



Timon Bertignoll, Bsc
Matrikelnummer: 01530745

Untersuchungen zur elektrischen Versorgung am Zug unter Berücksichtigung der Elektromobilität

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieur

Masterstudium: Elektrotechnik

eingereicht an der

Technische Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Schweighofer
Dipl.-Ing. Dr.techn. Armin Buchroithner
Dipl.-Ing. BSc Christof Birgel

Institut für Elektrische Messtechnik und Sensorik
Beurteiler: Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernhard Schweighofer

Graz, April 2024

Offenlegung

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Projektes "RailCharge", Mobilität der Zukunft 16. Ausschreibung (FFG-Nummer: 886444) von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft durchgeführt.

Teile dieser Arbeit wurden in inhaltlichen Auszügen in den folgenden Publikationen veröffentlicht:

- Mitter, T.; et al.: Kombiniertes Verkehr neu gedacht – Die intermodale Elektromobilität. ZEVrail 147 (2023) Sonderheft Graz 2023.[1]
- Buchroithner, A.; et al.: RailCharge – Automatisiertes Laden von Elektrofahrzeugen auf der Schiene als Enabler der E-Mobility – Teil 1 & 2, ZEVrail (in Druck, 2024)

Abstract

This master's thesis deals with the electrical supply of trains and how this can be used to charge the batteries of electric vehicles on wagons during the journey.

The first step is to look at which subsystems exist in the railway energy supply and how this energy is distributed on the train. The aim is to identify any limitations and restrictions, particularly regarding the available power.

Based on this, possible use cases that have already been developed as part of a research project will be further narrowed down based on their plausibility. Energy calculations will then be carried out for the selected use cases to demonstrate the charging potential.

Simple electrical concepts will also be developed to show what an electrical supply for the vehicles could look like for the individual use cases.

Kurzfassung

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der elektrischen Versorgung von Zügen und wie diese genutzt werden kann, um Batterien elektrischer Fahrzeuge, die sich auf Waggons befinden, während der Fahrt zu laden.

Zuerst soll betrachtet werden, welche Teilsysteme es in der Energieversorgung der Bahn gibt und wie diese Energie am Zug verteilt wird. Dadurch sollen eventuelle Limitierungen und Einschränkungen identifiziert werden, insbesondere was die verfügbare Leistung betrifft.

Darauf aufbauend, sollen mögliche Use-Cases, die bereits vorher im Rahmen eines Forschungsprojektes erarbeitet wurden, weiter, basierend auf ihrer Plausibilität, eingegrenzt werden.

Für die ausgewählten Uses-Cases sollen dann anschließend energietechnische Berechnungen durchgeführt werden, um das Ladepotential aufzuzeigen.

Ebenso sollen noch simple elektrische Konzepte entwickelt werden, die darstellen, wie eine elektrische Versorgung der Fahrzeuge für die einzelnen Uses-Cases aussehen könnte.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Forschungsfrage	3
1.3	Vorgehensweise	3
2	Elektrische Versorgung am Zug	5
2.1	Aufbau des Bahnstrom Netzes	5
2.2	Lokomotive	8
2.3	Zugsammelschiene	10
2.4	Waggon	11
3	Mögliche Use Cases und energetische Betrachtungen	13
3.1	Einleitung	13
3.1.1	UC1-1 Verteilerzug	13
3.1.2	UC1-2 RoLa	14
3.1.3	UC2-1 Pendlerzug	14
3.1.4	UC2-2 Reisezug	14
3.1.5	UC2-3 Urlauberzug	15
3.1.6	UC2-4 Radzug	15
3.2	Auswahl der Use-Cases	15
3.3	Limitierungen	16
3.3.1	Elektrotechnisch	16
3.3.2	Mechanisch	17
3.3.3	Kosten	18
3.4	Rollende Landstraße (RoLa)	18
3.4.1	Vergleich Ladezeit zu Fahrzeit	21
3.5	Urlauberzug	22
3.5.1	Vergleich Ladezeit zu Fahrzeit	25
3.6	Verwendung der Batterien der Fahrzeuge	26
3.6.1	Nutzung als Quelle	26
3.6.2	Nutzung als zusätzlicher Speicher während Rekuperation	28
4	Elektrische Konzepte	33
4.1	Erste Version der Konzepte	33
4.1.1	Auswahl der Komponenten	33

4.1.2	Modularer Aufbau	34
4.1.3	DC Laden - PKW	35
4.1.4	AC Laden - PKW	36
4.1.5	DC Laden - LKW	37
4.2	Anpassungen der Konzepte	38
4.2.1	PKW - Update	40
4.2.1.1	DC Laden	40
4.2.1.2	AC Laden	41
4.2.1.3	Zusammenfassung	42
4.2.2	DC Laden LKW	44
4.2.3	Amortisationszeit	45
5	Zusammenfassung und Ausblick	47
	Literatur	49

Abbildungsverzeichnis

1.1	Emissionen der EU, Quelle: Europäische Umweltagentur	1
2.1	Oberleitungsspannungen in Europa, Quelle: Wikipedia [6]	6
2.2	Struktur des Bahnstromnetzes der ÖBB, Eigene Grafik, Daten aus [7]	7
2.3	Aufbau eines Stromabnehmers/Pantografen, Quelle: [11]	8
2.4	Blockschaltbild einer Vectron Lokomotive von Siemens, Quelle: <i>Siemens</i> [13]	9
2.5	Maximal zulässiger Strom über die Zugsammelschiene bei $U = 1000 \text{ V @ } 16.7 \text{ Hz}$, Quelle: [14]	11
3.1	Schematische Skizze des Use-Cases <i>RoLa</i> , Quelle: [4]	19
3.2	Ladezeit und verfügbare Ladeleistung in Abhängigkeit von der Temperatur, , Use-Case: <i>RoLa</i> mit einer Ladeleistung von 50 kW	21
3.3	Grobe Skizze des Uses-Cases <i>Urlauberzug</i> , Quelle: [4]	23
3.4	Ladezeit und verfügbare Ladeleistung in Abhängigkeit von der Temperatur, Use-Case: <i>Reisezug</i> mit einer Ladeleistung von 11 kVA	24
3.5	Ladezeit und verfügbare Ladeleistung in Abhängigkeit von der Temperatur, Use-Case: <i>Reisezug</i> mit einer Ladeleistung von 20 kW	25
4.1	DC Laden für PKW - Modulares Prinzip	34
4.2	DC Laden für PKW - nicht modular	35
4.3	AC Laden für PKW	37
4.4	DC Laden für LKW - Rollende Landstraße	38
4.5	DC Laden für PKW - nicht modular	40
4.6	AC Laden für PKW	41
4.7	DC Laden für LKW	44

Tabellenverzeichnis

2.1	Spannungsniveaus und Frequenzen verschiedener Oberleitungen, Quelle: [5]	6
4.1	Komponenten für das DC Laden - 20 kW	40
4.2	Komponenten für das AC Laden - 11 kW	41
4.3	Komponenten für das DC Laden - 50 kW	45
4.4	Komponenten einer Trafostation	45

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die europäische Union (EU) hat 2019 den *European Green Deal*[2] beschlossen, der das Ziel hat, Europa bis 2050 klimaneutral zu machen. In Abbildung 1.1 ist zu erkennen, dass der Inlandsverkehr, der einzige Bereich ist, dessen Emissionen im Verhältnis zum Referenzwert des Jahres 1990, gestiegen sind.

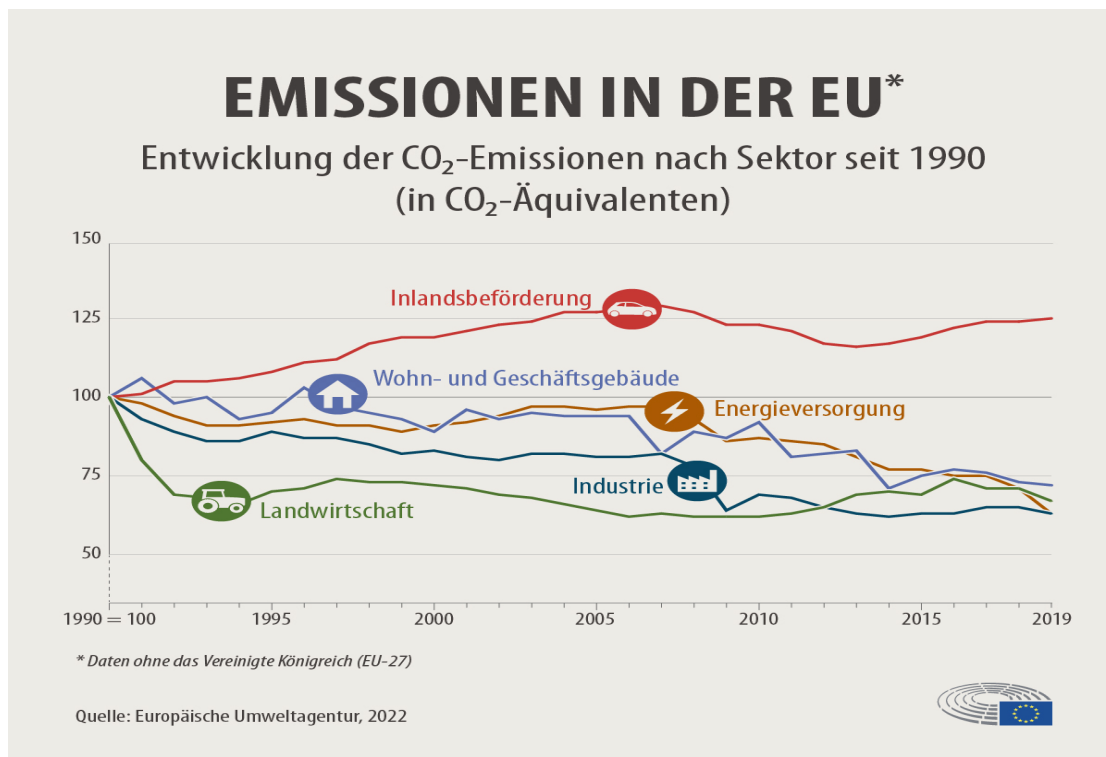


Abbildung 1.1: Emissionen der EU, Quelle: Europäische Umweltagentur

Laut der Daten der EU [2], macht der Verkehr ca. 25% der Gesamtemissionen innerhalb der EU aus. Daher ist dort auch ein großes Einsparungspotential vorhanden bzw. sind Reduktionen in diesem Bereich unbedingt nötig.

Um diese Reduktionen zu erreichen, liegt der Fokus der EU vor allem auf 2 Bereichen: Fahrzeuge mit einem Elektromotor erzeugen, indirekt durch Verwendung des verfügbaren Stromes, auch CO₂ Emissionen. Diese CO₂ Emissionen entstehen dadurch, dass bei der Erzeugung der elektrischen Energie durch fossile Energieträger (Kohle, Öl, Gas) CO₂ freigesetzt wird. Diese Emissionen werden dann, abhängig vom nationalen Strommix, den elektrischen Fahrzeugen zugerechnet. Dadurch haben elektrische Fahrzeuge auch indirekte Emissionen, obwohl sie selbst direkt keine erzeugen. Diese indirekten CO₂ Emissionen lassen sich dann über den Strommix zusammen mit dem Fahrzeugverbrauch berechnen:

$$Emission\left[\frac{g}{Pkm}\right] = Emission_{mix}\left[\frac{g(CO_2)}{kWh}\right] \cdot Verbrauch_{BEV}\left[\frac{kWh}{100 km}\right] \cdot \frac{1}{n} \quad (1.1)$$

wobei n für die Anzahl der Personen im Fahrzeug steht und Pkm für Personenkilometer. Dieser Wert gibt an wie viele Personen über eine Strecke transportiert werden.

So kommen PKWs mit Elektroantrieb auf indirekte, durchschnittliche, CO₂ Emissionen von $88.2 \frac{g}{Pkm}$, während ein Zug nur durchschnittliche Emissionen von $3.2 \frac{g}{Pkm}$ hat (Daten aus [3]). So wäre eine zusätzliche CO₂ Ersparnis möglich, wenn die Personen komplett auf den Zug umsteigen würden. Wenn jedoch nicht auf der gesamten Strecke eine Zugfahrt möglich ist, wäre eine Kombination der beiden Fortbewegungsvarianten sinnvoll.

Hier setzt das FFG-Projekt *Rail Charge - Automatisiertes Laden von Elektrofahrzeugen auf der Schiene als Enabler der E-Mobility* mit der Antragsnummer **39305736** an, welches das Realisierungs-Potential einer Kombination der Transportvarianten untersucht. Konkret geht es bei dem Projekt der *Technischen Universität Graz* darum, elektrische Fahrzeuge (E-LKW, E-Bike, E-PKW,...) auf die Schiene zu bringen und sie während der Fahrt automatisiert zu laden. Dabei werden vor allem drei Systemebenen betrachtet[4]

- Supersystem: Multimodale emissionsfreie Mobilität. Wie können verschiedene emissionsfreie Mobilitätsarten genutzt werden, um die Mobilität entlang einer gesamten Strecke, emissionsfrei zu machen?
- System: Fahrzeugwaggon. Wie kann die Beladung der Waggon mit Fahrzeugen verbessert/effizienter werden und wie können sie mit Strom versorgt werden?
- Subsystem: Fahrzeugschnittstelle: Wie kommt der Strom vom Waggon zum Fahrzeug?

Dazu wird der aktuelle Stand der Technik in diesen Bereichen untersucht, etwaige Verbesserungen erforscht und auf deren Realisierungspotential untersucht. Diese Masterarbeit wurde als Teil dieses Projekts entworfen und behandelt vorrangig das Subsystem Fahrzeugschnittstelle und die damit einhergehende Bereitstellung von elektrischer Energie an die Fahrzeuge.

1.2 Forschungsfrage

Ausgehend von den Vorarbeiten, die bereits vor Start der Masterarbeit im Projekt erfolgten, sollen die bisher erarbeiteten Use-Cases auf ihre Umsetzbarkeit überprüft werden. Für jene, bei denen eine Umsetzung am wahrscheinlichsten erscheint, sollen dann energetische Untersuchungen angestellt werden (wieviele Fahrzeuge können versorgt werden, Ladezeit,...) und auch grobe elektrische Konzepte erstellt werden.

1.3 Vorgehensweise

Zuerst wurde recherchiert, wie die Stromversorgung von Zügen aussieht und welche Komponenten es im Bahnstromnetz und am Zug für die elektrische Versorgung gibt. Das Ergebnis dieser Recherche ist in Kapitel 2 beschrieben.

Da es im Forschungsprojekt bereits Vorarbeiten gegeben hat und gewisse mögliche Anwendungsfälle/Use-Cases für das automatisierte Laden bereits entwickelt wurden, wurde anschließend durch Gespräche mit Experten aus der Bahn-Branche eruiert, welche davon das beste, unmittelbare, Realisierungspotenzial haben.

Für diese ausgewählten Use-Cases wurde dann energietechnische Untersuchungen angestellt, wie viele Fahrzeuge damit aufgeladen werden können und wie lange die entsprechenden Ladezeiten sind.

Diese Ergebnisse sind vor allem hinsichtlich einer wirtschaftlichen Betrachtung relevant und sind in Kapitel 3 zu finden.

Anschließend wurde noch für die in Kapitel 3 besprochenen Use-Cases Konzepte für die elektrische Versorgung am Waggon entwickelt. Diese Konzepte sind in Kapitel 4 zu finden.

2 Elektrische Versorgung am Zug

2.1 Aufbau des Bahnstrom Netzes

Die Versorgung elektrischer Bahnen erfolgt über die Oberleitung. Diese kann entweder über ein eigenes Bahnstromnetz versorgt werden, in dass eigene Bahnkraftwerke Strom einspeisen. Oberleitung und das Bahnstromnetz sind dann über Unterwerke verbunden, die die Transportspannung des Bahnstromnetzes (z.B. 110 kV in Österreich) auf die jeweilige Spannung der Oberleitung transformieren (z.B. 15 kV in Österreich).

Grund für dieses eigene Bahnstromnetz ist eine abweichende Frequenz vom öffentlichen Netz. So hat in z.B in Österreich und in Deutschland das Bahnstromnetz eine Frequenz von 16.67 Hz, während das öffentliche Netz eine Frequenz von 50 Hz hat.

In Ländern, wo die Züge mit der gleichen Frequenz wie das öffentliche Netz, betrieben werden, fällt dieses zusätzliche Bahnstromnetz weg. Dort kann eine direkte Einspeisung, über Umformwerke, aus dem öffentlichen Netz realisiert werden.

Die Eigenschaften der Stromversorgung (Nennspannung, AC oder DC, Frequenz) hängen vom jeweiligen Land und dem Einsatzgebiet ab, also ob es z.B. U-Bahnen versorgt oder Vollbahnen.

Tabelle 2.1 und Abbildung 2.1 geben einen beispielhaften Überblick über die jeweils verwendeten Spannungsarten und Spannungsniveaus in verschiedenen Ländern der Welt, mit Fokus auf europäische Länder. Die Daten der Tabelle stammen aus [5]

2 Elektrische Versorgung am Zug

Bahnstromsystem	Nennspannung	Beispiel
Gleichstrom	600 V	Straßenbahnen
	750 V	Straßenbahnen, U-Bahnen
	1200 V	Industriebahnen
	1500 V	Industriebahnen, Vollbahnen (F, NL)
	3000 V	Vollbahnen (CZ, E, I, PL, RUS,..)
Einphasenwechselstrom 16.7 Hz	11 kV	Schmalspurbahnen (CH)
	15 kV	Vollbahnen (A, CH, D, N, S)
Einphasenwechselstrom 25 Hz	12 kV	Vollbahnen (USA)
Einphasenwechselstrom 50/60 Hz	25 kV	Vollbahnen (CN, F, GB, HU, RO)

Tabelle 2.1: Spannungsniveaus und Frequenzen verschiedener Oberleitungen, Quelle: [5]

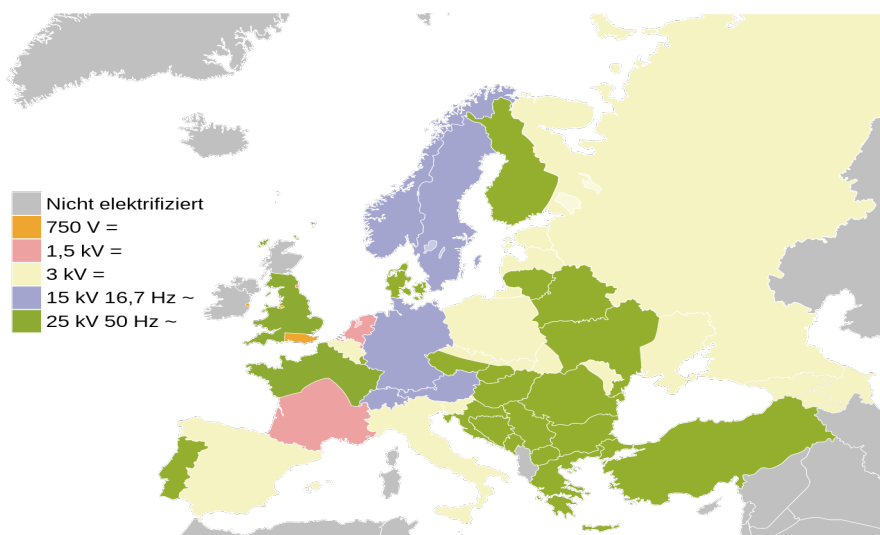


Abbildung 2.1: Oberleitungsspannungen in Europa, Quelle: Wikipedia [6]

In Österreich hat das Bahnstromnetz, wie bereits erwähnt, eine Spannung von 110 kV, die auf eine Spannung von 15 kV, für die Oberleitung, herunter transformiert wird. Die, von der Netzfrequenz abweichende, Frequenz von 16.67 Hz bzw. 16.7 Hz ist ein historisches Relikt, da es Anfangs des 20. Jahrhunderts noch Probleme mit den verwendeten Reihenschlussmotoren gab. Diese Motoren konnten nicht bei 50 Hz verwendet werden und dieses Problem konnte damals auch technisch nicht gelöst werden [5].

Daher entschied man sich für eine reduzierte Sonderfrequenz von 16.67 Hz, was einem Drittel der Netzfrequenz von 50 Hz entspricht.

Die Struktur des Bahnstromnetzes der ÖBB kann Abbildung 2.2 entnommen werden. Die Prozent Zahlen geben an, welcher Anteil der genutzten Energie, aus eigenen bzw. Partnerkraftwerken kommt und direkt in das 110 kV Bahnstromnetz eingespeist wird und welcher aus dem öffentlichen Netz bezogen wird.

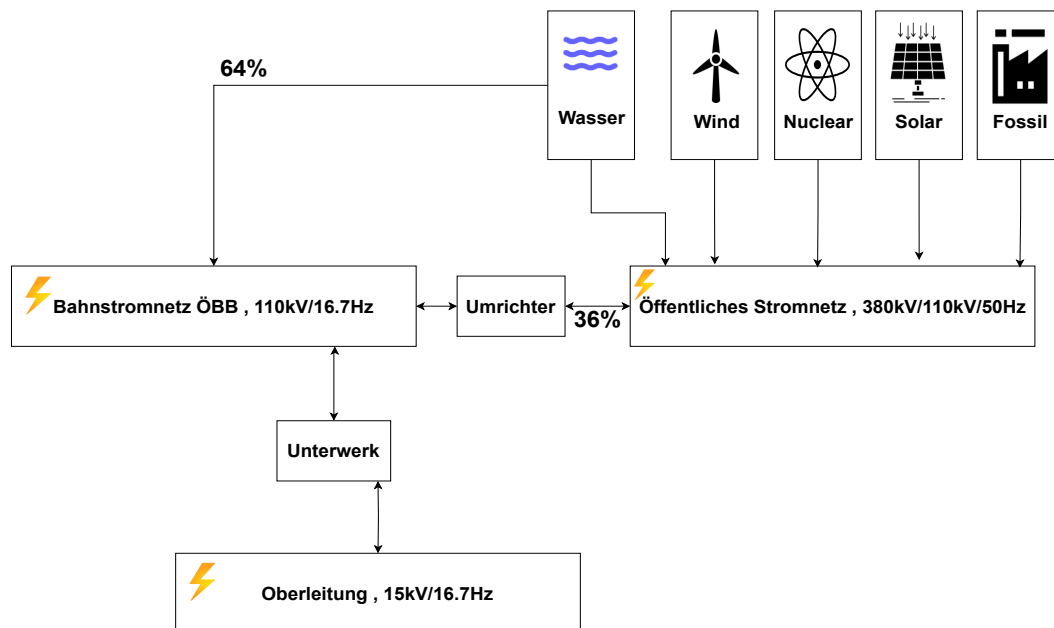


Abbildung 2.2: Struktur des Bahnstromnetzes der ÖBB, Eigene Grafik, Daten aus [7]

Die ÖBB setzen dabei auch sehr stark auf erneuerbare Energieträger, insbesondere Wasserkraft. So sind 96% der benutzten Energie aus Wasserkraft und die restlichen 4% zertifizierter Ökostrom. Auch hat die ÖBB selber nur Wasserkraftwerke, sodass die 64% der genutzten Energie, die direkt in das Bahnstromnetz eingespeist werden, rein aus Wasserkraft erzeugt werden. Auch alle Partnerkraftwerke, die dort einspeisen, sind Wasserkraftwerke [7].

Jedoch ist dadurch nicht zu 100% garantiert, dass jeder Strom, der von Zügen im Schienennetz der ÖBB benötigt wird, auch aus erneuerbaren Energieträgern stammt.

So wird das Schienennetz nicht nur von der ÖBB benutzt, sondern auch von der *WESTbahn* bzw. *WESTbahn Management GmbH* benutzt, die mit eigenen Zügen vor allem die Strecke Wien-Linz bedienen.

Seit der Liberalisierung des Bahnstrom-Marktes in Europa, ist es den Transportunternehmen, die das Schienennetz der ÖBB mitbenutzen, erlaubt, sich ihren Stromanbieter selber auszusuchen [8].

Vor dieser Liberalisierung war die ÖBB der einzige Strom Anbieter, der in ihr Bahnstromnetz einspeisen konnte.

Stand 2023 sind in Österreich 74% der Bahnstrecken elektrifiziert, wobei beim Personenverkehr bereits 90% der Fahrten rein elektrisch sind. Bis 2030 sollen, durch Ausbau der Strecken, 85% und bis 2035 89% aller Strecken in Österreich rein elektrisch sein[7][9].

Es gibt jedoch auch bereits erste Versuche, auf nicht elektrifizierten Strecken rein elektrisch zu fahren. Dabei werden Züge mit großen Batterien ausgestattet, die dann zur Energiebereitstellung für den Antrieb dienen [10].

2.2 Lokomotive

Das Verbindungsstück zwischen der Oberleitung und der elektrischen Lokomotive, ist ein Stromabnehmer, der über Schleifkontakte bzw. Schleifleisten Verbindung mit der Oberleitung hat. Dieser wird auch *Pantograph* genannt, da frühere Varianten eine Mechanik zum heben und senken benutzten, die einem technischen Zeichengerät, welches ebenso Pantograph bezeichnet wird, sehr ähnelten.

Die Abbildung 2.3 zeigt den Aufbau eines Pantographen, wie er bei Zügen des Modells ICE-3 von Siemens benutzt wird.

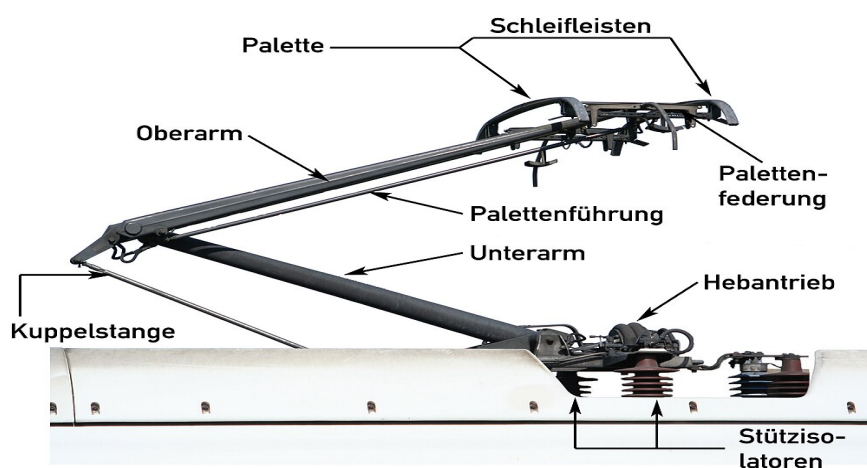


Abbildung 2.3: Aufbau eines Stromabnehmers/Pantographen, Quelle: [11]

Da elektrische Züge hohe Antriebsleistungen haben, die im MW (Megawatt) Bereich sein können (so hat z.B. eine *Railjet* Lok eine Antriebsleistung von bis zu 6.4 MW die sich gleichmäßig auf 4 Elektromotoren aufteilt[12]), müssen auch die Stromabnehmer für einen entsprechend hohen Strom ausgelegt sein. Elektrische Lokomotiven, die über Landesgrenzen eingesetzt werden, haben auch oftmals mehrere Pantographen. So müssen z.B. jene *Railjet* Züge, die zwischen Graz und Prag verkehren, zwei verschiedene Pantografen Systeme montiert haben. Einmal für das österreichische Netz (15 kV, 16.7 Hz) und dann für das tschechische Netz (25 kV, 50 Hz).

Die 15 kV der Oberleitung werden dann über einen Transformator auf eine niedrigere Spannung transformiert und dann über Stromrichter und Wechselrichter zu den Antriebsmotoren geführt. Bei den Transformatoren ist oftmals noch eine tertiäre Wicklung dabei, über die die Spannung der Zugsammelschiene (mehr dazu im folgenden Unterkapitel) bereitgestellt wird.

Abbildung 2.4 zeigt ein beispielhaftes Blockschaltbild einer elektrischen Lokomotive. Konkret handelt es sich dabei um eine Lokomotive der *Vectron* Modellreihe von *Siemens*, die hauptsächlich für den Güterverkehr benutzt wird.

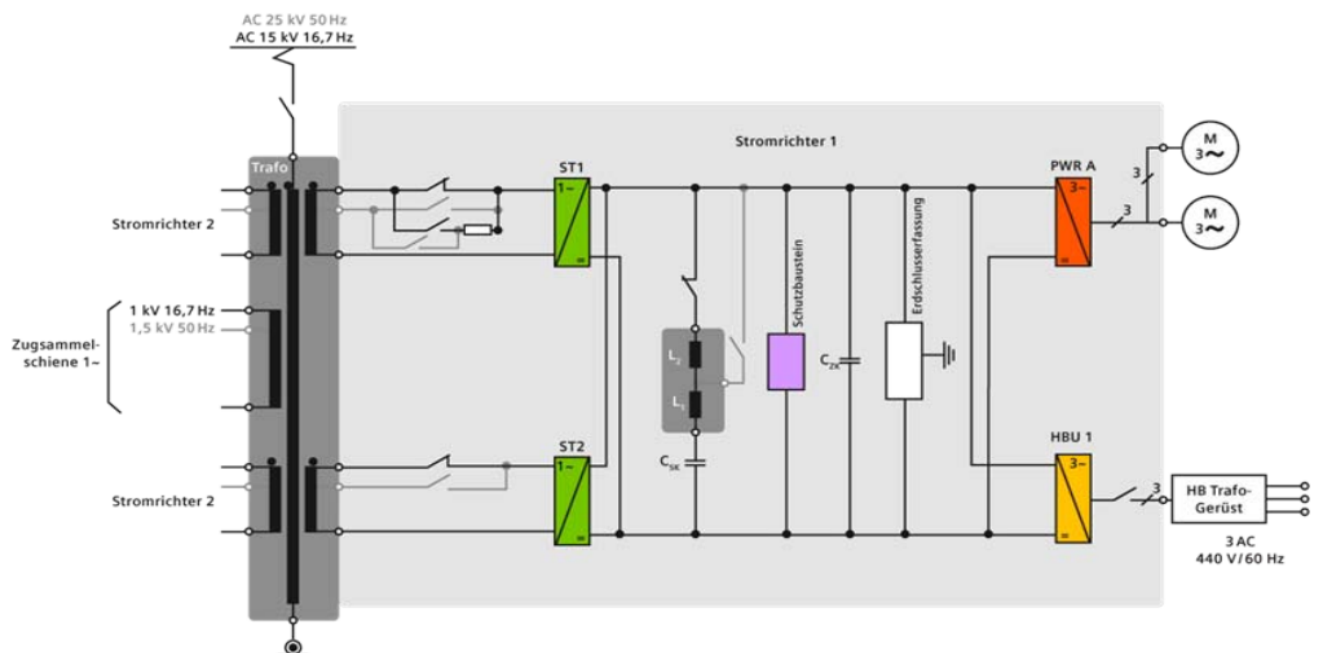


Abbildung 2.4: Blockschaltbild einer Vectron Lokomotive von Siemens, Quelle: *Siemens* [13]

2.3 Zugsammelschiene

Die Zugsammelschiene (ZS) ist das Verbindungsstück (aus elektrischer Sicht gesehen) zwischen der Lok und den Waggonen. Die ZS besteht aus Kabeln die durch den ganzen Zug geführt sind und die jeweiligen Waggonen mit Energie versorgen und wird technisch in der *UIC Norm 552*[14] beschrieben. Dort sind die Spannungsniveaus auf der ZS (in Österreich üblicherweise 1000 V @ 16.7 Hz), der Aufbau der Kupplungen und Kabel und auch die maximale Strombelastbarkeit angegeben.

Dadurch ergibt sich eine (theoretische) maximale Leistungsübertragung der ZS von 800 kVA. In der Realität ist die maximal übertragbare Leistung wesentlich geringer und abhängig von der Temperatur. Dieser Zusammenhang ist auch in der Abbildung 2.5 dargestellt. In dieser Abbildung ist der maximal zulässige Strom über die ZS dargestellt. Auf die entsprechende Leistung kommt man, indem man den Strom mit der Spannung der ZS multipliziert, die entsprechend in der Norm vorgegeben ist und 1000 V @ 16.7 Hz beträgt

$$P_{ZS} = I_{ZS} \cdot U_{ZS} = I_{ZS} \cdot 1000V \quad (2.1)$$

Während bei -10°C eine Belastbarkeit von 800 kVA gegeben ist, sinkt sie zum Beispiel bei 30°C auf nur mehr ca. 500 kVA. Diese Abhängigkeit ist für normale Reisezüge von wenig Bedeutung, da dort nicht viel Leistung pro Waggon benötigt wird. Sollen jedoch noch zusätzlich mehrere Elektrofahrzeuge geladen werden, kann schnell die Leistungsgrenze erreicht werden.

Daher ist eine Regelung der Leistung notwendig. Es wäre prinzipiell auch möglich, weniger Fahrzeuge bzw. Waggonen die Leistung benötigen an das Triebfahrzeug anzuhängen, jedoch ist das keine wirklich praktikable Lösung, da in einem Tunnel zum Beispiel eine erhöhte Temperatur herrscht[15].

Daher müsste von Beginn an, die Leistungsaufnahme (und damit die Anzahl an Waggonen) an die höchste zu erwartende Außentemperatur angepasst werden, was zu einer wesentlich geringeren Anzahl an Fahrzeugen führen würde. Eine Regelung der Leistung ist somit wesentlich praktikabler, wobei hier auch die thermische Trägheit vom Temperatursensoren berücksichtigt werden muss.

Ebenso eine Möglichkeit wäre es, den Ladevorgang in Tunneln prinzipiell zu unterbrechen und anschließend wieder fortzusetzen.

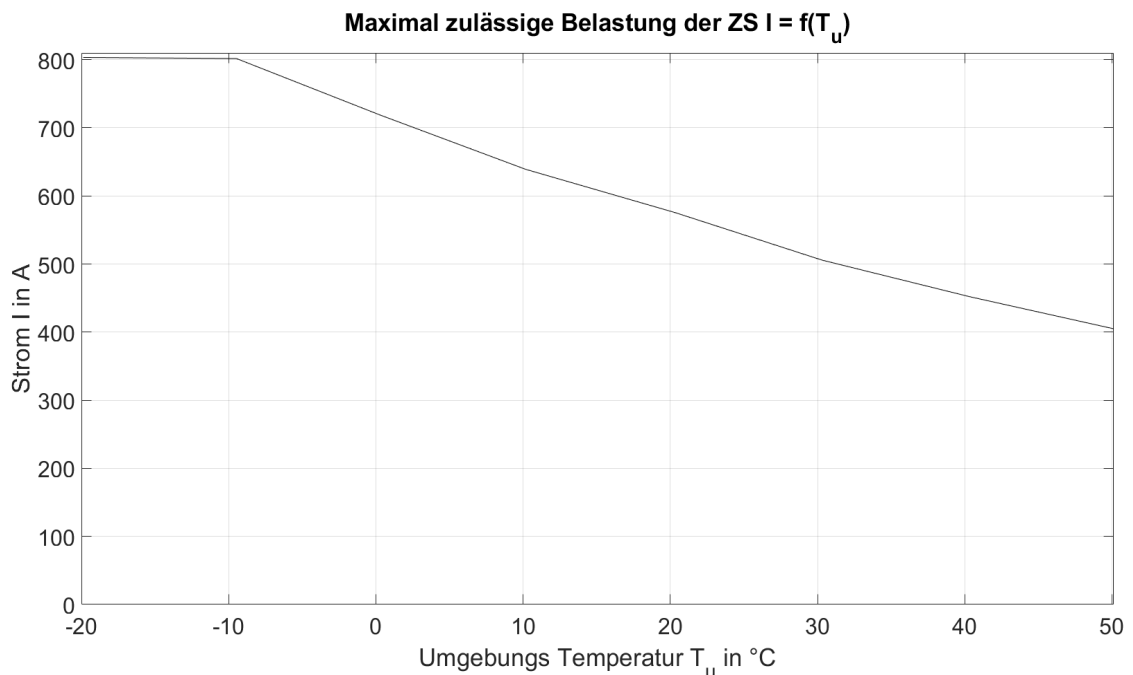


Abbildung 2.5: Maximal zulässiger Strom über die Zugsammelschiene bei $U = 1000 \text{ V @ } 16.7 \text{ Hz}$, Quelle: [14]

2.4 Waggon

Bisher existiert die Stromversorgung für Waggonen nur für Passagierwaggonen. Güterwaggonen (oder eben auch Waggonen für den Autotransport) sind aktuell noch komplett ohne etwaige elektrische Komponenten, da es dort bisher keinen Bedarf gegeben hat.

Jedoch hat es bereits erste Überlegungen gegeben, auch Güterwaggonen zu elektrifizieren um z.B. Kühlcontainer per Bahn transportieren können. So hat z.B. 2019 in der Schweiz ein Forschungsprojekt zur *“Energieversorgung von Güterwagen mittels Zugsammelschiene”* [16] des schweizerischen Bundesamt für Umwelt und einem Firmenpartner unter der Leitung der Wacosa AG gegeben, dass untersucht hat, wie man Kühleinheiten über die Zugsammelschiene mit Strom versorgen kann, sodass keine dieselbetriebenen Aggregate mehr nötig sind, unter anderem, wegen des dabei entstehenden Lärms.

Wie bereits erwähnt, gibt es Komponenten zur elektrischen Stromversorgung bisher nur für Passagierwaggonen. Das Verbindungsstück zwischen Zugsammelschiene und den elektrischen Verbräuchen im Waggon ist ein *Hilfsbetriebeumrichter* bzw. *Bordnetzumrichter*. Gängige Hersteller solcher Umrichter sind z.B. Siemens [17] oder Kiepe Electric Schweiz [18].

Diese Umrichter wandeln die Spannung der Zugschiene (1000 V mit 16.7 Hz in Österreich) in eine Spannung um, die von elektrischen Geräten an Bord (Klimaanlage, Sicherheitssysteme, Steckdosen für Passagiere, uvm.) genutzt werden kann. Meistens sind dies 400 V bei 50 Hz. Oftmals haben sie außerdem noch einen zusätzlichen DC-Ausgang, um On-Board Batterien zu laden. Diese Batterien dienen dazu, im Falle eines Stromausfalles, die Energieversorgung wichtiger Sicherheitssysteme am Zug aufrechtzuerhalten.

3 Mögliche Use Cases und energetische Betrachtungen

3.1 Einleitung

Wie bereits in Kapitel 1.1 erwähnt, ist diese Masterarbeit in das Forschungsprojekt *RailCharge* eingebunden. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes, wurden bereits vor Beginn dieser Masterarbeit mögliche Use-Cases erarbeitet. Die resultierenden Use Cases (UC) sind[4]

- UC1-1 Verteilerzug.
- UC1-2 RoLa (Rollende Landstraße)
- UC2-1 Pendlerzug
- UC2-2 Reisezug
- UC2-3 Urlauberzug
- UC2-4 Radzug

Folgend eine kurze Erklärung zu den einzelnen Use-Cases

3.1.1 UC1-1 Verteilerzug

Verteilerzüge als solche existieren noch nicht. Die Idee dahinter ist, dass Klein LKWs, die nur kleine Lasten transportieren können und keine große Reichweite haben als *Last Mile* Transport benutzt werden.

Dazu sollen sie zwischen Städten auf dem Zug transportiert werden (und währenddessen die Batterien aufgeladen werden) und dann nur innerhalb der Städte ihre Waren/Güter an den jeweiligen Zielort bringen.

3.1.2 UC1-2 RoLa

RoLa steht für *Rollende Landstraße* und bezeichnet als solches, den bereits existierenden, Transport von LKWs auf der Schiene (z.B. in Österreich durch die ÖBB [19]).

Dabei werden, im Gegensatz zu den Verteilerzügen, nicht (nur) Klein LKWs transportiert, sondern auch mittelschwere oder schwere LKWs, die entsprechend mehr Güter transportieren und mehr Reichweite haben.

Die RoLa soll vor allem dazu dienen, Güter zwischen Ländern zu transportieren, wo das Ziel des Transportes auch unter Umständen sich nicht in der selben Stadt wie der Bahnhof befindet.

3.1.3 UC2-1 Pendlerzug

Der Pendlerzug zielt vor allem auf Pendler ab, die den Weg zwischen Wohnort und Arbeitsplatz mit dem privaten PKW zurücklegen.

Wenn die Fahrzeuge während der Fahrt aufgeladen werden (wenn auch nur teilweise, weil die Fahrten eher kurz wären), könnte das die Akzeptanz für E-Autos erhöhen, vor allem bei Leuten die in ländlicheren Gegenden wohnen, wo die Ladestruktur nicht gut ausgebaut ist. Auch sollen so die Zufahrtsstraßen/Autobahnen entlastet werden, da dadurch weniger PKWs gleichzeitig in die Städte unterwegs sind.

3.1.4 UC2-2 Reisezug

Dieser Use-Case zielt auf eine Erhöhung der Reichweite im Personenfernverkehr ab (im Gegensatz zum Pendlerzug, der eher den Nahverkehr betrifft). Personen, die eine Reise antreten, könnten so mehr Ziele erreichen. Dazu gehören auch solche, die nicht per Bahn erreichbar sind.

3.1.5 UC2-3 Urlauberzug

Sehr ähnliche grundlegende Motivation wie der Reisezug, jedoch wäre hier eher eine saisonale Konzentration zu beliebten Urlaubszielen vorgesehen. Dies würde ebenso zu einer erhöhten Reichweite an der Urlaubsdestination führen und würde auch den Gepäcktransport für die Reisenden erleichtern, da Gepäckstücke im PKW bleiben können und nicht extra in den Zug mitgenommen werden müssen.

3.1.6 UC2-4 Radzug

Dieser Use-Case zielt auf Urlauber ab, die gerne ihr E-Bike in den Urlaub mitnehmen möchten. Das könnten z.B. Tagesurlauber sein, die aus den Städten auf das Land fahren und eine Radtour unternehmen möchten. Dann könnten sie ihr E-Bike auf dem Hinweg laden und auf dem Rückweg die leeren Batterien wieder aufladen.

Da E-Bikes weniger Platz brauchen als PKWs, existiert es die Überlegung, sie nicht auf einem extra Waggon zu transportieren (wie in den Use-Cases mit PKW bzw. LKW), sondern die E-Bikes direkt in den Passagierwaggons über Steckdosen aufzuladen. Manche Zug Garnituren haben ohnehin bereits Bereiche die für Radstellplätze vorgesehen sind. Diese könnten dann noch zusätzlich mit Steckdosen nachgerüstet werden.

3.2 Auswahl der Use-Cases

Die soeben erwähnten Use-Cases wurden nach verschiedenen Faktoren bewertet:

- CO² Reduktions-Potential
- Ressourcen Einsparungspotential, Nutzungs-Potential bzw. Frequentierung
- Verkehrsanteil
- Umweltwirkung

Aufgrund dieser Bewertungen, wurden dann im Rahmen der vorliegenden Masterarbeit zwei Use-Cases für weitere Bearbeitungen (energetische Betrachtungen und Erstellung eines Konzeptes für die elektrotechnische Versorgung am Waggon) ausgewählt.

Diese Auswahl erfolgte in Gesprächen zusammen mit Experten aus der Bahnbranche, allen voran *Alexander Schimanofsky* von der Firma *RCC (Railway Competence And Certification GmbH)* aus Graz und *Stefan Erhard* von der Firma *Kiepe Electric Schweiz A.G* (Teil der *Knorr Bremse Gruppe*).

RCC GmbH [20] ist eine Firma, die vor allem für die Zertifizierung von neuen Bauteilen im Bahnbereich zuständig ist und daher gut abschätzen kann, welche Konzepte am ehesten realisiert werden können bzw. wo eine Zertifizierung am wahrscheinlichsten ist.

Kiepe Electric Schweiz A.G[21] wiederum ist ein Komponenten Hersteller im Bahnbereich (unter anderem Boardnetzumrichter für die Verbindung zwischen Zugsammelschiene und Waggon, wie bereits in Kapitel 2.4 kurz erwähnt) und haben daher einen guten Überblick, was bereits an Bauteilen existiert oder bei welchen es am realistischen erscheint, dass diese im Bahnbereich eingesetzt werden könnten.

Aufgrund dieser Gespräche wurden folgende Use-Cases ausgewählt:

- *RoLa*
- *Urlauberzug* (wobei sich sämtliche Überlegungen für den *Urlauberzug* auch problemlos auf den Use-Case *Reisezug* übertragen ließen)

Zusätzlich wurden Limitierungen (vor allem in technischer Hinsicht) der jeweiligen Use-Cases erarbeitet, die im folgenden Kapitel behandelt werden.

3.3 Limitierungen

3.3.1 Elektrotechnisch

Aus elektrotechnischer Sicht gibt es 2 besonders wichtige Faktoren, die sich limitierend auf die verfügbare Ladeleistung auswirken.

Ein wichtiger Faktor ist die Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV). Wäre die elektromagnetische Störstrahlung, welche von der benötigten Leistungselektronik ausgeht, zu hoch, könnten Signale der Leit- und Sicherungstechnik (LST) beeinflusst werden. Die LST ist unter anderem dafür zuständig, dass Weichen und Ampeln der Bahnanlagen richtig geschaltet werden. Ein Fehler könnte zu schwerwiegenden Unfällen führen.

Die dafür nötigen Grenzwerte sind in der Normenreihe *EN 50121-x*[22] beschrie-

ben. Jede verwendete Leistungselektronik muss unbedingt die vorgegebenen Grenzwerte einhalten.

Der zweite wichtige Faktor ist die Energieversorgung der Waggonen an sich. Das betrifft insbesondere die Limitierung der, über die Zugsammelschiene übertragbaren, Leistung, wie in Kapitel 2.3 beschrieben. Da diese von der Temperatur abhängig ist, wird auch durch die Temperatur vorgegeben, wie viele Fahrzeuge geladen werden können bzw. mit welcher Leistung.

3.3.2 Mechanisch

Die größte Limitierung von der mechanischen Seite her, ist das Packaging der Leistungselektronik, also ihre Größe. Geplant ist, dass die Komponenten auf der Unterseite der Ladefläche befestigt werden und den Raum zwischen Unterseite und Schiene als Platz nutzen. Dieser Platz ist jedoch auch durch Normen beschränkt, insbesondere der Norm *UIC 571-4*[23] und *EN 15273-2*[24]. Wenn zum Beispiel ein Wagen der Bauart, wie in der Norm *UIC 571-4* beschrieben, verwendet wird, dann würde (nach abziehen von Vorgaben wie dem minimalen Abstand zur Schiene und dem Platz den die Radkästen benötigten) ein Volumen von ca. 1 m in der Höhe, ca. 3 m in der Breite und 12,5 m in der Länge übrig bleiben. Es muss also daher darauf geachtet werden, dass sämtliche Komponenten mitsamt Verkabelung dort Platz haben.

Ein anderer wichtiger Aspekt ist noch die Kühlung der Bauteile. Da es nicht möglich bzw. wirtschaftlich ist, extra Flüssigkeitsleitungen durch den ganzen Zug und zu jedem Waggon zu legen, ist darauf zu achten, dass alle Komponenten passiv über Kühlrippen, beziehungsweise aktiv über Ventilatoren gekühlt werden.

3.3.3 Kosten

Auch wenn die Kosten bei der theoretischen Betrachtung und Konzeptentwicklung der Use-Cases keine vorrangige Rolle gespielt hat, ist es trotzdem wichtig, etwaige Kosten (soweit es möglich ist) zu berücksichtigen.

Bahnunternehmen haben im allgemeinen keine hohen Gewinnspannen. So hatten z.B. die ÖBB im Jahre 2022 einen Gewinn vor Steuer von 193 Millionen Euro bei Gesamterträgen von 7398 Millionen Euro, also ca. 2.6 % [25].

Daher müssen solche Investitionen, wenn es in die Serienfertigung geht, eine kurze Amortisationszeit haben. Ein Prototyp, basierend auf den Konzepten und Überlegungen des Forschungsprojekts, sollte daher aufzeigen, dass eine Serienfertigung für das Bahnunternehmen wirtschaftlich ist.

3.4 Rollende Landstraße (RoLa)

Als erstes soll der Use-Case *RoLa* untersucht werden. Die Überlegung dahinter ist, dass E-Lkws, anstatt weite Strecken auf der Straße zurücklegen, auf dem Zug mitfahren und währenddessen aufgeladen werden.

Die RoLa ist ein Konzept, das es, bereits gibt und in Österreich auch aktiv genutzt wird. Vor allem auf wichtigen Transitstrecken, wie etwa über den Brenner, wird es von der ÖBB eingesetzt. Dazu verkehren täglich bis zu 80 Züge mit insgesamt 1600 Stellplätzen, was eine Kapazität von 20 LKWs pro Zug ergibt. Jedoch gibt es bei den bisherigen Varianten noch keine Möglichkeiten, einen E-LKW während der langen Fahrzeit aufzuladen.

Das ist der Punkt wo das Projekt *RailCharge* mögliche Änderungen und Verbesserungsvorschläge aufzeigen will.

Dieses Konzept hätte mehrere Vorteile gegenüber dem Transport auf der Straße:

- Die Fahrer der LKWs müssen nicht die gesamte Strecke selber fahren und würden somit eine Ruhezeit während der Fahrt haben.
- Die Logistikunternehmen/Spediteure können sich die Zeit zum Aufladen der Elektro LKWs sparen, da sie die LKWs nur soweit aufladen müssten, dass sie zum Verladeterminale der RoLa kommen.
Die restliche Ladung würde dann während der Fahrt aufgeladen werden.
- Mit einem Zug können bis zu 20 (oder eventuell sogar mehr) LKWs transportiert werden, die dafür nicht auf der Straße fahren müssten. Dies würde zu einer Verbesserung der Verkehrssituation auf den betreffenden Transitstraßen führen.

Abbildung 3.1 zeigt einen schematischen Entwurf, wie das System prinzipiell aussehen könnte. Dabei zeigen die Pfeile den ungefähren Energiefluss an. Die grünen Pfeile geben die "Quellen" an und die roten Pfeile die "Verbraucher".

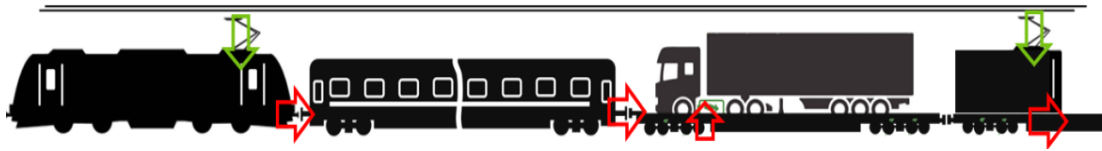


Abbildung 3.1: Schematische Skizze des Use-Cases *RoLa*, Quelle: [4]

Was sich in der Abbildung befindet und noch nicht erwähnt wurde, ist der Waggon, der in der Abbildung am rechten Rand ist. Dabei handelt es sich um einen Waggon, der mit einem zusätzlichen Pantografen und Transformator ausgestattet ist.

Dieser wäre nötig, wenn man eine größere Menge an LKWs aufladen will. Geht man von einer Ladeleistung für LKWs von 50 kW aus und einer maximalen übertragbaren Leistung der ZS von 800 kVA (sprich bei idealer Temperatur von weniger als -10°C , siehe Abbildung 2.5) kommt man zur folgenden Anzahl von LKWs, die gleichzeitig aufgeladen werden könnten:

$$n_{LKW} = \left\lfloor \frac{P_{ZS}}{P_{lade}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{800 \text{ kVA}}{50 \text{ kW}} \right\rfloor = 16 \text{ LKW} \quad (3.1)$$

Die 50 kW Ladeleistung wurde so gewählt, dass die LKWs in einer angemessenen Zeit aufgeladen werden. Ein gängiges Model von E-LKWs wäre z.B. das Model *eActros* von *Mercedes-Benz Trucks*, das eine Akku Kapazität von 400 kWh hat [26]. Mit 50 kW braucht es in etwa 8 Stunden für eine Ladung (in der Realität etwas weniger, da Akkus meist nur zwischen 10% und 90% aufgeladen werden). Wäre die Ladeleistung jedoch geringer, wie z.B. beim Urlauberzug wo 11 kVA respektive 20 kW ausgewählt wurden, wäre auch die Ladezeit wesentlich höher und es wäre unwahrscheinlich, dass der LKW während einer Zugfahrt genügend Ladung bekommen würde.

Um nun alle 20 LKWs zu versorgen, bräuchte man also einen zusätzlichen Waggon mit Pantograf und Transformator, der eine zusätzliche Zugsammelschiene versorgt, die nicht mit jener verbunden ist, die vom Triebfahrzeug versorgt wird (mehr dazu in Kapitel 4.1.5 bzw. 4.2.2)

Für die folgenden Berechnungen wurden jedoch noch zusätzliche einschränkende Bedingungen gewählt:

- Die Umgebungstemperatur wurde nicht mit dem ideal Wert von -10°C oder kleiner angenommen, sondern mit einem realistischeren Wert von 20°C angenommen. Dadurch sinkt die maximal übertragbare Leistung, nach Abbildung 2.5, von 800 kVA auf ca 575 kVA.
- Auch der Wirkungsgrad des Umrichters hat einen Einfluss auf die maximale Anzahl von Waggonen die versorgt werden können. So hat z.B. der Umrichter von *Kiepe Electric Schweiz A.G.* [27] einen Wirkungsgrad von 85%. Dadurch ergibt sich eine effektive maximale Leistung der ZS von $P_{ZS,eff} = P_{ZS} \cdot \eta_{umrichter} = 575 \text{ kVA} \cdot 0.85 = 460 \text{ kVA}$
- Weiters muss noch der Wirkungsgrad des Ladevorgangs selbst, der 90% beträgt [28], mitberücksichtigt werden.
Dadurch ergibt sich eine verringerte Ladeleistung am Fahrzeug, die entsprechend die Ladedauer erhöht.

Dadurch ergibt sich für die maximale Anzahl gleichzeitig aufzuladender LKWs

$$n_{LKW} = \left\lfloor \frac{P_{ZS}}{P_{lade}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{460 \text{ kVA}}{50 \text{ kW}} \right\rfloor = 9 \text{ LKW} \quad (3.2)$$

Hier wurden weiterhin für die Rechnung die 50 kW genommen, da es sich um die gewünschte Ladeleistung handeln soll und nicht um die Leistung, die tatsächlich am Fahrzeug ankommt. Diese lässt sich wie folgt berechnen:

$$P_{lade,real} = P_{lade} \cdot \eta_{laden} = 50 \text{ kW} \cdot 0.9 = 45 \text{ kW} \quad (3.3)$$

Abbildung 3.2 zeigt die entsprechenden Verläufe für die Ladezeit für einen SoC (State of Charge, Ladestand der Batterie) 0%-100% und 10%-90%. Die Berechnungen der Ladezeit beruhen auf der Kapazität eines *eActros*, der eine Kapazität von 400 kWh hat.

Die orange Linien stellen die Ladeleistung dar. Die durchgehend orange Linie stellt die wirkliche Ladeleistung da, die durch die Auswahl der Ladesäulen und deren Leistung limitiert wird. Die strichlierte orange Linie stellt die Ladeleistung dar, die theoretisch für die oben berechnete Anzahl an Fahrzeugen an der Zugsammelschiene, pro Fahrzeug, zur Verfügung steht. Die Differenz zwischen den beiden Linien stellt ein Merkmal für die noch verfügbare, ungenutzte Leistung dar. Alle Plots sind immer in Abhängigkeit von der Außentemperatur.

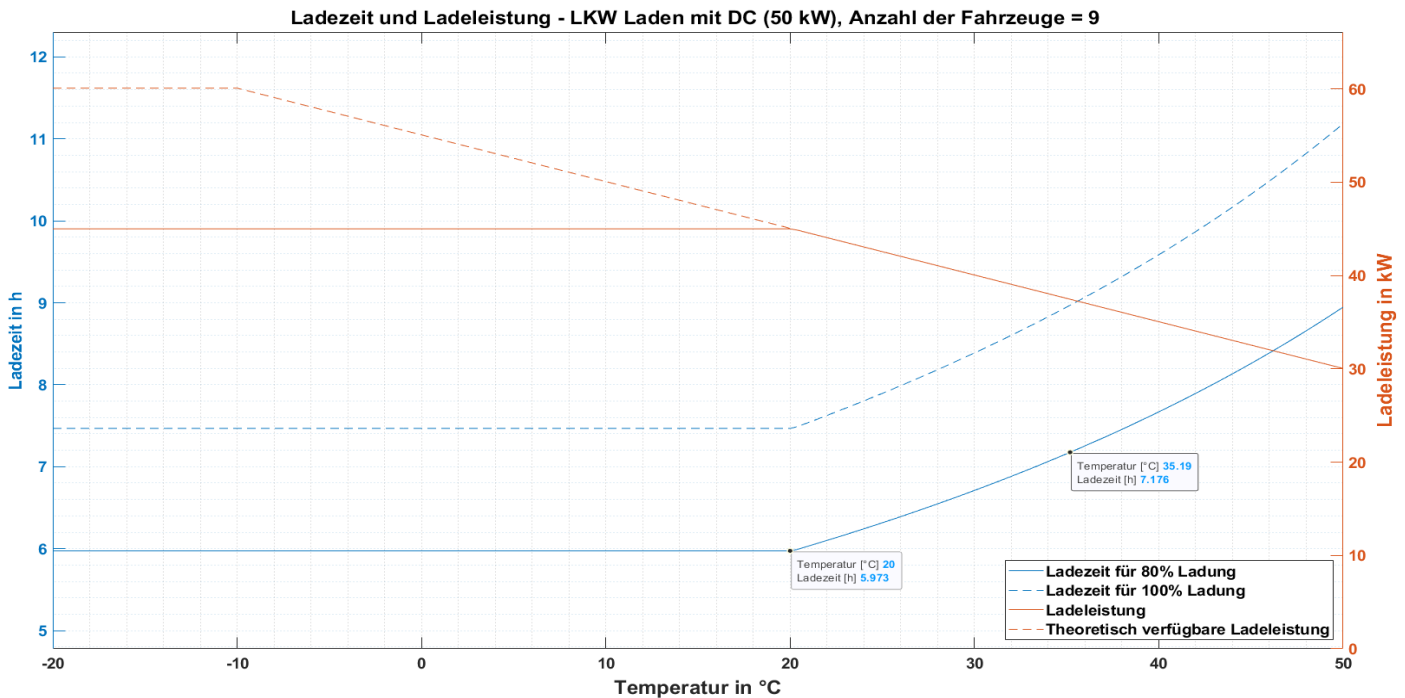


Abbildung 3.2: Ladezeit und verfügbare Ladeleistung in Abhängigkeit von der Temperatur, ,
Use-Case: RoLa mit einer Ladeleistung von 50 kW

3.4.1 Vergleich Ladezeit zu Fahrtzeit

Aus der Abbildung 3.2 lassen sich folgende Ladezeiten ablesen:

- Bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C ergibt sich eine berechnete Ladezeit von ca. 6 Stunden für eine Ladung von 10% bis 90%.
- Wenn es wärmer wird, z.B. die Umgebungstemperatur 35 °C beträgt, beträgt die Ladezeit schon ca. 7.1 Stunden.

Um zu beurteilen, ob die Ladezeiten ausreichend sind, müssen sie mit der Dauer einer Fahrt auf einer RoLa-Strecke verglichen werden. Dafür wird die, von den ÖBB befahrene Strecke, Wels-Maribor betrachtet. Laut den Zeitplänen [29], beträgt die Fahrzeit dort in etwa 8 Stunden für die Richtung Maribor→Wels bzw. 6 Stunden für die Richtung Wels→Maribor. Grund für diese Differenz in den Fahrzeiten sind Grenzkontrollen, wenn man von Slowenien nach Österreich einreist [30].

Wenn nun die Fahrzeit mit der Ladezeit verglichen wird, ist ersichtlich, dass die Fahrzeit nur knapp ausreicht, um einen LKW zu laden oder falls es wärmer wäre, die Fahrzeit zu kurz wäre, um die Batterie von 10% auf 90% aufzuladen. Auch auf den anderen Strecken, auf denen es in Österreich ein RoLa Angebot gibt (Wörgl-Brenner und Wörgl-Trentino) würde es sogar zu einer noch größeren Diskrepanz zwischen Ladezeit und Fahrzeit kommen, da diese kürzer sind als die Strecke Wels-Maribor (zumindest wenn man die Fahrzeiten des Personenverkehrs auf den selben Strecken untereinander vergleicht).

Daher kann man auf diesen Strecken nur eine vollständige Ladung bei kleineren LKWs erreichen, die auch eine entsprechend kleinere Batterie haben.

Bei großen LKWs muss entweder eine nicht vollständig geladene Batterie in Kauf genommen werden oder sie können nur auf längeren Strecken eingesetzt werden. Da es, zumindest vonseiten der ÖBB, noch keine längeren Strecken im Angebot gibt, müssen diese Probleme noch berücksichtigt werden.

3.5 Urlauberzug

Der zweite Use-Case der genauer betrachtet wurde, ist der Use-Case *Urlauberzug*. Bei diesem Use-Case ist die Überlegung dahinter, PKWs (im Gegensatz zu den LKWs, die bei der *RoLa* verwendet wurden) aufzuladen während sie per Zug transportiert werden.

Ebenso wie bei der *RoLa*, gibt es Autozüge bereits, wobei das Angebot hierbei noch sehr beschränkt ist. Aktuell existieren, wenn man nur das Angebot der ÖBB berücksichtigt, nur Verbindungen zwischen Wien, Villach, Feldkirch und Graz, da dort die einzigen Verladestationen für Autozüge existieren. Ebenso gibt es erweiterte Verbindungen (in Kooperation mit den entsprechenden nationalen Bahnunternehmen) nach Zürich in der Schweiz und Split in Kroatien [31]. All diese Autozug Verbindungen existieren nur als *Nightjet* Angebot (sprich immer über Nacht, da die Strecken entsprechend lange sind).

Die Idee von *Rail-Charge* ist es, sich diese langen Ladezeiten zunutze zu machen und währenddessen das E-Auto aufzuladen. Dadurch würde ein (noch) großer Nachteil der E-Autos gegenüber Autos mit Verbrenner Antrieb, nämlich die langen Ladenzeiten gegenüber kurzen Zeiten, die zum Tank auffüllen benötigt werden, zumindest teilweise wegfallen.

Dies könnte zu einer höheren Attraktivität für E-Autos und Autozügen führen. Auch die Reichweiten Erhöhung der E-Autos wäre ein großer Vorteil dieses Konzepts.

In Abbildung 3.3 ist ein schematischer Entwurf für einen möglichen elektrifizierten Urlauberzug zu sehen. Wie bereits in Abbildung 3.1, zeigen die Pfeile schematisch die Verbraucher an.

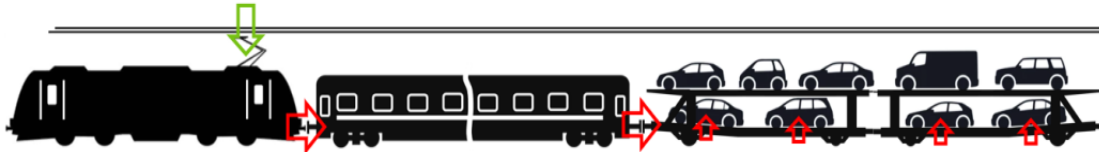


Abbildung 3.3: Grobe Skizze des Uses-Cases *Urlauberzug*, Quelle: [4]

Bei einem reinen PKW Transport könnten auch mehrere Fahrzeuge pro Waggon versorgt werden, da dort die Ladeleistungen geringer sind. So wurden zwei verschiedene Ladearten entwickelt:

- Niedrige Ladeleistung - 11 kVA AC pro Ladepunkt
- Mittlere Ladeleistung - 20 kW DC pro Ladepunkt

Nähere Erklärungen der einzelnen Konzepte so wie ihre Vor- und Nachteile folgen in Kapitel 4.

Es wurde auch überlegt, die Ladeleistung der RoLa mit 50 kW DC für den PKW Fall zu verwenden. Jedoch wurde davon abgesehen, da es, aufgrund der geringeren Kapazität der Batterien in PKWs, verglichen mit denen von LKWs, sinnvoller ist, mehrere Fahrzeuge gleichzeitig zu laden, anstatt ein Fahrzeug schneller zu laden. So hat z.B. ein *Tesla Model Y* nur eine Kapazität von 79 kWh [32] gegenüber der Kapazität eines *eActros* mit 400 kWh. Eine Ladeleistung von 50 kW würde eine 79 kWh Batterie in

$$t_{lade} = \frac{79 \text{ kWh}}{50 \text{ kW}} = 1.58 \text{ h} \quad (3.4)$$

aufladen. Da jedoch Reisezüge wesentlich länger unterwegs sind als nur ca. 1.5 Stunden, kann dort auch eine entsprechend geringere Ladeleistung ausgewählt werden.

So können auf den Waggons für PKWs bis zu 6 Fahrzeuge gleichzeitig versorgt werden, gegenüber einem einzigen LKW. Auch ist für diesen Use-Case keine zusätzliche Pantografen Einheit geplant, da mit der Leistung der ZS bereits genug Fahrzeuge versorgt werden können.

Für diesen Use-Case gelten die gleichen einschränkenden Bedingungen wie für den Use-Case *RoLa* bezüglich Leistung der ZS und den einzelnen Wirkungsgraden, da der selbe Umrichter verwendet wird. Jedoch ändert sich die Anzahl der maximal ladbaren Fahrzeuge, da die Ladeleistung geringer ist.

3 Mögliche Use Cases und energetische Betrachtungen

So können bei 11 kVA AC,

$$n_{PKW,11} = \left\lfloor \frac{P_{ZS}}{P_{lade}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{460 \text{ kVA}}{11 \text{ kVA}} \right\rfloor = 41 \text{ PKW} \quad (3.5)$$

und bei 20 kW DC

$$n_{PKW,20} = \left\lfloor \frac{P_{ZS}}{P_{lade}} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{460 \text{ kVA}}{20 \text{ kW}} \right\rfloor = 23 \text{ PKW} \quad (3.6)$$

geladen werden.

Ebenso ist auch die Ladeleistung, die effektiv vom Fahrzeug genutzt werden kann, durch den Wirkungsgrad des Ladevorgangs beschränkt. Bei 11 kVA kommt man somit auf

$$P_{lade,real} = P_{lade} \cdot \eta_{laden} = 11 \text{ kVA} \cdot 0.9 = 9.9 \text{ kVA} \quad (3.7)$$

und bei 20 kW auf

$$P_{lade,real} = P_{lade} \cdot \eta_{laden} = 20 \text{ kW} \cdot 0.9 = 18 \text{ kW} \quad (3.8)$$

Die Abbildungen 3.4 und 3.5 respektive zeigen die Ladezeiten und Ladeleistungen für die unterschiedlichen Varianten der gewählten Ladeleistung in Abhängigkeit von der Außentemperatur.

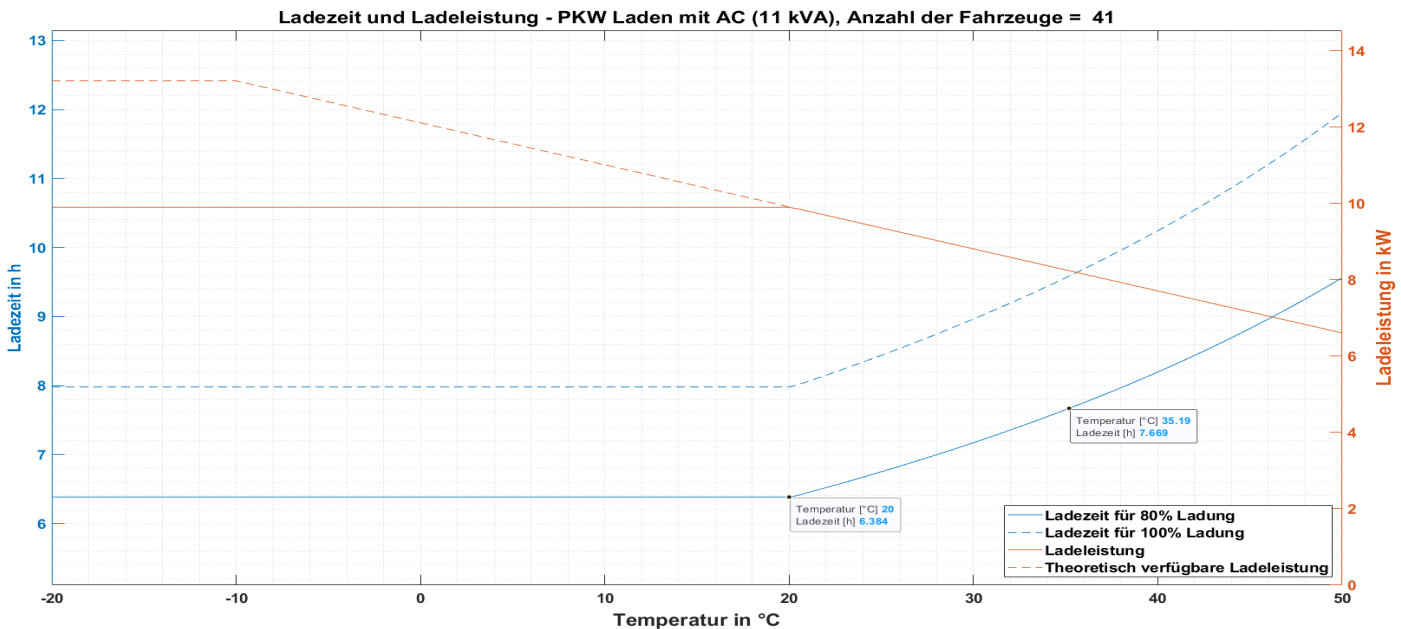


Abbildung 3.4: Ladezeit und verfügbare Ladeleistung in Abhängigkeit von der Temperatur, Use-Case: Reisezug mit einer Ladeleistung von 11 kVA

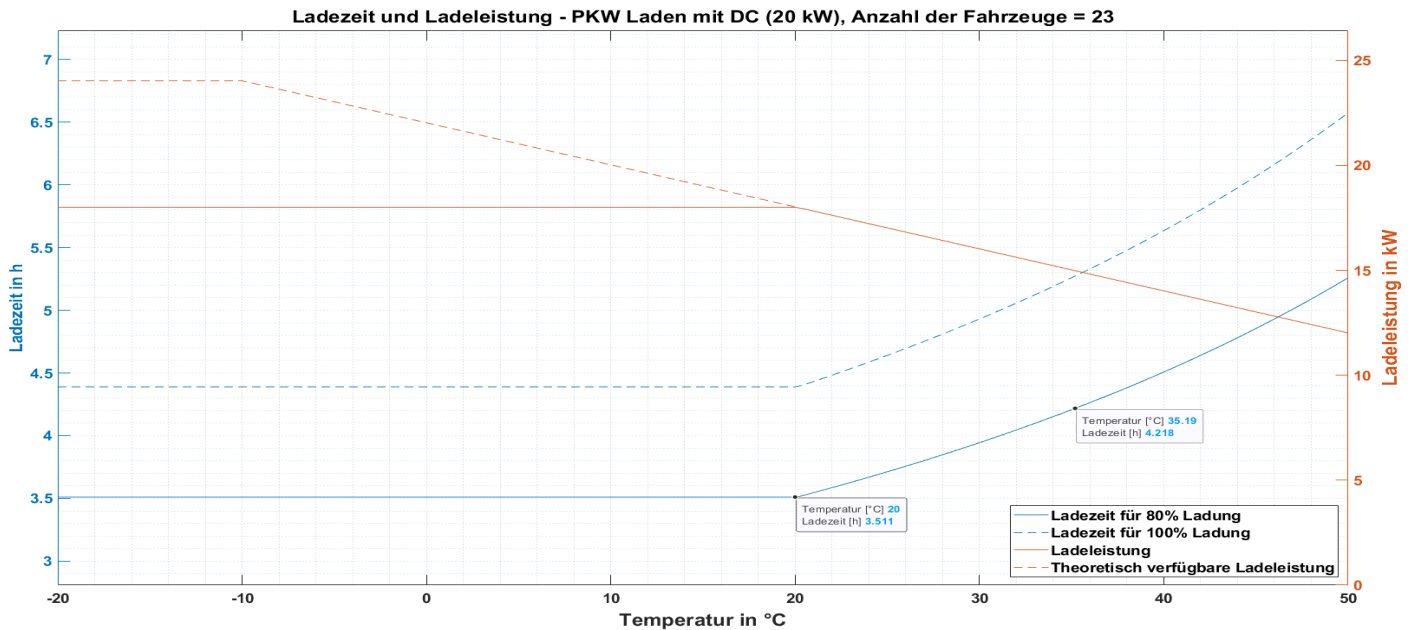


Abbildung 3.5: Ladezeit und verfügbare Ladeleistung in Abhängigkeit von der Temperatur, Use-Case: Reisezug mit einer Ladeleistung von 20 kW

3.5.1 Vergleich Ladezeit zu Fahrzeit

Wie bei dem Use-Case RoLa, können für den Urlauberzug ebenso aus den Diagrammen für die Ladezeit (Abbildung 3.4 und 3.5), die entsprechenden Ladezeit für 20°C und 35°C herausgelesen werden:

- Ladeleistung: 11 kVA
 - Bei 20 °C ca. 6.4 Stunden
 - Bei 35 °C ca. 7.7 Stunden
- Ladeleistung: 20 kW
 - Bei 20 °C ca. 3.5 Stunden
 - Bei 35 °C ca. 4.2 Stunden

Der Vergleich der unterschiedlichen Ladezeiten zeigt gut, dass durch die höhere Ladeleistung, die annähernd verdoppelt wird, sich auch die entsprechende Ladezeit ca. um die Hälfte reduziert. Dieser Unterschied ist jedoch nicht so relevant, wenn berücksichtigt wird, dass, wie bereits in der Einleitung zu diesem Kapitel erwähnt, Autozug Verbindungen in Österreich nur als Nightjet-Verbindungen existieren, die über Nacht unterwegs sind [31].

Daher sind dort auch die Fahrzeiten entsprechend lange. So hat z.B. der Autozug von Wien nach Split in Kroatien eine Fahrzeit von 14 Stunden und 25 Minuten. Diese lange Fahrzeit wäre für beide Ladeleistungen mehr als ausreichend, um die Batterien der Fahrzeuge komplett zu laden. Selbst eine Temperaturänderung auf 35 °C, wie sie im Sommer in Kroatien durchaus vorkommen kann, hätte keinen Einfluss darauf, ob die Fahrzeuge komplett geladen werden.

Nur wenn die Verbindungen signifikant kürzer werden würden, wie etwa nur von Graz nach Wien, würde auch der Use-Case mit dem Autozug an seine Grenzen stoßen. Für diesen Fall könnten eventuell Sonderzüge zum Einsatz kommen, die eine noch höhere Ladeleistung aufweisen (z.B. die 50 kW von der RoLa) um die Ladezeiten entsprechend weiter zu verkürzen.

3.6 Verwendung der Batterien der Fahrzeuge

Im Laufe der oben durchgeführten Untersuchungen ist auch die Idee aufkommen, die Batterien nicht nur als passive Senke für Energie zu betrachten, sondern aktiv in die Energieplanung des Zuges miteinzubeziehen.

Konkret wurden dabei zwei mögliche Szenarien überlegt, auf die anschließend näher eingegangen werden soll:

- Die Nutzung der Batterien als zusätzliche Quelle elektrischer Energie für die Lokomotive
- Die Nutzung der Batterien als zusätzlicher Energiespeicher (Senke), vor allem während Energie durch Bremsen rekuperiert wird

3.6.1 Nutzung als Quelle

Am Anfang der Überlegungen für dieses Szenario, stand die Tatsache, dass die meisten Loks heutzutage bereits elektrifiziert sind und daher die Batterien der Fahrzeuge (die ja, über Ladepunkte und Zugsammelschiene, elektrisch mit der Lok verbunden sind) eventuell als zusätzliche Quellen für den Antrieb der Lok verwendet werden können. Einsatzmöglichkeiten wären z.B. bei einem Ausfall der Oberleitung oder bei Hybrid Loks (also jene, die sowohl elektrisch als auch mit Verbrenner Motoren fahren können) als eine Art *Range Extender* zu wirken, sprich dadurch könnte eventuell die Reichweite erhöht werden.

Ebenso könnten eine Hybrid Lok dadurch lokal (z.B. in einem Stadtgebiet) rein elektrisch fahren, um somit die Umweltverschmutzung und auch die Lärmemissionen zu verringern, falls keine Oberleitung vorhanden sein sollte.

In Gesprächen mit Experten aus der Bahnbranche, vor allem *Alexander Schimanofsky*, hat sich jedoch raus gestellt, dass das Potential für eine mögliche Realisierung dieser Anwendung eher gering sein wird.

Das Hauptproblem wäre, dass die ZS nicht genug Leistung übertragen kann, um eine elektrische Lok vernünftig anzutreiben. Wie bereits in Kapitel 2.2 erwähnt, hat eine elektrische Lok eine Antriebsleistung, die in den MW Bereich geht (konkret: 6.4 MW bei einer Railjet Lok). Daher würde die Leistung, die über die ZS übertragen werden kann, nicht ausreichen, um die Lok und den gesamten Zug anzutreiben.

Auch stellt sich die Frage, wie sehr diese zusätzlichen Entladevorgänge, die Lebensdauer der Batterien und der darin enthaltenen Bauteile beanspruchen würde und ob die Kunden (sei es Logistik Unternehmen bei LKWs oder Privatpersonen bei PKWs) damit einverstanden wären, wenn ihre Batterien zusätzlich beansprucht werden würden.

Eine weitere Option, bei der eine Realisierung eventuell mehr Potential hätte, wäre die Verwendung der Batterien im Verschub, da währenddessen die Waggon von der Lokomotive getrennt sind und z.B. zu einer anderen Lokomotive gebracht werden.

Dort werden meisten nur kurze Strecken von ca. 500-700 m gefahren. Normalerweise wird das von eigenen Verschublokomotiven erledigt, die dieselbetrieben sind, da während des Verschubes keine dauerhafte Verbindung mit der Oberleitung existiert. Jedoch gibt es auch bereits *Verschubroboter* wie z.B. den *VLEX* von *Vollert*[33]. Dies sind kleine Antriebseinheiten, die, zentral von einer Leitwarte aus, gesteuert werden können und dabei rein elektrisch angetrieben werden.

Da im Verschub-Betrieb wesentlich niedrigere Leistungen benötigt werden, als bei einer normalen Fahrt (so hat z.B. der *VLEX 40* eine Antriebsleistung von 4×12.5 kW), könnten diese Roboter über die ZS versorgt werden. Jedoch müssten diese Roboter dafür auch mit der ZS verbunden werden und die Spannung der ZS auf eine, für den Roboter passende Spannung, transformiert werden. Dies würde natürlich weitere Kosten in der Produktion mit sich ziehen. Daher stellt sich auch die Frage der Wirtschaftlichkeit dieses Szenarios.

3.6.2 Nutzung als zusätzlicher Speicher während Rekuperation

Das zweite mögliche Szenario wäre das "Gegenteil" des vorherigen Szenarios. Hier würden die Fahrzeugbatterien als zusätzlicher Speicher für elektrische Energie verwendet werden.

Konkret soll dabei die elektrische Energie, die während des Bremsvorgangs eines Zuges durch Rekuperation (Rückgewinnung von Energie) entsteht, genutzt werden, um die Batterien aufzuladen. Normalerweise wird diese Energie wieder in die Oberleitung zurück gespeist, um anderen Loks, die sich im Einspeisebereich des selben Unterwerks befinden, zur Verfügung zu stehen. Dies ist jedoch nur möglich, wenn sich weitere Verbraucher (elektrische Loks) in eben diesem Einspeisebereich befinden.

Falls dies nicht der Fall ist bzw. zu wenige Verbraucher vorhanden sind, wird die Energie über Widerstände in Wärmeenergie umgewandelt und ist damit nicht mehr nutzbar[34].

Daher könnte hier eine Steigerung der Effizienz erzielt werden, wenn die zurückgewonnene Energie, anstatt wieder in die Oberleitung gespeist bzw. verheizt zu werden, direkt in die Batterien der am Zug befindlichen Fahrzeuge gespeist wird.

Dies ist auch erkennbar, wenn die Effizienz des Gesamtsystems, die sich aus den unterschiedlichen Wirkungsgraden zusammensetzt, betrachtet wird. Bei der folgenden Formel für die Effizienz des Gesamtsystems, wurde davon ausgegangen, dass eine Lok bremst, die Energie in die Oberleitung und das Bahnstromnetz zurück speist, diese Energie dann in einem Pumpspeicherkraftwerk zwischengespeichert wird und anschließend über die Oberleitung einer anderen Lok zur Verfügung gestellt wird.

Dort kann sie dann verwendet werden, um Fahrzeuge zu laden:

$$\eta_{\text{gesamt},1} = \eta_{\text{bremsen}} \cdot \eta_{\text{Transport}} \cdot \eta_{\text{Pump}} \cdot \eta_{\text{Transport}} \cdot \eta_{\text{umrichter}} \cdot \eta_{\text{laden}} \quad (3.9)$$

Wenn nun aber die Wirkungsgradkette betrachtet wird, wenn die Energie stattdessen direkt von den Bremsen in die ZS eingespeist wird und dort für den Ladevorgang zur Verfügung steht,

$$\eta_{\text{gesamt},2} = \eta_{\text{bremsen}} \cdot \eta_{\text{umrichter}} \cdot \eta_{\text{laden}} \quad (3.10)$$

ist erkennbar, dass die Gesamteffizienz im zweiten Fall höher sein muss, da einige Faktoren aus 3.9 wegfallen. Daher würde weniger Energie verschwendet, wenn direkt in die Batterien eingespeist werden würde.

Aufgrund dieser Überlegungen wurde dann auch noch eine beispielhafte Berechnung durchgeführt, um zu zeigen, welche Energie potentiell durch Rekuperation zur Verfügung stehen würde.

Dafür wurde die potentielle Energie eines vollbeladenen Railjets zwischen zwei Halten auf der Strecke zwischen Graz und Wien berechnet:

$$E_{\text{pot}} = m \cdot g \cdot \Delta h = m \cdot g \cdot (h_1 - h_2) \quad (3.11)$$

Dabei steht m für die Masse des Zuges in kg, g für die Erdbeschleunigung und h_1 bzw. h_2 für die Seehöhe in m ausgewählter Orte an der Südstrecke.

Konkret wurden dann folgende Werte benutzt:

- h_1 = Seehöhe Bahnhof Semmering, ca. 900 m
- h_2 = Seehöhe Bahnhof Wiener Neustadt, ca. 260 m
- Dadurch ergibt sich ein Δh von 640 m

- $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$
- m = Masse eines vollbeladenen Railjet Reisezuges, ca. 510 Tonnen

Die Masse des Zuges wurde aus [35] übernommen, da dort ebenso bereits energetische Berechnungen im Zug Bereich durchgeführt wurden.

Als Referenzwerte für die Höhe wurden der Bahnhof Semmering und Wiener Neustadt ausgewählt, da der Bahnhof Semmering sich am höchsten Punkt der Strecke befindet und Wiener Neustadt der erste Halt für Railjets, die von Graz nach Wien fahren, nach dem Semmering ist.

Mit diesen Werten ergibt sich folgende potentielle Energie (bzw. Differenz in potentieller Energie)

$$\begin{aligned} E_{pot} &= m \cdot g \cdot (h_1 - h_2) = 510000 \text{ kg} \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} \cdot (900 \text{ m} - 260 \text{ m}) \\ &\approx 3.2 \text{ GJ} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Dieser Wert muss noch mit der Effizienz der Rekuperation multipliziert werden. Hier wurde eine Effizienz von 40% bzw. 0.4 angenommen, jedoch kann diese stark schwanken (hängt unter anderem von Gewicht und Geschwindigkeit ab)[36]

$$E_{rekup} = E_{pot} \cdot 0.4 \approx 1.3 \text{ GJ} \quad (3.13)$$

Um diesen Wert besser mit den Kapazitäten der Batterien in den Fahrzeugen vergleichen zu können, wird er noch in *Kilowattstunden (kWh)* umgerechnet

$$E_{rekup,kWh} = \frac{E_{rekup}}{3600000} \approx 356 \text{ kWh} \quad (3.14)$$

Um eine ungefähre Abschätzung zu erhalten, wie viele Batterien damit geladen werden könnten, muss dieser Wert noch mit den Wirkungsgraden der Umrichter und des Ladevorganges multipliziert werden

$$E_{eff} = E_{rekup,kWh} \cdot \eta_{umrichter} \cdot \eta_{laden} = 356 \text{ kWh} \cdot 0.85 \cdot 0.9 \approx 272 \text{ kWh} \quad (3.15)$$

Diese Energiemenge wäre genug um z.B. drei Fahrzeuge des Models *Tesla Model Y* mit einer Kapazität von 79 kWh zu laden.

Um zu überprüfen, ob die dafür nötige Dauerleistung überhaupt machbar ist für die Zugsammelschiene, muss die Energiemenge noch mit der entsprechenden Fahrtdauer dividiert werden.

Laut Fahrplan der ÖBB beträgt die Fahrtdauer auf der Strecke Semmering-Wiener Neustadt ca. 40 Minuten oder 0.67 Stunden. Damit ergibt sich eine Dauerleistung von

$$P_{rekup} = \frac{E_{eff}}{t_{fahrt}} = \frac{272 \text{ kWh}}{0.67 \text{ h}} \approx 408 \text{ kW} \quad (3.16)$$

Eine Dauerleistung von 408 kW , würde nach Abbildung 2.5 kein Problem für die Zugsammelschiene darstellen, zumindest solange die Außentemperatur nicht 50°C erreicht. Daher wäre diese Art der Energierückgewinnung, zumindest theoretisch, machbar.

Auch wenn die Rechnung stark vereinfacht ist, da z.B. sämtliche Verluste (wie durch Reibung) vernachlässigt wurden, zeigt sie dennoch, dass durch Rekuperation große Mengen an Energie in elektrische Energie umgewandelt wird, die zum Laden der Fahrzeuge genutzt werden kann.

4 Elektrische Konzepte

4.1 Erste Version der Konzepte

In diesem Kapitel werden jene Konzepte nun vorgestellt, die sich im Laufe der Konzeptfindung ergeben haben und die Use Cases am besten abgedeckt haben. Dabei sind folgende Konzepte entstanden:

- Ein Modulares Konzept für DC Laden mit 6×11 kW pro Waggon, bei dem die einzelnen Ladepunkte miteinander elektrisch verbunden werden können.
- Konzept für DC Laden ohne Zusammenschließen der Ladepunkte, dafür mit 6×22 kW pro Waggon.
- Konzept für AC laden mit 6×11 kVA pro Waggon.
- Konzept für DC laden mit 1×50 kW pro Waggon, bei dem zusätzlich noch ein Transformator Waggon alle 7-8 Waggons benötigt wird.

Die ersten drei Konzepte wurden für den Urlauberzug mit PKWs entwickelt, das letzte Konzept mit der höchsten Leistung primär für die RoLa mit LKWs, da dort durch die höheren Kapazitäten der verbauten Akkus eine höhere Ladeleistung benötigt wird, um sinnvolle Ladezeiten zu erhalten.

4.1.1 Auswahl der Komponenten

Die ursprüngliche Idee für einen Konzeptentwurf war es, die Ladepunkte aus bereits vorhandener Leistungselektronik zusammenzubauen. Da es jedoch im Zugbereich diesbezüglich kaum eine Auswahl gibt (wie in Kapitel 2.4 erläutert), da es dort bisher keinen Bedarf an Leistungselektronik gegeben hat, wurde der allgemeine Markt für Leistungselektronik durchleuchtet.

Dort wurden vor allem Leistungselektronik gesucht, die in die entsprechenden benötigten Leistungsbereiche fällt oder z.B., wie für das modulare Prinzip nötig, einen Parallelbetrieb von Komponenten ermöglicht.

Daher sind bei den Konzepten, die als Erstes entworfen worden sind, die Komponenten einzeln dargestellt und nicht, wie bei den späteren Entwürfen in Kapitel 4.2, als eine Einheit.

Aufgrund der Einschätzung von Experten aus der Industrie, dass der Einbau fertiger Ladesäulen vorteilhafter wäre, wurde die Idee mit den einzelnen Komponenten schnell verworfen und nicht weiter verfolgt. Daher sind auch keine genaueren Daten zu potenziellen Bauteilen, wie Leistung/Preis/Wirkungsgrad, aufgeführt.

4.1.2 Modularer Aufbau

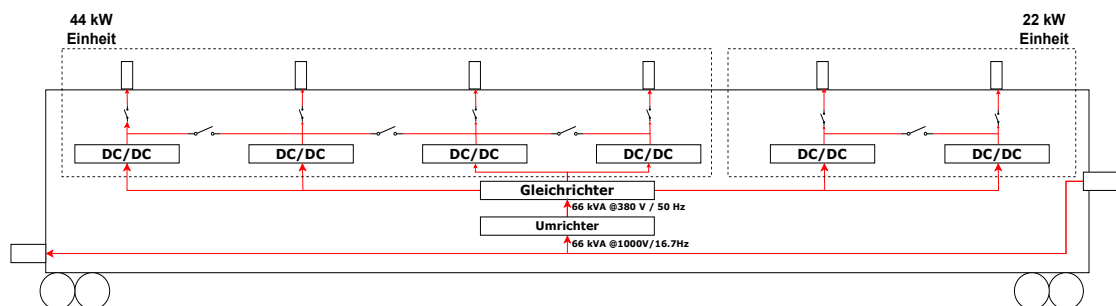


Abbildung 4.1: DC Laden für PKW - Modulares Prinzip

Wie bereits in der Einleitung dieses Kapitels erwähnt, lassen sich bei diesem Konzept, einzelne Ladepunkte verbinden, um so einen Ladepunkt mit mehr Leistung zu haben, bei gleichzeitiger Deaktivierung der anderen Ladepunkte. Die Grafik 4.1 zeigt einen beispielhaften Aufbau für einen modularen Waggon. Dort sind die sechs 11 kW Ladepunkte in einen 44 kW Bereich und einen mit 22 kW gruppiert. Mit den Schaltern zwischen den DC/DC Konvertern kann bestimmt werden, wie viel Leistung an einem Ladepunkt maximal zur Verfügung steht, da dadurch die Konverter parallel geschaltet werden. Ladepunkte müssen dann entsprechend über die jeweiligen Schalter deaktiviert werden.

Der große Vorteil dieses Konzeptes besteht in seiner hohen Flexibilität was die Ladeleistung betrifft. Werden zum Beispiel Ladepunkte in einer Einheit nicht benötigt, kann der Rest mit höherer Ladeleistung betrieben werden. Das ermöglicht (um bei den Werten von Grafik 4.1 zu bleiben) für die 44 kW Einheit Ladeleistungen von 11 kW, 22 kW, 33 kW und 44 kW die nutzbar wären. Es wäre zum Beispiel auch eine Struktur möglich, bei der alle 6 Ladepunkte parallel schaltbar sind, so dass dann nur mehr ein Ladepunkt aktiv ist, der aber dann mit 66 kW laden kann.

Diese Flexibilität bringt jedoch auch entsprechende Nachteile mit sich. Zum einen, durch die Flexibilität bedingt, ist ein wesentlich höherer Aufwand für die Verkabelung des Waggons nötig.

Die Schalter zu den Ladepunkten und zwischen den DC/DC Konvertern benötigen außerdem eine zusätzliche Steuerung mit der bestimmt wird welche Ladepunkte aktiv sind. Auch ist die Aufteilung/Gruppierung der Ladepunkte ein Problem, da sie nach erstmaliger Installation fix ist, beziehungsweise nur mit hohem Aufwand wieder veränderbar ist. Dadurch ergibt sich außerdem, dass bei gewünschter maximaler Flexibilität (also jeder Ladepunkt ist zwischen 11 und 66 kW schaltbar), auch jeder Ladepunkt (bzw. Steckverbindung) auf 66 kW ausgelegt werden muss, was wiederum höhere Kosten mit sich bringt. Ladestationen für 11 kW kosten ca. 1000 €[37], während eine 75 kW Ladebox z.B ca. 25000 € kostet [38].

Das ist ein prinzipielles Problem beim modularen Konzept. Bei der Aufteilung in Grafik 4.1 etwa, müssten die Ladepunkte der linken Einheit alle für 44 kW und die Ladepunkte der rechten Einheit alle auf 22 kW ausgelegt werden. Bezüglich der Bauteilauswahl ist auch zu beachten, dass die DC/DC Konverter im Parallelbetrieb funktionieren, sie also auch dann problemlos funktionieren, wenn mehrere Ausgänge zusammengeschaltet sind.

4.1.3 DC Laden - PKW

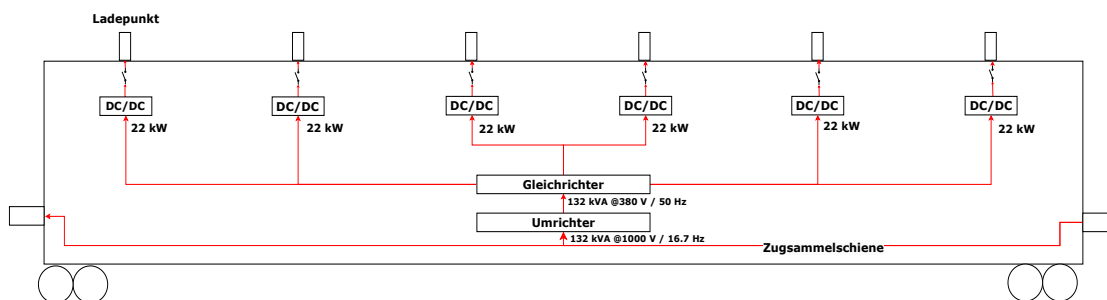


Abbildung 4.2: DC Laden für PKW - nicht modular

Als nächstes Konzept wurde eine Vereinfachung des modularen Prinzips mit gleichzeitig höheren Ladeleistungen entwickelt. Während die Ladepunkte ebenso ausschaltbar sind, falls sie nicht benötigt werden, fällt hier die Parallelschaltung der DC/DC Konverter weg. Daher hat jeder Ladepunkt nur eine fixe maximale Ladeleistung, die hier mit 22 kW, also doppelt so groß wie beim modularen Prinzip, gewählt wurde. Dadurch werden in Summe weniger Kabel und Schalter benötigt, was ein Vorteil gegenüber dem modularen Konzept ist.

Auch die prinzipiell höhere Ladeleistung, wenn alle Ladepunkte belegt sind, ist ein Vorteil, da dadurch der PKW schneller geladen werden kann. Diese erhöhte Ladeleistung hat jedoch auch den Nachteil, dass in Summe weniger Fahrzeuge gleichzeitig geladen werden können. Pro Waggon hat man die

doppelte Ladeleistung verglichen mit dem modularen Konzept, daher könnte man bei gleicher maximal Last der ZS, nur halb so viele Waggon versorgen. Ein weiterer Nachteil ist der hohe Aufwand an benötigter Leistungselektronik. Dieser ist zwar, wie bereits erwähnt, geringer als beim modularen Konzept, da Schalter wegfallen, jedoch noch immer hoch. Es wird immer mindestens ein Umrichter, mindestens ein Gleichrichter und pro Ladepunkt nochmal zusätzlich ein DC/DC Konverter benötigt.

4.1.4 AC Laden - PKW

Dieses Konzept nutzt den Fakt aus, dass die Spannung der ZS bereits eine Wechselspannung ist und versorgt die Ladepunkte mit einer Wechselspannung. Das hat den Vorteil, dass viel weniger Leistungselektronik verbaut werden muss, nämlich nur ein Umrichter. Dieser Umrichter wandelt die Wechselspannung der ZS in eine, für die Ladepunkte geeignete Spannung um (normalerweise 380 V @ 50 Hz). Dadurch ist dieses Konzept wesentlich einfacher zu realisieren und auch kostengünstiger.

Laden mit AC hat jedoch auch Nachteile. Ein Nachteil ist, dass Batterien prinzipiell nur mit DC funktionieren. Daher müssen alle elektrischen Fahrzeuge, die mit AC aufgeladen werden können, zwingend mit einem *On-Board Charger* ausgerüstet sein. Dieses Bauteil ist dafür zuständig, die AC Spannung aus dem Ladepunkt wieder in eine DC Spannung umzuwandeln. Dieser On-Board-Charger limitiert auch die maximal mögliche Ladeleistung. Aktuelle On-Board-Charger haben meist eine Leistung von 11 kW, es gibt auch Varianten mit 22 kW, wobei diese jedoch typischerweise nur bei hochpreisigen Fahrzeugen zum Einsatz kommen.

Da jedoch vor allem im häuslichen Bereich fast nur AC Ladestationen vorhanden sind (aufgrund der Tatsache, dass das Hausnetz auch immer AC ist), werden On-Board-Charger in absehbarer Zukunft auch weiterhin Teil von Elektrofahrzeugen bleiben.

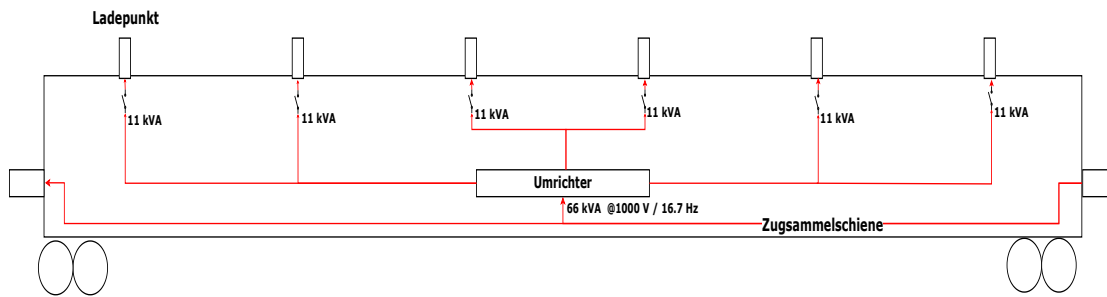


Abbildung 4.3: AC Laden für PKW

4.1.5 DC Laden - LKW

Dieses Konzept ist primär für elektrische LKWs gedacht, die per Zug in der *Rollenden Landstraße (RoLa)* transportiert und währenddessen aufgeladen werden sollen.

Geplant ist eine Ladeleistung von 50 kW pro Ladepunkt mit einem Ladepunkt pro Waggon. Diese hohe Ladeleistung ist notwendig, da LKWs eine wesentlich höhere Batteriekapazität als Elektroautos haben. Ein *Tesla Model Y* hat zum Beispiel eine Batteriekapazität von 79 kWh, während ein *Mercedes eActros* eine Kapazität von 336 bzw. 448 kWh hat, je nach Model.

Bei einem LKW-Zug der RoLa kann von 20 LKWs ausgegangen werden, was eine benötigte Maximalleistung von

$$P_{max} = P_{Ladepunkt} \cdot N_{LKW} = 50 \text{ kW} \cdot 20 = 1000 \text{ kW} \quad (4.1)$$

ergibt. Dieser Wert überschreitet jedoch das Maximum der ZS (was bei idealen Bedingungen bei 800 kW, real jedoch eher bei 500 bis 600 kW liegt, wie in Kapitel 3.3.1 beschrieben). Daher müsste, wie in Grafik 4.4 schematisch skizziert wurde, ein spezieller Waggon hinzugefügt werden, der eine eigene Trafostation hat, von der aus eine neue ZS gespeist wird.

Das Design der Waggonen ohne Trafostation wäre gleich wie jenes mit Trafostation, nur dass diese eben wegfällt. Es ist also immer nur ein Ladepunkt pro Waggon vorgesehen.

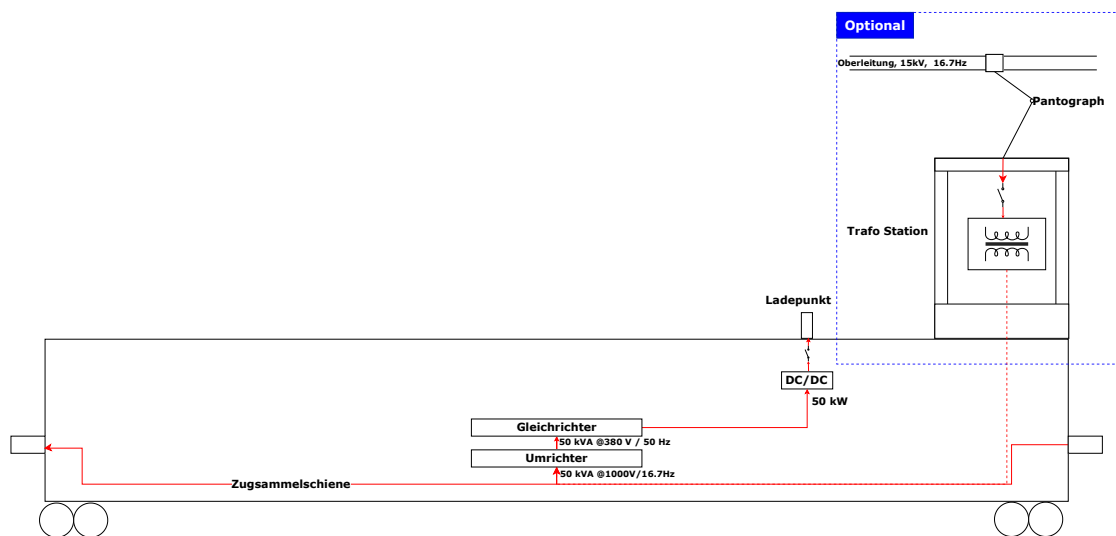


Abbildung 4.4: DC Laden für LKW - Rollende Landstraße

Ein Nachteil dieses Konzepts ist der große Mehraufwand, der durch die zusätzliche Trafostation entsteht. Dieser Mehraufwand ist vor allem auf den zusätzlichen Pantografen, den eigenen Trafo und der dafür notwendigen Sicherheitsausrüstung zurückzuführen, welche hohe Kosten verursachen.

Ein weiterer Nachteil entsteht dadurch, dass die hinteren Waggons eine eigene ZS, die nicht in Verbindung mit der ZS der vorderen Waggons ist. Bei der ZS sind Kabel für die Kommunikation vorgesehen. Daher muss sichergestellt werden, dass jener Zugteil, der über die Lokomotive versorgt wird, auch mit jenem Zugteil kommunizieren kann, der über den eigenen Trafowaggon versorgt wird.

4.2 Anpassungen der Konzepte

Nach der Erstellung der oben vorgestellten Konzepte, wurden diese zusammen mit Herrn *Stefan Erhard* überarbeitet. Auch wurde besprochen, welche Bauteile es bereits gibt (und vor allem welche davon Kiepe liefern könnte) und wie sie in den Konzepten eingesetzt werden könnten.

In diesem Gespräch (bzw. mehreren Gesprächen) haben sich vor allem folgende Änderungen für die Konzepte ergeben:

- Das modulare Konzept hat am wenigsten Realisierungspotential, da es vom Aufbau her komplex ist und dadurch auch deutlich teurer ist als das nicht modulare Konzept für PKW DC Ladepunkte.

Der Nachteil bezüglich des Preises ergibt sich daher, dass alle Wallboxen für die maximale Leistung ausgewählt werden müssten. Jedoch werden Wallboxen/Ladestationen mit zunehmender Ladeleistung überproportional teurer. So kostet z.B. eine 11 kW AC Wallbox ca. 1000 €, während eine 50 kW DC Ladestation 20000 € kosten kann[39]. Daher wird dieses Konzept nicht weiter verfolgt.

- Anstelle von extra Gleichrichtern und DC/DC Konvertern, ist es empfehlenswerter und einfacher, direkt marktübliche DC Ladensäulen/Wallboxen zu verwenden, da diese die benötigten Komponenten bereits in einem Gehäuse eingebaut haben. Dies hat den Vorteil, dass es bereits eine große Auswahl an Produkten gibt und es daher leichter sein wird, eine passende zu finden oder eine bestehende zu adaptieren.
- Bei sämtlichen Konzepten sollte noch eine Leistungsüberwachung bzw. ein Leistungszähler eingebaut werden. Dieser kann einerseits zur Abrechnung der Energie Kosten an den Kunden dienen und andererseits auch zur Leistungsregelung verwendet werden. Das ist ein weiterer Grund, warum es empfehlenswert ist, bereits vorgefertigte Ladesäulen zu verwenden, da diese fast immer dieses Bauteil bzw. generell eine Bezahlterminal implementiert haben (vor allem bei Ladesäulen für kommerzielle Parkplätze).
- Falls die Fahrzeuge, wie in Kapitel 3.6.1 beschrieben, als Quelle für elektrische Energie dienen sollen, müssen die Wallboxen/Ladestationen bidirektional Energie transportieren können.
- An Umrichtern könnte Kiepe einen Umrichter für die Zugsammelschiene mit 60 kW Leistung anbieten. Auch Umrichter von anderen Herstellern haben nicht mehr Leistung, da bisher im Zug Bereich nicht mehr Leistung von Nöten war. Dieser Umstand macht sich vor allem beim DC Laden Konzept für PKW bemerkbar, da dort mit 6x22 kW geladen werden sollte. Daher würde man dort 2 Umrichter benötigen. Da jedoch die Umrichter nur maximal 60 kW Leistung liefern, wurde auch die Ladeleistung von 6x22 kW auf 6x20 kW reduziert.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden dann mögliche Wallboxen/Ladesäulen ausgesucht. Diese Auswahl stellt nur eine theoretische Wahl da, da Wallboxen/Ladesäulen nur für den stationären Gebrauch ausgelegt sind und es keine Modelle gibt, die für Montage auf Zügen, ohne etwaige Modifikationen, geeignet wären. Würde es zu einer praktischen Umsetzung der Konzepte kommen, wäre es daher in diesem Fall notwendig, in diesem Bereich mit entsprechenden Herstellern zusammen zu arbeiten, die die Ladeinfrastruktur zugtauglich machen können.

4.2.1 PKW - Update

4.2.1.1 DC Laden

Bei diesem Konzept wurde, vor allem ein zusätzlicher Umrichter eingefügt, um in Summe auf 120 kW pro Waggon zu kommen. Dies wurde nötig, da verfügbare Umrichter nur mit einer maximalen Leistung von 60 kVA erhältlich sind.

Abbildung 4.5 zeigt das überarbeitete Konzept und Tabelle 4.1 die benötigten Komponenten mit einigen technischen Daten.

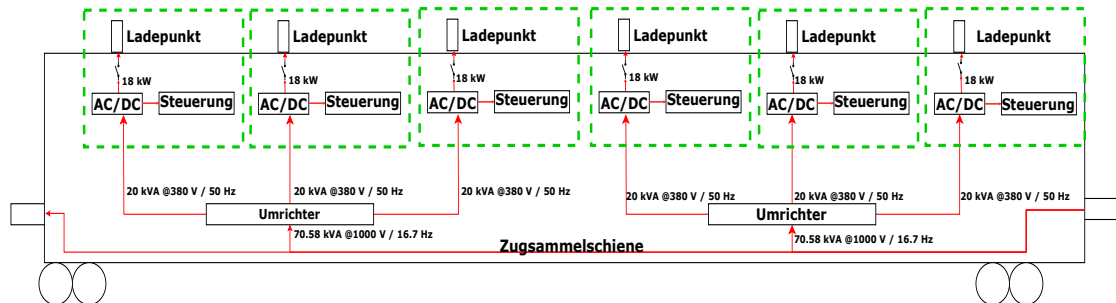


Abbildung 4.5: DC Laden für PKW - nicht modular

Bauteil	Name	Leistung kW	Gewicht kg	Abmessungen HxBxT mm	Preis €	Stückzahl
Wall Box DC	ABB Terra 22 kW [40]	20	40	700x406x241	ca 1200	6
Umrichter	Kiepe	60	450	1000x500x2300	ca 30000	2

Tabelle 4.1: Komponenten für das DC Laden - 20 kW

Dadurch ergeben sich folgende Gesamtkosten für einen Waggon

$$\begin{aligned}
 \text{Kosten}_{\text{gesamt}} &= 2 \cdot \text{Kosten}_{\text{Umrichter}} + 6 \cdot \text{Kosten}_{\text{Wallbox}} \\
 &= 2 \cdot 30000 \text{ €} + 6 \cdot 1200 \text{ €} = 67200 \text{ €}
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

4.2.1.2 AC Laden

Bei diesem Konzept hat sich durch die Anpassungen nicht viel geändert. Es war vorhin bereits das einfachste Konzept hinsichtlich Aufwand und das hat sich nicht geändert. Da jedoch die verfügbaren Umrichter nur eine maximale Leistung von 60 kVA haben, können nicht alle alle Ladepunkte gleichzeitig mit 11 kVA laden. Daher müssen die Steuerungen der Ladepunkte miteinander kommunizieren können und es muss eine Konzept für eine Laderegulierung existieren, dass z.B. abhängig von der aktuellen Ladung der Fahrzeuge die Leistung entsprechend aufteilt (Fahrzeuge mit weniger SOC (State of Charge = Ladestand) bekommen mehr Leistung).

Abbildung 4.6 zeigt das angepasste Konzept und Tabelle 4.2 eine Auflistung der benötigten Komponenten.

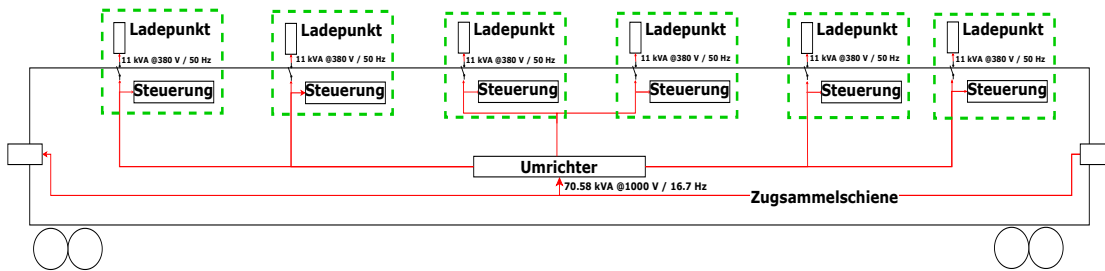


Abbildung 4.6: AC Laden für PKW

Bauteil	Name	Leistung kVA	Gewicht kg	Abmessungen HxBxT mm	Preis €	Stückzahl
Wall Box AC	KeContact P40 Wallbox [41]	max. 11	7.8	643x246x140	ca 1000	6
Umrichter	Kiepe	60	450	1000x500x2300	ca 30000	1

Tabelle 4.2: Komponenten für das AC Laden - 11 kW

Die Gesamtkosten für einen Waggon belaufen sich auf

$$\begin{aligned}
 \text{Kosten}_{\text{gesamt}} &= \text{Kosten}_{\text{Umrichter}} + 6 \cdot \text{Kosten}_{\text{Wallbox}} \\
 &= 30000 \text{ €} + 6 \cdot 1000 \text{ €} = 36000 \text{ €}
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

4.2.1.3 Zusammenfassung

Durch die Gegenüberstellung der Konzepte ergeben sich folgende Vorteile und Nachteile:

- DC-Laden
 - Vorteil: Durch die höhere Ladeleistung verkürzt sich auch die Ladezeit für die Batterien.
 - Nachteil: Höhere Kosten, da ein zusätzlicher Umrichter benötigt wird.
- AC-Laden
 - Vorteil: Geringere Kosten, da der zusätzliche UMrichter wegfällt. Auch sind die 11 kVA Wallboxen typischerweise leicht günstiger als 20 kW Wallboxen (siehe Tabelle 4.2 und 4.1)
 - Nachteil: Die geringere Ladeleistung bedingt höhere Ladezeiten.

Wie in Kapitel 3.5.1 erläutert, sind die Fahrzeiten aktueller Autozug-Verbindungen typischerweise deutlich länger als die Ladezeiten beim AC-Laden. Dieser Nachteil dieser Ladeart fällt in der Praxis nicht stark ins Gewicht.

Da aber der Preis für das AC-Laden nur die Hälfte des DC-Ladens beträgt, wird in der Praxis wahrscheinlich nur auf das AC-Laden gesetzt, da es durch den Preis Unterschied rentabler ist.

Um diese Differenz in der Rentabilität zu verdeutlichen, wird eine vereinfachte Berechnung zur Amortisationszeit durchgeführt. Für diese Berechnung werden folgende Vereinfachungen und Bedingungen angenommen:

- Der Preis für eine Kilowatt Stunde (kWh) beträgt aktuell (Stand 03.04.2024) für einen Privatverbraucher ca. 40 Cent [42]. Aufgrund der Tatsache, dass die ÖBB den Strom günstiger bereitstellen können, werden dennoch die 40 Cent pro kWh als Preis angenommen, um eine eventuelle Gewinnspanne einzupreisen.
- Die Fahrzeugbatterien werden immer komplett aufgeladen. Als Referenz wird die Batterie eines *Tesla Model Y* mit 79 kWh genommen.
- Der Autozug fährt einmal pro Tag, jeden Tag im Jahr, hat jedoch über das gesamte Jahr nur eine Auslastung von 10 % seiner Kapazität an elektrischen Fahrzeugen. Falls jedoch elektrische Fahrzeuge transportiert werden, wird davon ausgegangen, dass die entsprechenden Waggons voll belegt sind.

- Es werden nur die Kosten für einen einzelnen Waggon berücksichtigt und dabei auch nur die oben aufgeführten Kosten für die Ladestationen und Umrichter. Kosten für etwa die Montage oder die Verkabelung werden ignoriert, da diese nicht beziffert werden können.

Mit diesen Annahmen können nun Berechnungen durchgeführt werden. Zuerst müssen die Kosten für eine komplette Ladung der Autobatterie berechnet werden

$$Ertrag_{Ladung} = Strompreis \cdot Kapazität = 40 \frac{Cent}{kWh} \cdot 79 kWh = 31.60€ \quad (4.4)$$

Der Gesamtertrag pro Waggon errechnet sich dann aus dem Ertrag eines Fahrzeuges und der Anzahl der Fahrzeuge

$$Ertrag_{Waggon} = Ertrag_{Ladung} \cdot Fahrzeuge = 31.60€ \cdot 6 = 189.60€ \quad (4.5)$$

Das ergibt dann pro Jahr (ein Jahr entspricht 365.25 Tagen) einen Ertrag von

$$\begin{aligned} Ertrag_{Jahr} &= Ertrag_{Waggon} \cdot 365.25 = 189.60€ \cdot 365.25 \\ &= 69251.4 \frac{€}{Jahr} \approx 69250 \frac{€}{Jahr} \end{aligned} \quad (4.6)$$

Da der Zug nur 10% Auslastung hat ist der Ertrag dann entsprechend geringer

$$Ertrag_{real} = Ertrag_{Jahr} \cdot 0.1 = 6925 \frac{€}{Jahr} \quad (4.7)$$

Um auf die Amortisationszeit in Jahren zu kommen, müssen die Kosten pro Waggon mit dem jährlichen Ertrag gegen gerechnet werden.

Dadurch ergibt sich für das DC-Laden eine Amortisationszeit(AZ) von

$$AZ_{DC} = \frac{67200€}{6925 \frac{€}{Jahr}} = 9.7 Jahre \quad (4.8)$$

und beim AC-Laden

$$AZ_{AC} = \frac{36000€}{6925 \frac{€}{Jahr}} = 5.2 Jahre \quad (4.9)$$

Auch wenn einige Vereinfachungen angenommen wurden, so sind die berechneten Werte für die Amortisationszeit dennoch brauchbare Näherungen. Diese Näherung zeigt, dass solche Waggonen rentabel sein können, vor allem wenn die Amortisationszeit in Relation zur durchschnittlichen Lebensdauer eines Waggonen gestellt wird, die ca. 30–40 Jahre beträgt [43].

Außerdem könnte die Amortisationszeit noch verringert werden, wenn die Auslastung entsprechend nach oben geht. Dies würde die Rentabilität weiter verbessern.

4.2.2 DC Laden LKW

Dieses Konzept ist grundlegend gleich geblieben zur vorherigen Version, nur dass ebenso der Gleichrichter und DC/DC Konverter durch eine, bereits verfügbare, Ladesäule ersetzt wurde. Abbildung 4.7 zeigt das angepasste Konzept, Tabelle 4.3 die benötigten Komponenten für das DC laden mit 50 kW und Tabelle 4.4 beispielhafte Komponenten für eine mögliche Trafostation mit Pantografen.

Vor allem diese Trafostation kann nur in Umrissen beschrieben werden, da die benötigten Komponenten immer nur auf Anfrage hergestellt werden und individuell auf das jeweilige Projekt angepasst werden. Daher gibt es auch keine wirklichen Angabe zu Komponenten Größen und Preis, da diese ebenso von Projekt zu Projekt unterschiedlich sind. Auch fehlen in der Auflistung noch zusätzliche Komponenten, wie z.B Sicherheits-Einrichtungen oder Steuerungen für den Pantographen. Da diese jedoch meistens mit dem eigentlich Bauteil mitgeliefert werden, werden sie nicht gesondert aufgeführt.

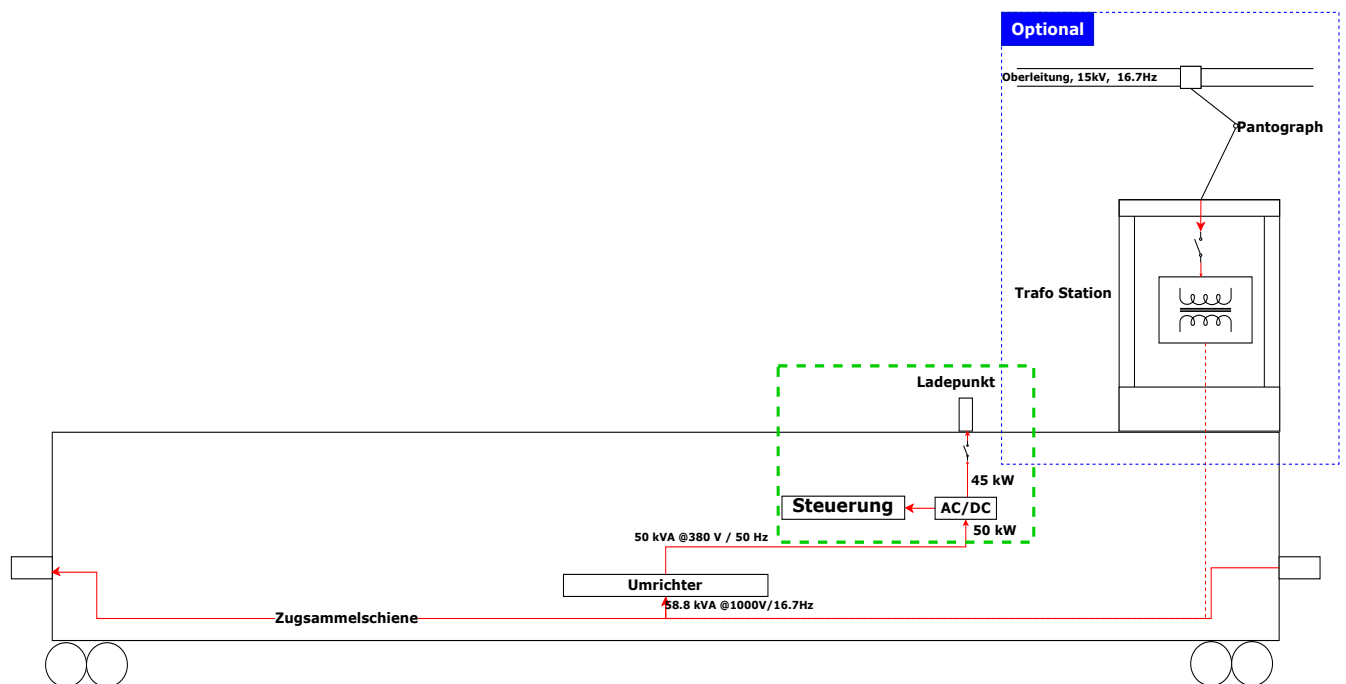


Abbildung 4.7: DC Laden für LKW

Bauteil	Name	Leistung kW	Gewicht kg	Abmessungen HxBxT mm	Preis €	Stückzahl
Wall Box DC	ABB Terra 54 DC [39]	50	370	1900x565x780	ca. 20000	1
Umrichter	Kiepe	60	450	1000x500x2300	ca. 30000	1

Tabelle 4.3: Komponenten für das DC Laden - 50 kW

Bauteil	Name	Gewicht	Abmessungen HxBxT mm	Preis €	Stückzahl
Traction Transformer	Transformer for AC Locomotives Siemens[44]	12.5 t	-	-	1
Stromabnehmer	RM 354 - Richard AG [45]	134 kg	-	-	1

Tabelle 4.4: Komponenten einer Trafostation

4.2.3 Amortisationszeit

Mit den Daten aus der Tabelle 4.3 lassen sich dann zumindest die Kosten für einen Waggon ohne Trafo-Station berechnen

$$\begin{aligned}
 \text{Kosten}_{\text{gesamt}} &= \text{Kosten}_{\text{Umrichter}} + \text{Kosten}_{\text{Wallbox}} \\
 &= 30000 \text{ €} + 20000 \text{ €} = 50000 \text{ €}
 \end{aligned}
 \quad (4.10)$$

Ähnlich wie beim Use-Case Urlauberzug kann daraus dann wieder eine Amortisationszeit berechnet werden, für die die selben Vereinfachungen gelten sollen wie beim Urlauberzug.

Der einzige Unterschied ist, dass immer nur ein Fahrzeug pro Waggon ist und sich die Referenz Kapazität ändert, da beim Use-Case RoLa der Akku eines Mercedes eActros betrachtet wird. Dieser hat eine Kapazität von 400 kWh.

Der Ertrag pro Ladung ist dann

$$\text{Ertrag}_{\text{Ladung}} = \text{Strompreis} \cdot \text{Kapazität} = 40 \frac{\text{Cent}}{\text{kWh}} \cdot 400 \text{ kWh} = 160 \text{ €} \quad (4.11)$$

Dieser Wert entspricht dann auch automatisch dem Ertrag eines gesamten Waggons, da immer nur ein LKW transportiert wird.

Pro Jahr ergibt sich dann ein Ertrag von

$$\begin{aligned}
 \text{Ertrag}_{\text{Jahr}} &= \text{Ertrag}_{\text{Waggon}} \cdot 365.25 = 160 \text{ €} \cdot 365.25 \\
 &= 58440 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}
 \end{aligned}
 \quad (4.12)$$

Wenn nun wieder eine Auslastung von 10 % berücksichtigt wird, ergibt sich der reale Jahresertrag zu

$$Ertrag_{real} = Ertrag_{Jahr} * 0.1 = 5844 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} \quad (4.13)$$

Die Amortisationszeit ist dann entsprechend

$$AZ_{LKW} = \frac{50000 \text{€}}{5844 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}} = 8.5 \text{ Jahre} \quad (4.14)$$

Dieser Wert ist ebenso eine brauchbare Näherung für die Amortisationszeit eines Waggons ohne Trafo-Station.

Für eine realistische Einschätzung zur Rentabilität fehlen jedoch die Kosten für die entsprechende Trafo-Station. Da diese unbekannt sind, lässt es aktuell nicht sagen, ob dieses Konzept der zusätzlichen Trafo-Station wirtschaftlich umsetzbar ist, oder ob nicht eventuell die Amortisationszeit die Lebensdauer eines Waggons übersteigen würde.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Masterarbeit wurde die elektrische Energieversorgung am Zug untersucht und wie diese genutzt werden kann, um Batterien elektrischer Straßenfahrzeuge zu laden, während diese sich auf dem Zug befinden.

Dazu wurde zuerst analysiert, welche Teilsysteme es in der Energieversorgung der Bahn gibt und wie die Energie am Zug verteilt wird. Somit konnten eventuelle Limitierungen und Einschränkungen identifiziert werden, insbesondere was die maximal verfügbare Ladeleistung betrifft.

Anschließend wurden zwei mögliche Anwendungsfälle der Elektromobilität am Zug näher untersucht. Diese Anwendungsfälle, auch Use-Cases genannt, waren einerseits der Transport von LKWs auf Schiene (sog. Rollende Landstraße, RoLa) und andererseits der Transport von PKWs (Urlauber- und Reisezug). Für diese Use-Cases wurden energietechnische Untersuchungen hinsichtlich der Ladezeit der Akkus und der maximal möglichen Anzahl an Ladepunkten pro Waggon und Zug durchgeführt. Daraus konnte eine gewisse Mindestverweildauer der Fahrzeuge auf dem Zug abgeleitet werden.

In weiterer Folge wurden auch mögliche Betriebsstrategien evaluiert. Es wurde die Plausibilität zweier möglicher Szenarien untersucht, bei denen die Akkus entweder als zusätzliche Energiequelle für den Zug dienen oder andererseits als effiziente Methode, um Bremsenergie, die durch Rekuperation in elektrische Energie umgewandelt wird, zu speichern.

Aufbauend auf den energietechnischen Untersuchungen wurden elektrische Konzepte erstellt, welche von der Zugsammelschiene ausgehend, die elektrische Versorgung der Fahrzeuge ermöglichen. Dabei stellte sich heraus, dass für höhere Ladeleistungen, wie z.B. bei elektrischen LKWs erforderlich, eine eigene Versorgungseinheit mit Pantograf und Transformator erforderlich ist. Ebenso wurde evaluiert, welche Leistungselektronik und Komponenten für die Energieversorgung (Umrichter, Transformatoren, Fahrzeugschnittstelle) benötigt wird und verfügbar ist.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die grundsätzliche technologische Machbarkeit und Sinnhaftigkeit des vorgeschlagenen Konzeptes im Rahmen dieser Masterarbeit bestätigt wurden.

Um das Konzept in eine praktische Umsetzung überzuführen, sind jedoch noch folgende Themenbereiche vorab zu untersuchen:

1. Sämtliche im Schienenverkehr eingesetzten Komponenten benötigen eine bahntechnische Zulassung.
Einige der benötigten Komponenten und Module wurden bisher (noch) nicht im Schienenverkehr eingesetzt und besitzen daher möglicherweise keine zulassungskonforme Zertifizierung. In diesem Kontext gilt es, die vorgeschlagenen Lösungen auf Basis von Normen, wie z.B. UIC Richtlinien, zu evaluieren.
2. Ein weiterer noch offener Punkt ist eine detailliertere Untersuchung der wirtschaftlichen Rentabilität, welche in den Kapiteln 4.2.1.3 und 4.2.3 nur rudimentär durchgeführt wurde.
Dabei geht es gleichermaßen um die exakte Quantifizierung der Investitionskosten, wie um die Konkretisierung möglicher Business Cases.

Können die soeben beschriebenen Problembereiche zufriedenstellend gelöst werden, kann das in dieser Arbeit untersuchte Konzept einen wesentlichen Beitrag zur Mobilitätswende leisten.

Literatur

- [1] Mitter,T.; et al. »Kombinierter Verkehr neu gedacht – Die intermodale Elektromobilität«. *ZEVrail Sonderheft Graz 2023* 147 (2023). <https://www.zevrail.de/artikel/kombinierter-verkehr-neu-gedacht-die-intermodale-elektromobilitaet>.
- [2] Europäische Kommission. »Der europäische Green Deal, Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den europäischen Rat, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen« (2019).
- [3] Umweltbundesamt Österreich und Bundesministerium für Klimaschutz. *Emissionskennzahlen 2023*. https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/themen/mobilitaet/daten/ekz_pkm_tkm_verkehrsmittel.pdf. Accessed: 2023-12-12. 2023.
- [4] RailCharge Konsortium. »Endbericht FFG Projekt RailCharge - Automatisiertes Laden von Elektrofahrzeugen auf der Schiene als Enabler der E-Mobility« (2023).
- [5] Lothar Fendrich und Wolfgang Fengler. »Energieversorgung elektrischer Bahnen«. *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. Springer Vieweg, 2019. Kap. 14.
- [6] Wikipedia. *Bahnstrom*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Bahnstrom>. Zuletzt aufgerufen am: 2023-12-12.
- [7] ÖBB - Österreichische Bundesbahnen. »Zahlen, Daten, Fakten 2022/23« (2023).
- [8] Presseaussendung EnergieAllianz Austria. *WESTbahn fährt ab 2016 mit Strom der ENERGIEALLIANZ Austria*. https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20151221_OTS0023/westbahn-faehrt-ab-2016-mit-strom-der-energieallianz-austria. Zuletzt aufgerufen am: 2023-12-27. 2015.
- [9] ÖBB - Österreichische Bundesbahnen. *Klimaschutzstrategie 2030*. <https://konzern.oebb.at/de/nachhaltige-oebb/klimaschutzstrategie-2030>. Zuletzt aufgerufen am: 2023-12-26.
- [10] ÖBB - Österreichische Bundesbahnen. *Cityjet Eco*. <https://www.oebb.at/dam/jcr:b697320b-4493-48f2-a9f4-b8ff3af4d4ec/datenblatt-cityjet-eco.pdf>. Zuletzt aufgerufen am: 2023-12-26.

- [11] Wikipedia. *Strohmabnehmer ICE 3*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Stromabnehmer>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-01-02. 2007.
- [12] André Werske. *railjet - Hochgeschwindigkeitszug in Österreich, Deutschland, Ungarn*. <https://www.hochgeschwindigkeitszuege.com/oesterreich/railjet.php>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-01-02.
- [13] Walter Hammer und Christian Thoma. »Vectron - Die neue Lokomotivengeneration für den europäischen Schienenverkehr«. *40. Tagung "Moderne Schienenfahrzeuge"*, Graz (2011).
- [14] Internationaler Eisenbahnverband. »UIC 552, Versorgung der Züge mit elektrischer Energie - Technische Einheitsmerkmale der Zugsammelschiene (ZS)« (1997).
- [15] L. Rybach und M. Pfister. »Temperature Predictions and Predictive Temperatures in Deep Tunnels«. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 27.2 (1994), S. 77–88.
- [16] Schweiz WASCOSA AG Luzern. »Schlussbericht zum Forschungsprojekt „Energieversorgung von Güterwagen mittels Zugsammelschiene“« (2019).
- [17] Siemens Mobility. *Hilfsbetriebsumrichter*. <https://www.mobility.siemens.com/global/de/portfolio/fahrzeugkomponenten/hilfsbetriebeumrichter.html>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-01-03.
- [18] Kiepe Electric Schweiz. *Bordnetzumrichter*. <https://www.apsag.com/de/bordnetzumrichter/bordnetzumrichter/>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-01-03.
- [19] RailCargo Group. *RoLa - RailCargo Group*. <https://rola.railcargo.com/>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-01-06.
- [20] RCC - Railway Competence and Certification. <http://rcc-rail.com/index.php?id=83>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-02-22.
- [21] Kiepe Electric Schweiz. <https://www.apsag.com/de/kiepe-electric-schweiz-ag/ueber-uns/>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-02-22.
- [22] DIN Deutsches Institut für Normung. »DIN EN 50121-x, Normenreihe, Bahnanwendungen - Elektromagnetische Verträglichkeit« (2017).
- [23] Internationaler Eisenbahnverband. »UIC 571-4, Einheitsgüterwagen - Güterwagen des kombinierten Verkehrs - Merkmale« (2014).
- [24] DIN Deutsches Institut für Normung. »DIN EN 15273-2, Bahnanwendungen - Begrenzungslinien - Teil 2: Fahrzeugbegrenzungslinien« (2017).
- [25] ÖBB - Österreichische Bundesbahnen. *ÖBB Bilanz 2022*. <https://presse.oebb.at/de/publikationen/geschaeftsbericht-2022>. Zuletzt aufgerufen am: 2023-12-12.

-
- [26] Mercedes Benz Trucks. *eActros*. https://www.mercedes-benz-trucks.com/de_AT/emobility/world/our-offer/eactros-and-services.html. Zuletzt aufgerufen am: 2023-12-12.
- [27] Kiepe Electric Schweiz A.G. *Technische Spezifikation MWSL 5UIC/3x400-72kVA/110-5*. Vorläufige Fassung des Datenblattes.
- [28] ÖAMTC. *ÖAMTC-Untersuchung: Ladeverluste bei Elektrofahrzeugen*. <https://www.oeamtc.at/thema/elektromobilitaet/oeamtc-untersuchung-ladeverluste-bei-elektrofahrzeugen-53183736>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-01-06.
- [29] Adria Kombi d.o.o. *Maribor - Wels and v.v. - time table*. <https://adriakombi.si/products/rolling-motorway/timetable?lang=en>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-03-22.
- [30] Bundesministerium für Inneres. *Innenministerium verlängert Grenzkontrollen zu Ungarn und Slowenien*. <https://www.bmi.gv.at/news.aspx?id=47424D4C426552675947303D>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-03-22.
- [31] ÖBB - Österreichische Bundesbahnen. *Nightjet Autozug*. <https://www.nightjet.com/de/angebote/automotorrad/in-oesterreich>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-01-12.
- [32] ADAC. *Tesla Model Y: Elon Musks kompaktes Elektro-SUV im ADAC Test*. <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/tesla/tesla-model-y/>. Zuletzt aufgerufen am: 2023-12-12.
- [33] Vollert. *VLEX*. <https://www.vollert.de/de/produktbereiche/loesungen-fuer-rangierprozesse/2-wege-robot-vlex>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-01-12.
- [34] IKEM - Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. *Netzrückspeisung bei Schienenfahrzeugen mit Elektrotraktion*. <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/342892/>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-01-06. 2019.
- [35] BSc. Melanie Messner. »Berechnung des Energieverbrauchs für Triebfahrzeuge«. Magisterarb. Technische Universität Graz, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, 2014.
- [36] IKEM - Institut für Klimaschutz, Energie und Mobilität e.V. *Möglichkeiten der Energierückgewinnung im Schienenverkehr*. <https://www.forschungsinformationssystem.de/servlet/is/343025/>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-01-06. 2019.
- [37] . *Myenergi zappi Wallbox*. https://www.energieloesung.at/p/myenergi-zappi-wallbox-v2.1-bis-22-kw-mit-typ-2-ladekabel_12392. Zuletzt aufgerufen am: 2024-03-22.

- [38] E.ON Drive. *Alpitronic Hypercharger 75*. <https://www.eon-drive.at/at/loesungen/alpitronic-hypercharger.html>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-03-22.
- [39] ABB. *Terra 54 CT*. <https://new.abb.com/products/6AGC084130/terra-ce-54-ct-4n1-7m-m-0>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-01-12.
- [40] ABB. *ABB Terra 22 kW*. <https://new.abb.com/ev-charging/de/terra-ac-wandladestation>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-01-12.
- [41] Keba. *KeContact P40*. <https://www.keba.com/de/emobility/products/p40/kecontact-p40-overview>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-01-12.
- [42] E-Control. *Was kostet eine kWh Strom?* <https://www.e-control.at/konsumenten/strom/strompreis/was-kostet-eine-kwh>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-04-02.
- [43] SBB Cargo. *Der Weg zum neuen Güterwagen ist lang*. <https://blog.sbbcargo.com/der-weg-zum-neuen-gueterwagen-ist-lang/>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-04-02.
- [44] Siemens Energy. *Traction Transformers – Tractronic*. <https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product/traction-transformers.html>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-01-12.
- [45] Richard AG Murgenthal. *Stromabnehmer für die Bahn*. <https://www.richardag.ch/stromabnehmer-bahn>. Zuletzt aufgerufen am: 2024-01-12.