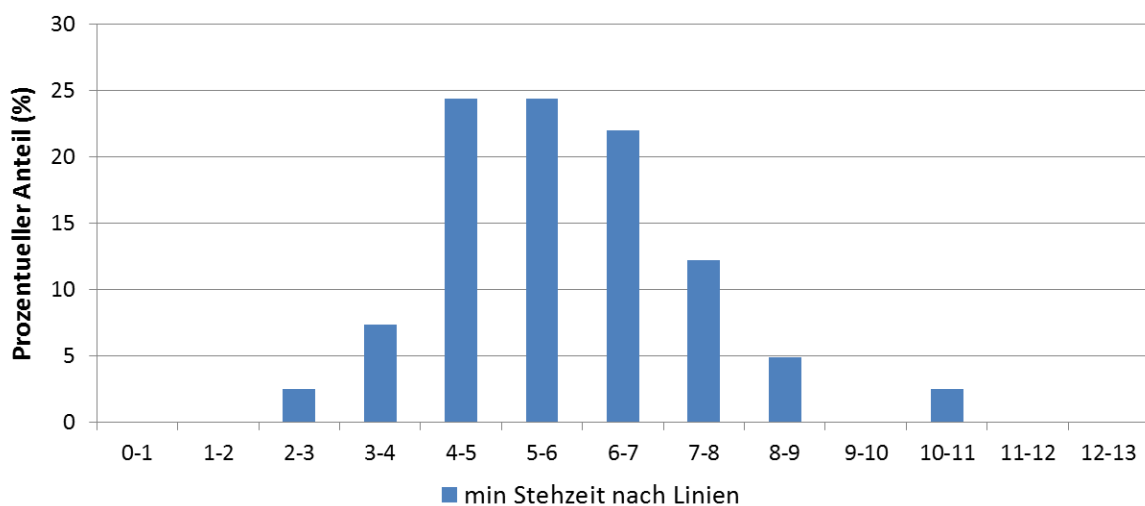


Abbildung 42 – Verteilung der Stehzeiten in der Endstation nach Linien [44]

min Stehzeit Verteilung nach Bussen

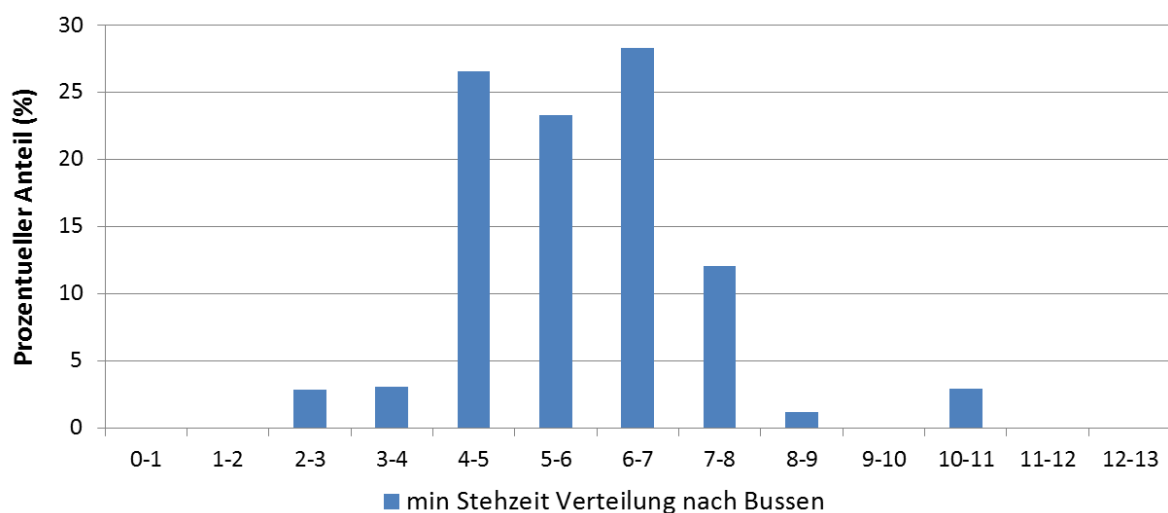


Abbildung 43 – Verteilung der Stehzeiten in der Endstation nach Bussen [44]

Wieder ist der Unterschied zwischen der Betrachtung von Linien und Bussen gering. Die planmäßigen Stehzeiten sind zu 90 % (Linien) bzw. zu 94 % (Busse) länger als 4 Minuten. Das bedeutet, dass bei planmäßigem Ablauf die Wechselzeit eher unkritisch ist. Trotzdem ist für einen reibungslosen Autobusbetrieb ein rascher Wechsel notwendig, da die hier gezeigten Stehzeiten dazu verwendet werden, um Unregelmäßigkeiten im Verkehr auszugleichen. Das bedeutet, dass die tatsächliche Stehzeit des Busses in der Endstation viel kürzer ausfällt und somit ein rascher Wechsel unbedingt erforderlich ist. Diese Problematik könnte zusätzlich entschärft werden, wenn nicht nach jeder Runde⁵⁾ ein Wechselvorgang stattfindet, sondern planmäßig erst nach jeder zweiten. Nach jeder Runde zu wechseln ist aus Sicht der Batteriebensdauer trotzdem empfehlenswert, da dadurch ein kleinerer SOC-Bereich genützt wird (siehe auch Kapitel 3.1.5). Mit dieser Lösung wäre es möglich den Betrieb variabler zu gestalten und Unregelmäßigkeiten ausgleichen.

4.3 Nutz- und Sonderfahrzeuge

Nutz- und Sonderfahrzeuge sind die Fahrzeuggruppe mit der größten Anwendungsvielfalt. Sowohl die Eigenschaften des Fahrzyklus, wie beispielweise die Fahrtstrecke und der Verbrauch, als auch die Fahrzeugeigenschaften, wie Aufbau, Gewicht und Größe, variieren je nach Verwendung stark. Es ist daher für die Erstellung des Anforderungsprofils unbedingt je nach Verwendung und Fahrzeugtyp zu unterscheiden. In [45] wurde der Fahrzyklus und das Potential verschiedener Antriebsarten (z. B. Diesel, Hybrid oder elektrisch) für Nutzfahrzeuge untersucht. Je nach Gewicht wurden die Nutzfahrzeuge in Klassen mit < 3,5 t (N1), < 12 t (N2) und < 40 t (N3) eingeteilt. Der elektrische Antrieb ist für Fahrzeuge, die lange Strecken zurücklegen müssen, insbesondere für schwere Fahrzeuge (N3), wegen der dafür benötigten Energiemenge problematisch. Die daraus resultierenden Batteriegrößen erhöhen das Fahrzeuggewicht und verkleinern den Laderaum. Damit wird die mögliche Zuladung stark reduziert, was sich negativ auf den Betrieb auswirkt. Es werden daher NFZ für den Fernverkehr bzw. Fahrzeuge der Gewichtsklasse N3 für die Verwendung eines BWS nicht weiter betrachtet. Auch in [45] wurde für diese Fahrzeuggruppe keine Simulation eines rein elektrischen Antriebes durchgeführt.

⁵⁾ Eine Runde: Fahrt von Endstation A zu Endstation B und retour.

Das Ergebnis der Simulationen zeigt, dass für Fahrzeuge der Klassen N1 und N2 ein elektrischer Antrieb realisierbar ist, solange die Fahrtstrecke nicht zu lang ist. Der Verbrauch eines Fahrzeuges der Klasse N1 beträgt 17,0 l / 100 km (Diesel) bzw. 49 kWh / 100 km (rein elektrisch). Für N2 beträgt dieser 26,9 l / 100 km (Diesel) bzw. 69,7 kWh / 100 km (rein elektrisch). [45]

Um die Batteriegröße in Grenzen zu halten, können daher bei diesen Fahrzeugklassen nur geringe bis mittlere Reichweiten mit einer Batterieladung abgedeckt werden. Dies ist gerade im lokalen Nutzfahrzeugbetrieb nicht unbedingt problematisch, da die Distanzen ohnehin eher gering sind und mit einer BWS-Lösung die schnelle Weiterfahrt ermöglicht werden kann.

Um das Anforderungsprofil aussagekräftiger zu gestalten, wären an dieser Stelle weitere Daten (vor allem über die Fahrtstrecken) notwendig. Aufgrund von Datenschutz- bzw. Geheimhaltungsbestimmungen von Unternehmen und Institutionen, war es nicht möglich im Rahmen der Recherche entsprechende Daten zu erhalten. Es werden daher für die weitere Arbeit folgende Annahmen bezüglich Fahrtstrecken getroffen:

- LNFZ (N1) kurze Strecke: 50 km
- LNFZ (N1) lange Strecke: 120 km
- MNFZ (N2): 50 km

Aufgrund der vielfältigen Anwendung von leichten Nutzfahrzeugen (LNFZ) wurde das Anforderungsprofil für diese Gruppe in zwei Distanzen geteilt. Für mittelschwere Nutzfahrzeuge (MNFZ) wird eine kurze Strecke betrachtet, um die Batteriegrößen in einem sinnhaften Rahmen zu halten.

Die Gruppe der Sonderfahrzeuge ist für den Einsatz von BWS ebenfalls interessant. Speziell Müll- und Räumfahrzeuge durchlaufen einen Fahrzyklus mit vielen Beschleunigungs- und Bremsvorgängen, weswegen der elektrische Antrieb grundsätzlich vorteilhaft wäre. Im Zuge der Recherche wurde Kontakt mit einem Unternehmen, das Müll- und Räumfahrzeuge betreibt, aufgenommen. Wie auch bei den Nutzfahrzeugbetreibern konnten aufgrund der Geheimhaltungsbestimmungen keine konkreten Daten erhalten werden. Seitens des Betreibers wurde aber auf die Problematik hingewiesen, dass die momentan mögliche Zuladung, aufgrund der gesetzlichen Bestimmungen und des ohnehin bereits hohen Leergewichts der Sonderfahrzeuge, bereits sehr gering sei. Eine weitere Reduktion der Zuladung, die eine Lösung mit elektrischem Antrieb (und somit auch BWS) mit sich bringen könnte,

stellt für den Betreiber bereits ein existenzbedrohendes Szenario dar. Unter den momentanen Rahmenbedingungen ist es daher aus Sicht des Betreibers nicht möglich eine Batterielösung zu verwenden. Diese müsste gleich schwer oder leichter sein, damit die mögliche Zuladung nicht negativ beeinflusst wird.

Aufgrund dieser Erkenntnis und mangels solider Daten werden daher Sonderfahrzeuge nicht näher betrachtet. Es sei trotzdem nochmals betont, dass eine Lösung mit BWS auch bei dieser Fahrzeuggruppe aus technischer Sicht grundsätzlich überlegenswert ist und bei einer Veränderung der Rahmenbedingungen jedenfalls neu untersucht werden sollte.

5 Eigenes Konzept

Basierend auf der Analyse der bestehenden BWS und dem Anforderungsprofil wurde ein eigenes Konzept für ein BWS erstellt. Das nachfolgend vorgestellte Konzept ist, aufgrund des teilweise vorhandenen Datenmangels und wegen dem einfachen zugrunde liegenden Berechnungsmodell, nur als erste Überlegung anzusehen. Es soll einen ersten Überblick geben, wie ein verbessertes BWS aussehen könnte und ob dieses grundsätzlich realisierbar ist. Die vorliegenden Überlegungen können als Basis für eine zukünftige Entwicklung eines BWS dienen, sind aber dafür alleine nicht ausreichend. Zu diesem Zweck müssen jedoch noch weitere Daten, insbesondere im Nutzfahrzeug-bereich, ermittelt und das Berechnungsmodell entsprechend der tatsächlichen Anwendung detaillierter gestaltet werden.

5.1 Grundlegende Überlegungen

Prinzipiell sollte das BWS so einfach wie möglich gestaltet sein, gleichzeitig aber alle Anforderungen bestmöglich erfüllen und eine große Variabilität im Betrieb zulassen. So war grundsätzlich das Ziel, ein BWS-Konzept zu erstellen, das sowohl von PKW, NFZ und Bus genutzt werden kann. Dabei ergibt sich bereits die Schwierigkeit, dass stark unterschiedliche Größenordnungen, sowohl bei der Fahrzeuggröße als auch beim Energie- und Leistungsbereich, abgedeckt werden müssen.

Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wird ein modulares Konzept verwendet, bei dem mehrere Batteriemodule mit einer bestimmten Größe benutzt werden können. Um den Bedarf eines PKW abzudecken, ist nur eine geringe Anzahl dieser Module erforderlich, während ein Bus eine höhere Anzahl benötigt. Dadurch können von allen Fahrzeugen dieselben Pakete verwendet werden. Das bedeutet, dass der

Wechselmechanismus prinzipiell nicht auf unterschiedliche Fahrzeuge vorbereitet sein muss. Des Weiteren können immer dieselben Pakete hergestellt werden, woraus sich ein Kostenvorteil erzielen lässt. Außerdem ist es auch möglich, je nach Reichweitenbedarf, eine niedrigere oder höhere Anzahl an Modulen zu verwenden. Dafür muss lediglich das Fahrzeug entsprechend vorbereitet sein.

5.2 Grobauslegung

Die Berechnung wurde für fünf verschiedene Fahrzeuge bzw. Betriebsweisen durchgeführt:

- PKW (Taxi)
- LNFZ (leichte Nutzfahrzeuge) kurze Strecke (50 km)
- LNFZ (leichte Nutzfahrzeuge) lange Strecke (120 km)
- MNFZ (mittelschwere Nutzfahrzeuge)
- Bus (öffentlicher städtischer Verkehr)

Des Weiteren sind für viele verwendete Zahlenwerte Schwankungsbereiche vorhanden. Es wurden daher die Berechnung für die Fälle Best, Average und Worst Case parallel durchgeführt, wobei für die Berechnung mit Best Case alle Werte verwendet wurden, die für ein BWS von Vorteil sind. So sind beispielsweise ein hoher Wirkungsgrad der elektrischen Maschine und ein niedriger Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors von Vorteil für ein BWS (für Details siehe Kapitel 5.2.1). Beim Average Case wurden Durchschnittswerte verwendet, beim Worst Case entsprechend die für ein BWS nachteiligen Werte.

5.2.1 Berechnungsmodell

Der Grobauslegung liegt eine einfache Betrachtung zugrunde. Ausgehend von einem konventionellen Dieselfahrzeug wurde mithilfe von Verbrauchswerten, Wirkungsgraden, usw. auf den Verbrauch eines elektrischen Fahrzeuges geschlossen. Unter Verwendung der Batterieeigenschaften, dem Anforderungsprofil und einigen zusätzlichen Betrachtungen (wie Heizungsbedarf) wurde somit die Batterie grob abgeschätzt. Die errechneten Werte wurden stets mit entsprechender Literatur bzw. Herstellerangaben verglichen und auf Plausibilität überprüft. Nachfolgend soll die Berechnung kurz gezeigt werden.

Mit dem Kraftstoffverbrauch b ($l/100km$), der Energiedichte des Kraftstoffes H_u (kWh/kg) und der gravimetrischen Dichte des Kraftstoffes ρ (kg/l), berechnet sich der chemische Energieverbrauch b_{ch} ($kWh/100km$) zu

$$b_{ch} = b \cdot H_u \cdot \rho. \quad (7)$$

Der Wirkungsgrad des elektrischen Antriebes η_{el} ergibt sich aus der Kette von Batterie (η_{Batt}), Inverter (η_{Inv}) und Maschine (η_{EM}) und berechnet sich mit

$$\eta_{el} = \eta_{Batt} \cdot \eta_{Inv} \cdot \eta_{EM}. \quad (8)$$

Mithilfe des durchschnittlichen Wirkungsgrades des Dieselmotors η_D und dem Wirkungsgrad des elektrischen Antriebes, lässt sich der elektrische Energieverbrauch b_{el} ($kWh/100km$) mit

$$b_{el} = b_{ch} \cdot \frac{\eta_D}{\eta_{el}} \quad (9)$$

berechnen. Aufgrund des zusätzlichen Energiebedarfs für Heizung und Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums ergibt sich mit einem Zuschlagsfaktor k_{HK} (siehe Kapitel 5.2.2) der elektrische Energieverbrauch inkl. Heizung und Klimatisierung ($kWh/100km$) zu

$$b_{el,HK} = b_{el} \cdot k_{HK}. \quad (10)$$

Aufgrund des maximal verwendeten SOC-Fensters ΔSOC_{max} fällt die benötigte Kapazität pro 100 km e_{Batt} etwas höher aus als der elektrische Energieverbrauch dies verlangen würde:

$$e_{Batt} = \frac{b_{el,HK}}{\Delta SOC_{max}}. \quad (11)$$

Damit, und mit der benötigten Reichweite s_{ben} (km) aus Kapitel 5.2.4, lässt sich nun die benötigte Batteriekapazität $E_{Batt,ben}$ (kWh) mit

$$E_{Batt,ben} = e_{Batt} \cdot s_{ben} \quad (12)$$

berechnen.

Aufgrund des modularen Batteriekonzepts muss die verwendete Batteriekapazität E_{Batt} aus der Anzahl der Module n_{Modul} und der Modulkapazität E_{Modul} zusammengesetzt werden und größer sein als die benötigte Batteriekapazität:

$$E_{Batt} = n_{Modul} \cdot E_{Modul} > E_{Batt,ben}. \quad (13)$$

Die daraus resultierende Batteriekapazität ermöglicht entweder eine größere Reichweite s als erforderlich

$$s = \frac{E_{Batt}}{e_{Batt}} \quad (14)$$

oder ein kleineres SOC-Nutzungsfenster

$$\Delta SOC = \frac{b_{el,HK} \cdot s_{ben}}{E_{Batt}}. \quad (15)$$

Aus Sicht der Lebensdauer wäre es günstiger, nicht die maximale Reichweite auszunützen, sondern das Paket nach dem planmäßigen Fahrzyklus zu wechseln.

Mit den weiteren Batterieeigenschaften lassen sich nun Werte für Gewicht, Volumen, Leistung und weiteres berechnen. Auf eine detaillierte Vorstellung dieser einfachen Berechnungen wird an dieser Stelle verzichtet, die Ergebnisse werden jedoch in den nachfolgenden Kapiteln diskutiert und können im Detail dem Anhang 9.3 entnommen werden.

5.2.2 Einfluss der Innenraumheizung und -klimatisierung

Da im verwendeten Berechnungsansatz vom Verbrauch des Dieselmotors auf den elektrischen Energieverbrauch geschlossen wird, ist die Innenraumheizung nicht enthalten (Heizung ausschließlich durch Abwärme des Motors). In [Abbildung 44](#) ist der Energiebedarf des Mitsubishi i-MiEV in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur dargestellt. Man sieht, dass insbesondere bei niedrigeren Temperaturen mit deutlich höheren Verbräuchen zu rechnen ist. Dies ist einerseits auf den erhöhten Heizungsbedarf zurückzuführen, andererseits wurden im Diagramm die geänderten Fahrwiderstände berücksichtigt. Der Mehrverbrauch durch unterschiedliche Umgebungstemperaturen darf daher keinesfalls vernachlässigt werden. [46]

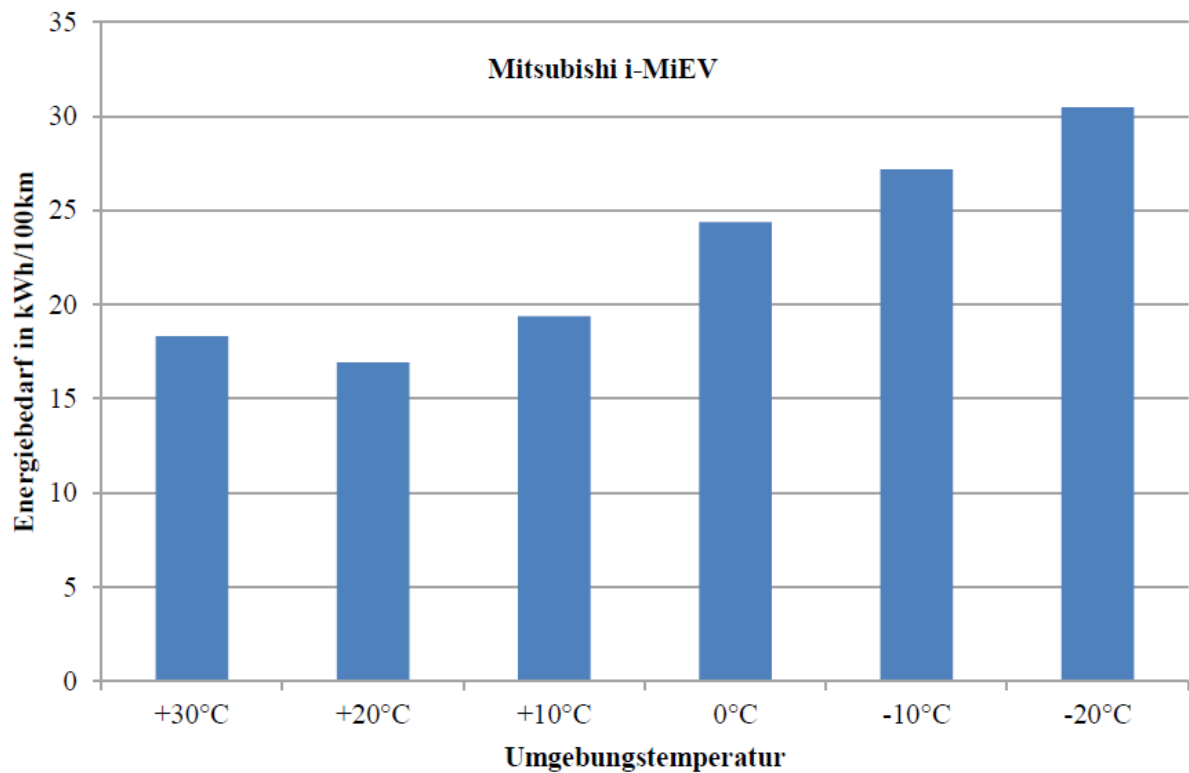


Abbildung 44 – Energiebedarf in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur [46]

Der erwähnte Mehrverbrauch wurde nun durch einen Faktor $k_{HK} > 1$ berücksichtigt. Die Ermittlung dieses Faktors wurde in Anlehnung an die in Abbildung 44 gezeigten Daten durchgeführt. Für die Temperatur wurde die Verteilung innerhalb eines Jahres in Wien (siehe [Abbildung 45](#)) verwendet.

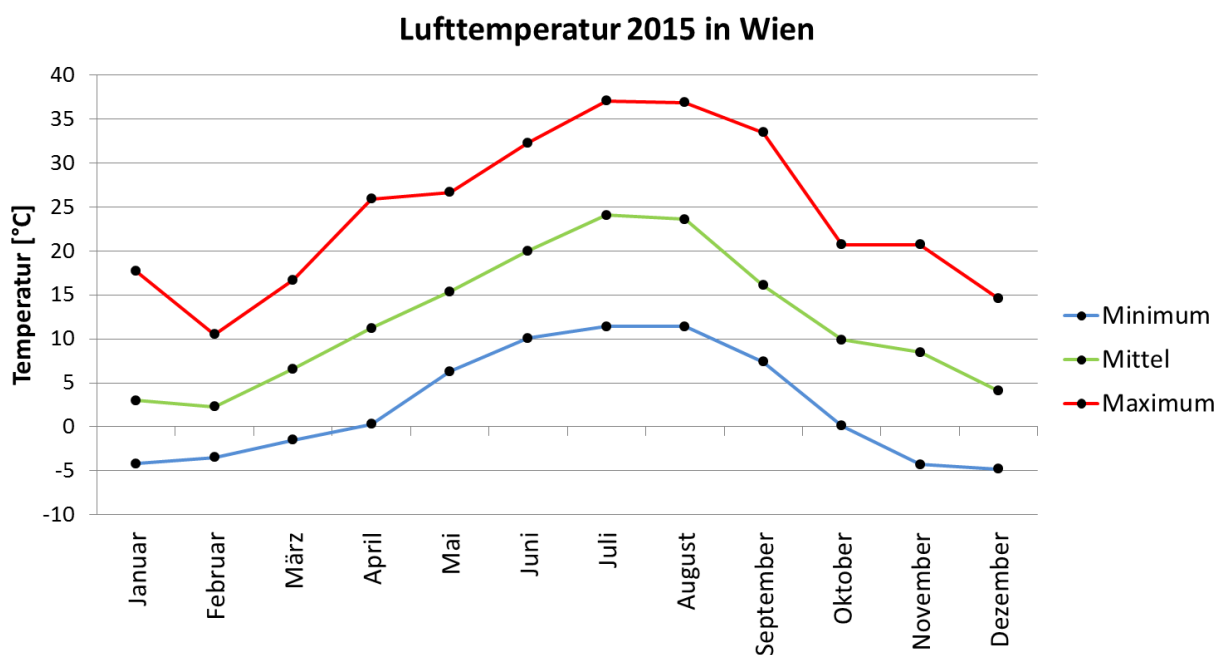


Abbildung 45 – Temperaturverteilung in Wien im Jahr 2015, eigene Darstellung [47]

In Tabelle 2 ist die Ermittlung des Faktors zu sehen. Links sind die Temperaturen jeweils als Minimum, Mittel und Maximum zu sehen. In der Mitte ist der aus diesen Temperaturen resultierende Verbrauch in Anlehnung an Abbildung 44 eingetragen. Das Minimum beträgt dabei 17 kWh / 100km und wird im Mittel im Juni (20 °C) erreicht. Rechts ist darauf aufbauend der Quotient zu diesem Minimum eingetragen. Dieser stellt einen dimensionslosen Faktor dar, der unabhängig vom Grundverbrauch des Fahrzeuges ist und eignet sich daher als multiplikativer Faktor zur Erhöhung des errechneten Verbrauchs im Berechnungsmodell. Da der Wert für jeden Monat stark schwankt, wurde für die Grobauslegung der Durchschnitt der Werte von Minimum, Mittel und Maximum gebildet. Der Schnitt der mittleren Werte beträgt 1,17 und wird in der Grobauslegung als Best Case verwendet. Des Weiteren wird der Durchschnitt aus Minimum (1,33) und Maximum (1,08) betrachtet. Dieser beträgt 1,21 und wird für den Worst Case verwendet. Der Average Case wird mit 1,19 festgelegt.

Tabelle 2 – Mehrverbrauch durch die Temperaturverteilung in Wien 2015 [46], [47]

| Monat | Temperaturen Wien | | | Energieverbrauch nach [46] | | | Quotient zu Min. (17) | | |
|---------------------|-------------------|--------|------|----------------------------|-----------|-----|-----------------------|-------------|-------------|
| | min | mittel | max | min | mittel | max | min | mittel | max |
| Januar | -4,2 | 3 | 17,7 | 25 | 23 | 18 | 1,47 | 1,35 | 1,06 |
| Februar | -3,5 | 2,3 | 10,5 | 25 | 23 | 19 | 1,47 | 1,35 | 1,12 |
| März | -1,5 | 6,6 | 16,7 | 24 | 22 | 18 | 1,41 | 1,29 | 1,06 |
| April | 0,3 | 11,2 | 25,9 | 24 | 19 | 18 | 1,41 | 1,12 | 1,06 |
| Mai | 6,3 | 15,4 | 26,7 | 22 | 18 | 18 | 1,29 | 1,06 | 1,06 |
| Juni | 10,1 | 20 | 32,3 | 19 | 17 | 19 | 1,12 | 1,00 | 1,12 |
| Juli | 11,4 | 24,1 | 37,1 | 19 | 18 | 20 | 1,12 | 1,06 | 1,18 |
| August | 11,4 | 23,6 | 36,9 | 19 | 18 | 20 | 1,12 | 1,06 | 1,18 |
| September | 7,4 | 16,1 | 33,5 | 21 | 18 | 19 | 1,24 | 1,06 | 1,12 |
| Oktober | 0,1 | 9,9 | 20,7 | 24 | 20 | 17 | 1,41 | 1,18 | 1,00 |
| November | -4,3 | 8,5 | 20,7 | 25 | 20 | 17 | 1,47 | 1,18 | 1,00 |
| Dezember | -4,8 | 4,1 | 14,6 | 25 | 23 | 18 | 1,47 | 1,35 | 1,06 |
| Durchschnitt | | | | | | | 1,33 | 1,17 | 1,08 |

Der Mehrverbrauch durch Heizung und Klimatisierung wurde daher mit 17 - 21 % festgelegt und in der Grobauslegung berücksichtigt. Damit werden die Monate April bis November im Mittel abgedeckt. Die Ausreißer zu Maximaltemperaturen werden damit sogar knapp über das ganze Jahr abgedeckt. Für die Ausreißer in Richtung minimaler Temperaturen sind jedoch selten vorkommende, hohe Mehrverbräuche zu erwarten. Dies sollte bei einer tatsächlichen Anwendung berücksichtigt werden.

5.2.3 Lebensdauerabschätzung

Wie bereits in Kapitel 3.1.5 erwähnt, ist die Lebensdauer einer Batterie von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Die genaue Berechnung der Lebensdauer ist daher im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Es soll trotzdem der Versuch unternommen werden, die Batterielebensdauer mit einigen Annahmen abzuschätzen.

Eine sinnvolle Abschätzung der rein kalendarischen Alterung und der Alterung durch Zyklieren stellt dabei die größte Herausforderung dar. In [48] wird die kalendarische Lebensdauer mit 15 Jahren bei 30 °C abgeschätzt. Die Zyklenlebensdauer wird mit 1.000 Zyklen bei einer Entladerate von 3C angegeben. Über den dabei benutzten SOC-Bereich sind keine Angaben vorhanden, was diese Zahlen nur eingeschränkt brauchbar macht. Trotzdem sollen sie leicht angepasst als Grundlage dienen.

Der Vorteil von BWS besteht darin, dass die „Ladung“ des Fahrzeuges schnell geht und dabei die Batterie keine hohen Ladeströme aushalten muss. Der Entladestrom bei der Fahrt ist in den meisten Fällen eher gering (weit unter 1C). Hohe Ströme (über 1C) werden lediglich beim Beschleunigen und Bremsen benötigt. Diese Fahrzustände sind aber vergleichsweise kurz und der Einfluss daher begrenzt. Die tatsächliche Batteriebelastung muss im Anwendungsfall durch Messungen oder Simulationen genauer ermittelt werden. Aufgrund der vereinfachten Betrachtung wird die Batteriebelastung in Summe eher hoch mit 1C abgeschätzt.

In Abbildung 27 in Kapitel 3.1.5 sieht man, dass eine Verringerung des Stromes von $I_t = 4$ auf $I_t = 1,25$, also eine Verringerung um den Faktor 3,2, eine Erhöhung der Lebensdauer von 660 auf 2.950 Zyklen, das heißt um den Faktor 4,47, bewirkt. Die Zyklenzahl steigt also stärker als die Verringerung des Stromes. Es wird für die Grobauslegung trotzdem eine vereinfachte, eher konservative Abschätzung verwendet, insbesondere wegen des unbekanntenen SOC-Nutzungsbereichs. Deswegen wird die Zyklenzahl von 1.000 auf nur 2.000 (Average Case) angehoben, obwohl der Strom um den Faktor 3 (von 3C auf 1C) gesunken ist. Diese Zyklenzahl wird für 100% DOD verwendet. Der Worst Case wird mit 1.500 Zyklen und der Best Case mit 2.500 Zyklen angenommen.

Der Einfluss des tatsächlich verwendeten DOD bzw. des SOC-Fensters muss unabhängig von der oben genannten Betrachtung berücksichtigt werden. In Anlehnung an die Kurve aus Abbildung 28 wurde für die gewählte Zyklenzahl ein ähnlicher Verlauf mit Hilfe einer Funktion dritten Grades mit MATLAB erzeugt. In [Abbildung 46](#) ist diese Annäherung zu sehen. Man sieht, dass für den Bereich zwischen 80 und 100 % DOD

keine gute Annäherung stattfindet, da dort die Zyklenzahl das Minimum nicht bei 100 % aufweist. Dies ist nicht weiter problematisch, da in diesem Bereich Batterien ohnehin nicht betrieben werden sollten. Die restlichen Punkte werden gut approximiert.

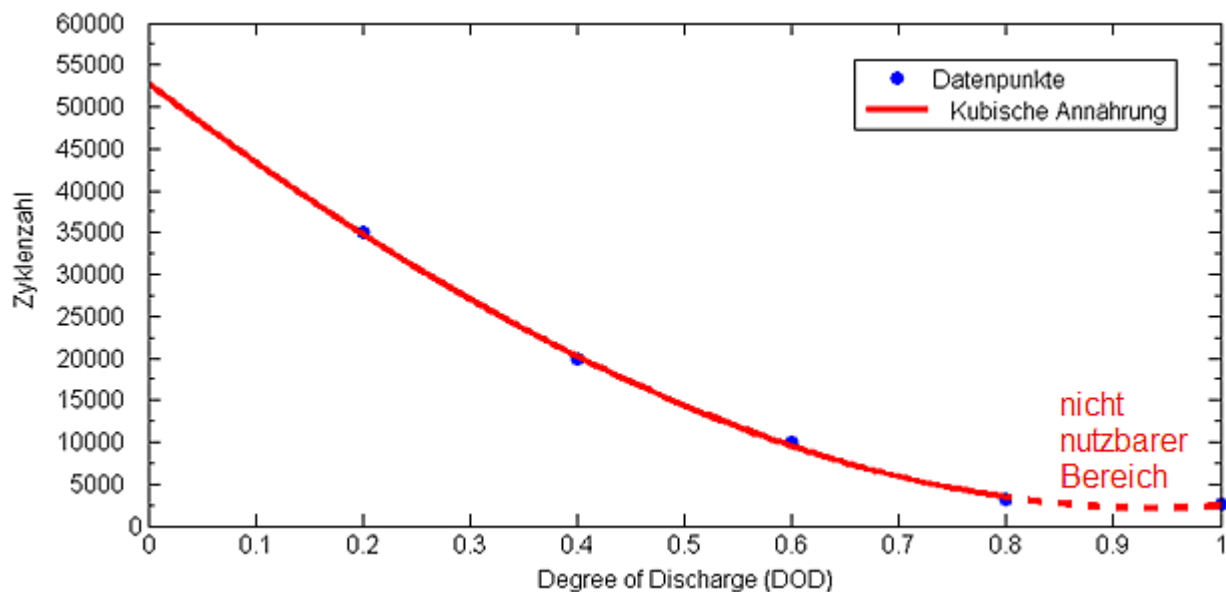


Abbildung 46 – Kubische Annäherung der Zyklenzahl über DOD [40]

Da die Datenpunkte nicht der oben ermittelten Zyklenzahl entsprechen, mussten diese nochmals um einen Faktor reduziert werden, damit die Zyklenzahlen bei 100 % DOD übereinstimmen. Damit ergibt sich die Funktion der Zyklenzahl $N_c(DOD)$ zu

$$N_c(DOD) = (12198 \cdot DOD^3 + 34954 \cdot DOD^2 - 97517 \cdot DOD + 52895) \cdot \frac{N_{c,100\%DOD}}{2530}, \quad (16)$$

wobei $N_{c,100\%DOD}$ die gewählte Zyklenzahl bei 100 % DOD ist und 2530 der erwähnte Korrekturfaktor, damit die Funktion den gewünschten Wert bei 100 % DOD ergibt. DOD ist hier einheitenlos, das heißt mit Werten < 1 einzusetzen (nicht %). In [Abbildung 47](#) ist die Annäherung für den Average Case (2000 Zyklen bei 100 % DOD) geplottet.

Die kalendarische Lebensdauer hängt im Wesentlichen vom Lagerungszustand ab, das heißt von der Temperatur und vom SOC. Die empfohlenen Bedingungen wurden bereits in Kapitel 3.1.5 erläutert. Aufgrund der sehr hohen Angabe von 15 Jahren aus [48], und den nicht genau bekannten Lagerungszuständen bei der praktischen Anwendung, wird die Lebensdauer etwas verringert (für alle Cases) mit 12 Jahren abgeschätzt.

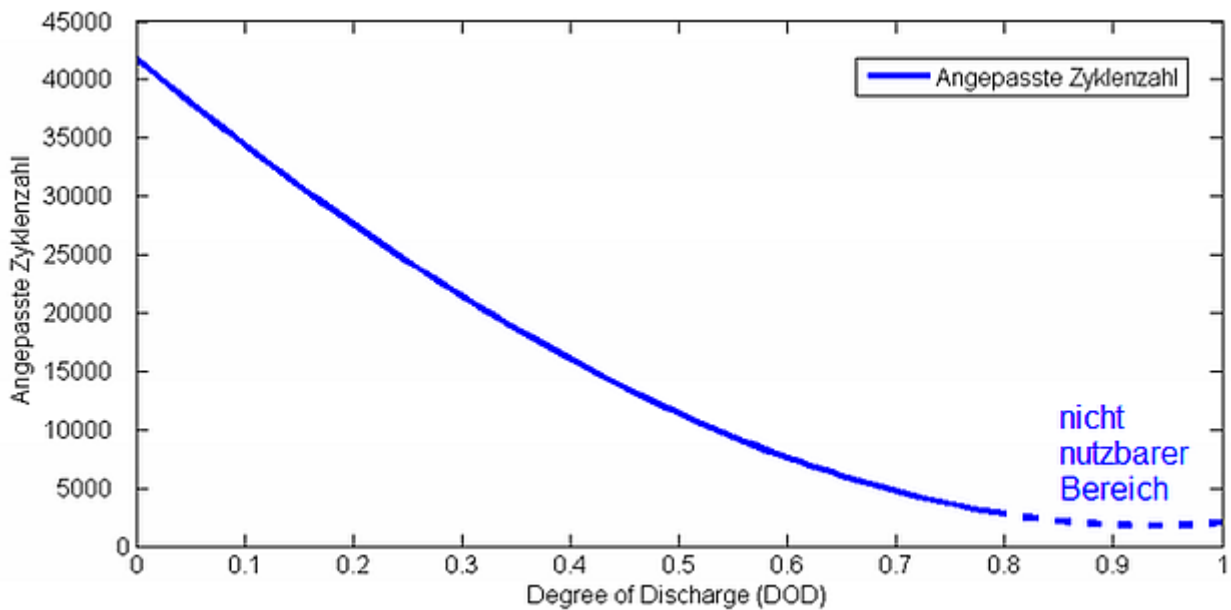


Abbildung 47 – Angepasste Zyklenzahl (Average Case) in Abhängigkeit vom DOD

Die Berechnung der Lebensdauer der Batterie erfolgt über die Betrachtung der Alterung pro Jahr A_{Jahr} ($\%/a$). Dafür muss die jährliche Fahrtstrecke s_{Jahr} (km/a) abgeschätzt werden. Die jährliche Alterung berechnet sich nun zusammengesetzt aus der Alterung durch Zyklieren $A_C(DOD)$ abhängig vom DOD ($\%/cycle$) und durch kalendarische Alterung A_K ($\%/a$) zu

$$A_{Jahr} = A_K + A_C(DOD) \cdot n_C, \quad (17)$$

wobei n_C die Anzahl der Zyklen pro Jahr ($cycle/a$) ist. Die Anzahl der Zyklen pro Jahr lässt sich mit der jährlichen Fahrtstrecke s_{Jahr} (km/a) und der Fahrtstrecke pro Zyklus, beispielsweise der benötigten Reichweite s_{ben} ($km/cycle$), die bereits in Kapitel 5.2.1 verwendet wurde, berechnen. Die Alterung durch Zyklieren berechnet sich mit Hilfe der Zyklenzahl $N_C(DOD)$ und der maximalen Alterung, auch als EOL Alterung A_{EOL} ($\%$) bezeichnet. Analog dazu lässt sich die kalendarische Alterung A_K mit der kalendarischen Lebensdauer L_K (a) und A_{EOL} ermitteln. Eingesetzt ergibt sich die Alterung pro Jahr zu

$$A_{Jahr} = \frac{A_{EOL}}{L_K} + \frac{A_{EOL}}{N_C(DOD)} \cdot \frac{s_{Jahr}}{s_{ben}}. \quad (18)$$

Mit der Alterung pro Jahr A_{Jahr} in $\%/a$ lässt sich nun die Lebensdauer in Jahren errechnen. Das Lebensdauerende (End of Life = EOL) wird mit Erreichen von 80 % der Nennkapazität angesetzt. Daher ergibt sich eine EOL Alterung A_{EOL} von 20 %, womit sich die Lebensdauer in Jahren mit Division durch die jährliche Alterung A_{Jahr} berechnen lässt. Die Lebensdauer in km (dabei zurückgelegte Strecke) lässt sich durch Multiplikation der Lebensdauer in Jahren mit der jährlichen Fahrtstrecke ermitteln.

5.2.4 Benötigte Reichweite

Grundlage der benötigten Reichweite ist das zuvor erstellte Anforderungsprofil. Die benötigte Reichweite hängt einerseits vom Fahrzeugtyp, andererseits vom Betrieb ab. Für den PKW und den Bus ist der Betrieb relativ genau bekannt, während dieser bei den Nutzfahrzeugen stark variieren kann. Nachfolgend soll die Ermittlung der Reichweite für die Grobauslegung diskutiert werden.

Beim PKW wurde bereits die Einschränkung auf den Betrieb als Taxi getroffen. In Abbildung 38 in Kapitel 4.1 ist näherungsweise die Verteilung der Distanzen innerhalb einer Schicht zu sehen. Für eine Abdeckung aller Schichtdistanzen wäre eine sehr große Batterie nötig, was nicht im Sinne eines BWS ist. Wie bereits erwähnt, gilt es eine sinnvolle Anzahl an Wechselvorgängen innerhalb einer Schicht festzulegen. Ziel dabei ist es, die Batterie so klein wie möglich zu halten und gleichzeitig eine geringe Wechselzahl zu erzielen, damit der Betrieb nicht beeinflusst wird. Es wurde daher für den PKW eine benötigte Reichweite von 140 km festgelegt. Vorausgesetzt die Batterie ist zu Schichtbeginn vollgeladen, kann damit eine geringe Anzahl der Schichten (26 %) bereits vollständig abgedeckt werden. Weitere 68 % der Schichten (140 bis 280 km) können mit dieser Reichweite abgedeckt werden, wenn die Batterie einmal innerhalb der Schicht gewechselt wird. Für die restlichen 6 % der Schichten muss ein zweiter Wechsel innerhalb der Schicht erfolgen. Mit dieser Festlegung kann daher ein Großteil der Schichten mit einem oder gar keinem Wechsel abgedeckt werden, was die Variabilität verbessert. Für eine Erhöhung der Lebensdauer sei aber nochmals erwähnt, dass mehr Wechselvorgänge als hier angegeben empfehlenswert sind. Aufgrund der hohen Stehzeiten sollte dies einfach zu realisieren sein.

Beim Bus wurde festgestellt, dass sich je nach Betrachtung von Bussen oder Linien rund 80 % der einfachen Strecken (von Endstation A nach Endstation B) mit 8 km Reichweite abdecken lassen. Um nicht an jeder Endstelle eine Wechselstation errichten zu müssen, was vereinfacht betrachtet die doppelten Investitionskosten bedeuten würde, muss die Reichweite also auch den Rückweg abdecken. Eine Reichweite von mindestens 16 km ist daher erforderlich. Um den Betrieb variabler gestalten zu können, insbesondere zum Ausgleich unvorhergesehener Verkehrsverhältnisse, ist es sinnvoll eine zweite Runde zu ermöglichen. Damit wächst die benötigte Reichweite auf 32 km. Auch hier ist es wiederum empfehlenswert, sollte dies der Betrieb zulassen, nach jeder Runde zu wechseln, da dies die Lebensdauer erhöht.

Die benötigte Reichweite der Nutzfahrzeuge ist aufgrund des Datenmangels unbekannt, es soll aber die Grobauslegung trotzdem für 3 Beispielszenarien durchgeführt werden. Die Strecken wurden dafür bereits in Kapitel 4.3 festgelegt. Zusammenfassend sind in Tabelle 3 die festgelegten benötigten Reichweiten nochmals aufgelistet. Diese sind für Best, Average und Worst Case gleich.

Tabelle 3 – Benötigte Reichweiten für die Grobauslegung

| | PKW | LNfZ kurz | LNfZ lang | MNFZ | Bus |
|-------------------|------------|------------------|------------------|-------------|------------|
| Reichweite | 140 km | 50 km | 120 km | 50 km | 32 km |

Abschließend sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass bei der Berechnung berücksichtigt werden muss, dass die Batterie zu Beginn und beim Erreichen des EOL verschiedene Kapazitäten und damit Reichweiten aufweist. Für manche Fahrzeuge, wie den PKW oder das LNfZ lang, und eingeschränkt auch den Bus, kann es akzeptiert werden, wenn die EOL-Reichweite nicht ganz der benötigten Reichweite entspricht. Dies würde für die genannten Anwendungen nur in einem zusätzlichen Wechsel innerhalb des Betriebes resultieren. Speziell für den Bus bedeutet dies, dass nahe am EOL für lange Strecken (nahe 8 km pro Richtung) nach jeder Runde gewechselt werden müsste bzw. nur auf kurzen Strecken zwei Runden gefahren werden können. Für die Szenarien LNfZ kurz und MNfZ ist ein weiterer Wechsel unterhalb der Mindestreichweite nicht denkbar, da die Fahrtstrecke ohnehin bereits kurz ist und ein weiterer Wechsel den Betrieb negativ beeinflussen würde.

5.2.5 Ergebnisse

Die Berechnung wurde auf Basis der zuvor erläuterten Grundlagen durchgeführt. Die detaillierten Ergebnisse können in tabellarischer Form dem Anhang 9.3 entnommen werden. Es sollen an dieser Stelle auszugweise die wichtigsten Resultate gezeigt und diskutiert werden.

In Abbildung 48 ist der errechnete elektrische Energieverbrauch in kWh / 100km zu sehen. Hier sieht man die deutlichen Unterschiede in der Größenordnung zwischen einem PKW und einem Bus. Dieser musste mit Hilfe der Modulanzahl und der Reichweite ausgeglichen werden. Aufgrund der gegenläufigen Reichweiten war dies relativ einfach möglich.

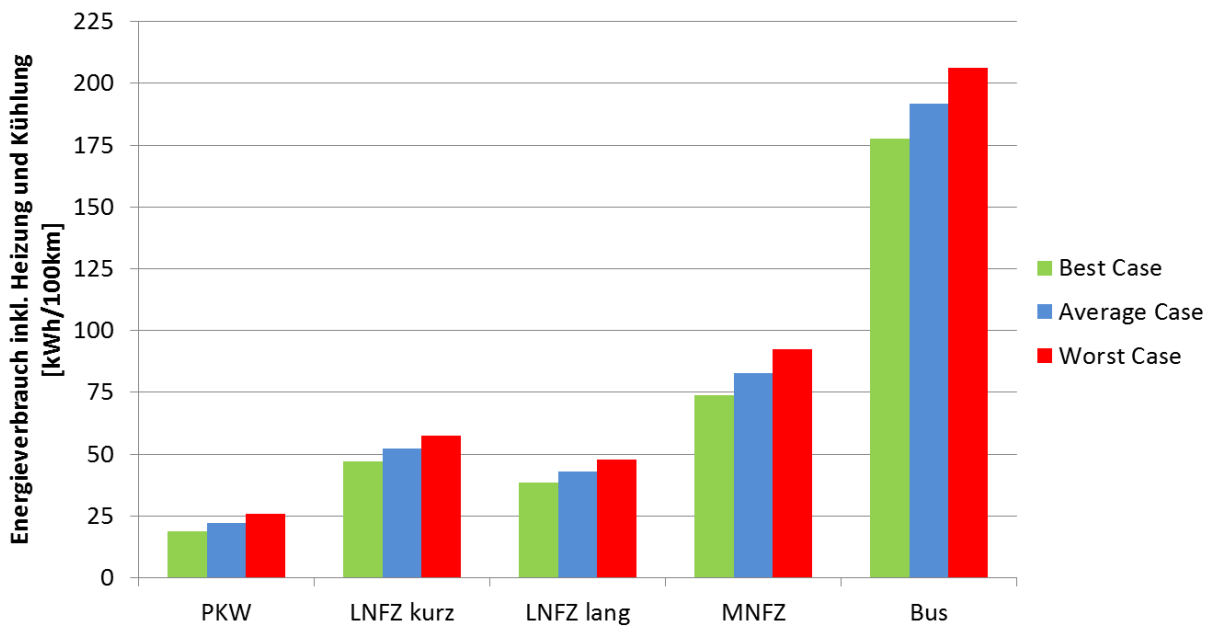


Abbildung 48 – Elektrischer Energieverbrauch inkl. Heizung und Kühlung

In Abbildung 49 ist die Kapazität des gesamten Speichers (alle eingebauten Module) dargestellt. Die Modulgröße ergibt sich für den Best Case zu 20 kWh, für den Average Case zu 22 kWh und für den Worst Case zu 24 kWh. Man sieht, dass für die Erfüllung des Anforderungsprofils außerdem mit wachsender Anforderung (von links nach rechts) erwartungsgemäß höhere Kapazitäten und damit Modulzahlen nötig sind. Trotzdem sind die Kapazitäten von ähnlicher Größenordnung. Dies zeigt, dass die gemeinsame Verwendung eines BWS auch aus energetischer Sicht möglich ist.

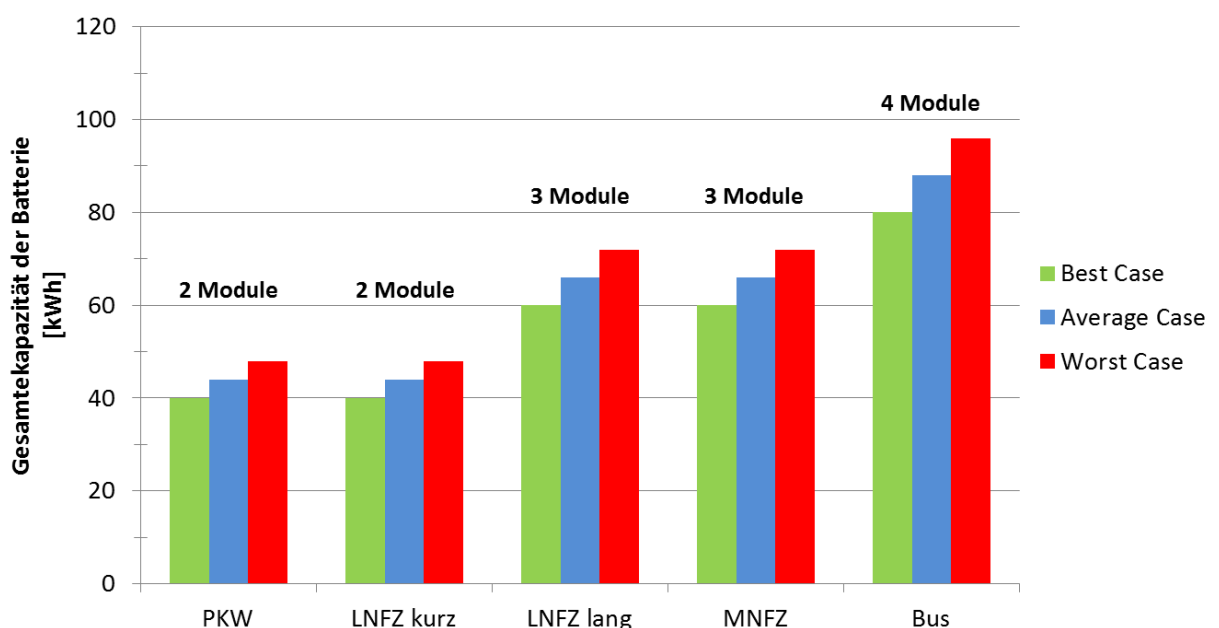


Abbildung 49 – Gesamtkapazität der Batterie (alle Module)

Abbildung 50 zeigt die aus den gewählten Kapazitäten resultierenden Reichweiten zu Beginn der Lebensdauer und am Ende (EOL). Man sieht, dass für den PKW, LNFZ lang und Bus die benötigten Reichweiten (siehe Kapitel 5.2.4) bei EOL nicht erreicht werden. Dies resultiert aus dem notwendigen Kompromiss, dass die Batteriegröße einerseits klein gehalten werden soll, andererseits aber für alle 5 Fahrzeug- bzw. Betriebstypen passen muss. Des Weiteren ist es bei diesen Fahrzeugen möglich, den Betrieb nahe des EOL der Batterie entsprechend anzupassen, das heißt beispielsweise früher zu wechseln. Eine weitere Möglichkeit, um das EOL-Verhalten zu verbessern, ist das Vorsehen eines zusätzlichen Raumes für ein weiteres Batteriemodul. Damit lässt sich nicht nur der EOL-Betrieb verbessern, sondern dies eröffnet auch die Möglichkeit die Reichweite bei Bedarf deutlich zu erhöhen. Bei einem LNFZ könnten daher je nach Größe 3 oder 4 Modulplätze vorgesehen werden. Bei einem PKW ist dies etwas problematischer, jedoch wären bei langen Fahrzeugen bis zu 3 Modulplätze denkbar.

Der Bus unterschreitet die geforderte Reichweite bei EOL nur knapp, daher könnten Busse mit einer hohen Fahrlänge von 8 km (32 km benötigte Reichweite) bereits nach jeder Runde (16 km) wechseln oder immer eine eher neuere Batterie verwenden. Für Busse mit einer Fahrlänge von 7 km (28 km benötigte Reichweite) oder weniger ist das EOL kein Problem, da die niedrigste errechnete EOL-Reichweite 29 km beträgt. Damit ließen sich immer noch 62 - 69 % (Bus bzw. Linie) der Strecken abdecken. Es soll an dieser Stelle noch erwähnt werden, dass höhere Bus-Strecken (> 8 km) mit diesem Konzept ebenfalls abgedeckt werden können, bei diesen muss jedoch in jedem Fall bereits nach einer Runde gewechselt werden.

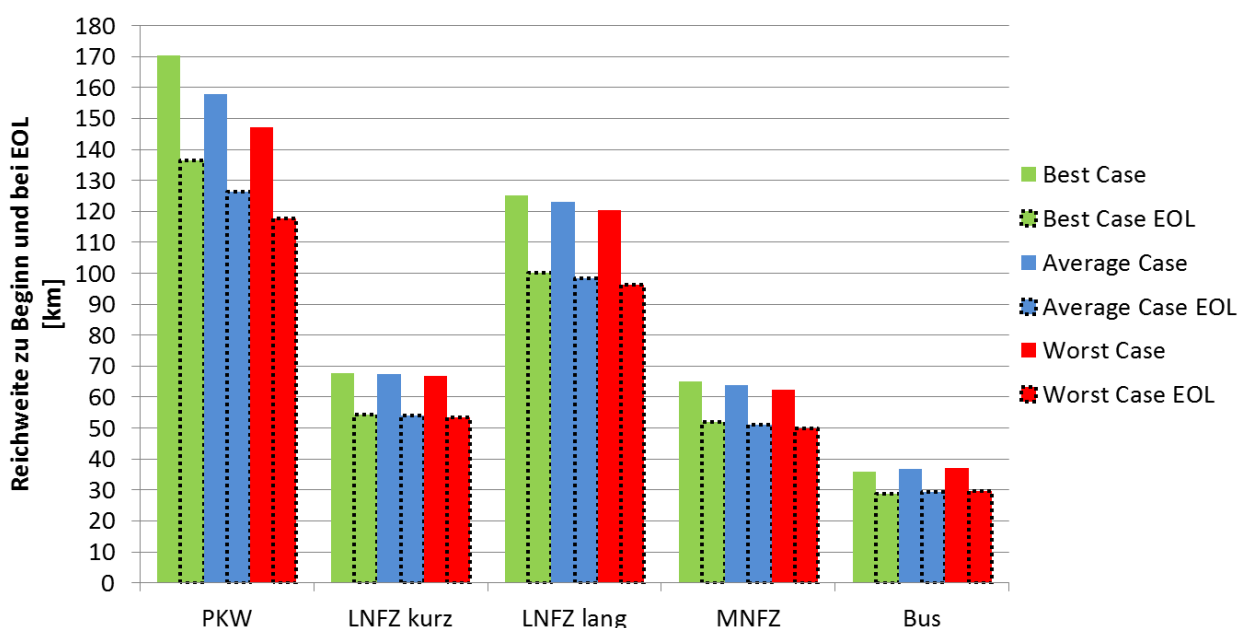


Abbildung 50 – Reichweite zu Beginn und am Ende der Lebensdauer (EOL)

Das Niveau der errechneten Reichweiten liegt im Vergleich zu typischen Reichweitenangaben elektrischer Fahrzeuge etwas niedrig. Dies liegt daran, dass für die Verbrauchswerte nicht die Angaben der Fahrzeughersteller verwendet wurden, sondern realitätsnähere Werte. Des Weiteren ist auch die Heizung und Klimatisierung berücksichtigt worden. Verwendet man typische Normverbrauchswerte von Dieselfahrzeugen und vernachlässigt den Mehrverbrauch durch Temperierung des Innenraums, so erhält man deutlich höhere Reichweiten. Diese sind in Abbildung 51 für die Fahrzeuge < 3,5 t aufgetragen. Man sieht, dass die so errechneten Reichweiten den Angaben von Elektrofahrzeugherstellern, mit ähnlichen Batteriegrößen, nahe kommen.

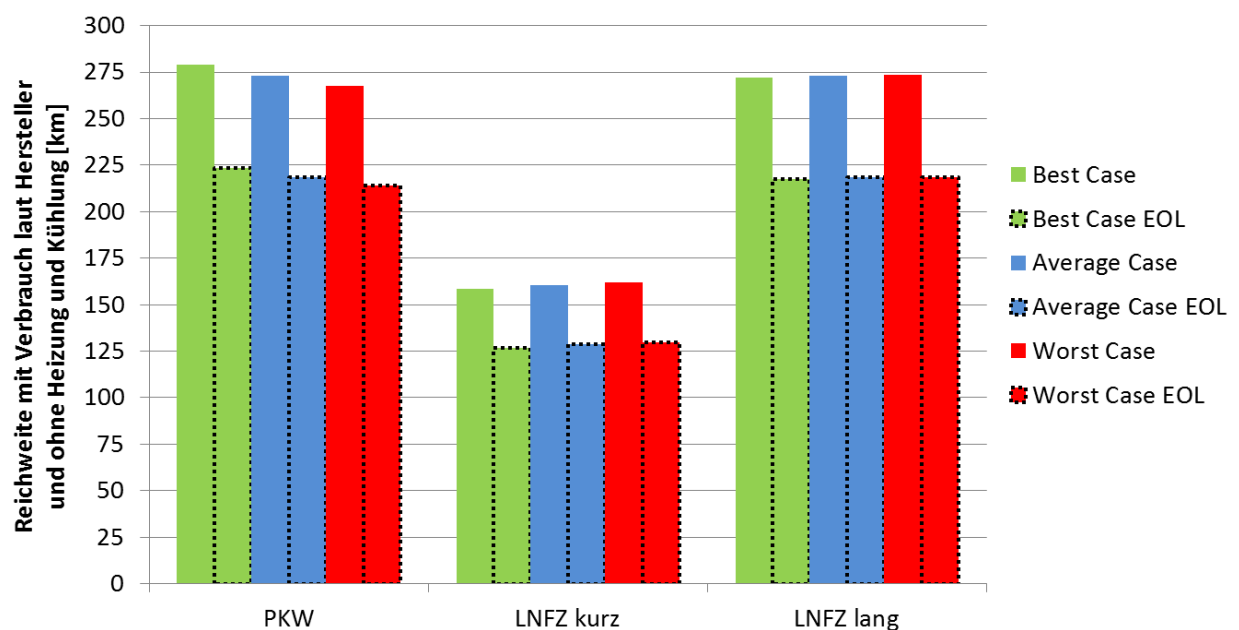


Abbildung 51 – Reichweite mit Verbrauch laut Hersteller ohne Heizung und Kühlung

In Kapitel 4.1 wurde festgestellt, dass die Taxistehzeiten, und die damit verbundene Heiz- bzw. Kühlleistung, bei der Berechnung zu berücksichtigen sind. Dies ist in der Grobauslegung nicht direkt erfolgt, es wurde lediglich eine nachträgliche Überprüfung durchgeführt, wie lange das Taxi unter dieser Last stehen kann bis die Batterie vollständig entladen ist. Die Heizleistung wird dabei zwischen 3 kW (Best Case) und 4 kW (Worst Case) angenommen. Das Ergebnis ist in Tabelle 4 dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse, auch für andere Fahrzeuge, sind im Anhang 9.3 zu finden.

Tabelle 4 – Mögliche Taxistehzeit bis die Batterie vollständig entladen ist

| | Best Case | Average Case | Worst Case |
|------------------------------|------------------|---------------------|-------------------|
| Mögliche Taxistehzeit | 10,7 h | 10,1 h | 9,6 h |

Man sieht, dass die vorgesehenen Batteriegrößen lange Stehzeiten ermöglichen und die Fahrt einen höheren Einfluss auf die Wechselhäufigkeit hat. Die Stehzeit kann daher bei diesem Konzept als unkritisch betrachtet werden.

Neben der Reichweite ist auch die mögliche Batterieleistung ein Kriterium, das zur Erfüllung der Anforderungen beiträgt. Um die Lebensdauer des Pakets hoch zu halten, wird empfohlen auf Ströme $> 1C$ zu verzichten. Im Mittel wird dies aufgrund der vorhandenen Batteriegrößen jedenfalls möglich sein, jedoch können Stromspitzen beim Beschleunigen auftreten. Diese können aus Sicht der Lebensdauer aufgrund ihrer kurzen Dauer ertragen werden, jedoch muss die Batterie diese Leistung bieten können. In Abbildung 52 sind die maximal möglichen Batterieleistungen, die sich kurzfristig abrufen lassen, zu sehen. Man sieht, dass die Leistung mit schlechterem Case zunimmt. Dies liegt am höheren Batteriegewicht (durch die höhere Kapazität und niedrigere Energiedichte), das im Wesentlichen für die maximale Leistung (wegen Leistungsdichte) verantwortlich ist. Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass das Leistungsniveau für die meisten Fahrzeuge in diesen Anwendungen, ausreichend ist. Werden weniger Module verwendet, beispielsweise beim Taxi nur eines, so ist mit einer deutlich niedrigeren Leistung zu rechnen. Dies ist bei dieser Betriebsweise zu berücksichtigen.

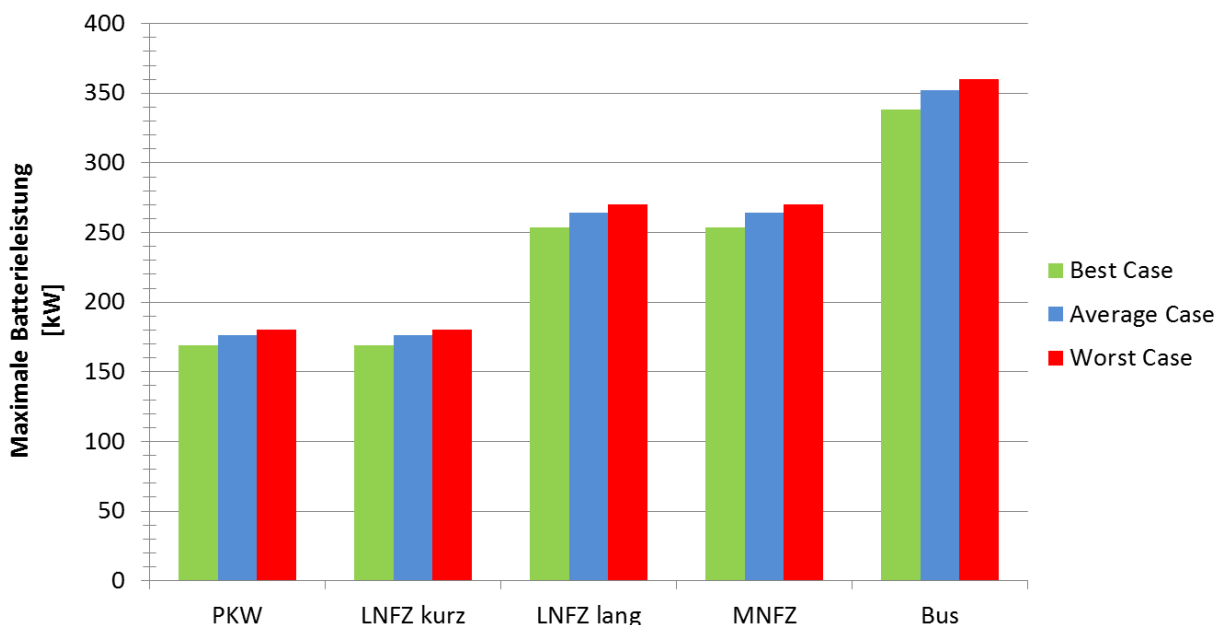


Abbildung 52 – Maximale Batterieleistung, die kurzfristig ertragen werden kann

Ein wesentlicher Faktor für die Wirtschaftlichkeit des BWS ist die Lebensdauer. Diese wurde entsprechend des Modells aus Kapitel 5.2.3 berechnet. In [Abbildung 53](#) ist die Lebensdauer in Jahren abgebildet. In [Abbildung 54](#) ist diese in km zu sehen. Diesen Werten liegt eine Abschätzung der jährlich zurückgelegten Distanz zugrunde, die für eine tatsächliche Anwendung unbedingt mit den entsprechenden Benutzern abgestimmt werden muss. Diese Abschätzung ist in [Tabelle 5](#) aufgetragen.

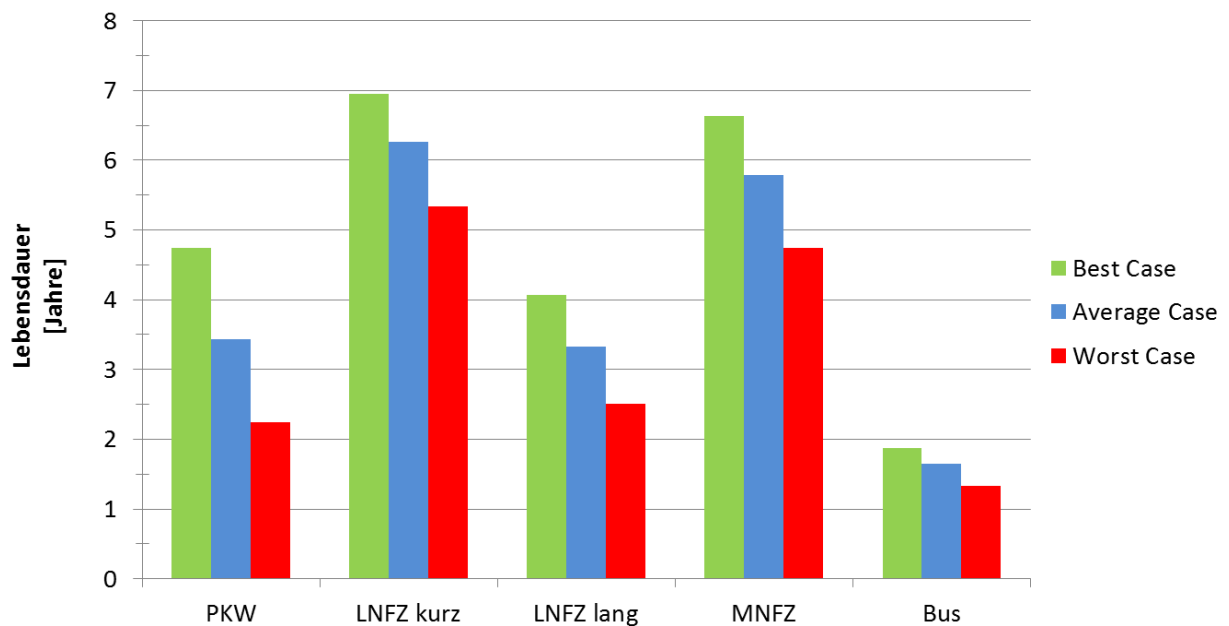


Abbildung 53 – Batterie-Lebensdauer in Jahren im typischen Fahrbetrieb

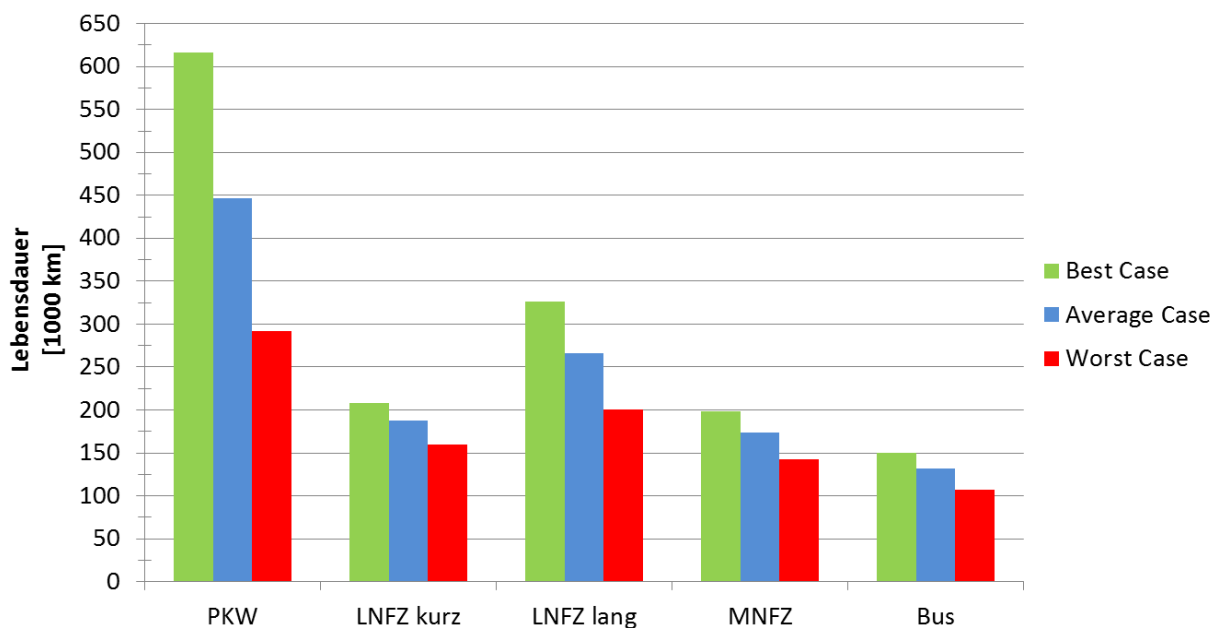


Abbildung 54 – Batterie-Lebensdauer in Kilometern im typischen Fahrbetrieb

Tabelle 5 – Abschätzung der jährlichen Fahrtstrecke

| | PKW | LNfZ k. | LNfZ l. | MNFZ | Bus |
|--|-----|---------|---------|------|-----|
| Jährliche Fahrtstrecke [1000km] | 130 | 30 | 80 | 30 | 80 |

Man sieht, dass die Lebensdauern je nach Case und Fahrzeug sehr stark variieren können. Bei der PKW Nutzung wird je nach Case eine sehr hohe Lebensdauer erreicht. Dies liegt an den verbesserten Nutzungsbedingungen der Batterie durch den Einsatz eines BWS. Des Weiteren erkennt man, dass aufgrund der intensiven Nutzung der Batterie beim Bus nur eine Lebensdauer von 1 bis 2 Jahren erreicht wird. Dabei wird eine Strecke von 100.000 - 150.000 km zurückgelegt. Die daraus resultierenden erhöhten Kosten zusammen mit der großen Menge an Batterieausschuss, der dabei produziert wird, lässt die Frage aufkommen, ob ein BWS für den Busbetrieb aus Sicht der Kosten bzw. der Umwelt problematisch ist. Letzteres wird im Kapitel 5.4 behandelt.

Für die Kostenbetrachtung wurde ein entsprechendes Dieselfahrzeug (Kraftstoffkosten je nach Case 1,2 - 1,0 EUR/l) mit einem Fahrzeug mit BWS verglichen. Beim BWS werden als Kosten pro Kilometer einerseits die Kosten für elektrische Energie (je nach Case 0,07 - 0,12 EUR/kWh), andererseits für die Neuanschaffung einer Batterie (umgerechnet auf einen km), berücksichtigt. Weitere Zahlenwerte sind dem Anhang 9.3 zu entnehmen. Es wird in dieser Berechnung davon ausgegangen, dass der Wert einer Batterie beim EOL auf null sinkt. In diesen Kosten ist die Errichtung von Wechselstationen nicht enthalten. In [Abbildung 55](#) ist der Kostenvergleich zu sehen.

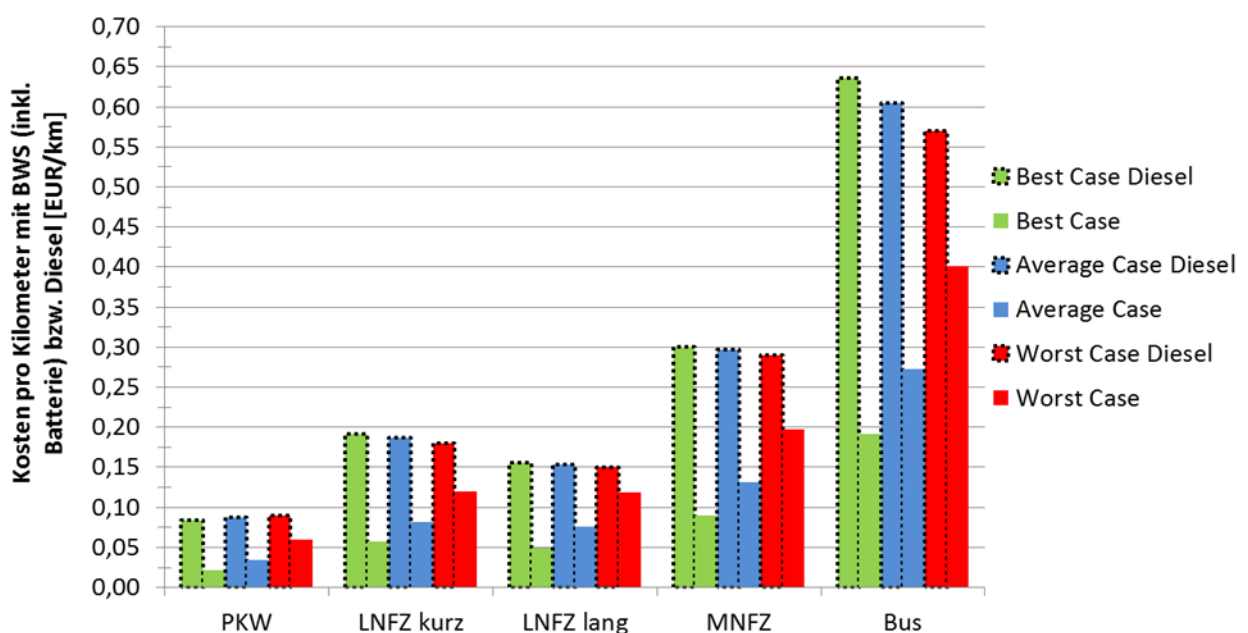


Abbildung 55 – Kostenvergleich (pro Kilometer) zwischen BWS und Diesel

Man kann erkennen, dass der Betrieb eines Dieselfahrzeuges, trotz der periodischen Neuanschaffungskosten der Batterie beim BWS, in allen Fällen teurer ist als die Verwendung eines BWS. Auch beim Bus ergibt sich trotz des hohen Batterieverschleißes ein deutlicher Kostenvorteil.

Aufgrund der benötigten Reichweite ist es notwendig die Batterie in einem SOC-Fenster von 60 - 80 % (je nach Case und Anwendung) zu betreiben. Dieser Bereich ist für die PKW Anwendung normal, für die Bus Anwendung vergleichsweise hoch. Besser wäre eine Verwendung von kleineren Bereichen. Dies lässt sich im Betrieb sehr einfach erreichen, indem durch den Benutzer häufiger gewechselt wird als dies aufgrund der Reichweite erforderlich wäre. Es wurde daher der Einfluss des zurückgelegten Weges bis zum Wechsel auf die Lebensdauer untersucht. In [Abbildung 56](#), [Abbildung 57](#) und [Abbildung 58](#) ist dieser Zusammenhang über % der typischen Fahrtstrecke aufgetragen. Bei 100 % der typischen Fahrtstrecke ist eine Markierung angebracht. Diese Fahrtstrecken sind Tabelle 3 zu entnehmen. Das rechte Ende jeder Linie symbolisiert die maximale Reichweite des jeweiligen Fahrzeugtyps. Man sieht, dass das BWS aufgrund der Reichweitenanforderungen im Betrieb nicht im optimalen Bereich betrieben wird. Dies kann mithilfe häufigerer Wechsel wesentlich verbessert werden. Das Maximum ist jeweils in der Form „% der typischen Fahrtstrecke; Lebensdauer“ beschriftet. Die errechneten Zahlenwerte liegen auf relativ hohem Niveau. Dies liegt hauptsächlich an der verbesserten Betriebsweise der Batterie (Temperierung im Idealbereich, langsame Aufladung, häufiger Wechsel), die durch das BWS erreicht wird.

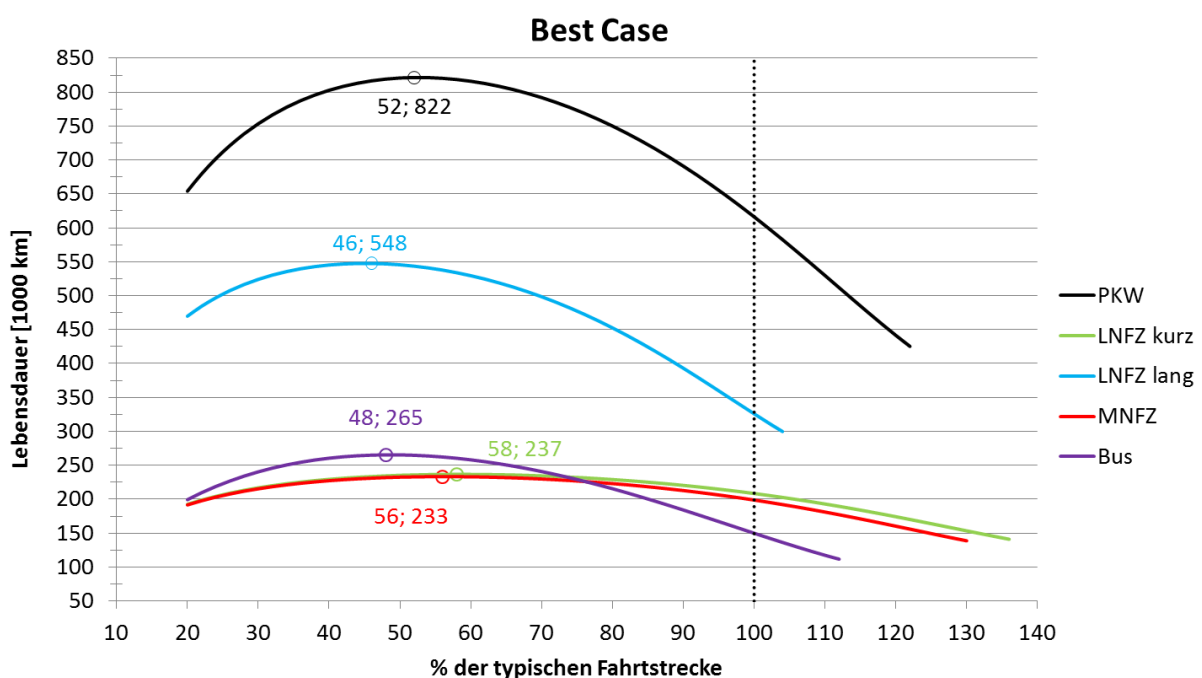


Abbildung 56 – Lebensdauer über die Fahrtstrecke (Best Case)

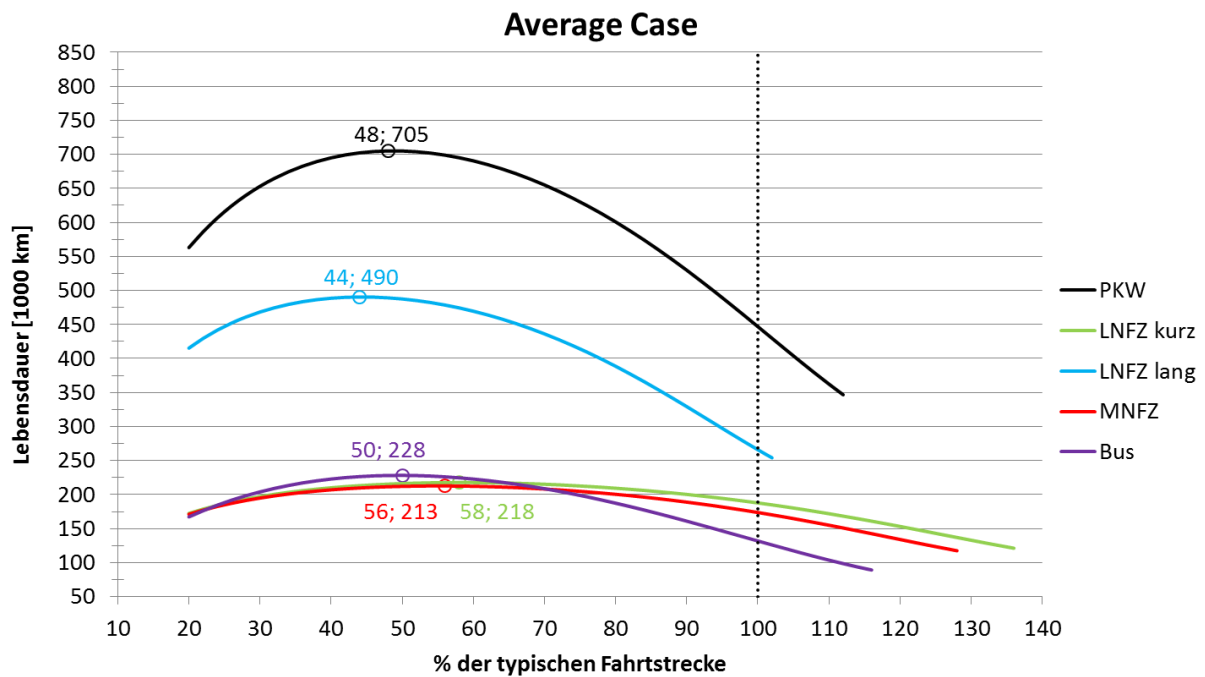


Abbildung 57 – Lebensdauer über die Fahrtstrecke (Average Case)

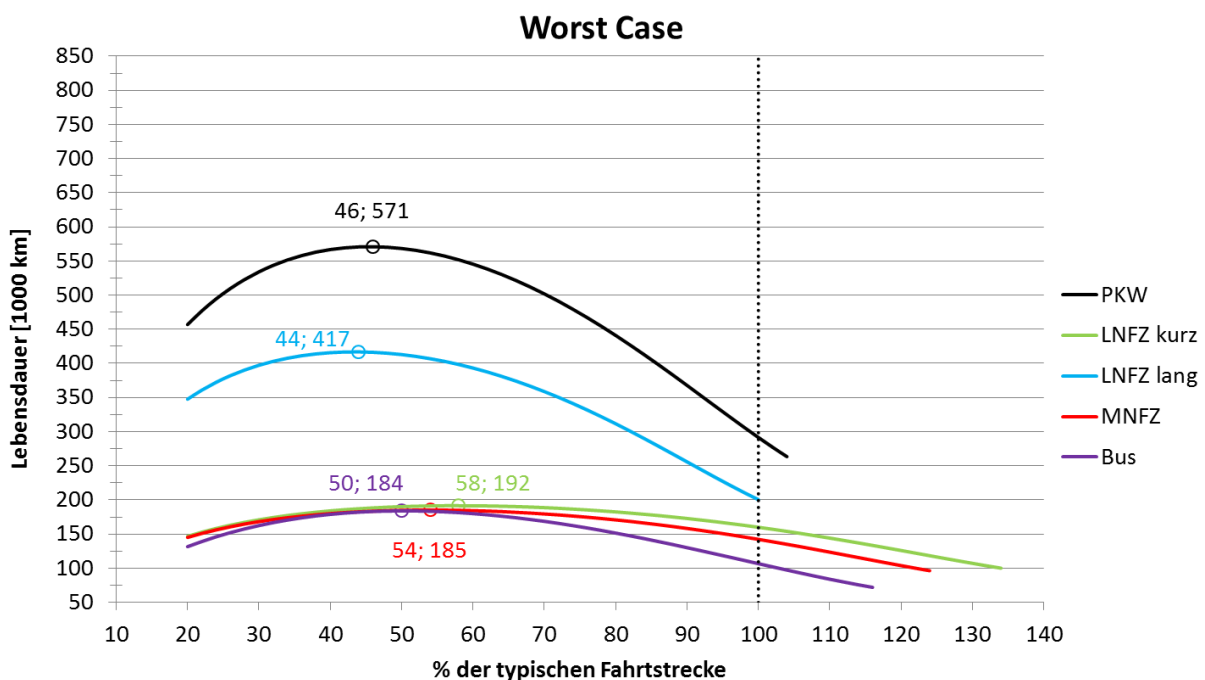


Abbildung 58 – Lebensdauer über die Fahrtstrecke (Worst Case)

Aus diesen Werten lässt sich eine optimale Strecke bis zum Wechsel ableiten, welche in Tabelle 6 für jedes Fahrzeug und für jeden Case zu finden ist. Man sieht, dass sich für die optimale Strecke teilweise stark reduzierte Werte ergeben. Besonders interessant ist der optimale Betriebsbereich des Busses. Dieser befindet sich genau in der Größe einer Runde eines Busses mit hoher Linienlänge (2 x 8 km). Gerade hier

empfiehlt es sich also unbedingt nach jeder Runde zu wechseln, wenn der reibungslose Betrieb aufrechterhalten werden kann. Auch bei den anderen Gruppen ist ein häufiger Wechsel sinnvoll, allerdings hat der geordnete Betrieb Priorität.

Tabelle 6 – Optimaler Wechselzeitpunkt für maximale Lebensdauer

| | optimaler Wechsel nach x [km] | | | | |
|---------------------|-------------------------------|-----------|-----------|------|-----|
| | PKW | LNfZ kurz | LNfZ lang | MNFZ | Bus |
| Best Case | 73 | 29 | 55 | 28 | 15 |
| Average Case | 67 | 29 | 53 | 28 | 16 |
| Worst Case | 64 | 29 | 53 | 27 | 16 |

An dieser Stelle sei nochmals erwähnt, dass das Modell, entsprechend seiner Einfachheit, nur Ergebnisse mit beschränkter Aussagekraft liefert. Dies gilt insbesondere für die Lebensdauer und die errechneten Kosten. Für eine bessere Abschätzung muss eine Vielzahl anderer Kriterien berücksichtigt werden, worauf aber aufgrund des Umfangs in dieser Arbeit verzichtet wurde.

5.2.6 Beispielstation

Um einen Überblick über die Anforderungen an eine gemeinsame Wechselstation zu bekommen, wurde eine Beispielstation berechnet. Diese Beispielstation wird von

- 10 Taxis,
- 5 LNfZ kurz,
- 5 LNfZ lang,
- 5 MNfZ,
- 1 Buslinie,

genützt. Die detaillierten Annahmen und Ergebnisse können dem Anhang 9.3 entnommen werden. Es sollen nachfolgend die wichtigsten Resultate gezeigt werden.

In Tabelle 7 sind ausgewählte errechnete Werte zu sehen. Besonders interessant ist dabei der Gesamtverbrauch der Station pro Jahr, der zwischen 1,7 und 2 GWh liegt. Dies stellt insbesondere für die Infrastruktur eine hohe Anforderung dar. Daraus lässt sich eine durchschnittliche Ladeleistung von 192 - 226 kW ermitteln. Dabei wird von einer Ladung mit weit weniger als 1C ausgegangen. Dies ist allein die Ladeleistung, die sich durch den Jahresverbrauch ergibt. Die tatsächliche Ladeleistung hängt zusätzlich davon ab, wie oft ein neues geladenes Paket bereitgestellt werden muss und wird daher oftmals höher sein. Eine mögliche Strategie wäre zu versuchen, stets über eine gewisse

Anzahl an vollgeladenen Modulen zu verfügen (Puffer). Prinzipiell sollten die Module langsam geladen werden. Werden dann geladene Module entnommen, so werden so viele Module nun mit 1C schnell geladen, bis wieder der benötigte Puffer vorhanden ist. Da die anderen Module auch nach einer gewissen Zeit aufgeladen sein werden, wird eine derartige Schnellladung nur selten notwendig sein, wie beispielsweise am Anfang oder am Ende einer Schicht, wenn viele Fahrzeuge wechseln müssen.

Tabelle 7 – Ergebnisse für eine Beispielstation

| | Best Case | Average Case | Worst Case | Einheit |
|--|------------------|---------------------|-------------------|----------------|
| Gesamtverbrauch Station pro Jahr | 1.680 | 1.822 | 1.971 | MWh |
| Gleichzeitig ladende Module | 92 | 92 | 92 | |
| Durchschnittliche Ladeleistung | 192 | 209 | 226 | kW |
| Theoretische Spitzenleistung bei 1C | 1.549 | 1.704 | 1.859 | kW |
| Wechselzeit Station pro Tag | 3,0 | 4,9 | 7,2 | h |
| Wechselvorgänge pro Tag | 122 | 122 | 122 | |
| Wechselvorgänge pro Jahr | 44.304 | 44.304 | 44.304 | |
| Batteriemodule EOL pro Jahr | 32 | 38 | 49 | |
| Ersparnis Station pro Jahr | 505.160 | 389.087 | 204.753 | EUR/a |

Die Anzahl der gleichzeitig ladenden Module gibt einen Überblick, wieviele Lager- bzw. Ladeplätze die Station maximal benötigt. Hierbei wird davon ausgegangen, dass dieselbe Anzahl an momentan im Fahrzeug befindlichen Modulen auch in der Wechselstation zum Laden aufbewahrt ist. Diese Abschätzung bedeutet, dass nach einer Schicht theoretisch alle Fahrzeuge gleichzeitig mit der benötigten Batterie versorgt werden könnten. Für eine tatsächliche Anwendung wird dies nicht notwendig sein, da dieser Fall praktisch nie eintreten wird, daher könnte die Modulzahl in der Station verringert werden. Aus dieser Anzahl lässt sich weiters die maximale Leistung errechnen, wenn theoretisch alle Batterien gleichzeitig mit 1C geladen werden. Diese beträgt 1,5 - 1,9 MW und ist deutlich höher als die durchschnittliche Leistung. Auch dieser Wert wird nicht eintreten, da nie alle Batterien gleichzeitig schnell geladen werden müssen. Diese Abschätzungen wurden absichtlich sehr hoch angesetzt, da dadurch ein Überblick über die maximal möglichen Werte gewonnen wird. Die tatsächliche Ladeleistung wird sich aber in der Praxis zwischen 190 und 1900 kW, mit der Tendenz zu niedrigeren Werten, befinden.

In Tabelle 7 ist die Ersparnis pro Jahr aufgetragen, die sich im Vergleich zum Betrieb mit Dieselfahrzeugen ergibt. Diese beinhaltet wiederum die Energie- und Neuanschaffungskosten für die Batterien. Es wird ebenfalls wieder davon ausgegangen, dass Batterien beim Erreichen des EOL keinen Wert mehr haben, was nicht unbedingt der Fall ist (siehe Kapitel 5.4). Es sei wiederum auf die Ungenauigkeit des Modells verwiesen, daher sind diese Zahlen nur als Richtwerte zu betrachten. Prinzipiell lässt sich daraus aber ein durchaus positiver Eindruck gewinnen. Es kann daher das Konzept, sowohl aus Sicht der CO₂-Problematik, als auch aus wirtschaftlicher Sicht, als grundsätzlich potentialreich bewertet werden.

5.3 Aufbau des Batteriewechselsystems

Basierend auf den in der Grobauslegung errechneten Werten und den Erkenntnissen aus der Analyse bestehender Systeme, soll der Aufbau des eigenen Konzepts festgelegt werden.

5.3.1 Abmessungen und Position im Fahrzeug

Aufgrund der Vorteile in der Fahrdynamik und beim Crash wurde die Batterie im Fahrzeugunterboden vorgesehen. Zunächst werden die grundlegenden Abmessungen entsprechend des Average Case festgelegt. Aus der Grobauslegung geht hervor, dass das Zellvolumen eines Moduls 79 Liter beträgt. Damit das Modul in alle Fahrzeugtypen eingebaut werden kann, muss dieses so breit sein, wie dies der Einbau in einen PKW erlaubt. Des Weiteren muss das Paket einigermaßen flach sein, damit die Bodenhöhe der Fahrzeuge nicht zu stark beeinflusst wird. Gerade bei Niederflurbussen ist dies ein wichtiger Faktor. Die Abmessungen wurden wie folgt festgelegt:

- Höhe: 3 x 36 mm (3 Elemente) + 2 x 20 mm (Gehäuse oben/unten) = 148 mm
- Breite: 5 x 200 mm (5 Elemente) + 2 x 80 mm (Gehäuse rechts/links) = 1160 mm
- Länge: 3 x 244 mm (3 Elemente) + 2 x 80 mm (Gehäuse vorne/hinten) = 892 mm

Mit diesen Abmessungen lassen sich mindestens 2 Module in typische PKW für die Taxianwendung (Ausgehend von Abmessungen des Skoda Octavia Combi [49] und Mercedes E Klasse Combi [50]) einbauen. Ein drittes Modul findet aufgrund des geringen Radstandes keinen Platz (Kollision mit Radaufhängung) und kann daher bei diesen Fahrzeugen nicht eingebaut werden. Bei Fahrzeugen mit einem entsprechend höheren Radstand oder einem stark ausragenden Heck, wäre ein dritter Modulplatz aber denkbar.

In Abbildung 59 ist die Position der Module (maßstabsgetreu) beispielhaft in einem Mercedes E-Klasse Combi zu sehen. Der rote Balken symbolisiert die Umriss des Pakets inkl. eines zusätzlichen Bereiches im Fahrzeug für den Platzbedarf des seitlich angebrachten mechanischen Connectors. Durch die flache Bauweise des Pakets sind nur geringfügige Anpassungen des Fahrzeuges notwendig.

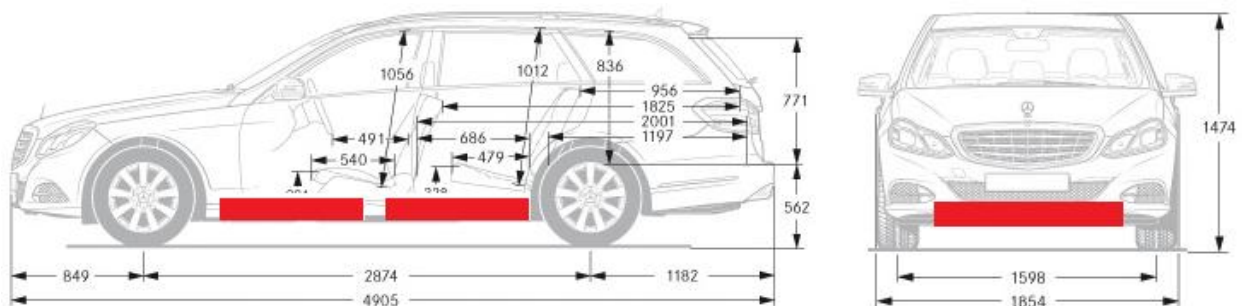


Abbildung 59 – Batterieposition in der Mercedes E-Klasse, geänderte Darstellung [50]

Bei leichten Nutzfahrzeugen ist es aufgrund der Größe eher möglich, dass drei Module Platz finden. Je nach Aufbau des LNFZ kann die Batterie entweder zwischen den Rädern oder auch ein Modul hinter der Hinterachse verbaut sein. Die Position hinter der Hinterachse sollte aber aus Gründen der Fahrdynamik und Crashesicherheit gemieden werden. In Abbildung 60 ist die Position bei LNFZ am Beispiel des VW Transporters maßstabsgetreu eingezeichnet. Man kann erkennen, dass aufgrund des eher geringen Radstandes (3550 mm) des Fahrzeuges drei Module zwischen den Achsen nur knapp Platz finden. Bei größeren Fahrzeugen, wie beispielsweise dem Mercedes Sprinter (Radstand: Standard: 3665 mm, Lang: 4325 mm; nach [51]), ist dies weniger problematisch.

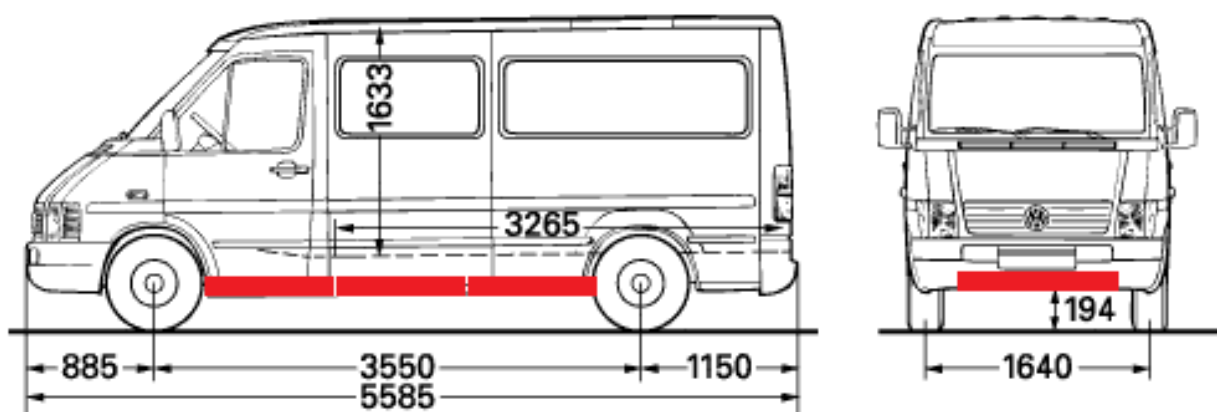


Abbildung 60 – Batterieposition im VW Transporter, geänderte Darstellung [52]

Für mittlere Nutzfahrzeuge ist der Bauraum aufgrund ihrer Größe eher unkritisch und wird daher nicht graphisch dargestellt.

Bei Bussen ist zunächst zwischen der einteiligen Variante und dem Gelenkbus zu unterscheiden. Da beim Gelenkbus die Platzverhältnisse eher großzügig sind, wird nachfolgend nur der einteilige Bus behandelt. Hier sind vor allem Niederflurbusse interessant. Des Weiteren ist hierbei zwischen Bussen mit 2 und 3 Türen zu unterscheiden. In Abbildung 61 und Abbildung 62 sind die beiden Varianten mit der entsprechenden Batterieposition (roter Balken, maßstabsgetreu) zu sehen.

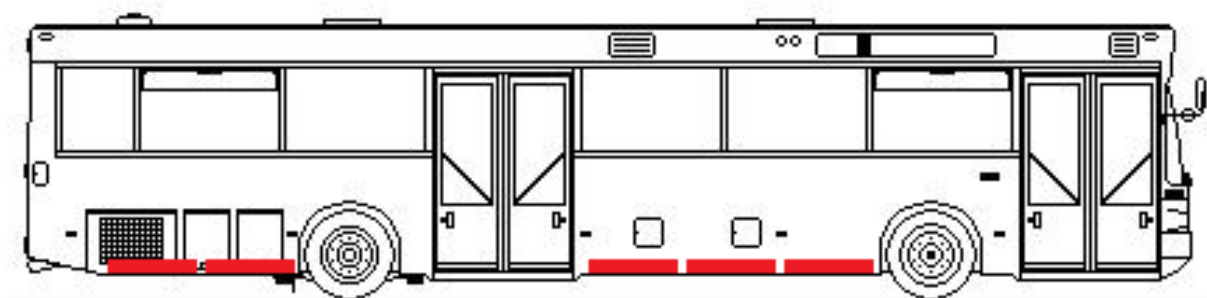


Abbildung 61 – Batterieposition beim MAN Bus mit 2 Türen, geänderte Darstellung [53]

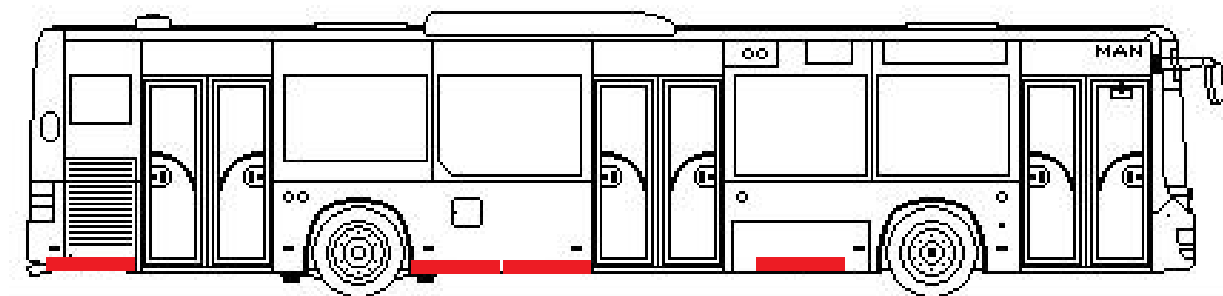


Abbildung 62 – Batterieposition beim MAN Bus mit 3 Türen, geänderte Darstellung [54]

Aufgrund des geforderten niedrigen Einstiegsniveaus ist es notwendig, dass der Türbereich frei bleibt. Daher kann dort kein Modul positioniert werden. Speziell in Abbildung 62 kann man erkennen, dass die hohe Anzahl der Türen ein Platzproblem nach sich zieht. Das Modul links muss bereits eine sehr ungünstige Position weit hinten einnehmen. Beim Bus mit 2 Türen (Abbildung 61) ist dies kein Problem. Es lässt sich sogar Platz für ein Modul mehr als benötigt finden, daher wurden in dieser Darstellung 5 Module eingezeichnet. Das Konzept sieht natürlich weiterhin nur 4 Module vor.

Abschließend soll hier erwähnt werden, dass für eine gute Umsetzbarkeit des Konzepts einige Anpassungen an den Fahrzeugen notwendig sind. Insbesondere Fahrzeuge mit niedrigem Radstand bzw. Busse mit vielen Türen sind diesbezüglich problematisch und müssen daher eher Änderungen unterworfen werden.

5.3.2 Heizung und Kühlung

Um den Paketaufbau einfach zu halten, wird als Wärmeübertragungsmedium für die Heizung und Kühlung Luft gewählt. Dadurch entfällt der Bedarf einer absoluten Dichtheit zwischen Paket und Fahrzeug, was auch den Connector einfacher macht. Welches Heiz- bzw. Kühlgerät dabei zum Einsatz kommt ist nicht festgelegt, eine Wärmepumpe wäre jedoch empfehlenswert. Die Verwendung desselben Geräts für die Innenraumbelüftung und für die Batterietemperierung ist prinzipiell möglich, schränkt jedoch den Betrieb etwas ein.

In Abbildung 63 ist eine Prinzipdarstellung des Pakets im Querschnitt zu sehen. Auf fertigungstechnische Details sowie konstruktionstechnische Feinheiten wurde in dieser Skizze verzichtet. Auch elektrische Isolationen sowie der Kabelbaum und Sensoren sind nicht eingezeichnet. Es sollen lediglich der Aufbau und die wesentlichen Eigenschaften des Moduls verdeutlicht werden. Die roten Objekte symbolisieren die einzelnen Elemente, das Gehäuse ist in grau gehalten.

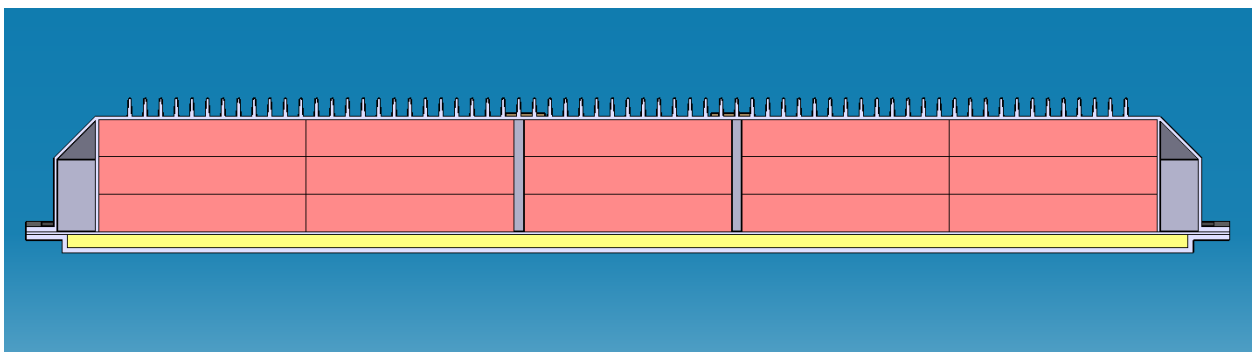


Abbildung 63 – Querschnitt durch ein Modul des eigenen Konzepts (Prinzipdarstellung)

Aufgrund der geringen Dicke des Moduls ist es möglich, dass das Paket nur von einer Seite (Oberseite) gekühlt bzw. beheizt wird [55]. Dies stellt keine optimale Lösung dar, weil sich dadurch ein Temperaturgradient zur Unterseite hin ergibt, jedoch wird der Temperaturunterschied aufgrund der niedrigen Dicke gering ausfallen. Für eine tatsächliche Anwendung ist das Wärmeverhalten mit Hilfe von FEM- bzw. CFD-Analysen zu untersuchen. Der Grund für die Wahl dieser Konstruktion ist die

abgeschlossene, dichte Gestaltung des Pakets ohne dabei auf eine Temperierung von außen verzichten zu müssen. Der Wärmeübergang erfolgt von oben, indem das Medium zwischen Fahrzeugboden und Modul durch strömt. Das Modul verfügt auf der Oberseite über Rippen, die den Wärmeübergang in das Paket verbessern sollen. Für die bessere Wärmeleitung und wegen der Korrosionsbeständigkeit besteht das Gehäuse des Pakets aus Aluminium. An der Unterseite ist das Paket wärmeisoliert (gelb dargestellt), damit die Wärmeaufnahme von abstrahlendem Asphalt bei hohen Temperaturen bzw. Wärmeabgabe an die Umgebung bei niedrigen Temperaturen, gering gehalten wird. Zusätzlich ist das unterste Blech verstärkt ausgeführt, damit bei einer Fremdeinwirkung von unten die Beschädigung der Batterie verhindert bzw. reduziert wird. Seitlich verfügt das Paket über Leerräume, die sich einerseits aufgrund der Schrägen ergeben. Andererseits sind diese Leerräume zur seitlichen Isolation des Pakets gedacht.

5.3.3 Paketgestaltung und Connector

In Kapitel 5.3.1 wurden durch die Festlegung der Abmessungen auch im Wesentlichen die Batterieeigenschaften festgelegt. Die Spannung der Elemente eines Moduls beträgt 7,2 - 8,4 V und besteht daher aus zwei in Serie geschalteten Zellen mit einer Spannung von 3,6 - 4,2 V (nach [56]). Ein Modul besteht aus 45 in Reihe geschalteten Elementen. Die Modulspannung beträgt daher 324 - 378 V. Der Energiegehalt des Moduls beträgt 22 kWh, daher beträgt die Kapazität, unter vereinfachter Verwendung der mittleren Spannung (351 V), in etwa 62,7 Ah. In Abbildung 64 ist die Zellanordnung von unten zu sehen.

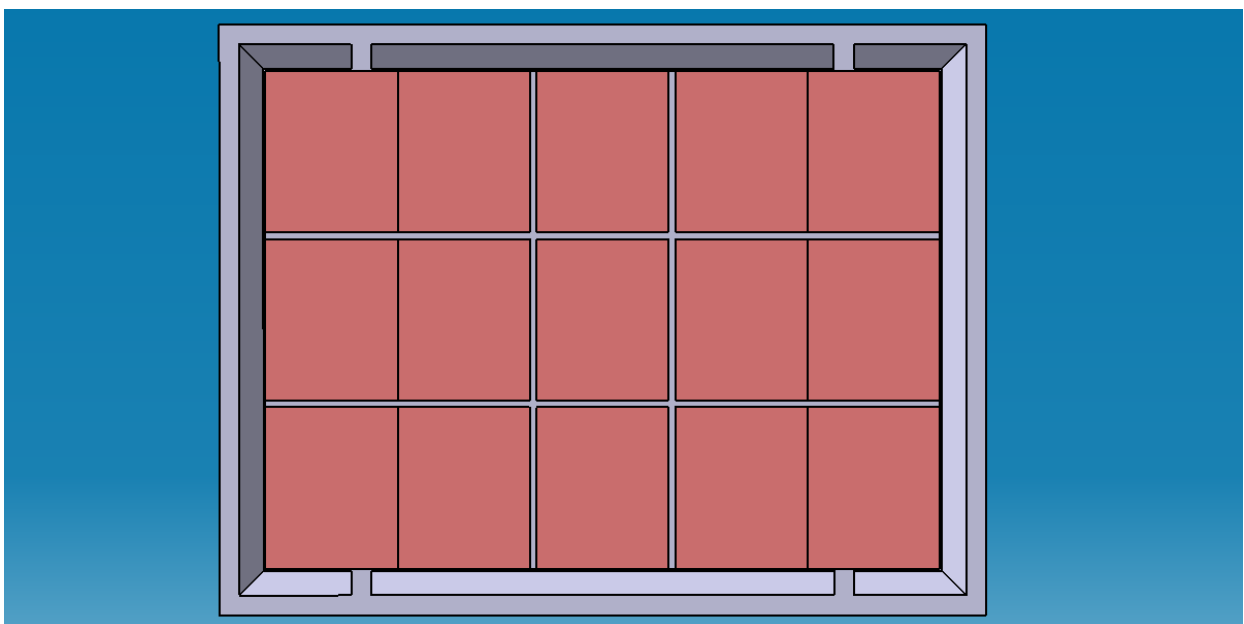


Abbildung 64 – Zellanordnung eines Moduls des eigenen Konzepts (Prinzipdarstellung)

Um diese Kapazität zu erreichen, kann ein Element intern auch aus mehreren, parallel geschalteten Zellen bestehen. Die Elemente sind quaderförmig und verfügen über zwei Hauptpole und einen Datenanschluss, über den die Überwachung und das Balancing der Zellen erfolgen (nicht dargestellt). Für die Kabelbaumanordnung wurden zwischen jeder Reihe und um die mittleren Elemente Zwischenräume vorgesehen. Diese haben neben der Leitungsdurchführung außerdem den Zweck, den Wärmefluss auf die mittleren Elemente zu verringern. Dies soll den Temperaturgradienten zur Mitte hin reduzieren.

Der elektrische Connector des Pakets ist in Form von berührenden elektrischen Flachkontakten auf der Oberseite ausgeführt. Flachkontakte bieten den Vorteil, dass die Zentrierung weniger genau erfolgen kann. Diese sind mittig angeordnet, um die größtmögliche Sicherheit gegen unerwünschten Kontakt zu erzielen. Die genaue Anordnung der Kontakte ergibt sich aufgrund der bereits angesprochenen Elementzwischenräume.

In Abbildung 65 sind die Ausnehmungen für den elektrischen Connector angedeutet. Dieser besteht aus zwei groß ausgeführten Hauptpolen (rechts und links) und aus den Kontakten für den Datentransfer. Diese sind wiederum ohne Isolierung und nur symbolisch dargestellt. Des Weiteren sind sieben Kontakte für den Datentransfer dargestellt, die genaue Anzahl muss aber entsprechend der elektronischen Anforderungen erst festgelegt werden. Damit die Kontakte nicht dem Luftstrom ausgesetzt sind, ist der fahrzeugseitige Connector (nicht dargestellt) mit einer Abdichtung versehen. Auch ein Anheben der Kontakte zum Fahrzeug hin ist denkbar.

Damit diese Kontaktanordnung möglich ist, müssen die Rippen unterbrochen werden. Diese Unterbrechungen befinden sich über den Elementzwischenräumen, daher sind diese aus Sicht der Wärmeübertragung eher unkritisch. Der dichte, hineinragende Connector könnte jedoch die Strömung behindern, daher ist für eine Anwendung eine Anpassung der Kühlrippenanordnung mit Hilfe von Simulationen notwendig. Um diese Problematik gänzlich zu beheben, könnte der elektrische Connector auch unten, abseits der Kühlrippen, angeordnet werden. Diese Variante hätte aber den Bauraum in Längsrichtung erhöht und wurde daher nicht verwendet.

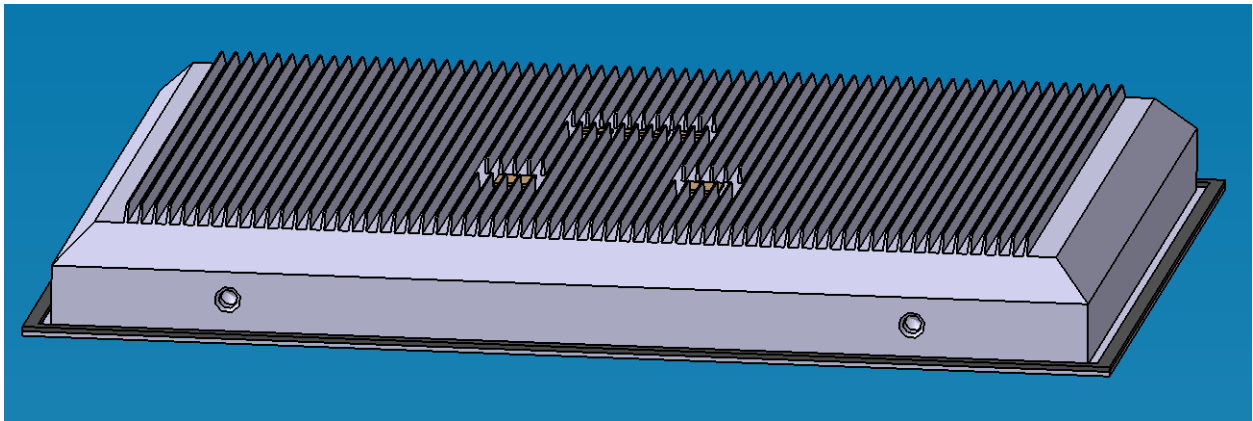


Abbildung 65 – Modul des eigenen Konzepts (Prinzipdarstellung)

Die Zentrierung des Pakets erfolgt über abgeschrägte Kanten (siehe Abbildung 65). Mit diesen kann eine Positionsungenauigkeit des Fahrzeuges von ca. 40 mm seitwärts und rund 55 mm in Längsrichtung ausgeglichen werden. Nach der Zentrierung erfolgt die Führung des Pakets entlang der geraden Seitenwände. Hier wären alternativ auch ausgeprägte Führungsschienen, evtl. mit Rollen, denkbar.

Der mechanische Connector wird mit Hilfe von dicken Bolzen (leicht spitz im Anfangsbereich) realisiert. Diese werden von der Seite unter Federvorspannung in dafür vorgesehene Bohrungen (insgesamt 4) gedrückt. Durch die Federvorspannung wird das Paket zusätzlich zur formschlüssigen Sicherung fixiert. Beim Wechselvorgang werden die Bolzen elektromagnetisch aus den Bohrungen gezogen und das Paket kann entfernt werden. In Abbildung 65 sind die Bohrungen für die Bolzen in der Seitenwand zu sehen. Ebenfalls sichtbar ist der schwarz dargestellte Rand rund um das Paket. Dieser soll die Abdichtung des Pakets symbolisieren.

Wenn ein Fahrzeug über mehr Modulplätze verfügt, als dieses notwendigerweise bräuchte, so entsteht bei Verwendung einer geringen Modulzahl ein leerer Platz. Dieser leere Platz muss gegen die Umgebung abgedichtet werden, da sonst das System verunreinigt wird, bzw. die Temperierung der übrigen Module nicht funktioniert. Zu diesem Zweck werden leere Modulgehäuse verwendet, die auf der Unterseite und im Bereich des mechanischen Connectors gleich aufgebaut sind. Es befinden sich jedoch keine Zellen in diesem Modul, ebenso sind auf der Oberseite keine Rippen und keine Kontakte vorhanden. Des Weiteren ist dieses Leermodul teilweise aus Kunststoff gebaut, damit es leichter wird. Diese Maßnahme ermöglicht die Abdichtung des Systems und einen unkomplizierten Austausch des leeren Moduls durch ein normales.

5.3.4 Fahrzeugpositionierung und Wechselmechanismus

Das richtige Zusammenspiel zwischen der Fahrzeugpositionierung und dem Wechselmechanismus bzw. der Zentrierung des Pakets, ist für einen schnellen und sicheren Wechsel entscheidend. Aufgrund der Wahl der Primärzentrierung über Abschrägungen am Gehäuse ist eine hohe Positionstoleranz gegeben. Die Feinzentrierung wird abschließend über die Fixierbolzen (mechanischer Connector) vorgenommen. Aufgrund dieser Toleranz muss die Fahrzeugpositionierung grundsätzlich nicht zu genau erfolgen, jedoch sind wegen der unterschiedlichen Fahrzeuge, die die Wechselstation benützen, einige Maßnahmen erforderlich, um die Kompatibilität aufrecht zu erhalten. Eine einigermaßen genaue Positionierung ist daher doch empfehlenswert, damit die Unterschiede in der Spurweite ausgeglichen werden können. Es werden nachfolgend zwei Positionierungsvarianten vorgestellt.

Die erste Variante sieht die seitliche Positionierung des Fahrzeuges über Führungsschienen, die an die jeweilige Fahrzeuggeometrie angepasst sind, vor. Diese Schienen sind für gängige Spurweiten im Boden nebeneinander auf beiden Seiten angeordnet. Für einen Wechsel werden die Führungen hochgeklappt, die für das jeweilige Fahrzeug geeignet sind. Aufgrund der unterschiedlichen Anzahl an benötigten Zellen der einzelnen Fahrzeuge bzw. Benutzer, ist es bereits notwendig, dass die Wechselstation Daten über das Fahrzeug hat. Dieser Datenaustausch könnte beispielweise bei der Einfahrt in die Station erfolgen. Dabei können auch Daten über die Fahrzeuggeometrie übertragen werden, wie beispielsweise der Reifeninnenabstand des Fahrzeuges. Ist dieser nun bekannt, kann die Station auf das Fahrzeug vorbereitet werden. Mit dieser Vorgehensweise kann eine relativ genaue Positionierung des Fahrzeuges erreicht werden. Die restliche Abweichung kann über die Schrägen des Moduls ausgeglichen werden.

Die Positionierung des Fahrzeuges in Längsrichtung kann aufgrund der unterschiedlichen Paketpositionen, die beispielsweise beim Bus auf großen Längen verteilt sein kann, nicht über einen Endanschlag im Boden erfolgen. Das Fahrzeug (PKW evtl. ausgenommen) muss daher für den Wechsel jedes Moduls bewegt werden. Da die Fahrzeugdaten bereits bekannt sind, kann die Positionierung des Fahrzeuges für den Wechsel über Abstandsmessung erfolgen. Damit der Fahrer das Fahrzeug korrekt positioniert, könnte der noch erforderliche Fahrtweg auf einem Bildschirm angezeigt werden. Nach der korrekten Positionierung erfolgt der Wechsel eines Moduls. Die noch

vorhandene Restungenauigkeit kann wiederum die Hauptzentrierung des Pakets ausgleichen. Diese Positionierungsmethode ist zwar einfach und relativ kostengünstig, jedoch ist dabei die manuelle Tätigkeit des Fahrers erforderlich.

Die zweite Variante zielt auf einen automatisierten Wechsel ab. Um den Wechsel dementsprechend zu gestalten, könnte beispielweise der Antrieb des Fahrzeuges direkt durch die Wechselstation angesteuert werden. Damit lässt sich das Fahrzeug nach dem Wechsel eines Moduls sofort und genau weiterbewegen um das nächste Modul zu wechseln. Um diese Wechselvariante vollständig automatisiert zu gestalten, wäre ein weiterer Schritt, auch die seitlichen Führungsschienen zu entfernen. Das Fahrzeug müsste über eigene Sensoren und ein entsprechendes Assistenzsystem die mittige Position über der Wechselvorrichtung finden. Bereits jetzt findet eine wachsende Verbreitung von Einparksystemen, die Parklücken erkennen und selbstständig einparken können, statt. Diese Variante wäre daher, auf Basis eines solchen Einparksystems, in Zukunft durchaus denkbar. Eine solche Anordnung ermöglicht außerdem aufgrund der wegfallenden Schienen, dass die Modulbreite größer und dafür die Modullänge kleiner werden kann. Damit wäre der Platzbedarf (in Längsrichtung) geringer und speziell bei kurzen LNFZ und bei Bussen die Platzproblematik entschärft. Mit sinkenden Kosten der dafür benötigten Komponenten ist diese Methode daher jedenfalls zu bevorzugen.

Der Wechselmechanismus selbst ist bei beiden Varianten eher trivial. Aus Sicherheitsgründen sollte die Öffnung im Boden bis zum eigentlichen Wechsel durch eine entsprechend starke Abdeckung verschlossen sein. Nach der Positionierung des Fahrzeuges und der Öffnung der Abdeckung wird ein Gestell, welches das Modul aufnehmen soll, hochgefahren. Dieses Gestell hebt die Batterie leicht an, damit die Bolzen (mechanischer Connector) einfacher aus den Bohrungen gezogen werden können. Die Bolzen bleiben nun unter Federspannung elektromagnetisch eingezogen bis das neue, geladene Modul eingebaut wird. Dieses Modul sollte durch ein zweites Gestell verbaut werden, damit der Wechsel schneller erfolgen kann. Das erste Gestell kann währenddessen die leere Batterie versorgen und ein neues vollgeladenes Modul aufnehmen. Hat das zweite Gestell das geladene Modul in das Fahrzeug gehoben, verriegeln die Bolzen die Batterie und das Fahrzeug kann sich nach vorne bewegen um das nächste Modul zu entfernen. Dieses wird durch das zweite, bereits richtig positionierte Gestell herausgehoben, während das erste Gestell die neue vollgeladene

Batterie bereitstellt. Dieser Vorgang wird fortgesetzt bis alle Module entfernt sind. Ein derartiger Wechsel kann sehr schnell durchgeführt werden, daher sollte das Ziel von 30 Sekunden pro Modul realisierbar sein.

5.4 End of Life Betrachtung

Eine Batterie wird in der Fahrzeuganwendung üblicherweise beim Erreichen von 80 % der Nennkapazität als verschlissen bezeichnet. Dass dieser Zeitpunkt als End of Life (EOL) für den Einsatz im Fahrzeug betrachtet wird, ist grundsätzlich sinnvoll, da die Reichweite bei gleichbleibendem Batteriegewicht immer weiter absinkt. Im Vergleich zu einer neuen Batterie würde daher viel „unnötiges“ Gewicht mitgeführt. Speziell bei BWS ist aufgrund der hohen Benützungsrates der Batterien bereits nach kurzer Zeit (aber bei hoher Kilometer-Laufleistung) das EOL erreicht. Aus Tabelle 7 in Kapitel 5.2.6 geht hervor, dass für eine Station beispielweise zwischen 32 und 49 Module pro Jahr das Lebensdauerende erreichen. Für den Fall einer größeren Verbreitung solcher Stationen, würde daher eine große Menge an Batterieausschuss anfallen. Es muss daher eine End of Life Betrachtung, das heißt eine Überlegung was mit den „verschlissenen“ Batterien passiert, erfolgen. Zwar können diese Batterien bei der Verwendung von BWS sehr einfach aus der Station entnommen werden, jedoch ist damit noch nicht geklärt, was mit diesen geschieht. Nachfolgend sollen einige Lösungsansätze nach dem Erreichen des EOL diskutiert werden.

Die Deklaration des EOL wie oben bedeutet nicht, dass die Batterie ab diesem Zeitpunkt funktionsuntüchtig ist. Im Gegenteil, oftmals könnten solche Batterien noch über längere Zeit mit geringerer Leistungs- und Energiedichte arbeiten. Für die Fahrzeuganwendung sind diese Batterien nur beschränkt denkbar.

Eine Möglichkeit wäre beispielsweise ältere Batterien als „Pakete geringerer Qualität“ zu einem günstigeren Benutzungspreis anzubieten. Dadurch wäre aus Benutzersicht ein Anreiz zur Verwendung dieser Batterien geschaffen. Damit die Reichweite noch erfüllt werden kann, muss entweder ein weiteres Paket eingebaut werden oder entsprechend öfter gewechselt werden. Gerade bei Taxis wäre aufgrund der hohen Stehzeiten ein derartiges Modell denkbar.

Eine weitere mögliche Anwendung für solche Batterien ist in Puffersystemen jeglicher Art. Gerade alternative Energiegewinnungsmethoden, die für einen aus Sicht der CO₂-Reduktion sinnvollen Betrieb von elektrischen Fahrzeugen notwendig sind, haben oft

den Nachteil, dass sie nicht jederzeit gleichmäßig verfügbar sind. Windkraft- sowie Solaranlagen sind davon größtenteils betroffen. Die Verwendung von Batterien, die aus Fahrzeugsicht das EOL erreicht haben, wäre in diesem Bereich sehr sinnvoll. Die geringere Energiedichte wird einfach mit einer höheren Anzahl an EOL-Modulen kompensiert. Dass das Batteriegewicht dadurch vergleichsweise hoch ist, spielt für diese Anwendung eine untergeordnete Rolle.

Wird mit Hilfe solcher Methoden den Batterien ein „Second Life“ verliehen, senkt dies auch die Kosten. In Abbildung 55 in Kapitel 5.2.5 sind die Betriebskosten dargestellt. In diesem Modell wurden die Batterieinvestitionskosten den Betriebskosten zugeteilt. Dabei wurde eine Verwendung der Module nach dem EOL nicht berücksichtigt. Im Modell bedeutet das Erreichen dieses Zeitpunktes, dass die Batterien über keinen Wert mehr verfügen, was entsprechend der oben erfolgten Überlegungen nicht der Fall ist. Die tatsächlichen Betriebskosten würden durch eine Second Life Anwendung daher noch weiter sinken, der Kostenvorteil gegenüber Fahrzeugen mit Dieselmotor noch weiter steigen.

Sinkt im Zuge der Second Life Anwendung die Kapazität und Leistung noch weiter, wird letztendlich das endgültige Lebensdauerende erreicht. Zu diesem Zeitpunkt ist die Batterie nicht mehr für einen Betrieb geeignet und es müssen weitere Überlegungen angestellt werden. Diese Problematik betrifft natürlich nicht nur Fahrzeuge mit BWS sondern generell alle batterieelektrisch betriebenen Fahrzeuge. Ein Recyclingprozess, bei dem die meisten Teile der Batterie wiederverwertet werden können, ist unbedingt erforderlich, da sonst große Mengen an Müll endgelagert werden müssten, was eine Verbreitung des elektrischen Antriebes wahrscheinlich verhindert.

5.5 Bewertung des eigenen Konzepts

Abschließend soll das vorgestellte eigene Konzept derselben Bewertung unterzogen werden, wie dies für die bestehenden BWS erfolgt ist. Das Bewertungsschema kann Kapitel 3.2.1 entnommen werden. Die detaillierte Bewertung des eigenen Konzepts ist im Anhang 9.2 zu finden. In Abbildung 66 sind die Bewertungsergebnisse der bestehenden BWS nochmals aufgezeichnet. Hinzugefügt wurde rechts die Bewertung des eigenen Konzepts. Die Validität beträgt erwartungsgemäß 100 %. Die Bewertung fällt mit knapp 94 % Erfüllungsgrad höher aus, als vom zweitplatzierten (Tesla Motors) erreicht werden kann (Bewertung 88%, maximal möglich 89 %). Dieses Ergebnis zeigt,

dass die notwendigen Verbesserungen offenbar gut umgesetzt wurden. Es sind nur wenige Kriterien mit weniger als 5 Punkten bewertet worden, daher sollen diese nachfolgend diskutiert werden. Die detaillierten Ergebnisse können dem Anhang 9.2 entnommen werden.

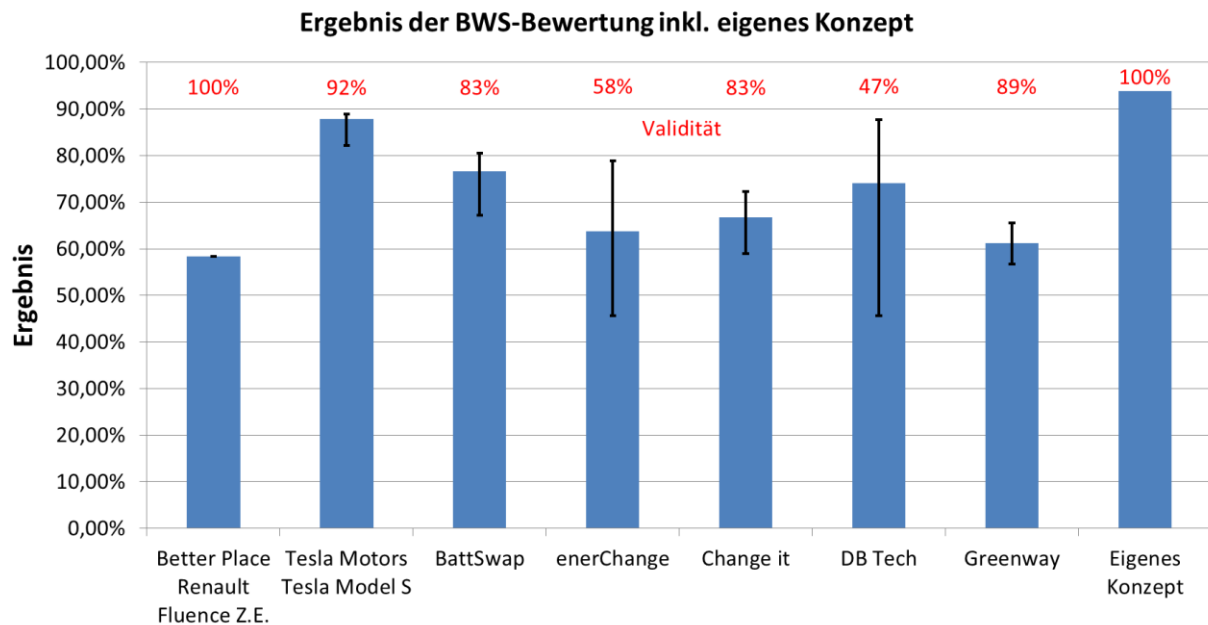


Abbildung 66 – Bewertungsergebnisse inkl. eigenes Konzept

Das Volumen wurde mit 4 Punkten bewertet, da durch die Schrägen Leerräume entstehen, welche die Volumensdichte verringern. Diese werden zwar gleichzeitig als Wärmedämmung verwendet, jedoch existiert hier noch ein Verbesserungspotential.

Die Investitionskosten in die Wechselstation wurden mit 3 Punkten am schlechtesten bewertet. Dies resultiert aus dem Dilemma, dass für die vorteilhafte Batterieposition im Fahrzeugunterboden der Wechsel von unten erfolgen muss. Dadurch wird die Wechselstation im Allgemeinen aufwändiger und daher auch teurer. Analog zu den anderen BWS mit unterirdischem Wechsel erfolgte daher die Bewertung mit 3 Punkten.

Die Zellanordnung und Paketgestaltung ist prinzipiell als durchwegs positiv zu bewerten, jedoch muss aufgrund der bereits angesprochenen Leerräume ein Punkteabzug erfolgen. Die Bewertung dieses Kriteriums wurde daher mit 4 Punkten festgelegt.

Die Heizung und Kühlung der Batterie ist grundsätzlich in Ordnung, jedoch ergibt sich aufgrund der einseitigen Kühlung ein Temperaturgradient nach unten hin. Hier gibt es daher noch Potential für Verbesserungen, daher die Bewertung mit 4 Punkten.

6 Abschließende Aspekte und Ausblick

Das ermittelte Anforderungsprofil und die darauf aufbauende Grobauslegung haben gezeigt, dass der Einsatz von BWS in einer gemischten Flotte sinnvoll ist. Die Analyse der bestehenden BWS hat ergeben, dass aus technischer Sicht zwar einige Verbesserungen notwendig sind, jedoch handelt es sich dabei in den meisten Fällen eher um Details als um das Grundkonzept. Es konnte daher kein technischer Hintergrund festgestellt werden, warum sich BWS sowohl für einzelne Fahrzeuge als auch für eine gemischte Flotte, nicht durchsetzen konnten. Der Grund für die kaum vorhandenen BWS lässt sich aber in anderen Aspekten finden.

Ein Grund für die geringe Verbreitung von Wechselstationen bzw. BWS in elektrischen Fahrzeugen ist die geringe Verbreitung von elektrischen Fahrzeugen selbst. Im Jahr 2015 waren 1,68 %, das heißt rund 5200, der neu zugelassenen PKW in Österreich elektrische bzw. Hybridfahrzeuge. [57] In anderen Ländern ist dieser Wert ähnlich niedrig. Lediglich Norwegen und die Niederlande stellen mit 22,8 bzw. 9,7% Anteil an neuzugelassenen elektrischen Fahrzeugen zwei Ausreißer dar. [58]

Daraus lässt sich ableiten, dass der Markt für ein BWS viel zu klein ist, um eine hohe Verbreitung zu bewerkstelligen. Die Kosten für den Aufbau einer ausreichend hohen Anzahl an Wechselstationen sind relativ hoch. Dieser Aufwand lohnt sich aufgrund der wenigen vorhandenen elektrischen Fahrzeuge, und somit wenigen potentiellen Benützer, bisher anscheinend nicht.

Der zweite Aspekt betrifft die Standardisierung. Wie man Kapitel 3.1 entnehmen kann, existiert eine Vielzahl an unterschiedlichen Lösungen von BWS. Diese Unterschiede reichen von der Bauform, über den Stecker und den Wechselmechanismus, bis hin zu grundlegenden Daten wie Batteriespannung und Kapazität. Die Kapazitäten der Batterien liegen bei ähnlichen Größenordnungen und eine modulare Lösung wäre relativ einfach umzusetzen. Auch gewisse Spannungsunterschiede könnten von einer entsprechend ausgerüsteten Elektronik bewältigt werden. Die anderen, vor allem konstruktiven Aspekte, müssten jedoch für eine gemeinsame Verwendung einheitlich oder zumindest kompatibel sein. Momentan zeichnet sich aber **kein Trend zu einer speziellen Bauform** ab. Das Fahrzeugdesign wird von der Batterie aufgrund ihrer Größe maßgeblich beeinflusst. Eine Standardisierung würde daher bedeuten, dass viele Fahrzeugkomponenten in ihrem Design festgelegt oder zumindest eingeschränkt

werden, was aus Herstellersicht nicht wünschenswert ist. Der Effekt der geringen Verbreitung elektrischer Fahrzeuge wird daher durch die Standardisierungsproblematik, und die damit verbundenen Einschränkungen im Design, noch zusätzlich verstärkt. Daraus lässt sich schließen, dass, solange jeder Hersteller ein anderes System verwendet, es sehr unwahrscheinlich ist, dass sich ein BWS durchsetzen kann.

Die Vorteile von BWS liegen vor allem im schnellen Wechsel, welcher eine rasche Weiterfahrt ermöglicht. Daraus lassen sich mit einer einigermaßen kleinen Batterie trotzdem hohe Reichweiten erzielen. Dieser Vorteil verliert allerdings mit zunehmender Batteriegröße an Bedeutung. Das BWS von Tesla Motors wurde daher, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben, wegen der bereits vorhandenen hohen Reichweite, von den Kunden als uninteressant empfunden. Dies ist ein weiterer Grund für die geringe Verbreitung eines solchen Systems. Trotzdem schmälert dieser Aspekt das Potential eines BWS nicht, da die Batteriegröße auch niedriger gewählt werden kann.

Die ersten beiden Aspekte sind in absehbarer Zeit schwierig zu verbessern. Wie aber bereits gezeigt, verfügt ein BWS grundsätzlich, sowohl aus wirtschaftlicher als auch Umweltsicht, über ein gewisses Potential. Damit dieses nun trotzdem Anwendung finden kann, wäre eine Zusammenarbeit verschiedener Unternehmen und Institutionen im Rahmen eines Umsetzungsprojekts im Anschluss an diese Arbeit zielführend. Zuerst muss, wie bereits zuvor erwähnt, für einen tatsächlichen Einsatz das in der Arbeit verwendete Berechnungsmodell, zur Feststellung der Batterieeigenschaften wie Kapazität, Lebensdauer, und dergleichen, besser bzw. detaillierter werden. Dafür ist die Simulation auf einer soliden Datenbasis, insbesondere bei den Nutzfahrzeugen, notwendig. Nach der Entwicklung eines verbesserten Konzepts, sollte anhand eines Versuches mit verschiedenen Fahrzeugen die Umsetzung in einer gemischten Flotte erprobt werden. Die daraus resultierenden Ergebnisse können wiederum in das Konzept einfließen. Ziel eines solchen Projekts könnte ein fertiges Konzept für einen gemischten Flottenbetrieb in einer Stadt sein, welches anschließend von der Partnerschaft umgesetzt wird. Mit einem solchen Projekt ließe sich das Problem der Standardisierung und des kaum vorhandenen Marktes aufheben.

7 Zusammenfassung

Zu Beginn der Arbeit wurden Kernfragen festgelegt, die im Laufe der Arbeit indirekt beantwortet wurden. Nachfolgend soll die Arbeit anhand der konkreten Beantwortung dieser Fragen zusammengefasst werden.

7.1 Beantwortung der Kernfragen

Welche bestehenden Batteriewechselsysteme (BWS) gibt es?

Es existieren viele verschiedene Fahrzeuge und Unternehmen, die BWS verwenden. Diese Systeme unterscheiden sich teilweise stark voneinander, daher wurde eine entsprechende Auswahl getroffen, die genauer analysiert wurde. Diese Analyse wurde für die BWS von Better Place, Tesla Motors, BattSwap, enerChange, Change it, Greenway und DB Tech durchgeführt.

Was muss ein BWS können?

Die Reichweitenanforderungen einer derartigen Anwendung reichen von kurzen Strecken mit 32 km (Bus) bis hin zu langen Strecken mit 140 km (Taxi). Aufgrund der konträren Energieverbräuche (Bus hoch, Taxi niedrig), ist es trotzdem möglich ein gemeinsames System zu verwenden. Der Wechsel muss für einen reibungslosen Betrieb so schnell wie möglich erfolgen (beispielsweise 30 s pro Modul), da gerade beim Bus die planmäßigen Stehzeiten für den Ausgleich von betrieblichen Schwankungen verwendet werden. Um die Kosten niedrig zu halten, ist oftmaliger Wechsel zielführend, da dadurch die Lebensdauer signifikant erhöht wird. Dafür ist außerdem eine Temperierung der Batterie in einem engen Temperaturfenster um 25 °C zielführend. Daher muss eine entsprechend leistungsstarke Heizung bzw. Kühlung, insbesondere für den Fall einer Abweichung vom hochfrequentierten Betrieb, vorhanden sein.

Welche Fahrzeuge sind für ein BWS geeignet?

Grundsätzlich ist ein BWS für alle Fahrzeuge geeignet, die über den notwendigen Platz für eine Batterie verfügen, die die Anforderungen (Reichweite, Leistung, usw.) erfüllt. Aufgrund der hohen Anforderungen für schwerere Fahrzeuge bzw. Anwendungen mit hohen Fahrtstrecken, ist ein BWS für einen solchen Betrieb nicht geeignet. Die Vorteile des BWS liegen im hochfrequentierten Betrieb von leichten bis mittelschweren Fahrzeuge mit kurzen und mittleren Strecken. In dieser Arbeit wurden daher fünf

verschiedene Anwendungen überprüft. Dies erfolgte beim PKW für den Taxibetrieb, beim Bus für den Stadtverkehr und bei den Nutzfahrzeugen für ein leichtes mit langer bzw. kurzer Strecke und für ein mittelschweres NFZ. Für alle Fahrzeuge ist unter den gegebenen Bedingungen ein Wechselsystem sinnvoll. Die Anwendung in Sonderfahrzeugen, wie Müll- und Räumfahrzeuge, ist grundsätzlich denkbar, wurde jedoch mangels solider Daten nicht weiter verfolgt.

Wieso haben sich BWS nicht durchgesetzt?

Zwar müssen einige Verbesserungen an den bestehenden BWS durchgeführt werden, die mangelnde Verbreitung dieser Systeme ist darauf aber nicht zurückzuführen. Der Grund dafür liegt vor allem in der geringen Verbreitung elektrischer Fahrzeuge. Der Markt für BWS ist darum äußerst beschränkt. Hinzu kommt die mangelnde Tendenz zu Standards (aufgrund des hohen Einflusses der Batterie auf das Fahrzeugdesign), die eine gemeinsame Verwendung unmöglich macht. Des Weiteren sind bei Verwendung von großen Batterien die Vorteile von BWS von geringerer Bedeutung und daher ist der Bedarf einer Wechsellösung verringert.

Wie sieht ein verbessertes BWS aus?

Anhand des Anforderungsprofils wurde eine Grobauslegung für ein eigenes Konzept durchgeführt. Dieses Konzept ist für eine gemischte Flotte für fünf verschiedene Fahrzeuganwendungen vorgesehen. Die Batterie besteht aus einzeln wechselbaren Modulen mit jeweils 20 - 24 kWh (Best Case - Worst Case), die je nach Bedarf in die verschiedenen Fahrzeuge eingebaut werden können. Ein PKW benützt beispielsweise 2 Module, während ein Bus 4 Module benötigt. Damit ist es möglich dieselben Pakete für alle Fahrzeuge zu nutzen, was sowohl einen logistischen als auch Kostenvorteil mit sich bringt. Die Module werden in der Station langsam geladen und entsprechend temperiert, damit die optimalen Bedingungen für eine hohe Lebensdauer gegeben sind. Aufgrund des häufigen Wechsels der Pakete, sind diese Bedingungen auch während der Verwendung im Fahrzeug relativ einfach zu halten. Damit dies gewährleistet ist, werden die Pakete auf der Oberseite mit Luft gekühlt bzw. beheizt. Durch diese Maßnahmen ist das Potential für eine deutlich höhere Batterielebensdauer vorhanden als dies bei konventionellen elektrischen Fahrzeugen der Fall ist. Die Batterie ist relativ flach gebaut, damit diese im Unterboden der Fahrzeuge Platz findet. Diese Position ist aus Sicht der Crashesicherheit und der Fahrdynamik am besten. Der Wechsel erfolgt

unterirdisch. Die Positionierung der Fahrzeuge erfolgt über Führungsschienen und Abstandsanzeigen. Zukünftig wäre aber eine vollautomatische Positionierung denkbar.

7.2 Fazit

Abschließend ist zu sagen, dass für ein Batteriewechselsystem ein großes Potential existiert, das bisher nicht ausgeschöpft werden konnte. Mit zunehmender Verbreitung des elektrischen Antriebes wird auch dieses System wieder an Bedeutung gewinnen. Die Verwendung eines Wechselsystems in einer Stadt wäre zur Reduktion der lokalen Schadstoff- sowie Lärmemissionen jedenfalls sinnvoll.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Chan, C. C.: Department of Electrical and Electronic Engineering. [Online] [Zitat vom: 09. 06 2016.]
http://www.eee.hku.hk/doc/ccchan/CC_Chan_IEEE%20Proceedings%20The%20rise%20&%20fall%20of%20EVs.pdf.
- [2] Manager Magazin: Elektroauto projekt Better Place gibt auf. [Online] 26. 05 2013. [Zitat vom: 10. 06 2013.] <http://www.manager-magazin.de/unternehmen/autoindustrie/a-901960.html>.
- [3] FAZ: Renault gelassen nach Pleite von Elektroauto-Partner. [Online] 27. 05 2013. [Zitat vom: 10. 06 2016.]
<http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/better-place-insolvenz-renault-gelassen-nach-pleite-von-elektroauto-partner-12196582.html>.
- [4] GoingElectric: Better Place E-Taxis fahren 600 km pro Tag. [Online] 04. 12 2012. [Zitat vom: 10. 06 2016.] <http://www.goingelectric.de/2012/12/04/news/better-place-elektro-taxis-amsterdam-schiphol/>.
- [5] Autoblog: Better Place's battery-swapping electric taxi test takes off in Tokyo. [Online] 27. 04 2010. [Zitat vom: 10. 06 2016.]
<http://www.autoblog.com/2010/04/27/better-places-battery-swapping-electric-taxi-test-takes-off-in/>.
- [6] Forbes.com: Better Place Wechselstation. [Online] [Zitat vom: 10. 06 2016.]
<http://b-i.forbesimg.com/stephenwunker/files/2013/05/Better-Place-swap-station.jpg>.
- [7] EV-TV: Renault: Summary of the Battery pack specifications for L38E. [Online] April 2011. [Zitat vom: 10. 06 2016.] <http://media3.ev-tv.me/renaultbatspec.pdf>.
- [8] El Pais: Renault Fluence Z.E. Batteriepaket. [Online] [Zitat vom: 10. 06 2016.]
<http://blogs.elpais.com/.a/6a00d8341bfb1653ef0153924b73ec970b-pi>.
- [9] Renault, Presse & Öffentlichkeitsarbeit: Presseinformation - Elektroautos von Renault. Mai 2011.
- [10] EV-TV: Renault Fluence Z.E. Batterieaufbau. [Online] [Zitat vom: 10. 06 2016.]
<http://store.evtv.me/proddetail.php?prod=Betterplace>.
- [11] Smithsonian Magazin: Charging Ahead With a New Electric Car. [Online] August 2010. [Zitat vom: 10. 06 2016.] <http://www.smithsonianmag.com/ecocenter-energy/charging-ahead-with-a-new-electric-car-710956/?no-ist>.

- [12] Heise online: Better Place zeigt Batteriewechselstation. [Online] 14. 05 2009. [Zitat vom: 11. 06 2016.] <http://www.heise.de/newsticker/meldung/Better-Place-zeigt-Batteriewechselstation-218981.html>.
- [13] GoingElectric: Hat Batteriewechsel eine Zukunft? [Online] 14. 06 2012. [Zitat vom: 11. 06 2016.] <http://www.goingelectric.de/2012/06/14/batterie/hat-batteriewechsel-eine-zukunft/>.
- [14] FDM: Renault Fluence Z.E. Batteriepaket Connector. [Online] <http://www.fdm.dk/billeder/Renault-batteri-2.jpg>.
- [15] Blogspot: Renault Fluence Z.E. Batteriepaket Connector. [Online] [Zitat vom: 10. 06 2016.] http://1.bp.blogspot.com/_QaRnGqYqM/Uxz0tGOIPpl/AAAAAAAAABQc/jwCTbQ9CpII/s1600/DSCN2962.jpg.
- [16] Ecomento.tv: Tesla: Keine Zukunft für Batteriewechsel-Stationen? [Online] 11. 06 2015. [Zitat vom: 11. 06 2016.] <http://ecomento.tv/2015/06/11/tesla-batteriewechsel-stationen-ohne-zukunft/>.
- [17] Gas 2: Tesla Battery Swapping. [Online] [Zitat vom: 1. 9 2014.] <http://gas2.wpengine.com/wp-content/uploads/2014/07/tesla-battery-swapping.jpg>.
- [18] Youtube, Tesla Schweiz: Tesla Model S - Battery Swap HD Official. [Online] 21. 06 2013. [Zitat vom: 11. 06 2016.] <https://www.youtube.com/watch?v=H5V0vL3nnHY>.
- [19] Tesla Motors Club: NHTSA Opened Up the Model S Battery Pack - Pics. [Online] [Zitat vom: 31. 8 2014.] <http://www.teslamotorsclub.com/attachment.php?attachmentid=31280&d=1379997185>.
- [20] Tesla Motors, Inc.: Vehicle Battery Pack Ballistic Shield. US 8286743 B2 US, 16. 10 2012.
- [21] BattSwap. [Online] [Zitat vom: 12. 06 2016.] battswap.com.
- [22] Youtube: enerChange Batteriewechselsystem für Autos. [Online] 12. 02 2013. [Zitat vom: 14. 06 2016.] https://www.youtube.com/watch?v=foLBcP_8DCK.
- [23] Stefan Wallner, Marlene Solis: Change it – The intelligent Battery Change System, An ideal solution for the public traffic. Shenzhen, The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition : s.n., 5 - 9. 11 2010.

- [24] Greenway: Contact. [Online] [Zitat vom: 16. 06 2016.]
<http://greenwayoperator.com/contact/>.
- [25] Greenway: Vehicles and Batteries. [Online] [Zitat vom: 16. 06 2016.]
<http://greenwayoperator.com/vehicles-and-batteries/>.
- [26] Youtube: GreenWay Battery Swap Demo. [Online] 17. 05 2014. [Zitat vom: 16. 06 2016.] <https://www.youtube.com/watch?v=SXXbFqhlQs8>.
- [27] Greenway: FAQ. [Online] [Zitat vom: 16. 06 2016.]
<http://greenwayoperator.com/faq/>.
- [28] Bluebird-Electric.net: Greenway. [Online] [Zitat vom: 16. 06 2016.]
http://www.bluebird-electric.net/blueplanet_ecostar/Greenway_Electro_Mobility_Bratislava.htm.
- [29] Hua, Jianfeng: Progress in Battery Swapping Technology and Demonstration in China. s.l. : Tsinghua University.
- [30] Johannsen, Heiko: Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion. s.l. : Springer Vieweg, 2013. S. 24. ISBN 978-3-658-01593-0.
- [31] Uptmoor, Felix: Master Thesis: Modellbildung und Simulation von Batterien in der Elektromobilität. HAW Hamburg : s.n., 2011.
- [32] Andreas Jossen, Volker Späh: BaSyTec - Simulation von Batterien und Batteriesystemen. [Online] [Zitat vom: 21. 06 2016.]
<http://www.basytec.de/simulation/Batmodell.html>.
- [33] Energieheld.de: Übersicht: Die wichtigsten Dämmstoffe und ihre Eigenschaften. [Online] [Zitat vom: 21. 06 2016.]
<http://www.energieheld.de/daemmung/daemmstoffe/daemmstoff-uebersicht>.
- [34] Mitianiec, Wladyslaw: COOLING OF REMOVABLE BATTERY PACK IN THE ELECTRIC CAR. No. 2, 2013, Cracow University of Technology : Journal of KONES Powertrain and Transport, Bd. Vol. 20.
- [35] Peter Keil, Andreas Jossen: Aging of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Impact of Regenerative Braking. KINTEX, Korea : Institute for Electrical Energy Storage Technology, Technische Universität München, 2015.
- [36] DR Brown, et al: The Prospects of Alternatives to Vapor Compression Technology for Space Cooling and Food Refrigeration Applications. USA : Pacific Northwest National Laboratory, 2010.
- [37] Blogspot: Cinco esferas tangentes - Bild. [Online] 28. 10 2007. [Zitat vom: 24. 06 2016.]

- http://2.bp.blogspot.com/_mWEcYI7WHGc/RwObuZWneRI/AAAAAAAAARU/90KZoat-yso/s320/bach20s1.png.
- [38] Korthauer, Reiner: Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Frankfurt, Deutschland : Springer Vieweg, 2013. S. 16-17, 410-411. ISBN 978-3-642-30652-5.
- [39] Madeleine Ecker, et al: Calendar and cycle life study of Li(NiMnCo)O₂-based 18650 lithium-ion batteries. s.l. : Journal of Power Sources, 2013.
- [40] Noshin Omar, et al: Lithium iron phosphate based battery – Assessment of the aging parameters and development of cycle life model. s.l. : Applied Energy, 2013.
- [41] Knotte, Dr. Thoralf: EDDA Bus-Flyer. s.l. : Fraunhofer-Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme IVI.
<http://www.ivf.fraunhofer.de/de/forschungsfelder/elektromobilitaet/ladetechnologien/schnellladefaeahiger-elektrobus.html>.
- [42] Linne + Krause, Marketing - Forschung: Gutachten über die wirtschaftliche Lage des Hamburger Taxigewerbes, 2. Zwischenbericht. Hamburg : Im Auftrag der Freien und Hansestadt Hamburg, Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, 2007.
- [43] Litzlbauer, Markus: Projekt ZENEM (Zukünftige Energienetze mit Elektromobilität). 2013. Technische Universität Wien - Institut für Energiesysteme und Elektrische Antriebe.
- [44] Institut für Fahrzeugantriebe und Automobiltechnik, TU Wien: Institutsinterne Daten.
- [45] Heinz Dörr, Peter Prenninger, Bardo Hörl, Steffen Bukold, et al: Neue Fahrzeugtechnologien und ihre Effekte auf Logistik und Güterverkehr (EFLOG). Wien : Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, 2014.
- [46] Tober, Werner: Praxisbericht Elektromobilität und Verbrennungsmotor. Wien : Springer Vieweg, 2016. ISBN 978-3-658-13601-7.
- [47] Wien.at: Wetter - Statistiken. [Online] [Zitat vom: 04. 07 2016.]
<https://www.wien.gv.at/statistik/lebensraum/wetter/>.
- [48] Warner, John: The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design. s.l. : Elsevier, 2015. S. 231. ISBN: 978-0-12-801456-1.
- [49] Angurten.de: Skoda Octavia Combi 2005 - 2013. [Online] [Zitat vom: 06. 07 2016.] <http://www.angurten.de/is/abmessungen/1161-Oktavia+Combi>.
- [50] Mercedes Benz: E Klasse T-Modell Abmessungen. [Online] [Zitat vom: 06. 07 2016.] <http://www.mercedes->

- benz.de/content/germany/mpc/mpc_germany_website/de/home_mpc/passenger cars/home/new_cars/models/e-class/_s212/facts_/technicaldata/dimensions.html.
- [51] Mercedes Benz: Sprinter Kastenwagen Abmessungen. [Online] [Zitat vom: 06. 07 2016.] http://www.mercedes-benz.at/content/austria/mpc/mpc_austria_website/de/home_mpc/van/home/new_vans/models/sprinter_906/panel_van_/data/dimensions.0003.html.
- [52] Umbauportal.de: VW Transporter Abmessungen. [Online] [Zitat vom: 06. 07 2016.] https://umbauportal.de/documents/10156/1625583/gif_Beklebungsvorlagen_fm_LT_46_Kasten_MR_ND_DE_08-2011.gif.
- [53] Stadtbuss-Giessen.de: MAN SL 202 (2 Türen). [Online] [Zitat vom: 06. 07 2016.] <http://www.stadtbuss-giessen.de/SL202.htm>.
- [54] Stadtbuss-Giessen.de: MAN A21 Lions City (3 Türen). [Online] [Zitat vom: 06. 07 2016.] <http://www.stadtbuss-giessen.de/LionsCity.htm>.
- [55] Traussnig, Thomas: AVL LIST GmbH, Fachgespräch per Email. 19. - 20. 05 2016.
- [56] Korthauer, Reiner: Handbuch Lithium-Ionen-Batterien. Frankfurt, Deutschland : Springer Vieweg, 2013. S. 177. ISBN 978-3-642-30652-5.
- [57] Austrian Mobile Power: Factsheet #9, Stand Jänner 2016 - Entwicklung Elektromobilität Österreich. Wien : s.n., 2016.
- [58] Statista: Anteil der Elektrofahrzeuge an den gesamten Neuzulassungen in ausgewählten Ländern im Jahr 2015. [Online] [Zitat vom: 11. 07 2016.] <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/243987/umfrage/anteil-der-neuzulassungen-von-elektrofahrzeugen-nach-laendern/>.
- [59] Wiener Linien: Betriebsangaben 2014. https://www.wienerlinien.at/media/files/2015/betriebsangaben_2014_151135.pdf.
- [60] Mercedes Benz: E Klasse Technische Daten. [Online] [Zitat vom: 31. 08 2016.] http://www.mercedes-benz.at/content/austria/mpc/mpc_austria_website/de/home_mpc/passengercars/home/new_cars/models/e-class/w213/facts/technicaldata/models.html.
- [61] Mercedes Benz: Sprinter Kastenwagen Motoren. [Online] [Zitat vom: 31. 08 2016.] http://www.mercedes-benz.at/content/austria/mpc/mpc_austria_website/de/home_mpc/van/home/new_vans/models/sprinter_906/panel_van_/data/engines.html.

-
- [62] Fachhochschule Landshut: Vergleich Kraftstoffe. [Online] [Zitat vom: 31. 08 2016.] <https://people.fh-landshut.de/~fprexle/pdf/alternative%20antriebe/energiespeicher/Vergleich%20Kraftstoffe.pdf>.
- [63] Neudorfer, Harald: Weiterentwicklung von elektrischen Antriebssystemen für Elektro- und Hybridstraßenfahrzeuge. s.l. : Wien : Österr. Verb. für Elektrotechnik, 2010. S. 136-213. ISBN 978-3-85133-056-4.
- [64] Barbara Breitschopf et. al., Fraunhofer ISI: Stromkosten der energieintensiven Industrie, Ein internationaler Vergleich. Juli 2015.
<http://www.ecofys.com/files/files/ecofys-fraunhoferisi-2015-stromkosten-der-energieintensiven-industrie.pdf>.

9 Anhang

9.1 Bewertungen bestehender Systeme

Batteriebewertung:

Better Place Renault Fluence Z.E.

| Nummer | Wertigkeit | Kriterium | Bewertung | Gewichtet |
|--------|------------|--|--------------------------|-----------------|
| 1 | 3 | Investitionskosten BWS | 4 | 12 |
| 2 | 3 | Gewicht | 3 | 9 |
| 3 | 3 | Volumen | 2 | 6 |
| 4 | 3 | Investitionskosten Wechselstation | 3 | 9 |
| 5 | 3 | Lebensdauer | 2 | 6 |
| 6 | 3 | Wechseldauer | 1 | 3 |
| 7 | 2 | Reichweite pro Wechsel | 3 | 6 |
| 8 | 2 | Gemischte Flotte | 2 | 4 |
| 9 | 2 | Bauform | 1 | 2 |
| 10 | 2 | Wechselstation | 4 | 8 |
| 11 | 2 | Position im Fahrzeug f. Wechsel | 5 | 10 |
| 12 | 2 | Wechselmechanismus | 5 | 10 |
| 13 | 1 | Connector | 4 | 4 |
| 14 | 1 | Zellanordnung/Paketgestaltung | 4 | 4 |
| 15 | 1 | Position im Fahrzeug f. Crashesicherheit | 3 | 3 |
| 16 | 1 | Position im Fahrzeug f. Dynamik | 3 | 3 |
| 17 | 1 | Heizung/Kühlung Batt. | 3 | 3 |
| 18 | 1 | Alternative Aufladung möglich | 3 | 3 |
| | | | Summe | 105 |
| | | | 100,00% | 58,33% |
| | | | Validität | Ergebnis |
| | | | Schwankungsbreite | |
| | | | Maximal | Minimal |
| | | | 58,33% | 58,33% |

Batteriewertung: Tesla Motors Tesla Model S

| Nummer | Wertigkeit | Kriterium | Bewertung | Gewichtet |
|--------|------------|--|-----------|-----------|
| 1 | 3 | Investitionskosten BWS | 4 | 12 |
| 2 | 3 | Gewicht | 5 | 15 |
| 3 | 3 | Volumen | 4 | 12 |
| 4 | 3 | Investitionskosten Wechselstation | 0 | 0 |
| 5 | 3 | Lebensdauer | 5 | 15 |
| 6 | 3 | Wechseldauer | 4 | 12 |
| 7 | 2 | Reichweite pro Wechsel | 5 | 10 |
| 8 | 2 | Gemischte Flotte | 4 | 8 |
| 9 | 2 | Bauform | 5 | 10 |
| 10 | 2 | Wechselstation | 5 | 10 |
| 11 | 2 | Position im Fahrzeug f. Wechsel | 5 | 10 |
| 12 | 2 | Wechselmechanismus | 4 | 8 |
| 13 | 1 | Connector | 2 | 2 |
| 14 | 1 | Zellanordnung/Paketgestaltung | 1 | 1 |
| 15 | 1 | Position im Fahrzeug f. Crashesicherheit | 5 | 5 |
| 16 | 1 | Position im Fahrzeug f. Dynamik | 5 | 5 |
| 17 | 1 | Heizung/Kühlung Batt. | 5 | 5 |
| 18 | 1 | Alternative Aufladung möglich | 5 | 5 |

Summe 145

91,67% **87,88%**
Validität **Ergebnis**

Schwankungsbreite

Maximal Minimal
88,89% 82,22%

Batteriebewertung: BattSwap

| Nummer | Wertigkeit | Kriterium | Bewertung | Gewichtet |
|--------|------------|--|-----------|-----------|
| 1 | 3 | Investitionskosten BWS | 4 | 12 |
| 2 | 3 | Gewicht | 0 | 0 |
| 3 | 3 | Volumen | 4 | 12 |
| 4 | 3 | Investitionskosten Wechselstation | 3 | 9 |
| 5 | 3 | Lebensdauer | 0 | 0 |
| 6 | 3 | Wechseldauer | 5 | 15 |
| 7 | 2 | Reichweite pro Wechsel | 4 | 8 |
| 8 | 2 | Gemischte Flotte | 3 | 6 |
| 9 | 2 | Bauform | 2 | 4 |
| 10 | 2 | Wechselstation | 5 | 10 |
| 11 | 2 | Position im Fahrzeug f. Wechsel | 5 | 10 |
| 12 | 2 | Wechselmechanismus | 5 | 10 |
| 13 | 1 | Connector | 5 | 5 |
| 14 | 1 | Zellanordnung/Paketgestaltung | 2 | 2 |
| 15 | 1 | Position im Fahrzeug f. Crashesicherheit | 5 | 5 |
| 16 | 1 | Position im Fahrzeug f. Dynamik | 5 | 5 |
| 17 | 1 | Heizung/Kühlung Batt. | 1 | 1 |
| 18 | 1 | Alternative Aufladung möglich | 1 | 1 |

Summe 115

83,33% **76,67%**
Validität **Ergebnis**

Schwankungsbreite

Maximal Minimal
80,56% 67,22%

Batteriebewertung: enerChange

| Nummer | Wertigkeit | Kriterium | Bewertung | Gewichtet |
|--------|------------|--|-----------|-----------|
| 1 | 3 | Investitionskosten BWS | 0 | 0 |
| 2 | 3 | Gewicht | 0 | 0 |
| 3 | 3 | Volumen | 0 | 0 |
| 4 | 3 | Investitionskosten Wechselstation | 1 | 3 |
| 5 | 3 | Lebensdauer | 0 | 0 |
| 6 | 3 | Wechseldauer | 4 | 12 |
| 7 | 2 | Reichweite pro Wechsel | 2 | 4 |
| 8 | 2 | Gemischte Flotte | 5 | 10 |
| 9 | 2 | Bauform | 5 | 10 |
| 10 | 2 | Wechselstation | 5 | 10 |
| 11 | 2 | Position im Fahrzeug f. Wechsel | 5 | 10 |
| 12 | 2 | Wechselmechanismus | 2 | 4 |
| 13 | 1 | Connector | 0 | 0 |
| 14 | 1 | Zellanordnung/Paketgestaltung | 0 | 0 |
| 15 | 1 | Position im Fahrzeug f. Crashesicherheit | 1 | 1 |
| 16 | 1 | Position im Fahrzeug f. Dynamik | 2 | 2 |
| 17 | 1 | Heizung/Kühlung Batt. | 1 | 1 |
| 18 | 1 | Alternative Aufladung möglich | 0 | 0 |

Summe 67

58,33% **63,81%**
Validität **Ergebnis**

Schwankungsbreite

Maximal Minimal
78,89% 45,56%

Batteriebewertung: Change it

| Nummer | Wertigkeit | Kriterium | Bewertung | Gewichtet |
|--------|------------|--|-----------|-----------|
| 1 | 3 | Investitionskosten BWS | 2 | 6 |
| 2 | 3 | Gewicht | 4 | 12 |
| 3 | 3 | Volumen | 4 | 12 |
| 4 | 3 | Investitionskosten Wechselstation | 3 | 9 |
| 5 | 3 | Lebensdauer | 4 | 12 |
| 6 | 3 | Wechseldauer | 0 | 0 |
| 7 | 2 | Reichweite pro Wechsel | 3 | 6 |
| 8 | 2 | Gemischte Flotte | 5 | 10 |
| 9 | 2 | Bauform | 5 | 10 |
| 10 | 2 | Wechselstation | 3 | 6 |
| 11 | 2 | Position im Fahrzeug f. Wechsel | 2 | 4 |
| 12 | 2 | Wechselmechanismus | 4 | 8 |
| 13 | 1 | Connector | 0 | 0 |
| 14 | 1 | Zellanordnung/Paketgestaltung | 0 | 0 |
| 15 | 1 | Position im Fahrzeug f. Crashesicherheit | 3 | 3 |
| 16 | 1 | Position im Fahrzeug f. Dynamik | 1 | 1 |
| 17 | 1 | Heizung/Kühlung Batt. | 0 | 0 |
| 18 | 1 | Alternative Aufladung möglich | 1 | 1 |

Summe 100

83,33% **66,67%**
Validität **Ergebnis**

Schwankungsbreite

Maximal Minimal
72,22% 58,89%

Batteriebewertung: DB Tech

| Nummer | Wertigkeit | Kriterium | Bewertung | Gewichtet |
|--------|------------|--|-----------|-----------|
| 1 | 3 | Investitionskosten BWS | 0 | 0 |
| 2 | 3 | Gewicht | 0 | 0 |
| 3 | 3 | Volumen | 0 | 0 |
| 4 | 3 | Investitionskosten Wechselstation | 5 | 15 |
| 5 | 3 | Lebensdauer | 0 | 0 |
| 6 | 3 | Wechseldauer | 0 | 0 |
| 7 | 2 | Reichweite pro Wechsel | 0 | 0 |
| 8 | 2 | Gemischte Flotte | 5 | 10 |
| 9 | 2 | Bauform | 4 | 8 |
| 10 | 2 | Wechselstation | 3 | 6 |
| 11 | 2 | Position im Fahrzeug f. Wechsel | 4 | 8 |
| 12 | 2 | Wechselmechanismus | 4 | 8 |
| 13 | 1 | Connector | 3 | 3 |
| 14 | 1 | Zellanordnung/Paketgestaltung | 0 | 0 |
| 15 | 1 | Position im Fahrzeug f. Crashesicherheit | 1 | 1 |
| 16 | 1 | Position im Fahrzeug f. Dynamik | 3 | 3 |
| 17 | 1 | Heizung/Kühlung Batt. | 0 | 0 |
| 18 | 1 | Alternative Aufladung möglich | 1 | 1 |

Summe 63

47,22% **74,12%**
Validität **Ergebnis**

Schwankungsbreite

Maximal Minimal
87,78% 45,56%

Batteriebewertung: Greenway

| Nummer | Wertigkeit | Kriterium | Bewertung | Gewichtet |
|--------|------------|--|-----------|-----------|
| 1 | 3 | Investitionskosten BWS | 0 | 0 |
| 2 | 3 | Gewicht | 3 | 9 |
| 3 | 3 | Volumen | 4 | 12 |
| 4 | 3 | Investitionskosten Wechselstation | 5 | 15 |
| 5 | 3 | Lebensdauer | 4 | 12 |
| 6 | 3 | Wechseldauer | 1 | 3 |
| 7 | 2 | Reichweite pro Wechsel | 4 | 8 |
| 8 | 2 | Gemischte Flotte | 2 | 4 |
| 9 | 2 | Bauform | 1 | 2 |
| 10 | 2 | Wechselstation | 5 | 10 |
| 11 | 2 | Position im Fahrzeug f. Wechsel | 2 | 4 |
| 12 | 2 | Wechselmechanismus | 1 | 2 |
| 13 | 1 | Connector | 5 | 5 |
| 14 | 1 | Zellanordnung/Paketgestaltung | 0 | 0 |
| 15 | 1 | Position im Fahrzeug f. Crashesicherheit | 5 | 5 |
| 16 | 1 | Position im Fahrzeug f. Dynamik | 5 | 5 |
| 17 | 1 | Heizung/Kühlung Batt. | 1 | 1 |
| 18 | 1 | Alternative Aufladung möglich | 1 | 1 |

Summe 98

88,89% **61,25%**
Validität **Ergebnis**

Schwankungsbreite

Maximal Minimal
65,56% 56,67%

9.2 Bewertung des eigenen Konzepts

Batteriebewertung: Eigenes Konzept

| Nummer | Wertigkeit | Kriterium | Bewertung | Gewichtet |
|--------|------------|--|--------------------------|-----------------|
| 1 | 3 | Investitionskosten BWS | 5 | 15 |
| 2 | 3 | Gewicht | 5 | 15 |
| 3 | 3 | Volumen | 4 | 12 |
| 4 | 3 | Investitionskosten Wechselstation | 3 | 9 |
| 5 | 3 | Lebensdauer | 5 | 15 |
| 6 | 3 | Wechseldauer | 5 | 15 |
| 7 | 2 | Reichweite pro Wechsel | 5 | 10 |
| 8 | 2 | Gemischte Flotte | 5 | 10 |
| 9 | 2 | Bauform | 5 | 10 |
| 10 | 2 | Wechselstation | 5 | 10 |
| 11 | 2 | Position im Fahrzeug f. Wechsel | 5 | 10 |
| 12 | 2 | Wechselmechanismus | 5 | 10 |
| 13 | 1 | Connector | 5 | 5 |
| 14 | 1 | Zellanordnung/Paketgestaltung | 4 | 4 |
| 15 | 1 | Position im Fahrzeug f. Crashesicherheit | 5 | 5 |
| 16 | 1 | Position im Fahrzeug f. Dynamik | 5 | 5 |
| 17 | 1 | Heizung/Kühlung Batt. | 4 | 4 |
| 18 | 1 | Alternative Aufladung möglich | 5 | 5 |
| | | | Summe | 169 |
| | | | 100,00% | 93,89% |
| | | | Validität | Ergebnis |
| | | | Schwankungsbreite | |
| | | | Maximal | Minimal |
| | | | 93,89% | 93,89% |

9.3 Batterieberechnung

Batterieberechnung Quellennachweis

| | PKW | LNFZ kurz | LNFZ lang | MNFZ | Bus | |
|--|--|---|--------------|------|------|---------------|
| Kraftstoffverbrauch/100km | Annahme | [45] und eigene Berechnungen (e. B.) | | | [59] | l/100km |
| Kraftstoffverbrauch/100km lt. Hersteller | [60] und e. B. | [61] und e. B. | | --- | --- | l/100km |
| Energie Kraftstoff | | [62] | | | | kWh/kg |
| Dichte Kraftstoff | Mittelwert aus Min. und Max. nach DIN EN 590 | | | | | kg/l |
| Chemischer Energieverbrauch/100km | | | | | | kWh/100km |
| Wirkungsgrad VM | | Annahme (Ann.) | | | | |
| Wirkungsgrad EM | [63] und e. B. | (eigene Berechnungen) | | | | |
| Wirkungsgrad Batterie | | [38] | | | | |
| Wirkungsgrad Inverter | | [63] und e. B. | | | | |
| Wirkungsgrad E-Antrieb | | [63] und e. B. | | | | |
| Betriebsbereich SOC | | | | | | |
| Zyklen-Lebensdauer (100% DOD) | | Siehe Kapitel 5.2.3 | | | | Jahre |
| Kalendarische Lebensdauer | | Siehe Kapitel 5.2.3 | | | | |
| End of Life Kapazität (%C) | | Ann. | | | | |
| Benötigte Kapazität/100km | | | | | | kWh/100km |
| Elektr. Energieverbrauch/100km | | | | | | kWh/100km |
| Zuschlag für Heizung und Klimatisierung | | Siehe Kapitel 5.2.2 | | | | |
| Reine Heizleistung (Stehphase) | | Ann. | | | | kW |
| Elektr. Energieverbrauch mit Heizung/Kl. | | | | | | kWh/100km |
| Kraftstoffkosten | | Ann. | | | | EUR/l |
| Kraftstoffkosten pro km | | | | | | EUR |
| Energiedichte Batterie | | [48] und [55] und e. B. | | | | kWh/kg |
| Energiedichte Batterie | | [48] und [55] und e. B. | | | | kWh/l |
| Leistungsdichte Batterie | | [48] | | | | kW/kg |
| Batteriekosten/kWh | | [48] und [55] und e. B. | | | | EUR/kWh |
| Energiekosten/kWh | | [64] und e. B. | | | | EUR/kWh |
| Fahrtstrecke | | Siehe Kapitel 5.2.4 | | | | km |
| Jährliche Kilometerleistung | | Siehe Kapitel 5.2.5 | | | | km |
| Modulgröße | | | | | | kWh |
| Anzahl der Module | | | | | | |
| Benötigte Kapazität für Strecke | | | | | | kWh |
| Gewählte Kapazität | | | | | | kWh |
| SOC-Betriebsbereich bei Kapazität | | | | | | |
| Zyklen-Lebensdauer | | | | | | |
| Reichweite | | | | | | km |
| Reichweite End of Life (EOL) | | | | | | km |
| Reichweite mit Verbrauch lt. Hersteller | | | | | | km |
| Reichweite mit Verbrauch lt. H. EOL | | | | | | km |
| Lebensdauer in Jahren | | | | | | Jahre |
| Lebensdauer in km | | | | | | km |
| Modulgewicht | | | | | | kg |
| Modulvolumen | | | | | | l |
| Modulleistung | | | | | | kW |
| Batteriegewicht | | | | | | kg |
| Batterievolumen | | | | | | l |
| Batterieleistung | | | | | | kW |
| Maximale Stehzeit (mit Heizung) | | | | | | h |
| Jahresenergieverbrauch pro Fahrzeug | | | | | | kWh/a |
| Batterieinvestitionskosten | | | | | | EUR |
| Energiekosten pro km | | | | | | EUR/km |
| Kosten pro km auf Lebensdauer | | | | | | EUR/km |
| Ersparnis pro km (gegenüber Diesel) | | | | | | EUR/km |
| Ersparnis pro Fahrt | | | | | | EUR |
| Ersparnis pro Fahrzeug pro Jahr | | | | | | EUR/a |
| Ersparnis pro Fahrzeug auf Lebensdauer | | | | | | EUR |

Batterieberechnung Best Case

| | PKW | LNfZ kurz | LNfZ lang | MNFZ | Bus | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|
| Kraftstoffverbrauch/100km | 7 | 16 | 13 | 25 | 53 | l/100km |
| Kraftstoffverbrauch/100km lt. Hersteller | 5 | 8 | 7 | --- | --- | l/100km |
| Energie Kraftstoff | 11,8 | 11,8 | 11,8 | 11,8 | 11,8 | kWh/kg |
| Dichte Kraftstoff | 0,833 | 0,833 | 0,833 | 0,833 | 0,833 | kg/l |
| Chemischer Energieverbrauch/100km | 68,8 | 157,3 | 127,8 | 245,7 | 521,0 | kWh/100km |
| Wirkungsgrad VM | 0,2 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,25 | |
| Wirkungsgrad EM | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | |
| Wirkungsgrad Batterie | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | |
| Wirkungsgrad Inverter | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | |
| Wirkungsgrad E-Antrieb | 0,86 | 0,86 | 0,86 | 0,86 | 0,86 | |
| Betriebsbereich SOC | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | |
| Zyklen-Lebensdauer (100% DOD) | 2.500 | 2.500 | 2.500 | 2.500 | 2.500 | |
| Kalendarische Lebensdauer | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | Jahre |
| End of Life Kapazität (%C) | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | |
| Benötigte Kapazität/100km | 23,5 | 59,0 | 48,0 | 92,2 | 222,2 | kWh/100km |
| Elektr. Energieverbrauch/100km | 16,1 | 40,4 | 32,8 | 63,1 | 151,9 | kWh/100km |
| Zuschlag für Heizung und Klimatisierung | 1,17 | 1,17 | 1,17 | 1,17 | 1,17 | |
| Reine Heizleistung (Stehphase) | 3,00 | 4,00 | 4,00 | 5,00 | 6,00 | kW |
| Elektr. Energieverbrauch mit Heizung/Kl. | 18,78 | 47,22 | 38,36 | 73,77 | 177,73 | kWh/100km |
| Kraftstoffkosten | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | EUR/l |
| Kraftstoffkosten pro km | 0,08 | 0,19 | 0,16 | 0,30 | 0,64 | EUR |
| Energiedichte Batterie | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | 0,13 | kWh/kg |
| Energiedichte Batterie | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | 0,30 | kWh/l |
| Leistungsdichte Batterie | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | 0,55 | kW/kg |
| Batteriekosten/kWh | 125 | 125 | 125 | 125 | 125 | EUR/kWh |
| Energiekosten/kWh | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | 0,07 | EUR/kWh |
| Fahrtstrecke | 140 | 50 | 120 | 50 | 32 | km |
| Jährliche Kilometerleistung | 130.000 | 30.000 | 80.000 | 30.000 | 80.000 | km |
| Modulgröße | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | kWh |
| Anzahl der Module | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | |
| Benötigte Kapazität für Strecke | 32,9 | 29,5 | 57,5 | 46,1 | 71,1 | kWh |
| Gewählte Kapazität | 40 | 40 | 60 | 60 | 80 | kWh |
| SOC-Betriebsbereich bei Kapazität | 0,66 | 0,59 | 0,77 | 0,61 | 0,71 | |
| Zyklen-Lebensdauer | 7277 | 9905 | 4111 | 8882 | 5551 | |
| Reichweite | 170 | 68 | 125 | 65 | 36 | km |
| Reichweite End of Life (EOL) | 136 | 54 | 100 | 52 | 29 | km |
| Reichweite mit Verbrauch lt. Hersteller | 279 | 159 | 272 | --- | --- | km |
| Reichweite mit Verbrauch lt. H. EOL | 223 | 127 | 217 | --- | --- | km |
| Lebensdauer in Jahren | 4,7 | 6,9 | 4,1 | 6,6 | 1,9 | Jahre |
| Lebensdauer in km | 616.287 | 208.469 | 325.892 | 198.826 | 149.886 | km |
| Modulgewicht | 154 | 154 | 154 | 154 | 154 | kg |
| Modulvolumen | 67 | 67 | 67 | 67 | 67 | l |
| Modulleistung | 85 | 85 | 85 | 85 | 85 | kW |
| Batteriegewicht | 308 | 308 | 462 | 462 | 615 | kg |
| Batterievolumen | 133 | 133 | 200 | 200 | 267 | l |
| Batterieleistung | 169 | 169 | 254 | 254 | 338 | kW |
| Maximale Stehzeit (mit Heizung) | 10,7 | 8,0 | 12,0 | 9,6 | 10,7 | h |
| Jahresenergieverbrauch pro Fahrzeug | 25.697 | 14.910 | 32.305 | 23.297 | 149.666 | kWh/a |
| Batterieinvestitionskosten | 5.000 | 5.000 | 7.500 | 7.500 | 10.000 | EUR |
| Energiekosten pro km | 0,01 | 0,03 | 0,03 | 0,05 | 0,12 | EUR/km |
| Kosten pro km auf Lebensdauer | 0,02 | 0,06 | 0,05 | 0,09 | 0,19 | EUR/km |
| Ersparnis pro km (gegenüber Diesel) | 0,06 | 0,13 | 0,11 | 0,21 | 0,44 | EUR/km |
| Ersparnis pro Fahrt | 8,78 | 6,75 | 12,74 | 10,53 | 14,24 | EUR |
| Ersparnis pro Fahrzeug pro Jahr | 8.156 | 4.049 | 8.491 | 6.319 | 35.590 | EUR/a |
| Ersparnis pro Fahrzeug auf Lebensdauer | 38.667 | 28.136 | 34.588 | 41.880 | 66.680 | EUR |

Batterieberechnung Average Case

| | PKW | LNfZ kurz | LNfZ lang | MNFZ | Bus | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|
| Kraftstoffverbrauch/100km | 8 | 17 | 14 | 27 | 55 | l/100km |
| Kraftstoffverbrauch/100km lt. Hersteller | 5,5 | 8,5 | 7,5 | --- | --- | l/100km |
| Energie Kraftstoff | 11,8 | 11,8 | 11,8 | 11,8 | 11,8 | kWh/kg |
| Dichte Kraftstoff | 0,833 | 0,833 | 0,833 | 0,833 | 0,833 | kg/l |
| Chemischer Energieverbrauch/100km | 78,6 | 167,1 | 137,6 | 265,4 | 540,6 | kWh/100km |
| Wirkungsgrad VM | 0,2 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,25 | |
| Wirkungsgrad EM | 0,93 | 0,93 | 0,93 | 0,93 | 0,93 | |
| Wirkungsgrad Batterie | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | |
| Wirkungsgrad Inverter | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | |
| Wirkungsgrad E-Antrieb | 0,84 | 0,84 | 0,84 | 0,84 | 0,84 | |
| Betriebsbereich SOC | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | |
| Zyklen-Lebensdauer (100% DOD) | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | |
| Kalendarische Lebensdauer | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | Jahre |
| End of Life Kapazität (%C) | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | |
| Benötigte Kapazität/100km | 27,9 | 65,2 | 53,7 | 103,5 | 239,5 | kWh/100km |
| Elektr. Energieverbrauch/100km | 18,7 | 43,8 | 36,1 | 69,6 | 161,0 | kWh/100km |
| Zuschlag für Heizung und Klimatisierung | 1,19 | 1,19 | 1,19 | 1,19 | 1,19 | |
| Reine Heizleistung (Stehphase) | 3,50 | 4,50 | 4,50 | 5,50 | 6,50 | kW |
| Elektr. Energieverbrauch mit Heizung/Kl. | 22,30 | 52,12 | 42,92 | 82,78 | 191,62 | kWh/100km |
| Kraftstoffkosten | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | 1,10 | EUR/l |
| Kraftstoffkosten pro km | 0,09 | 0,19 | 0,15 | 0,30 | 0,61 | EUR |
| Energiedichte Batterie | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | 0,125 | kWh/kg |
| Energiedichte Batterie | 0,280 | 0,280 | 0,280 | 0,280 | 0,280 | kWh/l |
| Leistungsdichte Batterie | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50 | kW/kg |
| Batteriekosten/kWh | 150 | 150 | 150 | 150 | 150 | EUR/kWh |
| Energiekosten/kWh | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,09 | EUR/kWh |
| Fahrtstrecke | 140 | 50 | 120 | 50 | 32 | km |
| Jährliche Kilometerleistung | 130.000 | 30.000 | 80.000 | 30.000 | 80.000 | km |
| Modulgröße | 22 | 22 | 22 | 22 | 22 | kWh |
| Anzahl der Module | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | |
| Benötigte Kapazität für Strecke | 39,0 | 32,6 | 64,4 | 51,7 | 76,6 | kWh |
| Gewählte Kapazität | 44 | 44 | 66 | 66 | 88 | kWh |
| SOC-Betriebsbereich bei Kapazität | 0,71 | 0,59 | 0,78 | 0,63 | 0,70 | |
| Zyklen-Lebensdauer | 4474 | 7852 | 3065 | 6715 | 4777 | |
| Reichweite | 158 | 68 | 123 | 64 | 37 | km |
| Reichweite End of Life (EOL) | 126 | 54 | 98 | 51 | 29 | km |
| Reichweite mit Verbrauch lt. Hersteller | 273 | 161 | 273 | --- | --- | km |
| Reichweite mit Verbrauch lt. H. EOL | 219 | 129 | 219 | --- | --- | km |
| Lebensdauer in Jahren | 3,4 | 6,3 | 3,3 | 5,8 | 1,6 | Jahre |
| Lebensdauer in km | 446.906 | 187.802 | 265.934 | 173.731 | 131.866 | km |
| Modulgewicht | 176 | 176 | 176 | 176 | 176 | kg |
| Modulvolumen | 79 | 79 | 79 | 79 | 79 | l |
| Modulleistung | 88 | 88 | 88 | 88 | 88 | kW |
| Batteriegewicht | 352 | 352 | 528 | 528 | 704 | kg |
| Batterievolumen | 157 | 157 | 236 | 236 | 314 | l |
| Batterieleistung | 176 | 176 | 264 | 264 | 352 | kW |
| Maximale Stehzeit (mit Heizung) | 10,1 | 7,8 | 11,7 | 9,6 | 10,8 | h |
| Jahresenergieverbrauch pro Fahrzeug | 30.513 | 16.459 | 36.146 | 26.141 | 161.366 | kWh/a |
| Batterieinvestitionskosten | 6.600 | 6.600 | 9.900 | 9.900 | 13.200 | EUR |
| Energiekosten pro km | 0,02 | 0,05 | 0,04 | 0,07 | 0,17 | EUR/km |
| Kosten pro km auf Lebensdauer | 0,03 | 0,08 | 0,08 | 0,13 | 0,27 | EUR/km |
| Ersparnis pro km (gegenüber Diesel) | 0,05 | 0,10 | 0,08 | 0,17 | 0,33 | EUR/km |
| Ersparnis pro Fahrt | 7,44 | 5,25 | 9,38 | 8,28 | 10,64 | EUR |
| Ersparnis pro Fahrzeug pro Jahr | 6.911 | 3.148 | 6.251 | 4.965 | 26.595 | EUR/a |
| Ersparnis pro Fahrzeug auf Lebensdauer | 23.759 | 19.709 | 20.781 | 28.755 | 43.837 | EUR |

Batterieberechnung Worst Case

| | PKW | LNfZ kurz | LNfZ lang | MNFZ | Bus | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------|
| Kraftstoffverbrauch/100km | 9 | 18 | 15 | 29 | 57 | l/100km |
| Kraftstoffverbrauch/100km lt. Hersteller | 6 | 9 | 8 | --- | --- | l/100km |
| Energie Kraftstoff | 11,8 | 11,8 | 11,8 | 11,8 | 11,8 | kWh/kg |
| Dichte Kraftstoff | 0,833 | 0,833 | 0,833 | 0,833 | 0,833 | kg/l |
| Chemischer Energieverbrauch/100km | 88,5 | 176,9 | 147,4 | 285,1 | 560,3 | kWh/100km |
| Wirkungsgrad VM | 0,2 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,25 | |
| Wirkungsgrad EM | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | 0,91 | |
| Wirkungsgrad Batterie | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | |
| Wirkungsgrad Inverter | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | 0,95 | |
| Wirkungsgrad E-Antrieb | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 0,82 | 0,82 | |
| Betriebsbereich SOC | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | |
| Zyklen-Lebensdauer (100% DOD) | 1.500 | 1.500 | 1.500 | 1.500 | 1.500 | |
| Kalendarische Lebensdauer | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | Jahre |
| End of Life Kapazität (%C) | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | 0,80 | |
| Benötigte Kapazität/100km | 32,6 | 71,7 | 59,7 | 115,5 | 258,0 | kWh/100km |
| Elektr. Energieverbrauch/100km | 21,5 | 47,4 | 39,5 | 76,4 | 170,6 | kWh/100km |
| Zuschlag für Heizung und Klimatisierung | 1,21 | 1,21 | 1,21 | 1,21 | 1,21 | |
| Reine Heizleistung (Stehphase) | 4,00 | 5,00 | 5,00 | 6,00 | 7,00 | kW |
| Elektr. Energieverbrauch mit Heizung/Kl. | 26,07 | 57,35 | 47,79 | 92,39 | 206,37 | kWh/100km |
| Kraftstoffkosten | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | 1,00 | EUR/l |
| Kraftstoffkosten pro km | 0,09 | 0,18 | 0,15 | 0,29 | 0,57 | EUR |
| Energiedichte Batterie | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | kWh/kg |
| Energiedichte Batterie | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | 0,26 | kWh/l |
| Leistungsdichte Batterie | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | 0,45 | kW/kg |
| Batteriekosten/kWh | 170 | 170 | 170 | 170 | 170 | EUR/kWh |
| Energiekosten/kWh | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | 0,12 | EUR/kWh |
| Fahrtstrecke | 140 | 50 | 120 | 50 | 32 | km |
| Jährliche Kilometerleistung | 130.000 | 30.000 | 80.000 | 30.000 | 80.000 | km |
| Modulgröße | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | kWh |
| Anzahl der Module | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | |
| Benötigte Kapazität für Strecke | 45,6 | 35,8 | 71,7 | 57,7 | 82,5 | kWh |
| Gewählte Kapazität | 48 | 48 | 72 | 72 | 96 | kWh |
| SOC-Betriebsbereich bei Kapazität | 0,76 | 0,60 | 0,80 | 0,64 | 0,69 | |
| Zyklen-Lebensdauer | 2561 | 5760 | 2112 | 4706 | 3750 | |
| Reichweite | 147 | 67 | 121 | 62 | 37 | km |
| Reichweite End of Life (EOL) | 118 | 54 | 96 | 50 | 30 | km |
| Reichweite mit Verbrauch lt. Hersteller | 267 | 162 | 273 | --- | --- | km |
| Reichweite mit Verbrauch lt. H. EOL | 214 | 130 | 219 | --- | --- | km |
| Lebensdauer in Jahren | 2,2 | 5,3 | 2,5 | 4,7 | 1,3 | Jahre |
| Lebensdauer in km | 291.519 | 159.995 | 200.482 | 142.296 | 106.661 | km |
| Modulgewicht | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | kg |
| Modulvolumen | 92 | 92 | 92 | 92 | 92 | l |
| Modulleistung | 90 | 90 | 90 | 90 | 90 | kW |
| Batteriegewicht | 400 | 400 | 600 | 600 | 800 | kg |
| Batterievolumen | 185 | 185 | 277 | 277 | 369 | l |
| Batterieleistung | 180 | 180 | 270 | 270 | 360 | kW |
| Maximale Stehzeit (mit Heizung) | 9,6 | 7,7 | 11,5 | 9,6 | 11,0 | h |
| Jahresenergieverbrauch pro Fahrzeug | 35.671 | 18.110 | 40.244 | 29.177 | 173.782 | kWh/a |
| Batterieinvestitionskosten | 8.160 | 8.160 | 12.240 | 12.240 | 16.320 | EUR |
| Energiekosten pro km | 0,03 | 0,07 | 0,06 | 0,11 | 0,25 | EUR/km |
| Kosten pro km auf Lebensdauer | 0,06 | 0,12 | 0,12 | 0,20 | 0,40 | EUR/km |
| Ersparnis pro km (gegenüber Diesel) | 0,03 | 0,06 | 0,03 | 0,09 | 0,17 | EUR/km |
| Ersparnis pro Fahrt | 4,30 | 3,01 | 3,79 | 4,66 | 5,42 | EUR |
| Ersparnis pro Fahrzeug pro Jahr | 3.995 | 1.805 | 2.528 | 2.793 | 13.548 | EUR/a |
| Ersparnis pro Fahrzeug auf Lebensdauer | 8.958 | 9.629 | 6.335 | 13.249 | 18.063 | EUR |

Beispielstation

1 Wechselstation für:

- 10 Taxis (10x14 Schichten pro Woche á 180km) 25200 km
- 5 LNfZ kurz (5x12 Schichten pro Woche á 100km) 6000 km
- 5 LNfZ lang (5x12 Schichten pro Woche á 120km) 7200 km
- 5 MNfZ (5x12 Schichten pro Woche á 100km) 6000 km
- 1 Buslinien (1x744 Fahrten pro Woche á 2x8km) 11904 km

| | Best Case | | | Average Case | | | Worst Case | | | | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | PKW | LNfZ kurz | LNfZ lang | PKW | LNfZ kurz | LNfZ lang | PKW | LNfZ kurz | LNfZ lang | | PKW | LNfZ kurz | LNfZ lang |
| Distanz (Station) in einer Woche | 25.200 | 6.000 | 7.200 | 25.200 | 6.000 | 7.200 | 25.200 | 6.000 | 7.200 | 25.200 | 6.000 | 7.200 | 11.904 |
| Energieverbrauch pro Tag | 608 | 364 | 355 | 710 | 395 | 391 | 816 | 628 | 428 | 816 | 628 | 428 | 3.053 |
| Energieverbrauch pro Woche | 4 | 3 | 2 | 5 | 3 | 3 | 6 | 4 | 3 | 6 | 5 | 3 | 21 |
| Energieverbrauch pro Jahr | 221 | 133 | 129 | 258 | 144 | 142 | 297 | 228 | 156 | 297 | 251 | 156 | 1.111 |
| Anzahl der gleichzeitig ladenden Module | 20 | 10 | 15 | 20 | 10 | 15 | 20 | 15 | 15 | 20 | 15 | 15 | 32 |
| Batteriemodule EOL pro Jahr | 4,3 | 3,0 | 3,4 | 5,9 | 3,3 | 4,2 | 9,0 | 5,4 | 5,6 | 9,0 | 6,6 | 6,6 | 23,2 |
| Ersparnis pro Tag | 226 | 116 | 109 | 191 | 90 | 80 | 111 | 142 | 33 | 111 | 80 | 33 | 288 |
| Ersparnis pro Woche | 1.581 | 810 | 764 | 1.340 | 630 | 563 | 774 | 993 | 228 | 774 | 559 | 228 | 2.016 |
| Ersparnis pro Jahr | 82.217 | 42.109 | 39.736 | 69.666 | 32.744 | 29.256 | 40.266 | 51.640 | 11.831 | 40.266 | 29.050 | 11.831 | 104.830 |
| Wechselvorgänge pro Tag | 26 | 17 | 9 | 26 | 17 | 9 | 26 | 17 | 9 | 26 | 17 | 9 | 53 |
| Zeit für einen Wechsel | 0,95 | 0,95 | 1,43 | 1,57 | 1,57 | 2,36 | 2,29 | 2,36 | 3,43 | 2,29 | 3,43 | 3,43 | 4,57 |
| Wechselzeit pro Tag | 24 | 16 | 12 | 40 | 27 | 20 | 59 | 40 | 29 | 59 | 59 | 29 | 243 |
| Gesamtverbrauch Station pro Woche | 32 | 32 | 32 | 35 | 35 | 35 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 | 38 |
| Gesamtverbrauch Station pro Jahr | 1.680 | 1.680 | 1.680 | 1.822 | 1.822 | 1.822 | 1.971 | 1.971 | 1.971 | 1.971 | 1.971 | 1.971 | 1.971 |
| Anzahl der gleichzeitig ladenden Module | 92 | 92 | 92 | 92 | 92 | 92 | 92 | 92 | 92 | 92 | 92 | 92 | 92 |
| Durchschnittliche Ladeleistung | 192 | 192 | 192 | 209 | 209 | 209 | 226 | 226 | 226 | 226 | 226 | 226 | 226 |
| Spitzenleistung bei 1C | 1.549 | 1.549 | 1.549 | 1.704 | 1.704 | 1.704 | 1.859 | 1.859 | 1.859 | 1.859 | 1.859 | 1.859 | 1.859 |
| Wechselzeit Station pro Tag | 3,0 | 3,0 | 3,0 | 4,9 | 4,9 | 4,9 | 7,2 | 7,2 | 7,2 | 7,2 | 7,2 | 7,2 | 7,2 |
| Wechselvorgänge pro Tag | 122 | 122 | 122 | 122 | 122 | 122 | 122 | 122 | 122 | 122 | 122 | 122 | 122 |
| Wechselvorgänge pro Jahr | 44.304 | 44.304 | 44.304 | 44.304 | 44.304 | 44.304 | 44.304 | 44.304 | 44.304 | 44.304 | 44.304 | 44.304 | 44.304 |
| Batteriemodule EOL pro Jahr | 32 | 32 | 32 | 38 | 38 | 38 | 49 | 49 | 49 | 49 | 49 | 49 | 49 |
| Ersparnis Station pro Woche | 9.715 | 9.715 | 9.715 | 7.482 | 7.482 | 7.482 | 3.938 | 3.938 | 3.938 | 3.938 | 3.938 | 3.938 | 3.938 |
| Ersparnis Station pro Jahr | 505.160 | 505.160 | 505.160 | 389.087 | 389.087 | 389.087 | 204.753 | 204.753 | 204.753 | 204.753 | 204.753 | 204.753 | 204.753 |