

Patrick Althaus & Alexander Staub

Antriebs- und Betriebskonzept für Kurswagen mit eigenem Hilfsantrieb

Masterarbeit

Power Electronic Systems Laboratory (PES)
Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich

Betreuung

Prof. Dr. Johann W. Kolar
Dr. Markus Meyer
David Menzi

31. August 2020

Danksagung

Durch diese Masterarbeit konnten wir unser Wissen im Bereich der Eisenbahntechnik erweitern und praktisch anwenden. Dank dieser Arbeit erhielten wir die einmalige Chance, ein Fahrzeugkonzept von der konzeptuellen Ebene, über die technische und betriebliche Machbarkeit und die technischen Anforderungen bis hin zur betrieblichen Ausarbeitung auszulegen.

Besonders möchten wir uns bei unseren Betreuern, Dr. Markus Meyer und David Menzi, bedanken. Ihr konstruktives Feedback und ihre hilfreichen Anregungen haben uns während der Arbeit sehr geholfen.

Bei unseren Interviewpartner*innen und den konsultierten Fachpersonen möchten wir uns dafür bedanken, dass sie sich die Zeit genommen haben, um unsere Fragen zu beantworten.

Ein weiterer Dank geht an unsere Familien und Freunde, welche uns mit Ratschlägen und Diskussionen tatkräftig unterstützt haben. Insbesondere möchten wir Annik Jeiziner, Eliane Eisenring, Beatrice Lengacher-Althaus und Pascal Niederer für das Korrekturlesen unserer Arbeit danken.

Zum Schluss möchten wir uns noch bei Prof. Dr. Johann W. Kolar und bei Emkamatik bedanken, die uns diese interessante Arbeit erst ermöglicht haben.

Zürich, August 2020

Alexander Staub und Patrick Althaus

Abstract

The number of direct through coaches in railway networks decreases as the amount of multiple units grows steadily, thus limiting the amount of possible connections. To increase the viability of through coaches, this thesis proposes a concept for motorized night train coaches to significantly simplify shunting processes and to increase the demand for night trains.

A two-coaches vehicle was found to fulfill the requirements regarding passenger capacity, flexibility and minimal technical complexity best. The motorization of the vehicles consists of two asynchronous motors with 125 kW each per bogie supplied via a converter from a 70.2 kWh LTO traction battery or the train busbar. The coaches are equipped with automatic couplers to allow for fast shunting. In addition, a new type of coupling is installed to allow decoupling of the gearbox and thus possessing different operation modes. Further, the vehicles are capable of self-supplying the pressurized air brakes to guarantee safety while shunting. Overall, this leads to additional equipment and a total weight of 126 t for the two-coach vehicle.

As a next step, a concept for the operation of the motorized through coaches was developed. In addition to a network graph, actual shunting procedures are shown. As proof of the functionality of the concept, battery cycling was simulated over the course of an exemplary line, showing that the coaches may be used on existing railway networks. A life cycle analysis was conducted to show the economic viability of the vehicles. The motorized through coaches were shown to be 500'000 CHF cheaper than classical sleeping cars and to have a return of investment of 15 % over the course of their lifetime.

To summarize, a concise concept for night through coaches has been developed and proven to be technically and operationally feasible. It showed to be even more profitable than classical train coach concepts and therefore should be able to revive the offer of night trains.

Abkürzungsverzeichnis

AB-EBV	Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung
AC	Wechselspannung
BAV	Bundesamt für Verkehr
Btkm	Bruttotonnenkilometer
BZ	Brennstoffzelle
DC	Gleichspannung
EVU	Eisenbahnverkehrsunternehmen
FM	Fahrmotor
HBU	Hilfsbetriebeumrichter
HVZ	Hauptverkehrszeiten
LTO	Lithium Titanium Oxide (Lithiumtitanat)
MOB	Montreux – Berner Oberland Bahn
NJ	NightJet
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
Pkm	Personenkilometer
RIC	Regolamento Internazionale delle Carrozze (Vereinbarung über den Austausch und die Benutzung d
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
SR	Stromrichter
TSA	Traktionssysteme Austria
Vst	Vielfachsteuerung
ZSS	Zugsammelschiene

Antriebs- und Betriebskonzept für Kurswagen mit eigenem Hilfsantrieb

MA Aufgabenstellung/ Patrick Althaus & Alexander Staub

LEM 2014 - 02.03.2020 bis 31.08.2020

Projektbeschreibung

Im internationalen Bahnverkehr wurden Reisezüge früher meistens aus Lokomotiven und Einzelwagen gebildet. Dies erlaubte es, an grossen Bahnhöfen einzelne Wagen oder Wagengruppen zwischen verschiedenen Zügen auszutauschen und so eine grössere Anzahl direkter Verbindungen für die Reisenden anzubieten. Heute werden dagegen fast nur noch Triebzüge mit fester Länge eingesetzt, was zwar den Rangieraufwand reduziert, die Anzahl Direktverbindungen aber sehr stark einschränkt. Insbesondere Nachtzüge leiden unter dieser Einschränkung, was einer der Gründe für deren Niedergang ist. Einerseits ist das Verkehrsaufkommen in der Nacht zu gering, um viele Züge zu füllen, andererseits können oder wollen die Passagiere mitten in der Nacht nicht selbst umsteigen.

Die Technik der Energiespeicher für Fahrzeuge hat sich in den letzten Jahren stark weiterentwickelt, und auch teilweise oder ganz automatisierte Zugfahrten werden zumindest denkbar. Damit könnten auch Hilfsantriebe für Reisezugwagen gebaut werden.

Die Idee der Arbeit ist es nun, ein Konzept für Einzelwagen mit einem eigenen Hilfsantrieb zu erstellen. Die Reisezugwagen sollen als normale Wagen in lokbespannten Zügen einsetzbar sein, Rangierbewegungen aber mit eigener Kraft bewältigen können. Das Konzept soll alle Aspekte umfassen, insbesondere natürlich die technischen, aber auch solche des Betriebs, der Zulassung in verschiedenen Ländern, des möglichen Angebots für die Reisenden und eine gesamtwirtschaftliche Betrachtung.

Aufgabenstellung

1. Erarbeiten Sie anhand von Literaturstudien einen Überblick über heute existierende oder vorgeschlagene Antriebsvarianten für einzelne Eisenbahnfahrzeuge. Dabei sollen auch Güterwagen und Baudienstfahrzeuge einbezogen werden. Definieren Sie eine Abgrenzung zwischen Hilfsantrieben und eigentlichen Haupt-Traktionsantrieben.
2. Definieren Sie verschiedene schaltungstechnische Konzepte für Hilfsantriebe für Reisezugwagen. Insbesondere Energiespeicher, Stromrichter, Motoren und Getriebe sollen betrachtet werden. Es sind alle Arten von Motoren und auch getriebelose Antriebe denkbar, und die

Anzahl angetriebener Achsen ist nicht vorgeschrieben. Bewerten Sie die Vor- und Nachteile der Varianten und Untervarianten zunächst qualitativ.

3. Legen Sie einen Hilfsantrieb für einen Reisezugwagen im Detail aus. Das geeignetste Konzept soll dabei berücksichtigt werden, wenn sinnvoll in Varianten, beispielsweise mit unterschiedlichen Energiespeichern. Eine vollständige Auslegung umfasst neben der Festlegung der Schaltung die Leistungsdaten, Massen, und Einbauräume aller Komponenten. Bahnspezifische Anforderungen – wie die gegebene Speisemöglichkeit aus der UIC-Zugsammelschiene – sind dabei zu berücksichtigen.
4. Erstellen Sie mögliche Betriebskonzepte für solche Wagen. Neben kommerziellen Aspekten müssen dabei die sich aus den Energiespeichern ergebenden Randbedingungen berücksichtigt werden. Nehmen Sie dazu auch mit verschiedenen Fachleuten von Bahnen und Industrie Kontakt auf, um das Konzept und die Ergebnisse zu hinterfragen.
5. Unterziehen Sie das gesamte Konzept einer umfassenden wirtschaftlichen Analyse über den Lebenszyklus der Fahrzeuge.
6. Legen Sie alle Erkenntnisse der Arbeit in einem Schlussbericht dar. Neben dem vollständigen Schlussbericht soll auch eine Kurzfassung geschaffen werden, die bei Interesse in der Bahnbranche verteilt werden kann.

Administrativ

Type: Master Thesis

Student: Patrick Althaus & Alexander Staub

Number: 2014

Start date: 02.03.2020 **End date:** 31.08.2020

Supervision: Dr. Markus Meyer
David Menzi

markus.meyer@emkamatik.com
menzi@lem.ee.ethz.ch

Professor: Prof. Dr. J. W. Kolar

Zürich, 26.02.2020.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	i
Abstract	iii
Inhaltsverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
2 Aufbau der Konzeptbewertung	11
2.1 Vorgehen	11
2.2 Aufbau der Nutzwertanalyse	12
2.3 Vorbereitungsschritte	12
2.4 Leistungsanalyse	15
2.5 Kostenanalyse	22
2.6 Bewertungskriterien	23
3 Evaluation der Fahrzeugkonzepte	25
3.1 Abgrenzung Hilfsantrieb/Hauptantrieb	25
3.2 Anforderungen an das Fahrzeug	26
3.3 Betrachtete Fahrzeugkonzepte	30
3.4 Fahrzeugkonzeptbewertung	31
3.5 Betrachtete schaltungstechnische Konzepte	34
3.6 Entscheid Fahrzeugkonzept	50
4 Detailauslegung des gewählten Konzepts	51
4.1 Konzeptübersicht	51
4.2 Energiespeicher	52
4.3 Fahrmotor und Getriebe	65
4.4 Stromrichter	68
4.5 Pneumatische Verbraucher	76
4.6 Leittechnik	78
4.7 Bedienkonzept	83
4.8 Kupplung	86
4.9 Einbauplanung	87
5 Betriebskonzept	93
5.1 Nachtzug	93
5.2 Randbedingungen	93
5.3 Betriebskonzept im Detail	95
5.4 Bewertung der Betriebskonzepte	107
6 Wirtschaftliche Analyse	111
6.1 Einleitung	111

6.2	Kostenstruktur	112
6.3	Einnahmen	119
6.4	Lebenszyklusanalyse	121
6.5	Fazit und Diskussion	124
7	Fazit	127
	Literaturverzeichnis	129
	Abbildungsverzeichnis	135
	Tabellenverzeichnis	140
A	Fachgespräche	142
B	Fachkorrespondenz	143
C	Nutzwertanalyse	144

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Motivation

Im internationalen Personenverkehr werden heute im Gegensatz zu früher vorwiegend Triebzüge eingesetzt. Früher waren vor den Triebzügen lokbespannte Wagenzüge, welche in den grossen Knotenbahnhöfen Kurswagen untereinander ausgetauscht haben, der Standard im internationalen Personenverkehr. Dieses Kurswagenkonzept ermöglichte viele Direktverbindungen, welche mit den Triebzügen, aufgrund derer unflexiblen Gefässgrösse, heute nicht mehr wirtschaftlich zu betreiben sind. Eine vorherige Masterarbeit hat zudem aufgezeigt, dass der lokbespannte Wagenzug im Fernverkehr gegenüber dem Triebzug das wirtschaftlichere Zugkonzept ist. In der Praxis ist wegen der hohen Infrastrukturauslastung in den Knotenbahnhöfen und den dichten Fahrplänen das klassische Stärken und Schwächen mit nicht angetriebenen Wagen kaum mehr möglich. Das Stärken und Schwächen mit nicht angetriebenen Wagen ist ausserdem mit einem erhöhten Rangierpersonalaufwand verbunden, welcher durch die Verwendung von Triebzügen reduziert werden kann [1]. Durch die Ausstattung der Reisezugwagen mit einem eigenen Hilfsantrieb kann der Rangieraufwand dank des Wegfalls der zusätzlichen Rangierlokomotive reduziert werden. Zusätzlich kann die Infrastrukturbelastung auf das Niveau von Triebzügen minimiert werden, ohne die hohe betriebliche Flexibilität des lokbespannten Zugkonzepts zu reduzieren.

Die Förderung alternativer Antriebe im Mobilitätssektor resultierte in technischen Fortschritten bei den Energiespeichertechnologien wie Wasserstoff und Traktionsbatterien. Dank dieser Entwicklung werden diese Technologien vermehrt auch bei Vollbahnzügen eingesetzt und die Integration eines kompakten Energiespeichers mit Hilfsantrieb in einem Reisezugwagen erscheint machbar.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Überprüfung der grundsätzlichen Machbarkeit einer Auslegung eines Reisezugwagens mit einem eigenen Hilfsantrieb. Weiter soll ein mögliches Betriebskonzept für die neuen Reisezugwagen gefunden werden, mithilfe dessen die Wirtschaftlichkeit der angetriebenen Reisezugwagen untersucht wird.

1.2 Aktueller Stand der Technik

Das System *Eisenbahn* ist ein System, welches seit 200 Jahren immer weiterentwickelt wird. Neue Technologien haben es traditionell schwer integriert zu werden, solange die Bahntauglichkeit nicht einwandfrei sichergestellt ist. Dieser Abschnitt präsentiert eine kurze Übersicht der gängigen Zugkonzepte, der heute eingesetzten Technik im Eisenbahnsystem, des aktuellen Bahnbetriebs und dessen betriebswirtschaftlicher Einordnung.

Zugkonzepte

Im Personenverkehr sind im Allgemeinen drei unterschiedliche Zugkonzepte anzutreffen: Der Lok-Wagen-Zug, der Pendelzug und der Triebzug. Der Lok-Wagen-Zug besteht aus mindestens einem Traktionsfahrzeug und einer variablen Anzahl Personenwagen. Er ist meistens in kurzer Zeit veränderbar durch das An- und Abkuppeln von Wagen. Der Pendelzug hingegen hat eine fixe Länge und ist im Betrieb wegen des Steuerwagens, welcher immer am Zugschluss bleiben muss, innerhalb eines sinnvollen zeitlichen Aufwands nicht mehrmals täglich anpassbar. Mittelfristig kann dessen Zusammensetzung jedoch geändert werden. Beim Triebzug ist eine Trennung nicht vorgesehen und es wird ausschliesslich mit ganzen Einheiten gearbeitet. Die Länge der Einheiten bleibt über die Lebensdauer in der Regel erhalten. Eine Übersicht ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Generell kann man sagen: Je weniger ein Zug trennbar ist, desto weniger flexibel kann das Angebot auf die Nachfrage abgestimmt werden [2].

Zusätzlich möglich ist die Verwendung von doppelstöckigem Rollmaterial. Dies ermöglicht eine höhere Anzahl beförderter Personen pro Meter Zuglänge, vermindert aber die Skalierbarkeit, weil die Granularität (d.h. die Kapazität eines einzelnen Wagens) grösser ist [3].

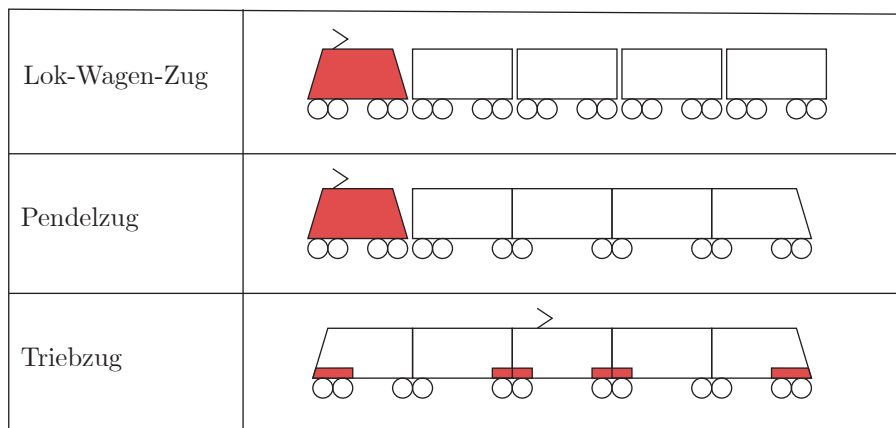


Abbildung 1.1: Häufige Zugkonzepte im Personenverkehr. Die Antriebskomponenten sind rot eingefärbt.

Seit den 1990-er Jahren lässt sich in der Schweiz und in anderen europäischen Ländern beobachten, dass vermehrt Triebzüge zur Bereitstellung des Angebots beschafft werden. Ausgehend vom Regionalverkehr hat diese Entwicklung mit dem ICN und dem Twindexx ‚SwissExpress‘ auch den Fernverkehr in der Schweiz erreicht. Im nationalen Regionalverkehr sind in der Schweiz heute in erster Linie Triebzüge unterwegs.

Im nationalen Fernverkehr findet zurzeit ein Mischbetrieb mit lokbespannten Zügen (EW IV), Pendelzügen (IC2000) und Triebzügen (SBB RAB(D)e 502, ICN) statt. Im internationalen Fernverkehr setzen die SBB sowohl Wagenzüge (RIC EC-Wagen), als auch Triebzüge (ETR 610, SBB RABe 501) ein [4].

Ein typisches Lok-Wagen-Zugkonzept ist heute noch im internationalen Personen-(nacht-)verkehr anzutreffen [5, 6]. Dort kann es dank der hohen Flexibilität einen wirtschaftlichen Betrieb sicherstellen, respektive diesen erst ermöglichen. Neu wird jedoch auch dort vermehrt auf Pendelzüge gesetzt [7]. Trotz diverser Vorteile beinhaltet ein solches Konzept Nachteile wie zum Beispiel die hohen Personalkosten und einen hohen Zeitaufwand. Um diese Faktoren zu verbessern, gibt es Vorschläge, ein Drehgestell mit einem Hilfsantrieb für den Rangiervorgang auszurüsten. Für den Güterverkehr zielt das System FlexCargoRail [8] oder der Güterwagen 4.0 [9] in diese Richtung, während im Personenverkehr Siemens Mobility an einem solchen Projekt forscht [10].

Ein weiterer Vorschlag zur Verbesserung der Flexibilität und zur besseren Abstimmung der Gefässgrösse auf die Nachfrage ist ein Mischkonzept bestehend aus Triebzügen und angetriebenen Verstärkungsmodulen [1].

Abschliessend kann festgestellt werden, dass bis auf einige theoretische Konzepte, einfache Prototypen und Pressemitteilungen die Idee eines eigenen Hilfsantriebs für Kurswagen bis jetzt nicht weiterverfolgt wurde. Das nächste Unterkapitel behandelt die technische Ebene moderner Kurswagen und Züge.

Stand der Technik

Die technologischen Entwicklungen vergangener Jahre sind auch an der Eisenbahn nicht spurlos vorübergegangen. Folgende elektrische und mechanische Technologien haben sich etabliert:

Elektrischer Teil:

Im Antriebsstrang ist heute der Asynchronmotor mit Umrichtertechnik der Standard [11]. Neuerdings spielt auch der mit Permanentmagneten erregte Synchronmotor eine Rolle, der sich durch einen besseren Wirkungsgrad in einigen Arbeitspunkten auszeichnet [12] und zum Beispiel beim SBB RABe 502 verbaut wurde [13].

Um einen Drehstrommotor effizient betreiben zu können, ist ein Umrichter notwendig. Früher wurden in Eisenbahnfahrzeugen Thyristor-basierte Umrichter verwendet. Später wurden diese von der GTO- und schliesslich von der IGBT-Technik abgelöst [14]. Ein grosser Vorteil der Umrichtertechnologie ist der modulare Aufbau. So können Motorstromrichter, Hilfsbetriebeumrichter und Netzstromrichter alle an den selben Zwischenkreis angeschlossen werden, welcher wiederum mit weiteren Umrichtern erweitert werden kann.

Seit dem Verschwinden der Dampftraktion sind die elektrische und die Dieseltraktion die dominierenden Energiequellen. Wegen der hohen Emissionen und um eine nachhaltige Energieversorgung langfristig zu sichern, sind Bestrebungen im Gange, die Dieseltraktion zu ersetzen [15]. Die folgenden Technologien kommen dabei zur Anwendung:

Elektrifizierung: Werden bestehende Eisenbahnstrecken elektrifiziert, kann auf Dieselfahrzeuge verzichtet werden. Bei tiefen Frequenzen ist eine Elektrifizierung aufgrund der hohen Infrastrukturkosten nicht wirtschaftlich [16].

Alternative Treibstoffe: Dieselfahrzeuge haben zahlreiche Vorteile, wie zum Beispiel ihre Langlebigkeit und Robustheit. Um diese Vorteile beizubehalten, wird intensiv an synthetischen Treibstoffen geforscht. Diese sind jedoch nur bedingt eine klimafreundliche Alternative, da ihre Synthese zurzeit nur mit grossem Energieaufwand möglich ist [17].

Traktionsbatterien: Eine Elektrifizierung seitens des Fahrzeugs kann mit Traktionsbatterien erreicht werden. Diese Technologie ist bereits weit ausgereift und die Produktionskapazitäten werden stetig ausgebaut [18, 19]. Einige Schienenfahrzeughersteller haben bereits ein Batteriefahrzeug im Portfolio und erste Bestellungen sind eingegangen, respektive Prototypen sind bereits im Betrieb [20]. Neben der relativ kurzen Lebensdauer der Batterien und der benötigten Ladeinfrastruktur [21], ist der grösste Nachteil bei Batteriefahrzeugen die tiefe Energiedichte und das daraus resultierende hohe Gewicht.

Brennstoffzellenantrieb: Ein grosses Potential für die ökologisch nachhaltige Mobilität der Zukunft wird in Wasserstoffantrieben gesehen. Bisher ist die Brennstoffzelle vor allem bei LKWs zum Einsatz gekommen [22]. Vergangenes Jahr konnte aber zum Beispiel Stadler Rail erste Wasserstoff-Flirts verkaufen [23]. Nachteile des Brennstoffzellenantriebs sind die fehlende Infrastruktur und der schlechte Wirkungsgrad über die gesamte Prozesskette [24].

Daraus folgt, dass die ideale Traktionsart stark vom gewählten Betriebskonzept abhängt. Eine aktuelle Studie hat dies genauer untersucht. So zeigt Abbildung 1.2 das wirtschaftlichste Konzept in Abhängigkeit der Taktichte im Fahrplan und der Menge elektrifizierter Strecken, respektive der Länge der nicht elektrifizierten Strecken. Auffallend ist, dass unter einer Taktichte von einer Stunde immer die Batterie oder die Oberleitung am rentabelsten ist. Andererseits rechnet sich die Elektrifizierung einer Strecke erst, wenn ein gewisses elektrisches Grundnetz vorhanden ist. Schlussendlich haben Wasserstoffantriebe wenig bis keinen sinnvollen Verwendungszweck, solange der Wasserstoffpreis nicht massiv sinkt.

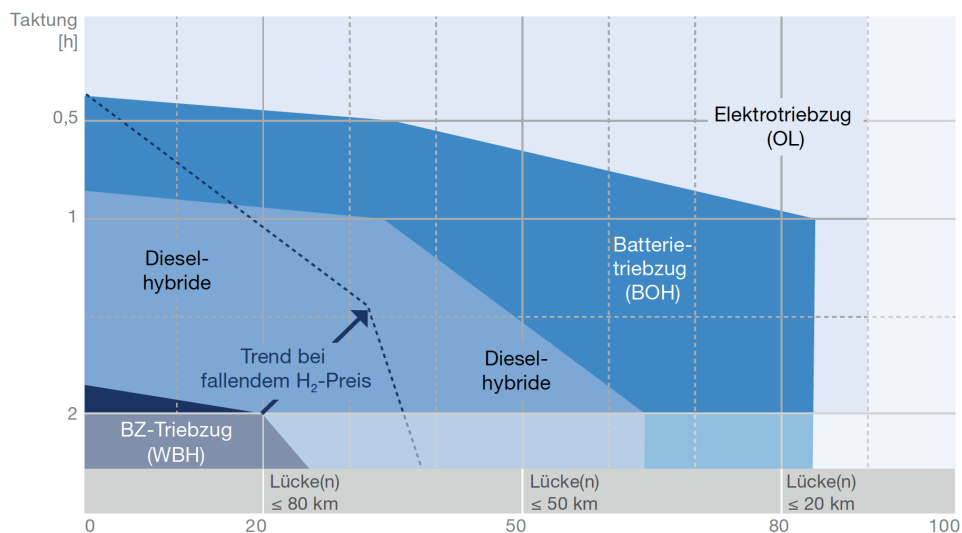


Abbildung 1.2: Optimales Einsatzgebiet für die verschiedenen Traktionsarten. Auf der x-Achse ist dargestellt, wie viel Prozent des Netzes bereits elektrifiziert sind und wie gross die nicht-elektrifizierten Streckenabschnitte sind. Die y-Achse beschreibt den Takt auf der Strecke [17]. BZ steht für Brennstoffzelle.

Eisenbahnwagen brauchen zur Speisung der Hilfsbetriebe wie Klimaanlage, Heizung, Leittechnik und Beleuchtung eine Energieversorgung vom Triebfahrzeug. Dies geschieht über die Zugsammelschiene (ZS). Für deren Versorgung sind vier Stromsysteme vorgesehen und normiert [25]: 1 kV 16.7 Hz, 1.5 kV 50 Hz, 1.5 kV DC und 3 kV DC. International verkehrende Fahrzeuge müssen im Stande sein, mit all diesen Spannungen umzugehen. Regulatorisch ist dies durch das Regolamento Internazionale delle Carozze (RIC) festgehalten [26]. Technisch kann dies heute durch die Umrichtertechnologie relativ einfach gehandhabt werden. Beispiel für RIC Wagen sind die EC-Wagen der SBB sowie der Viaggio von Siemens für die RZD [27].

Mechanischer Teil:

Das Fundament und Gerüst jedes Zuges ist die mechanische Auslegung. Im Rahmen dieser Arbeit sind folgende Technologien speziell von Bedeutung:

Kupplung: Die Kupplung ist die Verbindung zwischen zwei Wagenkasten oder zwischen Lok- und Wagenkasten. Die bis heute meistverwendete Kupplung ist die UIC-Schraubkupplung aufgrund ihres universellen Einsatzgebietes [14]. Um den Kuppelvorgang zu beschleunigen, sind hingegen automatische Kupplungen von Vorteil. Dazu verfügt im Unterschied zu den USA Europa über keinen Standard [28]. Einzig die Scharfenberg-Kupplung Typ 10 zielt im Hochgeschwindigkeitsverkehr in diese Richtung [29]. Falls ein Zug betrieblich nicht getrennt werden muss, kann eine Kurzkupplung eingesetzt werden [30]. Diese hat den Vorteil des tieferen Gewichts und kleineren Platzbedarfs. Ausserdem ermöglicht sie eine Verpendelung (d.h. die Nutzung zum Wendezugbetrieb) der Kompositionen, was einen Vorteil für Betrieb und Fahrgäste bringt.

Mechanischer Antrieb: Die mechanische Energie des Fahrmotors wird mithilfe eines mechanischen Antriebs auf die Radsätze des Schienenfahrzeugs gebracht. Dazu kann die Antriebsausrüstung als Tatzlager, als achsreitendes Getriebe, als Hohlwellenantrieb oder als Kardanwellenantrieb ausgeführt werden (siehe Abbildung 3.17). Erstere ist die einfachste aber auch die am schlechtesten gefederte Lösung. Letztere ist die komplexeste aber die am besten gefederte Lösung [31]. Das achsreitende Getriebe ist eine gute Kompromisslösung und wird zum Beispiel beim ICE3 eingesetzt [32]. Bei Platzknappheit kann allenfalls auch ein Kardanwellengetriebe verwendet werden [14].

Getriebe: Um die Drehzahl des Motors auf die Geschwindigkeit am Rad zu übersetzen, ist in der Regel ein Getriebe notwendig. Bei einem Einzelachsenantrieb ist für jede Achse des Drehgestells ein Motor mit dazugehörigem Getriebe vorhanden. Daneben gibt es auch noch Gruppenantriebe, bei dem ein Motor mit dem Getriebe auf beide Achsen wirksam ist [11]. Aufgrund ihrer Grösse und ihres Gewichts haben die Gruppenantriebe sich nicht durchgesetzt.

Adhäsionskupplung: Bei älteren Zahnradfahrzeugen mit gemischtem Adhäsions- und Zahnradantrieb kam gelegentlich eine Adhäsionskupplung zum Einsatz. Deren Vorteil ist, dass im Zahnradbetrieb die Radsätze nicht angetrieben werden. Ein Beispiel ist in Abbildung 1.3 zu sehen. Diese Technologie kann zum Beispiel auch beim Auskoppeln eines Rangierantriebs bei Kurswagen zur Anwendung kommen (siehe Kapitel 3).

Bremsen: Im Eisenbahnbereich ist bis heute die indirekte Druckluftbremse Standard. Diese ist ausfallsicher, da die Bremse im Fehlerzustand anliegt und nur bei genug hohem Hauptleitungsdruck gelöst wird.

Bei Triebfahrzeugen gibt es in der Regel zusätzlich eine direkt wirksame Druckluft-Rangierbremse. [33] Um die Abnutzung der mechanischen Teile zu minimieren, wird, wenn möglich, die elektrische Rekuperationsbremse genutzt. In Wechselstromnetzen kann die Energie der Rekuperationsbremse praktisch immer in das Fahrleitungsnetz zurückgespeist werden, während in DC-Netzen die Triebfahrzeuge zusätzlich entweder mit Bremswiderständen, einem Energiespeicher für die Rekuperation oder die Unterwerke mit bidirektionalen Umrichtern ausgerüstet sein müssen [34].

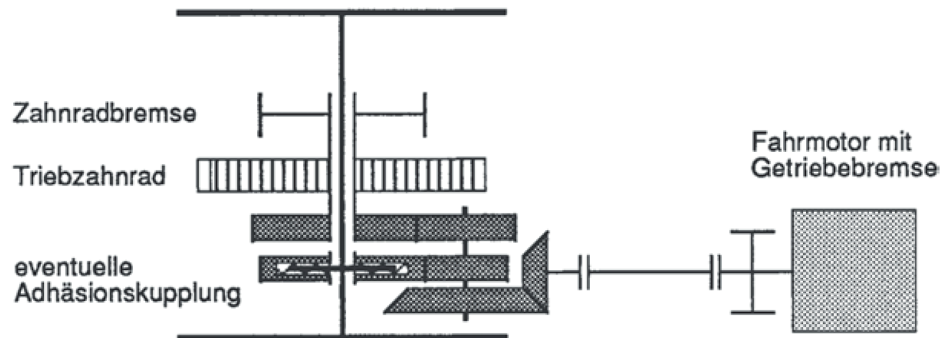


Abbildung 1.3: Gemeinsamer Zahnrad- und Adhäsionsantrieb (schematische Anordnung). Der Adhäsionsantrieb ist bei Bedarf auskoppelbar. [11]

Betriebliches und wirtschaftliches Umfeld

Dieses Unterkapitel gibt einen kurzen Überblick über die betrieblichen und wirtschaftlichen Abläufe sowie Herausforderungen eines Nachtzugkonzepts.

Betriebliche Abläufe

Die betriebliche Abwicklung ist bei einem Nachtzug deutlich aufwendiger als bei einem regulären Tageszug. Dies hat unter anderem folgende Gründe:

Kurswagenkonzept: In der Nacht ist es meist nicht rentabel einen Ganzzug von einem Ort zum anderen zu führen. Deshalb werden in der Regel nur einzelne Kurswagen oder Kurswagengruppen auf einer bestimmten Strecke eingesetzt. So wird zum Beispiel die Relation Zürich – Prag mit einem einzelnen Schlafwagen geführt [35]. Ausserdem ist das Kurswagenkonzept im Betrieb deutlich aufwendiger als ein Pendelzug oder ein Triebzug. So muss der Kurswagen in der Nacht ein oder mehrmals umgestellt werden, was einen hohen Personalaufwand bedingt, viel Zeit benötigt und Komforteinbussen für Passagiere bedeutet [36].

Personalaufwand: Im Vergleich zum regulären Eisenbahnbetrieb beinhaltet ein Nachtzug mehr personalintensive Abläufe. So muss der Zug oft rangiert werden: Das Rangieren beinhaltet dabei das Bereitstellen, Umstellen, Stärken, Schwächen und Wegstellen des Zuges. Zusätzlich ist jeder Wagen typischerweise mit mindestens einer Person zur Betreuung der Fahrgäste besetzt. Dazu gehört neben der Betreuung während der Fahrzeit auch das Vorbereiten der Wagen, welche zeitintensiv gereinigt werden müssen (siehe Anhang B). Erschwerend ist zudem die Europäische Eisenbahn-Personalverordnung, welche vorschreibt, dass nicht mehrere aneinander liegende Ruhephasen ausserhalb des Ursprungslandes liegen dürfen. Dies verunmöglicht sinnvolle mehrtägige Verbindungen respektive erhöht den Personalaufwand weiter [37].

Rollmaterial: Im Nachtverkehr wird Spezialrollmaterial in mindestens drei verschiedenen Klassen verwendet [38]. Zusammen mit den kleinen Stückzahlen sind die Fahrzeuge relativ aufwendig im Unterhalt und teuer in der Beschaffung. Während die hohe Anzahl an verschiedenen Klassen zwar den Ansprüchen der unterschiedlichen Fahrgäste gerecht wird, wird die Planung des Fahrzeugeinsatzes stark verkompliziert.

Neben diesen Hürden spielen einige Faktoren den Nachtzügen aber auch in die Hände. So ist es betrieblich in der Nacht deutlich einfacher Trassen zu erhalten, weil grundsätzlich weniger Verkehr stattfindet. Positiv ist auch, dass vermehrt ein Bewusstsein für ökologisch nachhaltige und komfortable Reisemöglichkeiten auftritt und die Nachfrage dadurch wieder anzieht [39].



Abbildung 1.4: Angebotene Nachtzüge in Europa im Jahre 2020. [40]

Wirtschaftliche Faktoren

Der hohe betriebliche Aufwand ist mit ein Grund, warum Nachtzüge tendenziell Probleme mit der Rentabilität haben. All die oben erwähnten Faktoren erhöhen die Produktionskosten. In Westeuropa sind die ÖBB die einzige Bahngesellschaft, die explizit auf den Nachtverkehr setzt und diesen auch wirtschaftlich betreibt [41].

Auch in der Schweiz und in Schweden ist im vergangenen Jahr der Wille nach mehr Nachtzugverkehr gestiegen und es soll wieder ein grösseres Angebot bereitgestellt werden [42, 43]. Folgende Faktoren sind wichtig für ein wirtschaftlich nachhaltiges Betriebskonzept für Nachtzüge:

Produktionskosten: Ein nachhaltig rentables Betriebskonzept erfüllt die grundlegende wirtschaftliche Tatsache, dass die Kosten von den Einnahmen gedeckt werden müssen. Kostentreiber im Personennachtverkehr sind die hohen Beschaffungskosten wegen des Spezialrollmaterials, die hohen Personalkosten und die tiefe Anzahl beförderbarer Personen [37]. Bis zu einem gewissen Grad unterliegt dies jedoch dem Interpretationsspielraum des Betreibers. So behauptete die DB, dass ein wirtschaftlicher Betrieb von Nachtzügen nicht möglich ist, während die ÖBB ihre Aktivitäten weiter ausbaut.

Liniennetz: Ein funktionierendes Liniennetz ist das Fundament eines wirtschaftlichen Betriebskonzepts. So haben es einzelne, isolierte Linien ausser auf gut ausgelasteten Strecken schwer, wirtschaftlich zu sein. Weiter kann die Auslastung durch eine sinnvolle Kombination von Linien erhöht werden und das Konzept durch zahlreiche Synergien rentabler werden. Beispiele dafür sind Trägerzüge für verschiedene Kurswagen oder die gute Anbindung ans Hochgeschwindigkeitsnetz. Im Unterschied zum Tagesfernverkehr ist es in der Nacht schwieriger, Fahrten zu kombinieren. Diese Schwierigkeit veranschaulicht das LunaLiner Konzept des Bündnisses Bahn für Alle, welches nie umgesetzt wurde [44].

Angebot: Ein attraktives Angebot ist essentiell für den Betrieb von Nachtzügen. So spielen Ankunfts- und Abfahrtszeiten eine wichtige Rolle für die Auslastung [37]. Deshalb soll ein Nachtzug idealerweise vor dem ersten Flug ankommen, aber auch nicht mitten in der Nacht. Die Abfahrtszeit ist weniger wichtig, solange sie nicht bereits am Nachmittag ist (siehe auch Anhang B). Wichtig ist ausserdem ein hoher Komfort (Liegemöglichkeit), Sauberkeit, Privatsphäre und Sicherheit vor Diebstahl. Auch die Kundenfreundlichkeit und ein internationales Buchungssystem sind von hoher Bedeutung, wobei es hier noch Aufholbedarf gibt [45]. Das Angebot an Nachtzügen in Europa ist in Abbildung 1.4 aufgeführt.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die technischen Entwicklungen neue und innovative Betriebskonzepte ermöglichen. Es gilt nun herauszufinden, wie diese Konzepte aussehen, deren Machbarkeit zu prüfen und deren Rentabilität sicherzustellen. Mit den angetriebenen Kurswagen wird in dieser Arbeit ein solches Konzept vorgestellt.

1.3 Umfang und Abgrenzung der Arbeit

Die vorliegende Arbeit hat zum Hauptziel, sich konzeptuell mit einem Reisezugwagen mit eigenem Hilfsantrieb zu befassen. Die Arbeitsschritte umfassen dabei als erstes die Bestimmung und Begründung eines Wagenkonzepts, da nicht von vornherein klar ist, welche Konfiguration von Wagen sich am besten eignet. Die Arbeit befasst sich anschliessend mit einer technischen Auslegung der wichtigsten Komponenten bis zum Punkt, an dem eine Offerte eingeholt werden könnte. Der Fokus ist dabei ausschliesslich auf diejenigen Teile gelegt, die bei einem angetriebenen Kurswagen neu dazu kommen, während bereits existierende Komponenten nicht betrachtet werden. Anschliessend wird ein Betriebskonzept, d.h. ein Einsatzkonzept, im Detail erstellt, welches zeigen soll, wie die Kurswagen eingesetzt werden können. Wichtig ist nachzuweisen, dass die technische Auslegung einen sinnvollen Betrieb ermöglicht. Schlussendlich wird eine wirtschaftliche Bewertung des erarbeiteten Konzepts durchgeführt, um zu zeigen, dass die Kurswagen auch in einem realistischen Umfeld rentabel betrieben werden können. Dabei hilft ein Vergleich mit bestehenden Konzepten die Resultate dieser Arbeit einzuordnen. Ein wichtiger Bestandteil der Untersuchung ist die Kontaktaufnahme zur Bahnindustrie und den Bahngesellschaften, damit das erarbeitete Konzept auch eine praktische Abstützung und Relevanz aufweist.

Die Arbeit kann damit als weiterführende Untersuchung in Bezug auf die Diplomarbeiten von Ballo [3] und Bormann [1] verstanden werden, welche sich mit dem Rollmaterial des SBB-Fernverkehrs beschäftigten. Um sich klar davon abzugrenzen, behandelt diese Arbeit jedoch ausschliesslich den internationalen Personenfernverkehr und im Detail den Nachtzugverkehr. Da hier die Rollmaterialfrage noch weniger klar entschieden ist und dieser Verkehr am Wachsen ist, wird hier viel Innovationspotential erwartet.

Nicht behandelt oder durchgeführt werden folgende Punkte:

- Es wird kein rein nationaler Regional- oder Fernverkehr betrachtet.
- Politische Faktoren und Subventionen werden in dieser Arbeit nicht betrachtet. Ausserdem werden sehr konkrete Vorschriften wie namentlich das Behindertengleichstellungsgesetz (BehiG) aussen vor gelassen.
- Es werden keine praktischen Umsetzungen zum vorgestellten Konzept durchgeführt und es werden auch keine Teilkomponenten gebaut und/oder getestet.

Der Fokus der Arbeit lässt sich somit auf folgende Weise zusammenfassen:

Es wird ein Fahrzeugkonzept für Kurswagen mit eigenem Hilfsantrieb für den internationalen Personen-Nachtverkehr entworfen und anschliessend technisch ausgelegt, sowie ein Betriebskonzept erarbeitet und auf seine Wirtschaftlichkeit geprüft.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in fünf grosse Hauptkapitel, eine Einleitung und ein Fazit: In *Kapitel 2* wird ein Vorgehen entwickelt, um verschiedene Fahrzeugkonzepte zu bewerten und den geeignetsten Entwurf zu ermitteln. Dies wird mithilfe einer Nutzwertanalyse erreicht, welche sowohl technische als auch betriebliche und wirtschaftliche Faktoren berücksichtigt.

In *Kapitel 3* werden die Anforderungen an die angetriebenen Reisezugwagen definiert und anschliessend mithilfe des Vorgehens aus Kapitel 2 das geeignetste Konzept aus verschiedenen Entwürfen gewählt. Im weiteren Verlauf des Kapitels werden bereits technologische Designentscheide zu verschiedenen Hauptkomponenten getroffen.

Nachdem das Fahrzeugkonzept feststeht, wird dieses in *Kapitel 4* im Detail ausgelegt. Der Fokus liegt auf denjenigen Komponenten, die über eine normale Ausrüstung eines Reisezugwagens hinausgehen. Neben der Dimensionierung des Energiespeichers und des Antriebstrangs werden auch Pneumatik, Leittechnik und Kupplung ausgelegt. Zur Funktion des Fahrzeugs wird ein Bedienkonzept erstellt und schlussendlich eine Einbauplanung der ausgelegten Komponenten präsentiert.

In *Kapitel 5* dient die technische Auslegung als Grundlage für ein Betriebskonzept. Das bedeutet den konkreten Einsatz des Fahrzeuges auf dem Schienennetz, welches zahlreiche Rahmenbedingungen setzt. Das Betriebskonzept beinhaltet neben einem konkreten Liniennetz einen genauen Ablaufplan der Rangiervorgänge und Batteriezyklen während der Fahrt. Das Ziel ist es zu zeigen, dass die Technik in der Realität auch effektiv einsetzbar ist.

Die ganze Arbeit wird in *Kapitel 6* mit einer wirtschaftlichen Betrachtung abgerundet, welche zeigen soll, dass die Fahrzeuge nicht nur sinnvoll eingesetzt werden können, sondern auch ökonomisch rentabel betreibbar sind. Dafür werden die anfallenden Kosten und Erträge im Detail beschrieben und daraus am Schluss eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt.

Am Ende der Arbeit wird in *Kapitel 7* ein Fazit über die gesamte Studie gezogen und ein kurzer Ausblick präsentiert.

Kapitel 2

Aufbau der Konzeptbewertung

Dieses Kapitel beschreibt den Aufbau der Konzeptbewertung. Das Ziel ist es, ein sinnvolles Konstrukt aufzubauen, welches als Entscheidungsgrundlage für oder gegen einen Entwurf dienen kann.

2.1 Vorgehen

Das Mittel für die Konzeptbewertung ist die Nutzwertanalyse. Diese ermöglicht es, nicht näher quantifizierbare Kriterien und nicht direkt zusammenhängende Faktoren miteinander in Bezug zu setzen [1]. In der Nutzwertanalyse werden alle relevanten Kriterien für die Konzeptbewertung definiert und entsprechend ihrer Relevanz für den Betrieb gewichtet. Die Erfüllung eines Kriteriums wird für jeden Entwurf mit einer Punktzahl bewertet, welche mit dem entsprechenden Gewicht des Kriteriums in die Gesamtpunktzahl des Konzepts einfließt. Die Gesamtpunktzahl eines Konzepts ist die Summe der gewichteten Punktzahlen der einzelnen Kriterien. Aus unternehmerischer Sicht sollte dann dasjenige Konzept weiterverfolgt werden, welches die höchste Punktzahl erreicht [46]. Der Vorteil der Nutzwertanalyse für die vorliegende Arbeit ist, dass bereits früh ein Konzeptentscheid getroffen werden kann und somit die Arbeit für die technische Auslegung nur für ein Fahrzeug gemacht werden muss. Eine Übersicht über die Funktionsweise der Nutzwertanalyse ist in Abbildung 2.1 gegeben.

Die Nutzwertanalyse erlaubt den Vergleich nicht quantifizierbarer Größen. Ein Nachteil der Analyse ist, dass sie nur grob als unabhängige Entscheidungsgrundlage dient, weil geringfügige Veränderungen an Gewichten und Bewertungsskalen das Resultat stark beeinflussen. Unabhängig davon können so grobe Fehlkonzepte ausgeschlossen werden. Alles in allem sprechen mehr Argumente für die Nutzwertanalyse als dagegen. Die Autoren versuchen mit gut dokumentierter und begründeter Arbeit zu vermeiden, sie als Werkzeug zur Bekräftigung der eigenen Ideen zu verwenden.

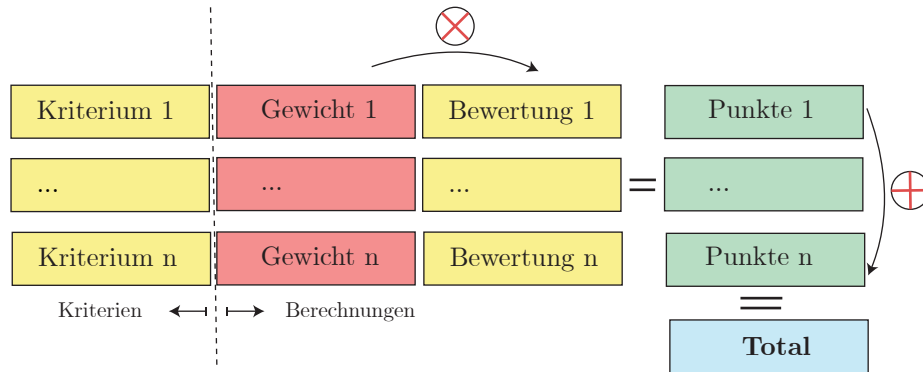


Abbildung 2.1: Darstellung des generellen Aufbaus einer Nutzwertanalyse. Die Kriterien werden definiert (gelb) und unterschiedlich gewichtet (rot). Danach wird das zu prüfende Konzept bezüglich dieser Kriterien bewertet (gelb) und Punkte vergeben (grün). Die Summe dieser Punkte ergibt die Gesamtwertung (blau).

2.2 Aufbau der Nutzwertanalyse

Die in dieser Arbeit verwendete Nutzwertanalyse besteht hauptsächlich aus drei grossen Schritten und ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Das Ziel dieser Nutzwertanalyse ist das Finden der geeignetsten Fahrzeugvariante für die Detailauslegung. Vor der Ausführung der drei Hauptschritte werden zuerst zwei Vorbereitungsschritte durchgeführt. Diese Vorbereitungsschritte sind in Abbildung 2.2 gestrichelt umrahmt. Zu diesen Vorbereitungen gehören die Berechnung des Fahrwiderstandes des Reisezugwagens und die Auslegung des Energiespeichers anhand des zur Erfüllung der Anforderungen benötigten Energieinhalts. Diese beiden Vorbereitungsschritte werden in Kapitel 2.3 im Detail beschrieben. Nach Abschluss der Vorbereitungsschritte werden die drei Hauptschritte nacheinander ausgeführt. Die drei Hauptschritte der Nutzwertanalyse sind:

1. **Leistungsanalyse:** In diesem Schritt werden unter Zuhilfenahme des aus den Eingangsdaten bekannten Fahrzeuggewichts die erforderlichen Leistungsdaten ermittelt und die zusätzlichen Komponenten für den Hilfsantrieb ausgelegt. Die Leistungsanalyse wird in Kapitel 2.4 im Detail erläutert.
2. **Kostenanalyse:** In diesem Schritt werden mithilfe der Resultate aus der Leistungsanalyse die Lebenszykluskosten und die Kilometerkosten der Fahrzeuge berechnet. Die Kostenanalyse wird in Kapitel 2.5 genauer vorgestellt.
3. **Konzeptbewertung:** In der Konzeptbewertung wird mithilfe der Erkenntnisse aus den ersten beiden Schritten eine Nutzwertanalyse durchgeführt. Die möglichen Fahrzeugkonzepte werden anhand von zu Beginn festgelegten Kriterien bewertet, um das geeignetste Konzept zu evaluieren. Die Kriterien und deren Gewichtung sind in Kapitel 2.6 näher beschrieben.

Nach Absolvierung der drei Hauptschritte resultiert aus der Nutzwertanalyse die Bewertung der einzelnen Fahrzeugentwürfe.

2.3 Vorbereitungsschritte

Die Vorbereitungsschritte der Nutzwertanalyse sind die Berechnung des sich aus den Anforderungen an die Beschleunigung ergebenden Fahrwiderstands und die Ausle-

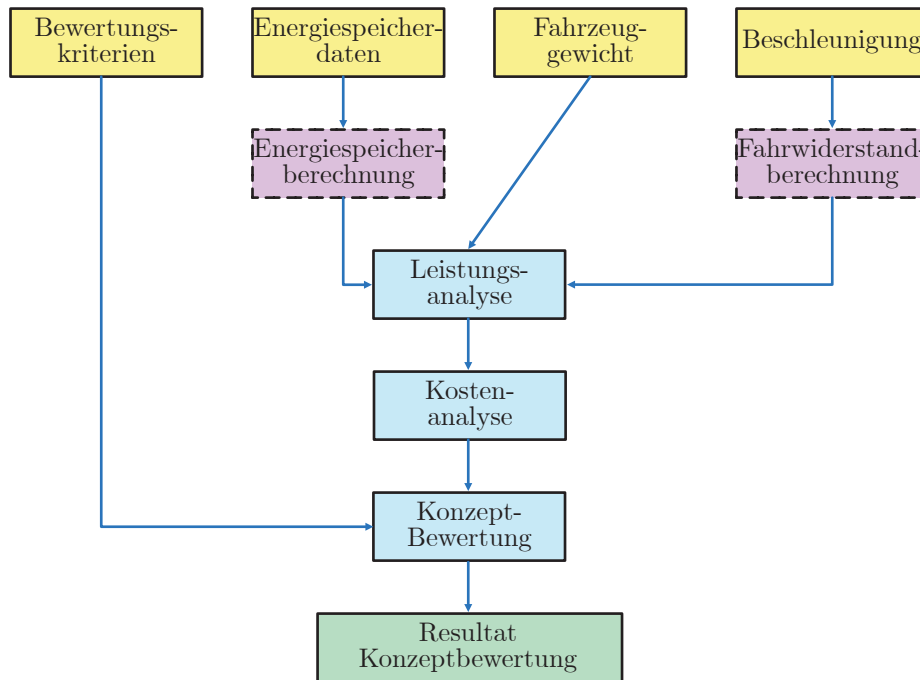


Abbildung 2.2: Aufbau der Nutzwertanalyse. Ausgehend von den Eingangsdaten (gelb) werden zuerst die Vorbereitungsschritte (violett), dann die drei Hauptschritte (blau) durchgeführt, was zum Resultat in Form einer Konzeptbewertung führt (grün). Dieser Ablauf wird für jeden Fahrzeugentwurf durchgeführt.

gung des Energiespeichers, dank derer der Speicher die Ziele bezüglich Reichweite und Standzeiten erfüllen kann. Die Anforderungen an das Fahrzeug sind in Kapitel 3.2 aufgeführt.

2.3.1 Fahrwiderstand

Der Fahrwiderstand des Reisezugwagens wird benötigt, um die Leistung des Fahrzeugs berechnen zu können. Für den resultierenden Fahrwiderstand werden der Laufwiderstand und der Beschleunigungswiderstand berücksichtigt. Der durch eine Steigung verursachte zusätzliche Fahrwiderstand wird vernachlässigt, da alle Leistungsberechnungen in der Ebene stattfinden und der Steigungswiderstand somit immer null ist. Die Komponenten des Fahrwiderstands werden gemäss Filipović [11] berechnet und danach zum gesamten Fahrwiderstand addiert. Der Laufwiderstand W_1 wird anhand folgender Formel berechnet:

$$W_1 = w_r + k \cdot (v + \Delta v)^2 \cdot 10^{-3} \quad [\text{N/kN}] \quad (2.1)$$

wobei w_r dem Rollwiderstand, k dem Koeffizienten für die Zusammensetzung der Züge, v der Geschwindigkeit des Fahrzeugs und Δv der Windgeschwindigkeit entspricht. Die Geschwindigkeit v entspricht der Geschwindigkeit im Nennleistungspunkt des Fahrzeugs und wird in den Anforderungen an das Fahrzeug festgelegt.

Der Beschleunigungswiderstand ist abhängig von der in den Anforderungen gewünschten Anfahrbeschleunigung und wird mithilfe dieser Formel berechnet:

$$W_a = \frac{a \cdot \xi}{g} \cdot 10^3 \quad [\text{N/kN}] \quad (2.2)$$

wobei a der Beschleunigung des Fahrzeugs, g der Erdbeschleunigung und ξ dem Zuschlagsfaktor für rotierende Massen entspricht. Die für die Fahrwiderstandsbe-
rechnung verwendeten Faktoren sind in Tabelle 2.1 abgebildet.

Faktoren		Werte	
Rollwiderstand [N/kN]	w_r		1.1
Zusammensetzung des Zuges	k		0.25
Windgeschwindigkeit [km/h]	Δv		10
Zuschlag für rotierende Massen	ξ		1.06

Tabelle 2.1: Übersicht über die verwendeten Faktoren und deren Werte für die Fahrwiderstandsbe-
rechnung.

2.3.2 Energiespeicheranalyse

In der Energiespeicheranalyse werden das Gewicht und das Volumen des Energiespeichers ermittelt. In Kapitel 3.5 werden die verschiedenen Antriebstechnologien Diesel, Wasserstoff und Traktionsbatterie verglichen und bewertet. Die Bewertung zeigt auf, dass die Traktionsbatterie für diese Anwendung das geeignetste Konzept darstellt. Aus diesem Grund wird die Energiespeicherberechnung nur für die Dimensionierung einer Traktionsbatterie ausgelegt.

Eine Übersicht über die Ein- und Ausgänge der Energiespeicheranalyse ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Der Energiespeicher wird anhand des benötigten Energieinhalts ausgelegt. Dieser ergibt sich aus den Anforderungen an die Reichweite. Für die Berechnungen werden auch die gravimetrische Energiedichte in Wh/kg und die volumetrische Energiedichte in Wh/l des verwendeten Energiespeichers benötigt. Durch die Verwendung einer Batterie als Energiespeicher muss zusätzlich die maximale Entladetiefe als Einschränkung spezifiziert werden. Als Resultat der Analyse erhält man das Gewicht und das Volumen des Speichers.

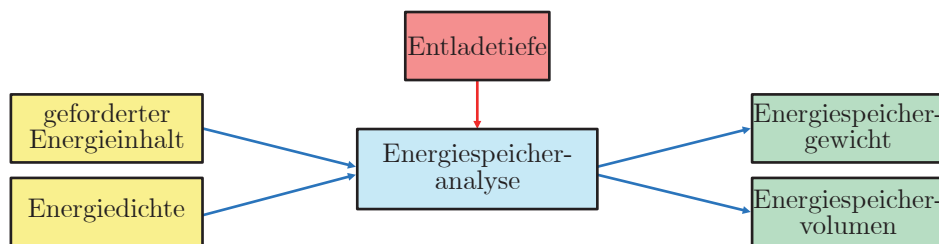


Abbildung 2.3: Übersicht über die Ein- und Ausgänge der Energiespeicheranalyse. Die Eingangswerte sind gelb und die Einschränkungen rot eingefärbt. In Grün sind die Resultate der Energiespeicheranalyse dargestellt.

Die Berechnung des Volumens und des Gewichts des Energiespeichers wird mit folgender Formel berechnet:

$$V_E = \frac{E_{\text{soll}}}{DoD \cdot \rho_v} \quad (2.3)$$

wobei E_{soll} der benötigten Energie, DoD der maximalen Entladetiefe und ρ_v der volumetrischen Energiedichte des Energiespeichers entspricht. Um das Gewicht des Energiespeichers zu ermitteln, wird die gleiche Formel wie für das Volumen verwendet, mit dem Unterschied, dass die volumetrische Energiedichte ρ_v mit der gravimetrischen Energiedichte ρ_m ersetzt wird.

2.4 Leistungsanalyse

Die Leistungsanalyse berechnet die benötigte Leistung der Antriebskomponenten, wie Stromrichter und Fahrmotoren und ermittelt die daraus resultierenden Gewichte und Volumen der zusätzlichen Ausrüstung. Eine Übersicht über die Eingangs- und Ausgangsdaten der Leistungsanalyse ist in Abbildung 2.4 dargestellt.

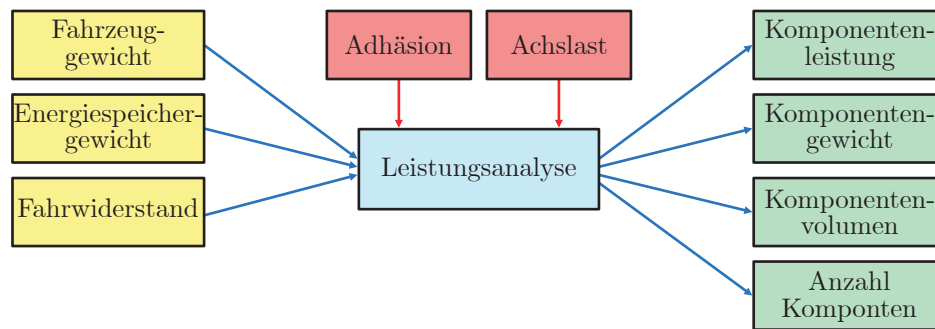


Abbildung 2.4: Ein- und Ausgänge der Leistungsanalyse. In Gelb sind die benötigten Eingangsdaten für die Leistungsanalyse dargestellt. Aus diesen Angaben werden die in Grün dargestellten Ausgangsdaten berechnet. Die verwendeten Einschränkungen für die Leistungsanalyse sind rot markiert.

Als Eingangsdaten werden das Gewicht des Reisezugwagens, das Gewicht des benötigten Energiespeichers und der anhand der gewünschten Anfahrbeschleunigung errechnete Fahrwiderstand des Fahrzeugs verwendet.

Die möglichen Resultate der Leistungsanalyse werden zusätzlich durch die in den Anforderungen in Kapitel 3.2 definierten zulässigen maximalen Adhäsionswerte und Achslasten eingeschränkt. Diese Einschränkungen werden in der Leistungsanalyse berücksichtigt und beeinflussen beispielsweise die Anzahl der angetriebenen Achsen. Die Resultate der Leistungsanalyse bestehen aus den Gewichten, dem Volumen und der Anzahl der Antriebskomponenten.

Die Leistungsanalyse besteht aus verschiedenen Berechnungen und ist in Abbildung 2.5 dargestellt. In einem ersten Schritt wird mithilfe des Fahrzeug- und Energiespeichergewichts das Gesamtgewicht des Fahrzeugs ermittelt. Anhand des Gesamtgewichts des Reisezugwagens und des Fahrwiderstands wird die benötigte Leistung berechnet. Mit dieser Leistung wird in einem nächsten Schritt das Gewicht und das Volumen des Stromrichters und des Fahrmotors abgeschätzt. Diese Abschätzung wird mit einem Skalierungsgesetz in Funktion der Leistung realisiert, um den Zusammenhang zwischen der Leistung und dem Gewicht oder dem Volumen abzubilden. Dafür wird folgende Potenzfunktion verwendet [47]:

$$f(x) = a \cdot x^b \quad (2.4)$$

wobei die Faktoren a und b individuell für das Gewicht und das Volumen jeder Komponente mithilfe einer Ausgleichsrechnung ermittelt werden. Die Ausgleichsrechnung wird mit MATLAB durchgeführt und basiert auf der nichtlinearen Methode der kleinsten Quadrate [48]. Die Bestimmung der Faktoren wird in den Abschnitten zu den Stromrichter- und Fahrmotorberechnungen näher erläutert. Das zusätzliche Gewicht beeinflusst die zur Erfüllung der Anforderungen benötigte Leistung des Fahrzeugs. Aus diesem Grund wird die Leistungsanalyse so oft wiederholt, bis sich das Resultat nicht mehr verändert. Die einzelnen Berechnungsschritte der Leistungsanalyse sind in den folgenden Abschnitten genauer beschrieben.

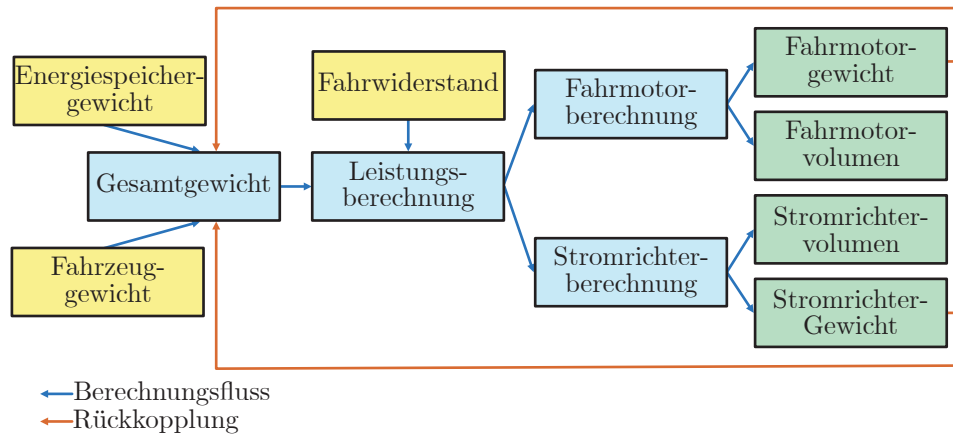


Abbildung 2.5: Aufbau der Leistungsanalyse. Mithilfe der Eingangsdaten (gelb) wird die benötigte Leistung und die daraus folgenden Fahrmotor- und Stromrichter-gewichte berechnet (blau). Diese Gewichte (grün) haben einen Einfluss auf das Fahrzeuggewicht und die Berechnungen werden wiederholt. Zusätzlich wird das Volumen der Komponenten berechnet (grün).

2.4.1 Leistungsberechnung

In der Leistungsberechnung wird anhand des Gesamtgewichts des Fahrzeugs und des Fahrwiderstands, welcher aus den Vorgaben zur Beschleunigung resultiert, die gewünschte Anfahrzugkraft berechnet. Aus der Anfahrzugkraft werden die erforderliche Leistung und der benötigte Haftwert ermittelt. Die Anfahrzugkraft wird mithilfe dieser Formel berechnet:

$$Z_{\text{start}} = (W_1 + W_a) \cdot m \cdot g \quad (2.5)$$

wobei W_1 dem Laufwiderstand, W_a dem Beschleunigungswiderstand und m der Gesamtmasse des Fahrzeugs entspricht. Die Konstante g symbolisiert die Erdbeschleunigung.

Aus der Zugkraft Z_{start} lässt sich die erforderliche Leistung errechnen:

$$P_{\text{soll}} = Z_{\text{start}} \cdot v \quad (2.6)$$

wobei v der Geschwindigkeit des Fahrzeugs im Nennleistungspunkt entspricht.

Zusätzlich wird aus der gewünschten Zugkraft Z_{start} der benötigte Haftwert μ mithilfe dieser Formel ermittelt:

$$\mu = \frac{Z_{\text{start}}}{m \cdot g \cdot z} \quad (2.7)$$

wobei z der Anzahl angetriebener Achsen und m der Gesamtmasse des Fahrzeugs entspricht. Die Konstante g symbolisiert die Erdbeschleunigung.

Falls der Haftwert grösser ist als die vorgegebene Obergrenze, wird eine zusätzliche angetriebene Achse vorgesehen, um die gewünschte Zugkraft auf mehr Achsen zu verteilen.

2.4.2 Stromrichterberechnung

In der Stromrichterberechnung werden das Volumen und das Gewicht des resultierenden Stromrichters mithilfe eines Skalierungsgesetz anhand der benötigten Leistung geschätzt. Dies wird für die Bestimmung der voraussichtlichen Gewichte und

Volumen der zusätzlichen Komponenten benötigt. Zur Bestimmung des Zusammenhangs zwischen der Leistung und dem Gewicht oder Volumen werden die Leistungs-, Gewichts- und Volumendaten von bestehenden Stromrichtern in verschiedenen Leistungsklassen erfasst und ausgewertet. Bei der Erfassung der Leistung eines Stromrichters werden die Traktions- und die Hilfsbetriebeleistung berücksichtigt. Als Datengrundlage werden verschiedene Datenblätter zu Stromrichtern von den Herstellern ABB, Ingeteam, Medcom, Toshiba und Voith verwendet. Die Stromrichter werden anhand ihrer Kühlung in die Kategorien „Wassergekühlt“ und „Luftgekühlt“ eingeteilt. Für beide Kühlmethoden wird ein eigenes Skalierungsgesetz für das Gewicht und das Volumen ermittelt. Die für das Skalierungsgesetz optimalen Faktoren werden mit einer Ausgleichsrechnung errechnet, die auf der nichtlinearen Methode der kleinsten Quadrate basiert.

Das Gewicht ist in Abhängigkeit der Leistung für alle betrachteten Stromrichter in Abbildung 2.6 mithilfe einer doppellogarithmischen Skala dargestellt. Die Datenpunkte können je nach Bedarf während der Ausgleichsrechnung mit dem Least Absolute Residuals (LAR) Anpassungsverfahren gewichtet werden, um die resultierende Potenzfunktion robuster gegenüber einzelnen Ausreißern zu machen. Die Gewichtung der Daten nach der LAR-Methode funktioniert über das iterativ-neugewichtete Kleinste-Quadrate-Verfahren. In einem ersten Schritt wird die Ausgleichsrechnung mit ungewichteten Datenpunkten durchgeführt. Die Datenpunkte werden danach aufgrund des absoluten Abstands zur gefundenen Potenzfunktion gewichtet. Bei den Punkten mit einem größeren Abstand wird das dazugehörige Gewicht gegenüber näheren Punkten reduziert. Mit der aktualisierten Gewichtung wird erneut eine Ausgleichsrechnung durchgeführt und die Punkte mit der aktualisierten Funktion neu gewichtet. Dieses Vorgehen wird solange wiederholt, bis eine Funktion gefunden wurde, welche die gewichteten Residuen minimiert [48]. Das Skalierungsgesetz, als Resultat der Ausgleichsrechnung, ist für beide Stromrichtertypen ebenfalls in Abbildung 2.6 in Form einer durchgezogenen Linie dargestellt.

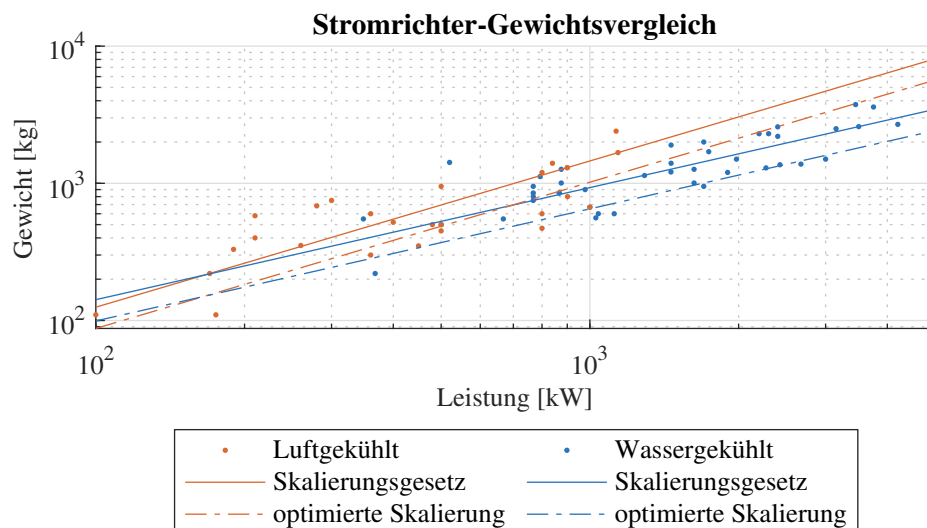


Abbildung 2.6: Darstellung des Gewichts in Abhängigkeit der Leistung der erfassten Stromrichter. Die durchgezogenen Geraden entsprechen den ermittelten und die gestrichelten Linien den optimierten Skalierungsgesetzen, welche für die Nutzwertanalyse verwendet werden. Mit dieser Modifikation werden die resultierenden Stromrichtergewichte anhand der optimalen Auslegungen abgeschätzt.

Für die Nutzwertanalyse wird vorausgesetzt, dass sich das resultierende Gewicht

des Stromrichters nur an den optimalen Auslegungen und nicht am Durchschnitt aller betrachteten Stromrichter orientiert. Aus diesem Grund werden die verwendeten Skalierungsgesetze so optimiert, dass die Potenzfunktion am unteren Rand der möglichen Stromrichterdesigns liegt. Dazu wird der Faktor a der Potenzfunktion modifiziert. Die optimierten Skalierungsgesetze für das Gewicht des Stromrichters sind in Abbildung 2.6 mit einer gestrichelten Linie dargestellt. Für die Nutzwertanalyse werden die optimierten Skalierungsgesetze verwendet.

Bei der Berechnung der Skalierungsgesetze für das Verhältnis zwischen dem Volumen und der Leistung des Stromrichters wird das gleiche Verfahren angewendet wie beim Gewicht. Die Datenpunkte sind sehr kompakt über die Leistungsklassen verteilt und es gibt keine klaren Ausreisser. Aus diesem Grund wird, im Gegensatz zum Skalierungsgesetz für das Stromrichtergewicht, beim Volumen auf die iterative Gewichtung der einzelnen Datenpunkte gemäss dem LAR-Verfahren in der Ausgleichsrechnung verzichtet. Jeder Datenpunkt erhält aus diesem Grund in der Ausgleichsrechnung das gleiche Gewicht. Die Datenpunkte und die dazugehörigen Resultate der Ausgleichsrechnung in Form einer durchgezogenen Linie sind für beide Kühlmethoden in Abbildung 2.7 in einer doppellogarithmischen Skala dargestellt. Auch für das Volumen wird für die Nutzwertanalyse über die Anpassung des Faktors a ein optimiertes Skalierungsgesetz bestimmt, damit sich das geschätzte Stromrichtervolumen in der Nutzwertanalyse an den optimalen realen Auslegungen orientiert. Diese optimierten Skalierungsgesetze sind mit einer gestrichelten Linie dargestellt.

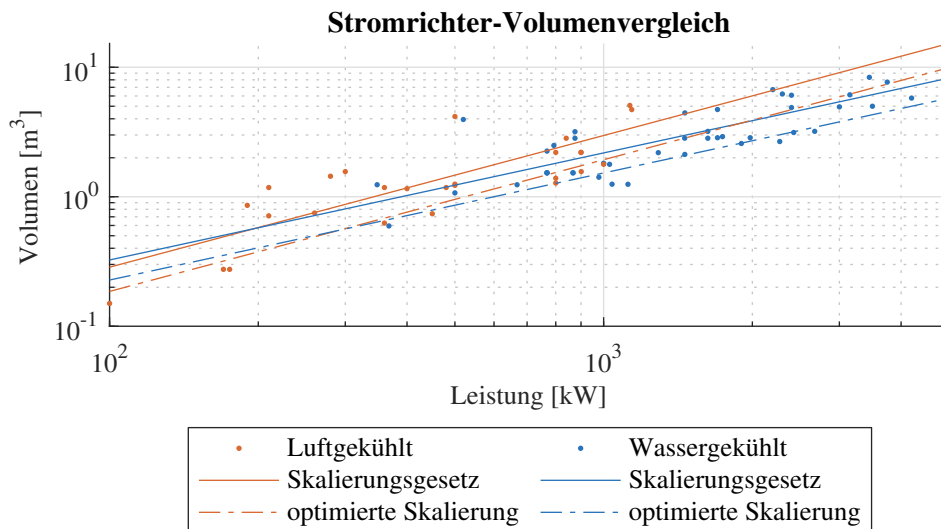


Abbildung 2.7: Abbildung des Stromrichtervolumens in Abhängigkeit der Leistung für alle erfassten Stromrichter. Die Datenpunkte und die resultierenden Volumen-Skalierungsgesetze sind für die wassergekühlten Stromrichter in Blau und für die luftgekühlten Stromrichter in Orange dargestellt. Die für die Abschätzung in der Nutzwertanalyse verwendeten optimierten Skalierungsgesetze sind mit einer gestrichelten Linie dargestellt.

In den Abbildungen 2.6 und 2.7 ist erkennbar, dass bei kleinen Leistungen primär luftgekühlte Stromrichter verwendet werden. Bei kleinen Leistungen sind die Einsparungen beim Volumen und Gewicht durch die Verwendung eines wassergekühlten Stromrichters sehr klein und rechtfertigen nicht den Zusatzaufwand für die Installation eines Wasser-Kühlkreislaufts. Bei höheren Leistungen erhöht sich bei luftgekühlten Stromrichtern das benötigte Gewicht und Volumen überproportional

gegenüber dem wassergekühlten Stromrichter und die Installation eines zusätzlichen Wasser-Kühlkreislaufs erscheint sinnvoll.

In Tabelle 2.2 sind die in den Skalierungsgesetzen der Nutzwertanalyse verwendeten Faktoren für beide Kühlmethoden aufgeführt.

Stromrichter Faktoren	Wassergekühlter Stromrichter		Luftgekühlter Stromrichter	
	a	b	a	b
	Gewicht	2.3044	0.8171	0.64568
Volumen	0.005049	0.8268	0.001717	1.017

Tabelle 2.2: Auflistung der optimierten Faktoren der Stromrichter-Skalierungsgesetze, jeweils für das Gewicht und das Volumen und abhängig von der Kühlmethode. Diese Faktoren werden in die Potenzfunktion in Formel 2.4 eingesetzt und für die Auslegung in der Nutzwertanalyse verwendet.

2.4.3 Fahrmotorberechnung

Für die Abschätzung des Fahrmotorgewichts und des Volumens in der Leistungsanalyse wird wie für die Stromrichter ebenfalls ein Skalierungsgesetz gesucht. Grundsätzlich skaliert das Gewicht und das Volumen elektrischer Maschinen gemäss dem Wachstumsgesetz folgendermassen mit der Leistung [49] :

$$V = P^{\frac{3}{4}} \quad \text{und} \quad m = P^{\frac{3}{4}} \quad (2.8)$$

wobei P die Leistung, V das Volumen und m das Gewicht des Fahrmotors darstellt.

Obwohl ein theoretisches Skalierungsgesetz existiert, werden die Leistungsdaten und das dazugehörige Gewicht und Volumen verschiedener Fahrmotoren erfasst und ausgewertet. Aus diesen Daten werden wie beim Stromrichter neue Skalierungsgesetze berechnet, um eine möglichst reale Abschätzung der Fahrmotordimensionen in der Nutzwertanalyse zu erreichen. Die Fahrmotoren werden aufgrund ihrer Kühlmethode in die zwei Kategorien „Fremdbelüftet“ und „Eigenbelüftet“ eingeteilt. Für Fahrmotoren mit einer Wasserkühlung ist die Datengrundlage zu klein, um berücksichtigt zu werden. Für die Bestimmung der Skalierungsgesetze werden die Daten verschiedener Fahrmotoren vom Hersteller Traktionssysteme Austria (TSA) verwendet. Die Potenzfunktion wird wie beim Stromrichter durch eine Ausgleichsrechnung bestimmt.

Der Vergleich zwischen dem Gewicht und der Leistung der fremd- und eigenbelüfteten Fahrmotoren ist in Abbildung 2.8 in einer doppellogarithmischen Skala dargestellt. Die Datenpunkte der fremdbelüfteten Fahrmotoren werden gewichtet, um die Robustheit des Skalierungsgesetzes gegenüber den einzelnen, grossen Ausreissern zu erhöhen. Für die Gewichtung wird wie bei den Stromrichtern das LAR-Verfahren verwendet, welches die absoluten Residuen zwischen den Datenpunkten und der Potenzfunktion reduziert. Für die eigenbelüfteten Fahrmotoren wird auf eine Gewichtung verzichtet, da die Anzahl Datenpunkte im oberen Leistungsbereich sehr gering ist. Durch die fehlende Gewichtung fliessen alle Datenpunkte gleichberechtigt in die Ausgleichsrechnung mit ein. Die aus dem Anpassungsverfahren resultierenden Skalierungsgesetze sind mit einer durchgezogenen Linie in Abbildung 2.8 dargestellt. Für die Nutzwertanalyse werden die Skalierungsgesetze wie bei den Stromrichtern durch die Veränderung des Faktors a optimiert, um nur die optimalen Fahrmotorauslegungen zu berücksichtigen. Die verwendeten optimierten Skalierungsgesetze sind für beide Kühlmethode mit einer gestrichelten Linie eingezeichnet.

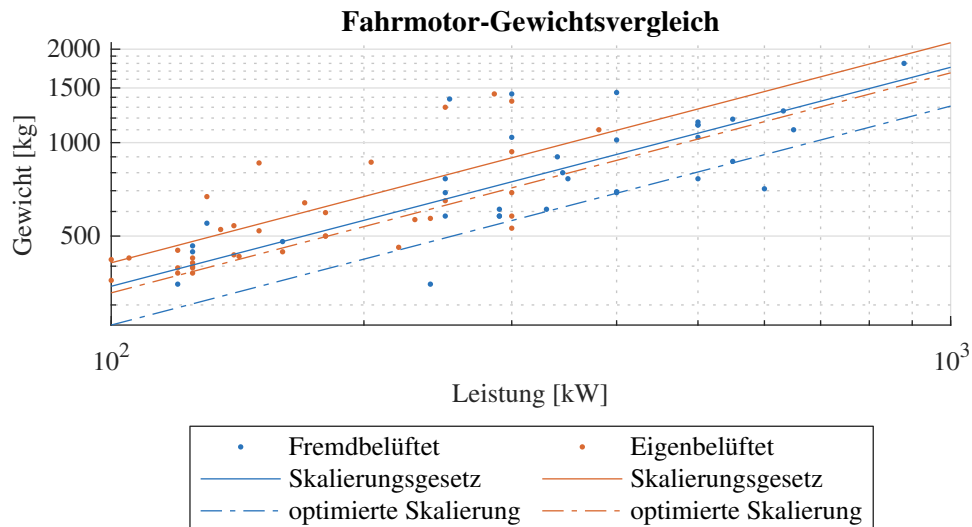


Abbildung 2.8: Darstellung der Gewichte in Abhängigkeit der Leistung der betrachteten Fahrmotoren. Die Daten und Resultate der fremdbelüfteten Fahrmotoren sind blau und die Daten und Resultate der eigenbelüfteten Fahrmotoren sind orange gekennzeichnet. Die durchgezogene Linie entspricht den aus den Daten resultierenden Skalierungsgesetzen und die gestrichelte Linie den in der Nutzwertanalyse verwendeten optimierten Skalierungsgesetzen.

Die für die Ermittlung des Fahrmotorvolumen-Skalierungsgesetzes verwendeten Volumendaten sind in Abbildung 2.9 im Verhältnis zur Fahrmotorleistung in einer doppellogarithmischen Skala dargestellt. Beim Skalierungsgesetz für die eigenbelüfteten Fahrmotoren werden die Datenpunkte wieder gemäss dem LAR-Verfahren gewichtet, da die Volumendaten einzelne grosse Ausreisser, sowohl gegen oben als auch gegen unten, aufweisen. Diese Ausreisser können aufgrund der nicht immer optimalen Volumenausnutzung, die aus der für das verwendete Fahrzeug angepassten Bauart des Fahrmotors resultieren, entstehen. Mit der Gewichtung gemäss dem LAR-Verfahren wird der Einfluss extremer Ausreisser auf das Resultat reduziert. Die Volumendatenpunkte für den fremdventilierten Fahrmotor sind wie in Abbildung 2.9 sichtbar, sehr breit gestreut und einzelne Ausreisser sind nicht erkennbar. Aus diesem Grund werden diese Daten mit einem weiteren Verfahren mit dem Namen „Bisquare“ gewichtet. Bei dieser Methode wird das iterativ-neugewichtete Kleinste-Quadrate-Verfahren angewendet, mit dem Unterschied, dass das Quadrat eines Datenpunkts anhand der Distanz des Punkts zur gefundenen Potenzfunktion gewichtet wird. Je grösser die Distanz zur Potenzfunktion ist, desto kleiner ist das Gewicht des einzelnen Datenpunkts. Dies führt dazu, dass Datenpunkte welche einen zu grossen Abstand zur Potenzfunktion aufweisen, mit null gewichtet und somit nicht berücksichtigt werden [48]. Der Vorteil gegenüber der ungewichteten Ausgleichsrechnung ist, dass offensichtliche Ausreisser bei den Datenpunkten wie beim LAR-Verfahren trotzdem nicht berücksichtigt werden und es eignet sich gut für Datensätze, welche eine hohe Streuung aufweisen. Die aus den Daten resultierenden Skalierungsgesetze sind in Abbildung 2.9 für beide Kühlmethode mit einer durchgezogenen Linie abgebildet. Die für die Nutzwertanalyse verwendeten, optimierten Skalierungsgesetze sind in der gleichen Abbildung mit einer gestrichelten Linie dargestellt.

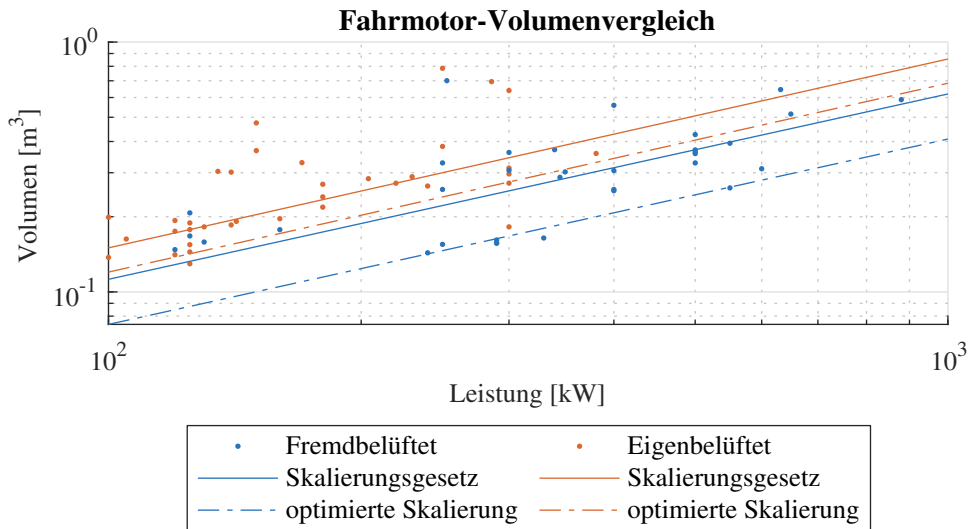


Abbildung 2.9: Abbildung des Fahrmotorvolumens in Abhängigkeit der Leistung für alle betrachteten Fahrmotoren. Die Datenpunkte und Skalierungsgesetze sind für die fremdbelüfteten Fahrmotoren blau und für die eigenbelüfteten Fahrmotoren orange eingefärbt. Das resultierende Skalierungsgesetz ist mit einer durchgezogenen Linie und das in der Nutzwertanalyse verwendete optimierte Skalierungsgesetz mit einer gestrichelten Linie eingezeichnet.

In Abbildung 2.8 und 2.9 ist erkennbar, dass die eigenbelüfteten Fahrmotoren gegenüber den fremdbelüfteten Fahrmotoren sowohl schwerer als auch grösser sind. Dies entspricht den Erwartungen, da die eigenbelüfteten Fahrmotoren im Gegensatz zum fremdbelüfteten Fahrmotor einen zusätzlichen Ventilator auf der Motorwelle besitzen. Die Steigung des Skalierungsgesetzes ist bei beiden Kühlungsarten gleich und lässt den Schluss zu, dass die Kühlmethode keinen nennenswerten Einfluss auf das Skalierungsgesetz des Fahrmotorgewichts und des Volumens hat. Die ermittelten optimierten Faktoren sind in Tabelle 2.3 dargestellt und aus Resultaten für den Faktor b lässt sich erkennen, dass sich das reale Fahrmotorgewicht für grössere Leistungen gegenüber dem theoretischen Skalierungsgesetz leicht unterproportional erhöht. Beim Fahrmotorvolumen hingegen entspricht die Erhöhung des Volumens bei einer Leistungserhöhung dem theoretischen Skalierungsgesetz.

Fahrmotor Faktoren	Fremdbelüftete Fahrmotoren		Eigenbelüftete Fahrmotoren	
	a	b	a	b
Gewicht	10.035	0.7054	12.544	0.7088
Volumen	0.002435	0.7418	0.003697	0.7558

Tabelle 2.3: Auflistung der Faktoren für die berechneten Fahrmotor-Skalierungsgesetze für das Gewicht und das Volumen abhängig von der Kühlmethode. Die Faktoren werden in die Potenzfunktion in Formel 2.4 eingesetzt. Dabei handelt es sich um die in der Nutzwertanalyse verwendeten optimierten Werte.

2.5 Kostenanalyse

Die Kostenanalyse nimmt die Resultate der Leistungsanalyse und schätzt grob die Lebenszykluskosten für die verschiedenen Zugkonzepte. Der Output fließt dann direkt in die Konzeptbewertung mit ein. Sie ist nicht zu verwechseln mit der Wirtschaftlichkeitsrechnung aus Kapitel 6, welche umfassendere Betrachtungen darstellt, jedoch nur einen von mehreren Fahrzeugentwürfen betrachtet. Eine Übersicht über die Kostenanalyse zeigt Abbildung 2.10.

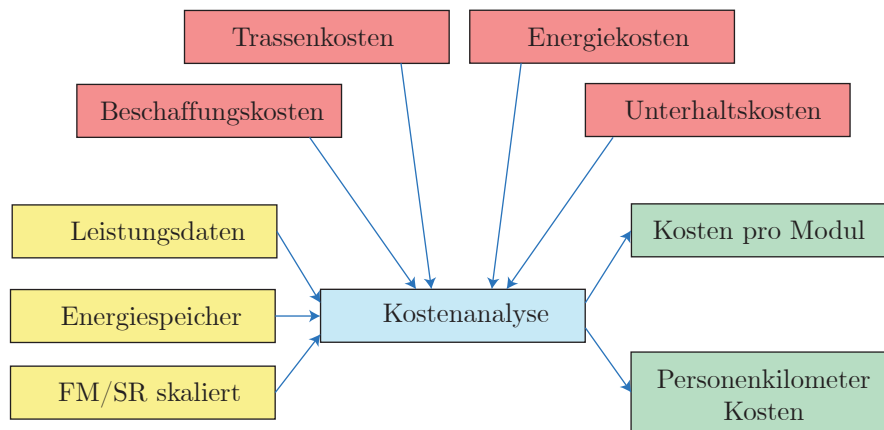


Abbildung 2.10: Übersicht über die Kostenanalyse. In Gelb sind die benötigten Inputs dargestellt. Daraus werden die in Grün dargestellten Outputs berechnet. In Rot sind die Randbedingungen dargestellt. FM steht für Fahrmotor und SR für Stromrichter.

Die Kostenschätzung benutzt Ergebnisse der Leistungsanalyse als Input. Dazu gehören Gewicht und Volumen, berechnet über die oben beschriebenen Skalierungsgesetze. Zusätzlich ist die Größe des Energiespeichers als Input gegeben. Für die Berechnungen werden Kosten für die Beschaffung, die Energie, den Unterhalt und die Trasse als Randbedingungen berücksichtigt. Die Basispreise werden aus [3] abgeleitet. Dazu werden die Massen und Volumina aus der Leistungsanalyse addiert.

Als Resultat folgen die Kosten pro Modul über die Lebensdauer sowie die Kosten pro Personenkilometer (Pkm). Diese Werte fließen als Parameter schließlich direkt in die Konzeptbewertung mit ein.

Für die Berechnungen musste ein Nachfragemodell berücksichtigt werden. Damit soll den unterschiedlichen Gefäßgrößen der Zugkonzepte Rechnung getragen werden. D.h. bei einer hohen Nachfrage werden mehr Module benötigt und somit mehr Rollmaterial, was wiederum höhere Kosten verursacht. Das benötigte Rollmaterial verändert sich aber mit dem Fahrzeugkonzept. Bei der Verwendung eines Doppelstock-Moduls braucht es weniger Module als bei einem einstöckigen. Aus diesem Grund werden die Kosten für verschiedene Nachfragen von 50 bis zu 1'400 Personen in 50er-Schritten pro Zug berechnet. Diese Kosten werden schließlich mit der effektiven Nachfrage verrechnet, welche als Gauss-Verteilung realisiert ist. Die Parameter der Verteilung sind in Tabelle 2.4 aufgeschrieben. Die Kosten werden also nach ihrer Häufigkeit gewichtet. Aus dieser Betrachtung folgt für jedes der betrachteten Fahrzeugkonzepte ein Kostenwert und ein Personenkilometer-Wert. Diese Werte fließen als absolute Zahlen in die Konzeptbewertung mit ein.

Nachfrage [Personen]	
Mittelwert μ	450
Standardabweichung σ	150

Tabelle 2.4: Standardabweichung und Mittelwert der Gaussverteilung zur Modellierung der effektiven Nachfrage.

2.6 Bewertungskriterien

In diesem Abschnitt werden die Bewertungskriterien der Nutzwertanalyse vorgestellt und deren Gewichtung begründet. Die Gewichte werden auf einer Skala von eins bis zehn verteilt. Die Skalen hängen von den Resultaten der Kostenanalyse und der Konzeptbewertung ab. Darauf wird in Kapitel 3 genauer eingegangen. In Tabelle 2.5 sind die Kriterien mit den entsprechenden Gewichten aufgelistet.

Bewertungskriterien	Kriterium	Gewicht [1...10]
Infrastruktur	Gleisanlagen	3
	Pkm-Kosten	8
Kostenanalyse	Systemkosten	10
	Verfügbarkeit	6
Energiespeicher	Infrastruktur	7
	Gewicht	9
	Dimension	9
	Technologische Ausgereiftheit	5
Betrieb	Reserven	5
	Gleisbelegung	10
Total		72

Tabelle 2.5: Übersicht über die Bewertungskriterien der Nutzwertanalyse und deren jeweilige Gewichte.

Im Folgenden wird nun näher auf die einzelnen Kriterien eingegangen:

Gleisanlagen: Dieser Faktor berücksichtigt den Bedarf an Gleisanlagen zur Abstellung von Rollmaterial. Ein höherer Bedarf resultiert in einer tieferen Punktezahl. Gleisanlagen sind bei vielen Knotenbahnhöfen genügend vorhanden, allenfalls etwas weiter weg. Deshalb wird dieses Kriterium niedrig mit dem Faktor „3“ gewichtet.

Pkm-Kosten: Die Personenkilometerkosten (Pkm-Kosten) bewerten die Kosten, die ein Fahrzeugkonzept pro Distanzeinheit benötigt. Dieser Faktor ist entscheidend für die Wirtschaftlichkeit eines Konzepts. Die Auslastung der Züge kann jedoch nicht direkt beeinflusst werden und die Pkm sind somit einer signifikanten Unsicherheit unterworfen. Deshalb wird diesem Kriterium das Gewicht „8“ gegeben.

Systemkosten: Die Systemkosten berücksichtigen die Lebenszykluskosten eines Fahrzeugs. Tiefe Kosten ergeben eine hohe Punktezahl. Diese Kosten sind nicht von Nachfrageschwankungen betroffen und repräsentieren die Kosten eines Konzepts sehr genau. Da die Kosten entscheidend sind für die Wirtschaftlichkeit eines Konzepts, wird diesem Kriterium das Gewicht „10“ verliehen.

Verfügbarkeit: Die Verfügbarkeit berücksichtigt die Robustheit in Bezug auf Ausfälle. Grössere fix verbundene Fahrzeugeinheiten sind generell weniger flexibel einsetzbar als Einzelwagen. Fällt eine Einheit aus, muss sie vollständig aus dem Verkehr gezogen werden. Somit betrachtet die Verfügbarkeit die Werkstattreserven. Damit ein Betriebskonzept gefahren werden kann, ist eine hohe Verfügbarkeit wichtig. Andererseits ist der Ausfall einer Komposition normalerweise nicht weiter dramatisch. Deshalb wird die Verfügbarkeit mit „6“ bewertet.

Infrastruktur: Dieser Faktor berücksichtigt die benötigte Infrastruktur um die Versorgung eines bestimmten Energiespeichers sicherzustellen. Teurere Infrastruktur wird mit weniger Punkten bestraft. Ohne Infrastruktur kann ein Speicher nicht verwendet werden. Andererseits ist es möglich die bestehende Infrastruktur zu erweitern oder auszubauen. Deshalb wird dieses Kriterium mit „7“ bewertet.

Gewicht: Das Gewicht der Fahrzeugkonzepte wird ebenfalls berücksichtigt. Dies ist ein sehr wichtiger Punkt, weil er für Trassenkosten und Energieverbrauch entscheidend ist. Zusätzlich dürfen die Achslasten nicht überschritten werden. Ein hohes Gewicht wird mit weniger Punkten gewertet. Aufgrund seiner Wichtigkeit wird das Gewicht mit „10“ bewertet.

Dimension: Die Dimension bewertet das Volumen eines Fahrzeugkonzepts. Dabei ist in erster Linie das Zusatzvolumen durch die Antriebsausrüstung gemeint und die damit verminderte Platzanzahl. Gemäss ÖBB Personenverkehr ist es kritisch bereits ein Abteil an Sitzplätzen zu opfern. Deshalb bekommt die Dimension ebenfalls die höchste Gewichtung von „10“.

Technologische Ausgereiftheit: Dieses Kriterium berücksichtigt die Technologie des Energiespeichers. Damit wird berücksichtigt, dass gewisse Technologien über Jahrzehnte hinaus bewährt sind, während andere erst in den Kinderschuhen stecken. Da diese Arbeit eher auf eine mittel- bis langfristige Realisierung ausgelegt ist und die Technik sich bis dahin entwickeln wird, bekommt dieses Kriterium nur ein Gewicht von „5“.

Reserven: Eine Reservenvorhaltung ist wichtig für die betriebliche Stabilität. Dieser Faktor berücksichtigt die Grösse der benötigten Fahrzeugreserve. Kleinere Fahrzeuge benötigen generell eine höhere Reserve in absoluten Zahlen. Da dieser Faktor stark vom Betriebskonzept abhängt und für diese Betrachtung noch nicht feststeht, wird dieser Faktor nur mit „5“ bewertet.

Gleisbelegung: Die Gleisbelegung beschreibt die Zeit, für welche ein Fahrzeug die Bahninfrastruktur beim Rangieren beansprucht. Ein Zug mit tiefer Maximalgeschwindigkeit und kleiner Beschleunigung braucht dabei länger. Je länger die Gleise belegt werden, desto weniger Punkte werden vergeben. Dieses Kriterium ist entscheidend für den Erfolg. In den grösseren Bahnhöfen besteht überall Platzknappheit bei den Bahnhofseinfahrten. Deshalb wird diesem Kriterium das Gewicht „10“ verliehen.

In diesem Kapitel wurde die Funktion und der Inhalt der Nutzwertanalyse genauer erläutert. Es wurde begründet, warum gewisse Methoden verwendet werden und es wurde dargelegt, wie die Konzeptbewertung durchgeführt wird. Weiter wurden die theoretischen Grundsteine für die Konzeptbewertung gelegt. Der nächste Schritt der Nutzwertanalyse besteht darin, diese verschiedenen Fahrzeugkonzepte nach ihrem Gesamtnutzen zu bewerten. Daher werden im folgenden Kapitel die Fahrzeugkonzepte evaluiert und technische Grundentscheidungen getroffen. Schlussendlich wird die Nutzwertanalyse zusammengeführt und ein Konzept zum Sieger gekürt.

Kapitel 3

Evaluation der Fahrzeugkonzepte

In diesem Kapitel werden die betrachteten Fahrzeugkonzepte und die Anforderungen an den Reisezugwagen definiert. Des Weiteren werden verschiedene schaltungstechnische Konzepte vorgestellt und evaluiert. Mithilfe der Konzeptbewertung aus Kapitel 2 wird das geeignetste Fahrzeugkonzept für die Detailauslegung ausgewählt.

3.1 Abgrenzung Hilfsantrieb/Hauptantrieb

Um begriffliche Klarheit zu schaffen, befasst sich dieser Abschnitt mit den Unterschieden zwischen einem Hilfsantrieb und einem Hauptantrieb.

Als Entscheidungskriterium zwischen Hauptantrieb und Hilfsantrieb wird die Leistungsdichte eines Fahrzeuges in kW/t gewählt. Diese beschreibt das Verhältnis zwischen der Leistung und dem Gewicht des Fahrzeuges. Die Leistungsdichte als Entscheidungskriterium hat gegenüber einem fixen Leistungswert den Vorteil, dass verschiedene Fahrzeuggrößen einfacher miteinander verglichen werden können. Bei regulären Zügen befindet sich die Leistungsdichte im Bereich von 10 bis 20 kW/t [3]. In Tabelle 3.1 ist die Leistungsdichte ausgewählter Fahrzeuge angegeben.

Name	Typenbezeichnung	Leistungsdichte kW/t	Referenz
IC 200	RABDe 502	14	[13]
Giruno	RABe 501	14	[50]
Railjet	Rh 1216	13	[51]
Nightjet	Rh 1116	9	[51, 52, 53]
IC 2000	Re 460	11	[54]
Frecciarossa	ETR 1000	20	[55]

Tabelle 3.1: Typische Leistungsdichten von ausgewählten Zuggarnituren der SBB, ÖBB und FS. Railjet-Garnitur mit sieben Anhängewagen. Nightjet-Garnitur wie NJ 446 von Wien nach Zürich / Venedig mit zwölf Anhängewagen. IC 2000 mit neun Anhängewagen (inkl. Steuerwagen Bt).

Für diese Arbeit wird die Abgrenzung zwischen Hauptantrieb und Hilfsantrieb auf 5 kW/t festgelegt. Dies bedeutet, dass der Antrieb eines Fahrzeuges mit einer kleineren Leistungsdichte als 5 kW/t in die Kategorie Hilfsantrieb fällt.

3.2 Anforderungen an das Fahrzeug

Der eigene Hilfsantrieb ist ausschliesslich für Rangierbewegungen in Bahnhöfen und Abstellanlagen vorgesehen. Der verbaute Energiespeicher muss in der Lage sein, den Antriebsstrang inklusive Hilfsbetriebe mit Energie zu versorgen. Zusätzlich muss der Energiespeicher ein Minimum an Komfortanlagen während des Rangiervorgangs bereitstellen können. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten technischen und betrieblichen Anforderungen an das Fahrzeug erläutert.

3.2.1 Technische Anforderungen

Zu den technischen Anforderungen gehören hauptsächlich die Ansprüche an den Antriebsstrang und den Energiespeicher des Reisezugwagens.

Höchstgeschwindigkeit

Der Reisezugwagen mit Hilfsantrieb besitzt zwei Höchstgeschwindigkeiten:

- Eine Höchstgeschwindigkeit für die Fahrt im Zugverband mit ausgeschaltetem Hilfsantrieb.
- Eine Höchstgeschwindigkeit für den Rangierbetrieb aus eigener Kraft.

Für die Fahrt im Zugverband beträgt die geforderte Höchstgeschwindigkeit des Reisezugwagens 200 km/h und entspricht dem Standard für internationale Reisezugwagen.

Für den Rangierbetrieb aus eigener Kraft wird eine Geschwindigkeit von mindestens 40 km/h gefordert. Diese Forderung entspricht der maximalen Geschwindigkeit für Rangierfahrten in den Bahnhöfen der Schweiz [56]. Höhere Geschwindigkeiten können auf dem Bahnhofsareal nur während einer Zugfahrt gefahren werden und dafür ist gemäss den Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (AB-EBV) eine Zugbeeinflussung zwingend nötig [57]. Die Ausrüstung der Reisezugwagen mit einer Zugbeeinflussung ist aus Komplexitäts- und Kostengründen nicht sinnvoll. Das Fahrzeug soll zusätzlich in der Lage sein, bis zu 5 km/h schneller als die vorgesehene Höchstgeschwindigkeit zu fahren, ohne dass die Komponenten im Antriebsstrang, wie der Fahrmotor oder das Getriebe, Schaden nehmen. Die geforderte Maximalgeschwindigkeit des Reisezugwagens erhöht sich somit auf 45 km/h. Für die Motor- und Getriebeauslegung muss zusätzlich berücksichtigt werden, dass sich der Rad Durchmesser im Betrieb aufgrund der Abnutzung verkleinert und daraus bei gleicher Geschwindigkeit höhere Motor- und Getriebedrehzahlen resultieren.

Beschleunigungsvermögen

Die Anfahrbeschleunigung des Reisezugwagens soll so gewählt werden, dass der Wagen eine Rangierfahrstrasse nicht länger belegt als andere Fahrzeuge. Diese Forderung soll verhindern, dass die Leistungsfähigkeit der Gleisanlagen in den Bahnhöfen durch die Verwendung der Reisezugwagen reduziert wird. Zur Ermittlung dieser optimalen Anfahrbeschleunigung wird ein mögliches Rangierszenario simuliert. Die verwendete Simulation basiert auf der Zuglaufrechnung aus [58]. Für den Reisezugwagen wird festgelegt, dass die Anfahrbeschleunigung bis zu einer Geschwindigkeit von 15 km/h beibehalten werden soll. Die Zeiten, welche der Reisezugwagen bei unterschiedlichen Anfahrbeschleunigungen benötigt, werden mit der Zeit eines Referenz-Triebzugs mit einer Anfahrbeschleunigung von 1.2 m/s^2 verglichen. Die maximale Zeit, die der Reisezugwagen für das Rangierszenario benötigen darf, ist die Zeit des Triebzugs plus 30 Sekunden.

Diese Forderung stellt sicher, dass der Reisezugwagen die Rangierfahrstrasse nicht signifikant länger benutzt als ein Triebzug.

Das Fahrzeug fährt in diesem Szenario von einem Aufstellgleis in ein Perrongleis und muss während der Fahrt aus betrieblichen Gründen einmal für 30 Sekunden im Gleisfeld anhalten. Die zurückzulegende Strecke ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Die erlaubte Höchstgeschwindigkeit beträgt auf diesem Streckenabschnitt 30 km/h. Das Fahrzeug startet 30 m vor dem Signal am Ende des Aufstellgleises und der Haltepunkt im Gleisfeld befindet sich 10 m vor dem Halt zeigenden Signal.

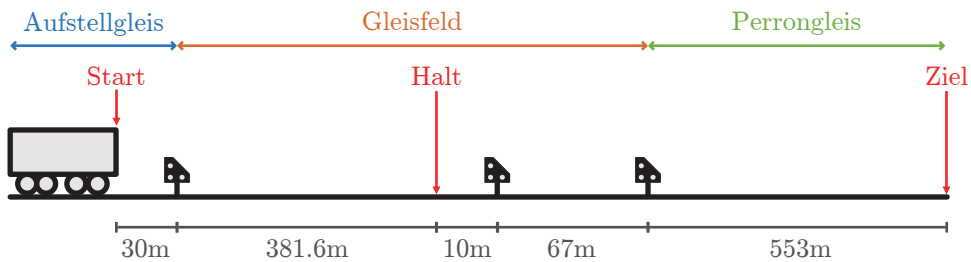


Abbildung 3.1: Darstellung des verwendeten Rangierszenarios und der zurückgelegten Strecke für die Bestimmung des benötigten Beschleunigungsvermögens.

Die Resultate für die einzelnen Anfahrbeschleunigungen sind in Abbildung 3.2 dargestellt. Darin ist ersichtlich, dass das Fahrzeug idealerweise eine Anfahrbeschleunigung von 0.4 m/s^2 besitzen muss, um innerhalb der Toleranz von 30 Sekunden gegenüber der Zeit des Referenz-Triebzugs zu bleiben. Eine Beschleunigung von 0.4 m/s^2 entspricht in etwa der typischen Anfahrbeschleunigung von Reisezügen [11].

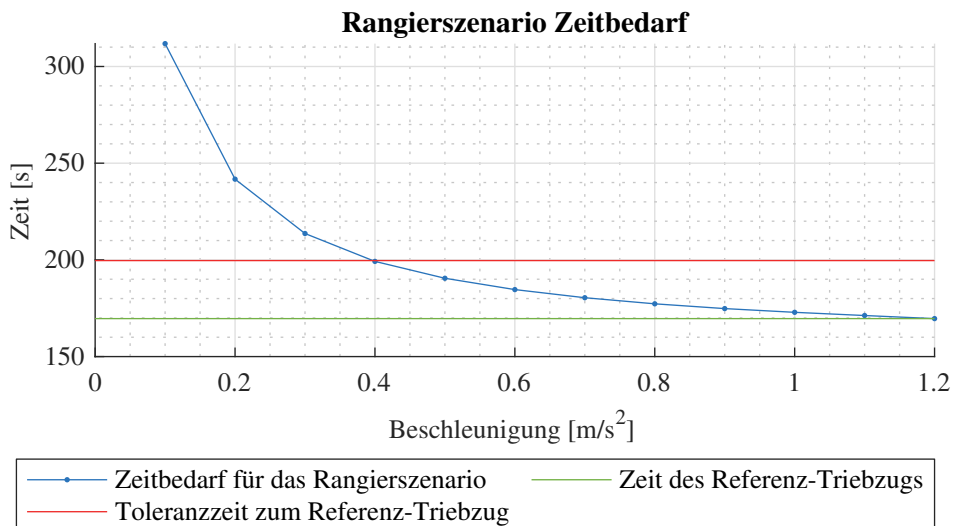


Abbildung 3.2: Resultate der Rangierszenario-Simulation für verschiedene Anfahrbeschleunigungen. Die Zeit des Referenz-Triebzugs ist in Grün abgebildet und die Zeit, welche der Reisezugwagen maximal benötigen darf, ist rot eingefärbt.

Des Weiteren ist ersichtlich, dass die zusätzliche Zeitersparnis durch eine höhere Beschleunigung sehr schnell kleiner wird. Beträgt die Zeitersparnis für das Rangierszenario bei einer Erhöhung der Beschleunigung von 0.1 m/s^2 auf 0.4 m/s^2 noch

ungefähr 110 Sekunden, reduziert sich die zusätzliche Zeitersparnis bei einer Erhöhung der Anfahrbeschleunigung von 0.4 m/s^2 auf 1.2 m/s^2 auf ungefähr 30 Sekunden. Der Grund dafür ist die tiefe Höchstgeschwindigkeit von 30 km/h und die daraus resultierende sehr kurze Beschleunigungszeit. Dies führt zu der Erkenntnis, dass für diese Anwendung eine höhere Anfahrbeschleunigung als 0.4 m/s^2 nicht sinnvoll ist.

Zusätzlich zur Bereitstellung der gewünschten Anfahrzugkraft muss der Fahrmotor genug Leistung aufweisen, um die Anfahrbeschleunigung bis zur festgelegten Geschwindigkeit von 15 km/h halten zu können.

Komfortanlagen

Vor allem im Nachtzugverkehr ist es üblich, dass sich während des Rangiervorgangs Passagiere im Reisezugwagen befinden. Die Temperatur im Reisezugwagen muss deshalb während des Rangierens in einem erträglichen Rahmen bleiben. Dies bedeutet, dass der Energiespeicher neben dem Antrieb auch noch die im reduzierten Betrieb laufenden Komfortanlagen versorgen muss. Für die Klimatisierung und Heizung eines einstöckigen Wagens wird für den Rangierbetrieb eine benötigte Leistung von 10 kW angenommen. Für den doppelstöckigen Wagen erhöht sich dieser Wert auf 15 kW . Die Dauer eines Rangiervorgangs wird mit mindestens einer Stunde angesetzt.

Reichweite

Der Reisezugwagen soll in der Lage sein, aus eigener Kraft vom Perrongleis in abgelegene Abstellanlagen und zurück zu fahren. Es wird noch eine zusätzliche Reichweitenreserve gefordert, weil nicht immer sichergestellt werden kann, dass der Energiespeicher beim Beginn der Rangierbewegung vollständig gefüllt ist. Für die Auslegung des Energiespeichers wird deshalb eine maximale Reichweite von 20 km bei einer Steigung von 0 ‰ angenommen. Während der Fahrt werden zusätzlich zehn Halte mit einer Dauer von je 30 Sekunden berücksichtigt, um möglichst alle typischen Rangierszenarien abzudecken. Die Bremsenergie soll, wenn möglich, zurückgewonnen werden, um den Energiespeicher möglichst klein zu halten. Das resultierende Reichweitzenszenario ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

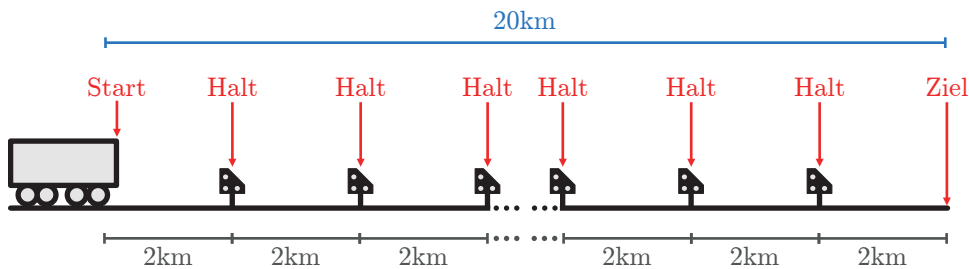


Abbildung 3.3: Illustration des definierten Reichweitzenszenarios für die Evaluation der benötigten Energiespeichergroße. Die Streckenlänge beträgt 20 km bei einer Steigung von 0 ‰ und es sind zehn Halte auf der Strecke vorgesehen. Die Dauer eines Halts beträgt 30 Sekunden .

Bei der Berechnung des Energiebedarfs aus den Reichweitenanforderungen müssen die Anforderungen an die Komfortanlagen mitberücksichtigt werden. Die Berechnung wird mit der Fahrzeugsimulation aus [58] durchgeführt. Für die Berechnung

des benötigten Energiebedarfs wird das in Abbildung 3.3 gezeigte Reichweitenszenario um eine zusätzliche Wartezeit von 15 Minuten ergänzt, um die oben erwähnte geforderte Rangierzeit von gut einer Stunde zu erreichen. In Abbildung 3.4 ist der Geschwindigkeitsverlauf und die Energiebilanz beispielhaft für das gesamte Reichweitenszenario abgebildet. Die Rückspeisung der kinetischen Energie während des Bremsens ist in der Energiebilanz durch den Rückgang der verbrauchten Energie ersichtlich. Während der ersten 15 Minuten verbrauchen nur die Komfortanlagen Energie, da sich das Fahrzeug im Stillstand befindet.

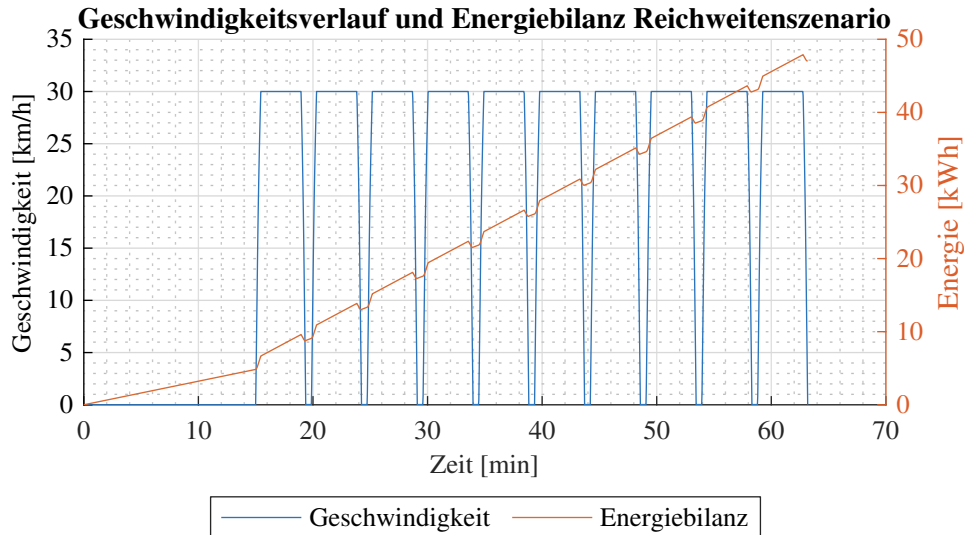


Abbildung 3.4: Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufs und der Energiebilanz über die Zeit für ein Beispiel des gesamten Reichweitenszenarios. Der Rückgang in der Energiebilanz kommt durch die Rekuperation während des Bremsens zustande.

Adhäsion und Achslasten

Die Kraft, welche vom Fahrzeug auf die Schienen übertragen wird, ist durch die Adhäsion begrenzt. Ein Rad kann dabei höchstens folgende Kraft auf die Schienen übertragen:

$$F = \mu \cdot F_G \cdot \cos(\beta) \approx \mu \cdot F_G \quad (3.1)$$

wobei F_G der Gewichtskraft auf das entsprechende Rad entspricht und μ dem Haftwert. β entspricht dem Winkel zwischen der Gewichtskraft und der Senkrechten der Schienenebene und kann aufgrund der kleinen Neigungswinkel bei Vollbahnen näherungsweise auf null gesetzt werden [11].

Der Haftwert begrenzt die maximal mögliche Anfahrzugkraft und hängt von verschiedenen Faktoren ab, unter anderem dem Material der Oberflächen, deren Beschaffenheit (rau oder glatt) und deren Zustand (nass oder trocken). Zusätzlich hat auch die Fahrgeschwindigkeit einen Einfluss auf den Haftwert. Bei trockenen Schienen und mittleren Verhältnissen kann man mit einem Haftwert zwischen 0.33 und 0.19, abhängig von der Fahrgeschwindigkeit, rechnen [11]. Für die Auslegung des Reisezugwagens wird festgelegt, dass der für die gewünschte Anfahrzugkraft benötigte Haftwert nicht grösser als 0.2 sein darf.

Die Achslast des Reisezugwagens soll 20 t nicht überschreiten, um auch auf Strecken mit Streckenklasse C2 verkehren zu dürfen [59]. Diese Begrenzung der Achslast

reduziert die meisten betrieblichen Einschränkungen aufgrund von Achslastüberschreitungen in der Streckenwahl und ermöglicht einen weiträumigen Betrieb der Reisezugwagen auch auf Nebenstrecken.

3.2.2 Betriebliche Anforderungen

Zu den betrieblichen Anforderungen gehören die Ansprüche an die benötigte Ausstattung und die Steuerung des Reisezugwagens, um die geforderten Betriebsabläufe zu gewährleisten.

Vielfachsteuerung

Der Reisezugwagen muss dazu fähig sein, mit weiteren Reisezugwagen in Mehrfachtraktion zu verkehren. Die Antriebe aller an der Mehrfachtraktion beteiligten Reisezugwagen müssen von einem Wagen aus gesteuert werden können. Mit der Forderung nach einer Vielfachsteuermöglichkeit wird sichergestellt, dass effiziente Rangiervorgänge mit mehreren Reisezugwagen möglich sind.

Rangierbetrieb

Der Rangierbetrieb soll möglichst effizient und mit möglichst wenig Rangierpersonal durchgeführt werden können. Aus diesem Grund wird eine automatische Kupplung auf den Wagen installiert. Dies ermöglicht im Idealfall, dass eine Rangierbewegung nur von einer einzelnen Person durchgeführt werden kann.

Fahrzeugsteuerung

Eine einzelne rangierende Person muss in der Lage sein, mit dem Fahrzeug in beide Richtungen fahren zu können. Diese Anforderung soll nicht über das im Rangierdienst übliche Schieben erfüllt werden, weil dafür eine weitere rangierende Person benötigt wird oder die Einschränkungen des unbegleiteten Schiebens beachtet werden müssen [56].

3.3 Betrachtete Fahrzeugkonzepte

Für die Auslegung des Reisezugwagens werden verschiedene Fahrzeugvarianten in Betracht gezogen. Die vier Möglichkeiten sind in Abbildung 3.5 dargestellt und die im Abschnitt 3.6 ermittelte, geeignetste Variante wird in Kapitel 4 im Detail ausgelegt.

Die erste Möglichkeit ist die Ausstattung jedes einzelnen Reisezugwagens mit einer eigenen Antriebsausrüstung. Die zweite Variante ist die Kombination von zwei Reisezugwagen zu einem Modul. Die gesamte Antriebsausrüstung befindet sich dabei auf einem einzelnen Wagen und ist leistungsfähig genug, um beide Wagen anzutreiben. Die beiden Reisezugwagen funktionieren als eine Einheit, welche über Kurzkupplungen verbunden wird und aus diesem Grund betrieblich nicht trennbar ist. Bei den letzten beiden Varianten werden drei oder vier Reisezugwagen zu einem Modul vereinigt. Die Antriebsausrüstung befindet sich auch bei den grösseren Modulen auf einem einzelnen Wagen. Zusätzlich werden die vier Fahrzeugvarianten sowohl in der einstöckigen, als auch in der doppelstöckigen Version betrachtet und es resultieren daraus acht mögliche Fahrzeugkonzepte.

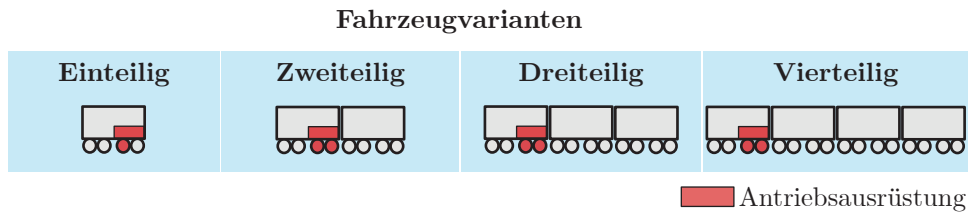


Abbildung 3.5: Darstellung der betrachteten Fahrzeugvarianten, welche aus Modulen mit bis zu vier Reisezugwagen bestehen. Zusätzlich werden sowohl einstöckige als auch doppelstöckige Module betrachtet. Die Antriebsausrüstung ist rot eingefärbt und befindet sich immer auf einem einzelnen Wagen.

3.4 Fahrzeugkonzeptbewertung

In diesem Abschnitt wird dargelegt, wie mit Hilfe der in Kapitel 2 erläuterten Nutzwertanalyse eine Entscheidung über die in Kapitel 3.3 vorgestellten Fahrzeugkonzepte getroffen werden kann.

3.4.1 Bewertung

Die neun Bewertungskriterien sind in Kapitel 2 bereits genauer beschrieben worden. Nun geht es darum, diese Kriterien anhand der Konzeptbewertung auf eine Punkteskala zu legen, damit jedem Konzept eine Punktzahl gegeben werden kann. Diese Skalen basieren auf den Ergebnissen der Kostenanalyse (Abschnitt 2.5), der Leistungsanalyse (Abschnitt 2.4) und der Literaturrecherche. Wo Berechnungen stattfinden, wird dem besten Ergebnis die Maximalpunktzahl „10“ verliehen und dem schlechtesten die Minimalpunktzahl „1“. Die rechnerisch begründeten Skalen basieren auf den realen Konzeptüberlegungen. Zum Beispiel die Skala zur Ladeinfrastruktur basiert auf der Literaturrecherche und der Energiespeicheranalyse im Kapitel 3.5.1. Dort wird bereits ein Konzeptentscheid getroffen und das Kriterium ist deshalb irrelevant für die Nutzwertanalyse.

Eine Übersicht über alle Skalen ist in Tabelle 3.2 dargestellt. Es gibt verschiedene Typen von Skalen, welche nun etwas genauer erklärt werden:

- Die Skala zu den Gleisanlagen verteilt die verschiedenen Fahrzeugkonzepte fix auf die Punkte. Dem liegt der grundsätzliche Gedanke zu Grunde, dass einteilige Fahrzeuge mehr Gleisanlagen beanspruchen, weil sie nur komplett alleine rangiert werden können. Die mehrteiligen hingegen können nur zusammen bewegt werden, was insgesamt zu weniger Beanspruchung der Anlagen führt.
- Die Skalen für Gewicht und Dimension von Stromrichter, Fahrmotoren und Energiespeicher beinhalten jeweils nur das zusätzlich anfallende Gewicht und Volumen. Diese Zahl ist aussagekräftiger als das Gesamtgewicht, welches sich jeweils zwischen den Entwürfen nur marginal unterscheidet. So weist das vierteilige Doppelstockmodul mit 4.4 t (ein Punkt) das höchste Zusatzgewicht auf, während das einteilige einstöckige Modul nur ein Zusatzgewicht von 1.7 t (zehn Punkte) hat. Es werden hier jedoch nur die Komponenten zur Traktion berücksichtigt. Eine genaue Betrachtung findet in einem späteren Schritt nach dem Konzeptentscheid statt.

Gleisanlagen		Pkm-Kosten		Systemkosten	
Pkt.	Wert	Pkt.	Wert [Rp/Pkm]	Pkt.	Wert [MCHF]
1	-	1	0.873	1	55.3
2	-	2	0.851	2	54.4
3	1-teilig, 1-Stock	3	0.829	3	53.6
4	-	4	0.807	4	52.7
5	-	5	0.784	5	51.9
6	2-teilig, 1-Stock	6	0.762	6	51
7	1-teilig, Dosto	7	0.74	7	50.2
8	3/4-teilig, 1-Stock	8	0.718	8	49.3
9	2-teilig, Dosto	9	0.695	9	48.4
10	3/4-teilig, Dosto	10	0.673	10	47.6

Verfügbarkeit		Ladeinfrastruktur		Gewicht	
Punkte	Wert [%]	Punkte	Technik	Punkte	zus. Gewicht [t]
1	94.2	1	-	1	4.4
2	94.5	2	-	2	4.1
3	94.8	3	-	3	3.8
4	95.1	4	H2	4	3.5
5	95.4	5	-	5	3.2
6	95.7	6	Diesel	6	2.9
7	95.9	7	-	7	2.6
8	96.2	8	-	8	2.3
9	96.5	9	Batterie	9	2
10	96.8	10	-	10	1.7

Dimension		Betriebliche Reserve*		Gleisbelegung	
Punkte	+ Volumen	Punkte	+ Module	Punkte	Zeit [s]
1	2.5	1	50	1	224
2	2.3	2	45	2	223
3	2.1	3	40	3	220
4	1.9	4	35	4	217
5	1.7	5	30	5	214
6	1.5	6	25	6	211
7	1.3	7	20	7	208
8	1.1	8	15	8	205
9	0.9	9	10	9	203
10	0.8	10	5	10	200

Tabelle 3.2: Alle verwendeten Bewertungsskalen für die Nutzwertanalyse.

- Die Verfügbarkeit berücksichtigt, dass ein einteiliges Modul grundsätzlich weniger verfügbar ist, weil alle Wagen Traktionskomponenten enthalten. Es wird angenommen, dass Wagen mit Traktionskomponenten zehnmal häufiger ausfallen als solche ohne Antrieb. Deshalb schneiden in dieser Skala die grossen Module am besten ab. So hat ein Einteiler eine Verfügbarkeit von 94.2% relativ zum jährlichen Einsatzzeitraum, während ein Vierteiler eine Verfügbarkeit von ca. 96.8% besitzt.
- Die Systemkosten und Personenkilometer-Kosten folgen direkt aus der Kostenanalyse. Der höchste Wert, nämlich 55.3 Millionen CHF Systemkosten für das einteilige, einstöckige Modul, wird mit der tiefsten Punktzahl bewertet und umgekehrt.
- Der Skala zu den betrieblichen Reserven muss eine Nachfrage zugrunde gelegt werden, damit sie aussagekräftig ist. Deshalb wird bei der Bewertung von 4'000 nachgefragten Sitzplätzen ausgegangen. Anhand dieser Zahl wird berechnet, wie viele zusätzliche Module nötig sind, um eine betriebliche Reserve von 10% zu erreichen.

Für die Durchführung der Nutzwertanalyse werden nun die Punkte für die verschiedenen Konzepte vergeben. Die Punktzahlen für die Konzepte in den verschiedenen Kategorien sind in Tabelle 3.3 dargestellt. Diese Punkte werden als nächstes mit den Gewichten aus Kapitel 2 verrechnet. Die Resultate sind in Kapitel 3.4.2 dargelegt.

Punkte	1-Stock				Dosto				
	#Wagen	1	2	3	4	1	2	3	4
Gleisanlagen		3	6	8	8	7	9	10	10
Pkm Kosten		10	9	7	5	9	7	4	1
Systemkosten		5	5	3	1	10	8	3	3
Verfügbarkeit		2	8	10	10	1	6	8	9
Ladeinfrastruktur		9	9	9	9	9	9	9	9
Gewicht		10	8	6	4	8	6	4	1
Dimension		10	8	6	4	8	6	4	1
Betr. Reserven		1	6	8	10	3	7	9	10
Gleisbelegung		10	10	7	1	8	8	7	1

Tabelle 3.3: Übersicht der Punkteverteilung für die Nutzwertanalyse. Die beste Zahl ist 10 und die schlechteste 1. Es wird zwischen acht verschiedenen Zugkonzepten differenziert.

Die Punktevergabe ist durch die Skalen rechnerisch begründet. Allerdings muss festgehalten werden, dass die Nutzwertanalyse keine Aussage über die Machbarkeit oder die Wirtschaftlichkeit eines Entwurfs zu tätigen vermag. Diese Betrachtung dient lediglich dazu, für die gewählten Parameter das geeignetste Konzept zu finden. Falls sich später herausstellen sollte, dass das Konzept nicht umsetzbar ist, muss dieser Prozess mit angepassten Parametern und Bedingungen wiederholt werden.

3.4.2 Resultate

Mithilfe der zugewiesenen Punktzahlen und Gewichte kann das Resultat der Nutzwertanalyse bestimmt und daraus folgend das beste Fahrzeugkonzept ermittelt werden. Die Resultate der Nutzwertanalyse sind in Tabelle 3.4 dargestellt.

Die Nutzwertanalyse hat ergeben, dass das **zweiteilige, einstöckige Modul** am besten abschneidet, dicht gefolgt vom einstöckigen und zweistöckigen Einteiler.

Punkte	1-Stock				Dosto			
#Wagen	1	2	3	4	1	2	3	4
Punktetotal	499	525	451	329	501	485	390	263
Rang	3	1	5	7	2	4	6	8

Tabelle 3.4: Resultate der Nutzwertanalyse differenziert nach Fahrzeugkonzept. Die Detaillierte Auswertung ist im Anhang C abgelegt.

Der Abstand an Punkten ist jedoch nicht besonders gross. Trotz des knappen Vorsprung wird im weiteren Verlauf dieser Studie mit diesem Konzept gearbeitet. Ein einstöckiger Zweiteiler erscheint intuitiv als fähig, viele Synergien nutzen zu können, sei es beim Antrieb oder in anderen Bereichen, welche beim Einteiler nicht genutzt werden können. Trotzdem bleibt die Flexibilität bei der Anpassung an die Nachfrage gegenüber im Vergleich zum Vierteiler erhalten. Im nächsten Abschnitt werden verschiedene Varianten von benötigten Antriebskomponenten qualitativ bewertet und ein Konzeptentscheid zu den einzelnen Komponenten getroffen.

3.5 Betrachtete schaltungstechnische Konzepte

In diesem Abschnitt werden die für die Anwendung in einem Hilfsantrieb relevanten Komponenten und Konzepte vorgestellt. Dazu gehören neben den verschiedenen Energiespeichern die denkbaren Fahrmotortypen, Stromrichtervarianten und Getriebearten.

3.5.1 Energiespeichervarianten

Für die Energieversorgung des Reisezugwagens während des Rangierbetriebs werden die drei Antriebsarten Dieselantrieb, Wasserstoffantrieb und Traktionsbatterie näher untersucht.

Die Ausrüstung der Module mit einem Stromabnehmer und einer Hochspannungsausrüstung für eine Energieentnahme direkt aus der Fahrleitung erscheint aufgrund des Platzbedarfs und der entstehenden Kosten als nicht sinnvoll für diese Anwendung. Für den internationalen Verkehr wäre sogar eine Hochspannungsausrüstung für mehrere Spannungssysteme nötig. Aus diesem Grund wird die Ausrüstung der Reisezugwagen mit eigener Hochspannungsausrüstung nicht weiter verfolgt.

Diesel

Eine Möglichkeit den Reisezugwagen mit Energie zu versorgen ist die Verwendung eines Dieselmotors. Für den in dieser Anwendung relevanten Leistungsbereich von einigen 100 kW eignet sich ein Dieselmotor mit Schaltgetriebe, wie in Abbildung 3.6 illustriert. Dieses Getriebe besitzt im Gegensatz zu anderen Kraftübertragungsvarianten ein geringes Gewicht und Volumen. Zusätzlich generiert diese Art der Kraftübertragung kleine Umwandlungsverluste [34].

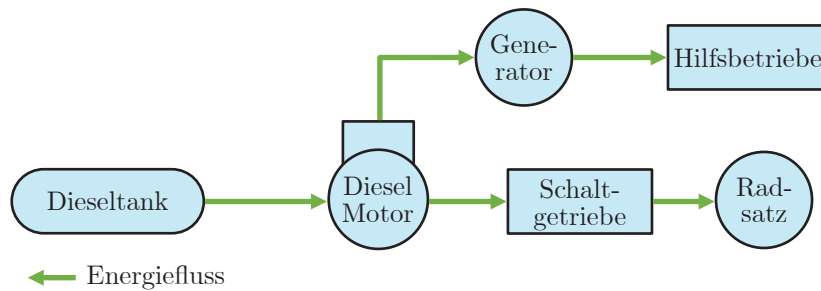


Abbildung 3.6: Übersichtsdarstellung des Dieselantriebs. Der hier betrachtete Dieselantrieb besteht aus einem Dieseltank und einem Dieselmotor, welcher über ein Schaltgetriebe mit dem Radsatz verbunden ist. Zusätzlich besitzt der Dieselmotor einen Generator, um die elektrischen Hilfsbetriebe mit Energie zu versorgen. In Grün ist der Energiefluss dargestellt.

Die weiteren Vor- und Nachteile des Dieselantriebs auf diese Anwendung bezogen sind gemäss [17, 60]:

- + die hohe mögliche Reichweite bedingt durch die grosse Energiedichte von Dieselmotor. Die für diesen Einsatzzweck benötigte Reichweite lässt sich mit einem kleinen Tank erreichen und hat dementsprechende Volumen- und Gewichtsvorteile gegenüber den anderen Energiespeichern.
- + der hohe Erfahrungsschatz im Umgang mit Dieselmotoren in der Wartung und Instandhaltung. Beim Dieselmotor kann auf standardisierte und verbreitete Komponenten zurückgegriffen werden und die Lebensdauer der verwendeten Teile ist berechenbar.
- + die tiefen Anschaffungskosten für den Antriebsstrang. Der Dieselmotor ist günstig in der Anschaffung und benötigt wegen seiner Robustheit gegenüber Hitze und Kälte nur ein simples Kühlsystem. Die gesamten Anschaffungskosten des Dieselantriebsstrangs können dadurch niedrig gehalten werden.
- die Lärm- und Schadstoffemissionen während des Betriebs eines Dieselmotors. Störender Lärm durch Motorgeräusche wird hauptsächlich im Stillstand und beim Anfahren erzeugt. Dies ist für eine Anwendung im Nachtzugverkehr störend, weil durch die Lärm- und Vibrationsemissionen der Passagierkomfort in der Nähe des Dieselmotors beeinträchtigt wird. Voraussichtlich strenger werdende Umweltauflagen bezüglich der Schadstoffemissionen können den Einsatzbereich der Reisezugwagen zudem einschränken, falls eine rückwirkende Anpassung an neue Abgasnormen nicht möglich ist.
- die höheren Betriebskosten gegenüber einem elektrisch angetriebenen Zug. Die Traktionsenergiekosten sind aufgrund des schlechteren Wirkungsgrads und der fehlenden Rekuperation höher. Zusätzlich müssen aufgrund der hohen mechanischen Belastung des Antriebs häufiger Instandhaltungsarbeiten durchgeführt werden.
- die für den Betrieb des Reisezugwagens nötigen Tankfahrten zu Dieseltankstellen. Dies führt zu einer Reduktion der betrieblichen Flexibilität und kann je nach Ausbaustand der Dieselinfrastruktur zu längeren Tankfahrten, oder zusätzlichen Kosten für den Aufbau und Betrieb neuer Dieseltankstellen führen.

- die kleine Dynamikreserve und die daraus folgenden geringen Beschleunigungswerte von Dieselantrieben. Dies führt bei den in Kapitel 3.2 gestellten Anforderungen an die Beschleunigung zu einem überdimensionierten Motor.

Wasserstoff

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Reisezuwagen mit einem Wasserstoff-Antrieb auszustatten. Eine Illustration des Wasserstoff-Antriebs für diese Anwendung ist in Abbildung 3.7 ersichtlich. Die Hauptkomponenten des Antriebs sind der Drucktank für den Wasserstoff und die Brennstoffzelle für die Umwandlung des Wasserstoffs in elektrische Energie. Diese Energie wird über einen DC/DC-Wandler in den Zwischenkreis gespeist. Vom Zwischenkreis aus werden die Hilfsbetriebe und die Fahrmotoren mit Energie versorgt. Zusätzlich wird eine Traktionsbatterie benötigt, um die dynamischen Leistungsspitzen des elektrischen Antriebs abdecken zu können. Die Brennstoffzelle kann nur langsam auf sich verändernde Leistungsanforderungen reagieren und braucht aus diesem Grund eine Traktionsbatterie als Puffer. Die Traktionsbatterie ermöglicht auch die Rekuperation der Bremsenergie. Ein Beispiel für einen Wasserstoffzug ist der bestellte Triebzug für die Zillertalbahn in Österreich.

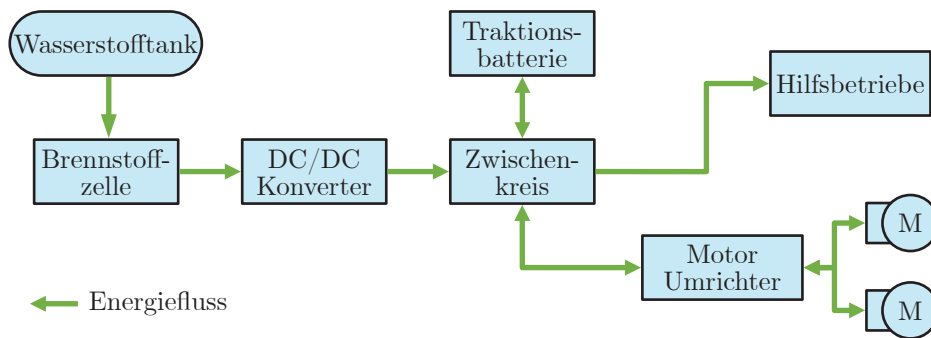


Abbildung 3.7: Aufbau eines Wasserstoffantriebs. Der Antrieb ist in der Lage, die Bremsenergie in die Traktionsbatterie zu rekuperieren.

Der Wasserstoff-Antrieb besitzt die folgenden Vor- und Nachteile in dieser Anwendung [17, 60, 61]:

- + Die Verwendung von Elektromotoren im Antriebsstrang erlaubt es, die Anforderungen an die Anfahrbeschleunigung einfacher zu erfüllen. Der Verschleiss bei Elektromotoren ist geringer als bei Dieselmotoren.
- + Das Brennstoffzellen-Fahrzeug verursacht im Stand und beim Anfahren im tiefen Geschwindigkeitsbereich geringere Lärmemissionen als beispielsweise ein Dieselmotor. Dies führt zu einem höheren Passagierkomfort im Vergleich zum Dieselantrieb. Ein weiterer Vorteil des Brennstoffzellenantriebs ist, dass lokal nur Wasser und somit keine Schadstoffe emittiert werden.
- + Mit dem Brennstoffzellen-Antrieb lässt sich die benötigte Reichweite für diese Anwendung gut erreichen. Zusätzlich kann dank der Rekuperation in die Batterie die Bremsenergie wiederverwendet werden und die Reichweite ohne einen grösseren Tank leicht gesteigert werden.

- Ein Nachteil des Wasserstoff-Antriebs ist die komplexe Systemarchitektur bestehend aus Wasserstoff-Drucktank, Brennstoffzelle und Traktionsbatterie. Mit der Traktionsbatterie und der Brennstoffzelle werden gleich zwei teure Komponenten benötigt. Dies hat entsprechende Auswirkungen auf die Kosten bei der Beschaffung und bei einem Brennstoffzellentausch während der Lebensdauer des Fahrzeugs. Des Weiteren muss eine relativ aufwändige Kühlung installiert werden.
- Der Wartungsaufwand für die Brennstoffzelle ist relativ hoch und sie besitzt auch eine kürzere durchschnittliche Lebensdauer gegenüber einer Traktionsbatterie. Zusätzlich können Kosten für die Anpassung der Werkstatteinfrastuktur an die erhöhten Anforderungen beim Brand- und Explosionsschutz anfallen.
- Für den Betrieb mit Wasserstoff ist eine neue Betankungsinfrastruktur notwendig, was zu hohen Infrastrukturkosten führt. Die fehlende Wasserstoffinfrastruktur kann zu erhöhten Reichweitenanforderungen und daraus folgend zu einem grösseren Platzbedarf für die Wasserstoffdrucktanks führen.

Traktionsbatterie

Denkbar ist auch die Ausrüstung der Reisezugwagen mit einer Traktionsbatterie, um die benötigten Rangierstrecken im Batteriebetrieb zurückzulegen. Der Antriebsstrang ist in Abbildung 3.8 dargestellt und besteht aus einer Traktionsbatterie, welche über den Zwischenkreis die Hilfsbetriebe und die am Motorstromrichter angeschlossenen Motoren versorgt. Die Batterieladung kann beispielsweise über Ladestationen erfolgen. Während der Fahrt ist die Ladung über die Zugsammelschiene oder über Achsgeneratoren eine Option. Ein Beispiel für ein Batteriefahrzeug ist die Tea 2/2 der Matterhorn-Gotthard Bahn.

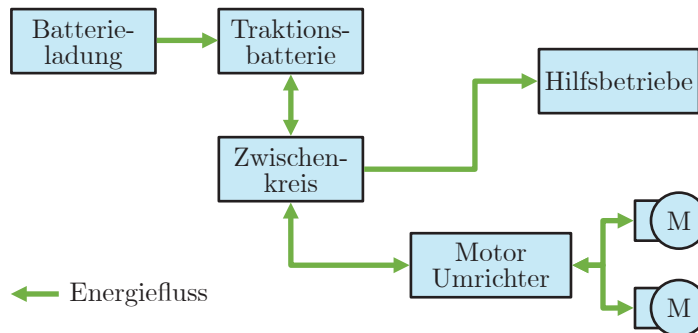


Abbildung 3.8: Übersichtsgrafik eines Antriebsstrangs mit Traktionsbatterie. Der Antrieb besteht aus einer Traktionsbatterie, welche über den Zwischenkreis die Hilfsbetriebe und die Fahrmotoren mit Energie versorgt. Die Energieversorgung der Traktionsbatterie wird über die Batterieladung sichergestellt und kann optimal auf den spezifischen Anwendungsfall ausgelegt werden. In Grün sind die möglichen Energieflüsse dargestellt.

Ein Antriebsstrang mit Traktionsbatterie besitzt folgende Vor- und Nachteile [17, 19, 34, 60, 61]:

- + Die Verwendung einer Traktionsbatterie verursacht keine zusätzlichen Lärmemissionen im Vergleich zu einem elektrischen Triebzug und der gesamte Antriebsstrang ist lokal emissionsfrei.

- + Die Traktionsbatterie ermöglicht eine gute Integration in das bestehende elektrifizierte Eisenbahnnetz. Im Gegensatz zu Diesel- und insbesondere Wasserstoffantrieben ist kaum zusätzliche Infrastruktur erforderlich. Die benötigten Infrastrukturmassnahmen werden durch die Art der Batterieladung beeinflusst und können beispielsweise aus zusätzlichen Ladestationen auf Abstellgleisen bestehen.
- + Die Verwendung von Elektromotoren im Antriebsstrang erlaubt es wie beim Brennstoffzellen-Antrieb, die Anforderungen an die Anfahrbeschleunigung einfacher zu erreichen. Im Gegensatz zur Brennstoffzelle und dem Dieselmotor ist die Traktionsbatterie praktisch wartungsfrei. Dies führt zu Kostenreduktionen im Unterhalt. Die Traktionsenergiekosten können dank der möglichen Rekuperation reduziert und die Reichweite, bei gleicher Batteriekapazität, vergrössert werden.
- + Der Antriebsstrang mit Traktionsbatterie erlaubt je nach Anwendung eine hohe betriebliche Flexibilität im elektrifizierten Bahnnetz, da beispielsweise keine zusätzlichen Fahrten zu Tankstellen nötig sind. Die Traktionsbatterie kann, falls vorgesehen, auch während der Fahrt im Zugverbund über die Zugammelschiene nachgeladen werden.
- Zur Erreichung einer akzeptablen Lebensdauer darf die vorhandene Batteriekapazität nicht vollständig verwendet werden. Durch die reduzierte Entladetiefe muss eine grössere Batteriekapazität bereitgestellt werden, als für die Anwendung nötig ist. Dies hat Auswirkungen auf den Platzbedarf, das Gewicht und die Kosten der Batterie. Im Gegensatz zu einem Dieselantrieb besitzt die Traktionsbatterie deutlich höhere Anschaffungskosten.
- Aufgrund der im Vergleich zu Wasserstoff oder Diesel geringen Energiedichte von Traktionsbatterien können mit sinnvollen Batteriegrössen nur kleine Reichweiten erzielt werden. Die Batteriegrösse hat durch die zusätzliche Masse einen Einfluss auf die Betriebskosten. Sowohl im Rangierbetrieb als auch im Zugverbund hat die erhöhte Masse eine Steigerung des Energieverbrauchs zur Folge. Zusätzlich erhöht sich auch der Verschleiss der Trasse, was höhere Trassenkosten verursacht als bei Fahrzeugen ohne Traktionsbatterien.
- Die Traktionsbatterie ist temperaturempfindlich. Für extreme Temperaturen ist ein aufwendiges Kühl- und Heizsystem erforderlich, um die Leistungsfähigkeit der Batterie sicherzustellen und den negativen Einfluss der extremen Temperaturen auf die Lebensdauer der Batterie zu minimieren. Die benötigte Energie für die Temperierung der Batterie geht zu Lasten der Reichweite oder verlangt den Einbau einer grösseren Traktionsbatterie.

Gewählter Energiespeicher

Aufgrund der oben genannten Vor- und Nachteile der verschiedenen Varianten fällt die Entscheidung bezüglich des optimalen Energiespeichers für diese Anwendung auf die Traktionsbatterie. Ausschlaggebend waren die wenigen zusätzlichen Infrastrukturkosten und die geringeren Instandhaltungs- und Betriebskosten gegenüber dem Diesel- und Brennstoffzellen-Antrieb. Die Traktionsbatterie kann relativ problemlos in die aktuelle elektrifizierte Infrastruktur integriert werden. Zusätzliche Kosten können durch Nachrüstungen der Abstellgleise mit Lademöglichkeiten für die Traktionsbatterie entstehen. Der Dieselmotor ist wegen seiner Lärmemissionen insbesondere im Nachtzugverkehr nur bedingt geeignet. Zusätzlich ist aufgrund von Umweltschutzaufgaben die Zukunftsfähigkeit des Dieselantriebs für dieses Konzept mittel- bis langfristig nicht mehr gegeben.

Mit einem Brennstoffzellen-Antrieb muss an vielen grösseren Bahnhöfen eine Versorgungsinfrastruktur für Wasserstoff errichtet werden, um einen flexiblen Betrieb der Reisezugwagen zu ermöglichen. Die Errichtung dieser Infrastruktur würde sich nur für die Versorgung von Reisezugwagen mit Hilfsantrieb wirtschaftlich nicht lohnen. Bei den tiefen benötigten Reichweiten können der Dieselantrieb und die Brennstoffzelle ihren Reichweitenvorteil gegenüber der Traktionsbatterie nicht ausspielen.

Der nächste Schritt ist die Wahl der geeignetsten Zellchemie für die Traktionsbatterie. Für diese Anwendung werden Traktionsbatterien auf Lithium-Titanium-Oxide (LTO) Basis gewählt. LTO-Batterien besitzen eine hohe Zyklfestigkeit und kalendarische Lebensdauer im Vergleich zu anderen Zellchemien. Zusätzlich sind LTO-Zellen in der Lage, hohe Leistungen bereitzustellen und bleiben auch bei niedrigen Temperaturen einsatzbereit. Nachteilig bei der LTO-Zellchemie ist die relativ geringe Energiedichte und die höheren Anschaffungskosten der entsprechenden Batterien [19]. Jedoch sind die in dieser Anwendung benötigten Batteriegrößen verglichen zu einem vollwertigen Batterietriebzug relativ klein und die Vorteile in der Leistungsdichte und der Lebensdauer der Batterie überwiegen somit die Nachteile in Form höherer Anschaffungskosten und tieferer Energiedichte.

3.5.2 Fahrmotortypen

Bei der Verwendung einer Traktionsbatterie als Energiespeicher ist ein Antriebsstrang mit elektrischen Fahrmotoren die einzig sinnvolle Lösung. Es wurden zwei verschiedene elektrische Fahrmotortypen für die Anwendung als Hilfsantrieb in Betracht gezogen. Dazu gehören der Asynchronmotor in der fremd- und eigenbelüfteten Variante und der wassergekühlte Permanentmagnet-Synchronmotor. Die Fahrmotoren müssen in der Lage sein, die benötigte Leistung und das gewünschte Anfahrmoment bereitzustellen zu können. Die Vor- und Nachteile der beiden Fahrmotorarten für diese Anwendung werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

Asynchronmotoren

Die Asynchronmaschine hat sich als Fahrmotor im Bahnbereich bewährt und wird standardmässig eingesetzt. Für die Regelung des Fahrmotors wird ein frequenzvariabler Umrichter benötigt. Die Vor- und Nachteile des Asynchron-Fahrmotors sind in Bahnanwendungen [34]:

- + die gute Regelbarkeit dank des Einsatzes eines Frequenzumrichters.
- + der hohe verfügbare Drehzahlbereich durch die Ausnutzung der möglichen Feldschwächung.
- + die Verwendung mehrerer Asynchronfahrmotoren im Gruppenantrieb an nur einem Umrichter. Dies reduziert die Anzahl der benötigten Motorstromrichter.
- die zusätzlichen Verluste im Rotor aufgrund des Schlupfs bei der Drehmomentabgabe. Dies reduziert den Wirkungsgrad des Fahrmotors.

Für die Kühlung des Asynchron-Fahrmotors wird meistens eine luftbasierte Kühlung verwendet. Für diese Anwendung kommen entweder Fremdventilation oder Selbstventilation in Betracht.

Der fremdbelüftete Asynchronmotor wird standardmässig im mittleren und hohen Leistungsbereich eingesetzt. Beim fremdbelüfteten Fahrmotor wird, wie in Abbildung 3.9 gezeigt, ein Luftstrom durch einen externen Ventilator im Inneren des Fahrzeug erzeugt und über Luftkanäle zum Fahrmotor geführt.

Die Luft wird im Fahrmotor durch die Kühlbohrungen in den Wicklungspaketen und durch den Luftspalt zwischen Stator und Rotor gedrückt, bevor die Kühlluft den Motor auf der anderen Seite verlässt [62]. Diese Technologie wird zum Beispiel bei der Re 460 eingesetzt.

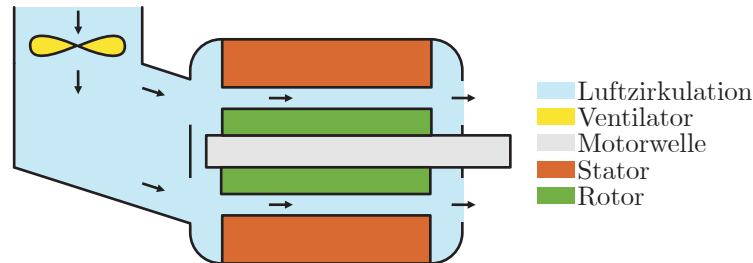


Abbildung 3.9: Darstellung der Kühlung bei einem fremdbelüfteten Fahrmotor bestehend aus einem Luftkreislauf, dessen Luftstrom durch einen Ventilator im Fahrzeuginneren erzeugt wird.

Der fremdbelüftete Fahrmotor besitzt die folgenden Vor- und Nachteile [34, 62]:

- + Die Fremdventilation besitzt die höchste Kühlleistung aller Kühlarten und erlaubt eine hohe Leistungsdichte des Fahrmotors. Dies ermöglicht den Bau kleinerer und leichter Motoren bei gleicher Leistung gegenüber anderen Kühlarten.
- + Die Kühlung ist unabhängig von der Motordrehzahl und kann in Abhängigkeit der aktuellen Motortemperatur gesteuert werden. Diese bedarfsabhängige Kühlung verringert die Lärmemissionen und den Energieverbrauch des Kühlsystems. Der Fahrmotor kann durch die unabhängige Kühlung auch im Stillstand voll gekühlt werden.
- Es werden zusätzliche Komponenten wie ein Ventilator mit dazugehöriger Ansteuerung und Stromversorgung benötigt.
- Die erforderlichen Luftkanäle im Fahrzeugkasten benötigen zusätzlichen Platz gegenüber eigenbelüfteten Fahrmotoren.

Der eigenbelüftete Asynchronmotor wird standardmässig im Bereich der kleinen bis mittleren Leistungen eingesetzt. Der Luftstrom wird durch einen auf der Motorwelle sitzenden Ventilator erzeugt und durchströmt die Stator- und Rotorwicklung wie beim fremdbelüfteten Fahrmotor [62]. Das Kühlkonzept ist in Abbildung 3.10 dargestellt. Dieses Kühlkonzept wird unter anderem bei den Triebzügen der Jungfraubahnen (JB) Bhe 4/8 eingesetzt.

Die Vor- und Nachteile des eigenbelüfteten Fahrmotors sind [34, 62]:

- + die Einfachheit und Kosteneffizienz der Kühllösung. Es sind keine zusätzlichen Komponenten im Fahrzeug nötig und auch die Luftkanäle im Fahrzeugkasten fallen weg.
- die schlechte Kühlleistung im Stillstand und bei tiefen Geschwindigkeiten.
- die Begrenzung der maximalen Motordrehzahl durch die Lärmemissionen des Ventilators.
- der grössere benötigte Bauraum des Fahrmotors aufgrund des zusätzlichen Ventilators auf der Motorwelle.

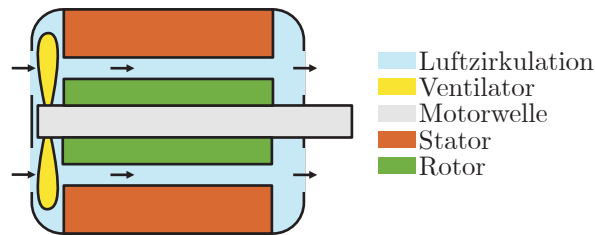


Abbildung 3.10: Darstellung des Kühlkonzepts eines eigenbelüfteten Fahrmotors. Diese Kühlung besteht aus einem Ventilator, welcher direkt auf der Motorwelle angebracht ist.

- die höhere Verschmutzung des Fahrmotors. Die Luft muss im Gegensatz zum fremdbelüfteten Fahrmotor in Bodennähe angesaugt werden. Dies führt zu einem erhöhten Reinigungsaufwand.

Permanentmagnet-Synchronmotor

Der Permanentmagnet-Synchronmotor wird im Gegensatz zum Asynchronfahrmotor erst seit kurzem für Traktionsanwendungen verwendet [34]. Das für den Betrieb der Synchronmaschine benötigte Erregerfeld wird durch Permanentmagnete erzeugt. Dadurch muss dem Rotor kein Erregerstrom zugeführt werden und es kann auf wartungsintensive Schleifringe und einen zusätzlichen Gleichrichter verzichtet werden [12]. Synchronmotoren mit Permanentmagneten werden zum Beispiel bei den neuen SBB Triebzügen RAB(D)e 502 eingesetzt

Der Permanentmagnet-Synchronmotor besitzt folgende Vor- und Nachteile für Bahnanwendungen [34]:

- + Der Permanentmagnet-Synchronmotor besitzt den höchsten Wirkungsgrad aller eingesetzten Fahrmotortypen während der Drehmomentabgabe.
- + Eine hohe Leistungsdichte ermöglicht eine kompakte Bauweise des Fahrmotors und reduziert das Gewicht und den Platzbedarf im Drehgestell des Fahrmotors.
- Das Erregerfeld, welches durch die Permanentmagneten erzeugt wird, lässt sich im Leerlauf nicht ausschalten. Dies führt zu hohen Magnetisierungsverlusten im Leerlauf.
- Beim Permanentmagnet-Synchronmotor ist kein Gruppenantrieb möglich. Für jeden einzelnen Motor ist darum ein separater Frequenzumrichter nötig, was die Kosten und Komplexität des Stromrichters erhöht.
- Aufgrund der verwendeten Permanentmagnete kann der Permanentmagnet-Synchronmotor nicht luftgekühlt werden. Der im Bahnbetrieb entstehende Eisenstaub wird bei einer Luftkühlung in den Fahrmotor geblasen und würde dort an den Permanentmagneten haften bleiben. Aus diesem Grund kommt für den Fahrmotor nur eine Wasserkühlung in Frage.

Die Wasserkühlung eines Fahrmotors ist in Abbildung 3.11 dargestellt und wird zum Beispiel bei den Flexity-Trams in Wien eingesetzt. Der Motor ist vollständig geschlossen und wird über Wasserkanäle gekühlt, welche an der Aussenseite des Stators montiert sind. Im Inneren kann ein zusätzlicher Luftkreislauf installiert werden, um den Rotor zu kühlen [62].

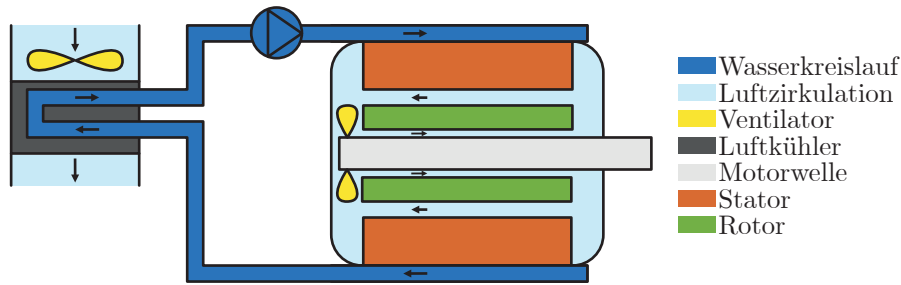


Abbildung 3.11: Darstellung der Wasserkühlung eines Fahrmotors bestehend aus einem inneren Luft-Kühlkreislauf für die Rotorkühlung und äusseren Wasserkühlkreislauf für die Kühlung des gesamten Fahrmotors.

Die Wasserkühlung besitzt folgende Vor- und Nachteile [34, 62]:

- + Die Wasserkühlung verhindert durch die geschlossene Bauweise eine Verschmutzung des Motors.
- + Es besteht die Möglichkeit, die Abwärme des Motors anderweitig wiederzuverwenden.
- + Die Kühlung funktioniert auch während des Stillstands.
- Die Wasserkühlung benötigt viele zusätzliche Komponenten, dazu gehören neben den Schlauchverbindungen und der Wasserpumpe auch der Rückkühler.
- Die Wasserkühlung kann auftretende Rotorverluste schlecht kühlen und begrenzt dadurch die Leistungsdichte des Motors.

Gewählter Fahrmotortyp

Für die Anwendung als Hilfsantrieb für Reisezugwagen wird der eigenbelüftete Asynchronmotor gewählt. Der Hauptvorteil des eigenbelüfteten Fahrmotors ist das einfache Kühlkonzept ohne Zusatzkomponenten wie Luftschächte, gesteuerte Ventilatoren oder Wasserkreislauf mit Rückkühler. Der Verzicht auf diese Zusatzkomponenten führt zu Platz- und Gewichtseinsparungen im Fahrzeug.

Die Fahrmotoren für den Hilfsantrieb sind aufgrund der geringen benötigten Fahrmotorleistung sehr klein. Dies führt dazu, dass im Drehgestell auch eigenbelüftete Fahrmotoren trotz des grösseren benötigten Bauraums genügend Platz finden.

Ein Gegenargument für die Verwendung eines eigenbelüfteten Fahrmotors ist die schlechte Kühlung im Stillstand und bei tiefen Geschwindigkeiten. In diesem spezifischen Anwendungsfall ist dies wenig problematisch, da durch die hohen Anforderungen an die Beschleunigung und die tiefe Höchstgeschwindigkeit eine hohe Getriebeübersetzung benötigt wird. Dies führt dazu, dass die Motorwelle des Fahrmotors auch bei tiefen Geschwindigkeiten eine hohe Drehzahl besitzt und die resultierende Kühlleistung hoch genug ist.

Die Nachteile des eigenbelüfteten Fahrmotors sind für diese Anwendung entweder nicht relevant oder können mit vertretbarem Aufwand gelöst werden.

3.5.3 Stromrichtervarianten

Bei Bahnanwendungen sind Umrichter mit Insulated-Gate Bipolar Transistoren (IGBT) seit einigen Jahren Standard.

Auch für die Stromversorgung der Reisezugwagen werden diese Stromrichter verwendet. In Reisezugwagen kommen in den meisten Fällen luftgekühlte Bordnetzumrichter zum Einsatz. Aufgrund des zusätzlichen Hilfsantriebs werden neben der bereits vorhandenen Ausrüstung für die Energieversorgung des Reisezugwagens noch ein Motorstromrichter und ein Batterieumrichter benötigt.

Für die Energieversorgung des Reisezugwagens werden zwei Möglichkeiten in Betracht gezogen. Die erste Möglichkeit ist der Einbau zweier separater Stromrichter, wobei ein Stromrichter wie bei einem gewöhnlichen Reisezugwagen das Bordnetz und die Komfortanlagen über die Zugsammelschiene versorgt. Der zweite Stromrichter versorgt nur den Hilfsantrieb mit der Energie aus der Traktionsbatterie. Für die Nachladung der Traktionsbatterie muss dieser Stromrichter ebenfalls an die Zugsammelschiene angeschlossen werden. Die zweite Möglichkeit ist die Integration der zusätzlichen Komponenten in den in Reisezugwagen bereits vorhandenen Bordnetzumrichter. Die Integration in den Bordnetzumrichter hat den Vorteil, dass die Traktionsbatterie während der Rangierfahrt auch die Komfortanlagen und das Bordnetz mit Energie versorgen kann. Dies wäre bei einem separaten Stromrichter nur mit einer zusätzlichen Batterie oder einer umschaltbaren Versorgung der Komfortanlagen auf den zweiten Stromrichter möglich. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, die im Bordnetzumrichter bereits verbauten Komponenten für den Rangierbetrieb und die Traktionsbatterieladung wiederzuverwenden. Dies ermöglicht eine kompaktere Bauweise gegenüber zwei separaten Stromrichtern. Für die Detailauslegung wird wegen der erwähnten Vorteile nur die Variante mit einem einzelnen Stromrichter weiterverfolgt.

Bei der Integration des Hilfsantriebs in den Bordnetzumrichter steigen die Leistungsanforderungen an den Stromrichter und dessen Kühlung. Aus diesem Grund werden für diese Anwendung sowohl ein luftgekühlter, als auch ein wassergekühlter Stromrichter in Betracht gezogen. Bei beiden Kühlarten werden die Halbleiter auf einem Kühlkörper montiert, welcher die Abwärme entweder an die Luft oder an das Wasser abgibt. Dieser Aufbau ist in Abbildung 3.12 illustriert.

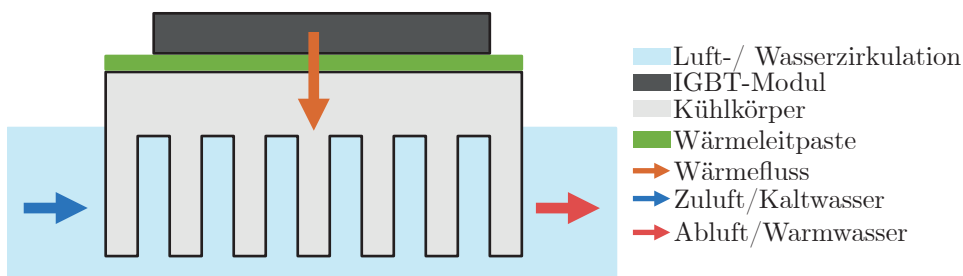


Abbildung 3.12: Illustration der Kühlung eines IGBT-Moduls. Das IGBT-Modul ist mit Wärmeleitpaste auf einem Kühlkörper montiert, welcher entweder mit Wasser oder Luft durchströmt wird.

Luftgekühlter Stromrichter

Beim luftgekühlten Stromrichter werden die IGBT-Module mit einem durch Ventilatoren erzeugten Luftstrom gekühlt. Luftgekühlte Stromrichter eignen sich gut für kleinere Leistungen. Die luftgekühlten Stromrichter haben folgende Eigenschaften [63]:

- + Simpler Aufbau der Kühlung und robust gegenüber äusseren Einflüssen.

Die elektrische Isolation der IGBT-Module im Stromrichter ist vergleichsweise einfach.

- + Das Kühlsystem lässt sich kostengünstig realisieren und ist wartungsarm, was sich in tieferen Betriebskosten widerspiegelt.
- Das Kühlsystem besitzt eine limitierte Kühlleistung im Vergleich zu anderen Kühllösungen. Daraus folgt, dass ein luftgekühlter Stromrichter im Vergleich zu wassergekühlten Stromrichtern eine tiefere Leistungsdichte aufweist.

Luftgekühlte Stromrichter können sowohl direkt mit Aussenluft gekühlt werden, als auch indirekt über einen inneren und äusseren Luftkreislauf. Nachfolgend werden die Vor- und Nachteile der beiden Methoden erläutert. Die direkte Kühlung mit Aussenluft ist in Abbildung 3.13 illustriert. Die Aussenluft wird mithilfe von Ventilatoren durch die Kühlrippen des Kühlkörpers geführt.

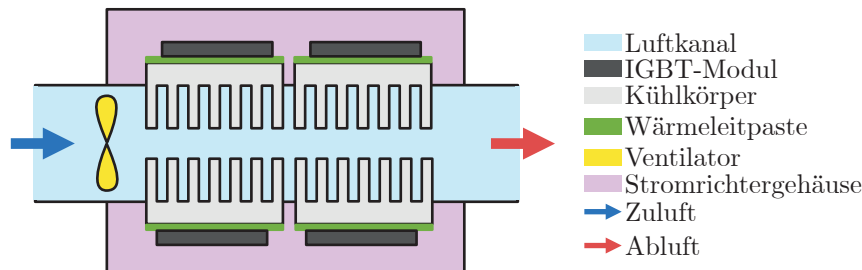


Abbildung 3.13: Darstellung eines luftgekühlten Stromrichters ohne inneren geschlossenen Kühlkreislauf. Die Aussenluft wird direkt in den Stromrichter geleitet.

Diese Kühlmethode hat folgende Vor- und Nachteile [63]:

- + Die Kühlung hat einen sehr einfachen Aufbau. Es werden keine zusätzlichen Kühlkreisläufe und Wärmetauscher benötigt.
- Die Kühlmethode ist insbesondere bei einer Unterflurmontage des Stromrichters anfällig für Verschmutzungen. Aufgrund der im Gleisbereich besonders dreckigen Umgebungsluft darf der Abstand zwischen den Kühlrippen des Kühlkörpers nicht zu klein sein. Zusätzlich müssen die Kühlkörper aufgrund von Korrosion und Vibrationen aus einem Stück gefertigt werden, was die möglichen Längen der Kühlrippen und die Abstände zwischen den Rippen begrenzt. Dies kann zu Kühlkörperdesigns führen, welche für die Anwendung nicht optimal sind.
- Bei der Unterflurmontage ist der Platz sehr beschränkt. Dies führt dazu, dass der Kühlkörper und der Ventilator nicht beliebig gross sein und höhere Kühlleistungen nur über eine Erhöhung der Luftgeschwindigkeit realisiert werden können.
- Die Erhöhung der Luftgeschwindigkeit führt zu steigenden Lärmemissionen. Falls die maximal erlaubten Lärmemissionen begrenzt sind, hat dies Auswirkungen auf die maximale Ventilatorleistung und die Kühlluftgeschwindigkeit. Dies führt zu Einbussen in der Leistungsfähigkeit des Kühlsystems.

Eine weitere Kühlmethode ist die Ausstattung des Stromrichters mit einem geschlossenen internen Luftkreislauf, wie in Abbildung 3.14 dargestellt. Mit einem Luft-Luft-Wärmetauscher wird die Abwärme an den separaten Aussenluft-Kühlluftstrom abgegeben.

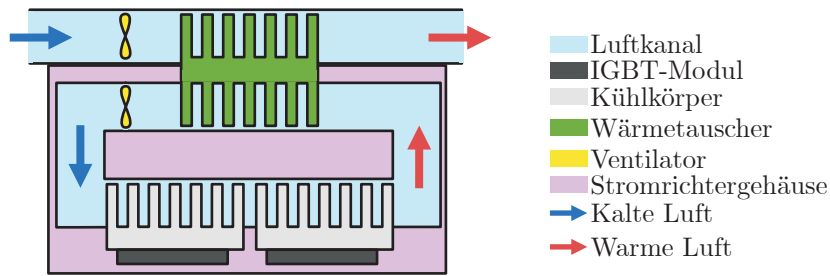


Abbildung 3.14: Illustration eines luftgekühlten Stromrichters mit einem separaten, internen Kühlluftkreislauf. Die Wärme der IGBT-Module wird über den Wärmetauscher an die Umgebungsluft abgegeben.

Diese Kühlmethode besitzt die folgenden Vor- und Nachteile [34, 63]:

- + Keine Verschmutzungsgefahr im Inneren des Stromrichters.
- Es werden zusätzliche Komponenten wie ein Luft-Luft-Wärmetauscher benötigt.
- Die Kühlleistung ist aufgrund des benötigten Luft-Luft-Wärmetauschers sehr gering und aus diesem Grund nicht für Traktionsanwendungen geeignet.

Wassergekühlter Stromrichter

Beim wassergekühlten Stromrichter werden die Kühlkörper der IGBT-Module mit einem Wasser-Glykol Gemisch umspült. Das Kühlmittel nimmt die Abwärme auf und gibt sie in einem externen Rückkühler an die Umgebungsluft ab. Diese Kühlmethode eignet sich für höhere Leistungen und ist heute die Standardlösung bei Traktionsanwendungen [34]. Der Wasserkreislauf in einem wassergekühlten Stromrichter ist in Abbildung 3.15 illustriert.

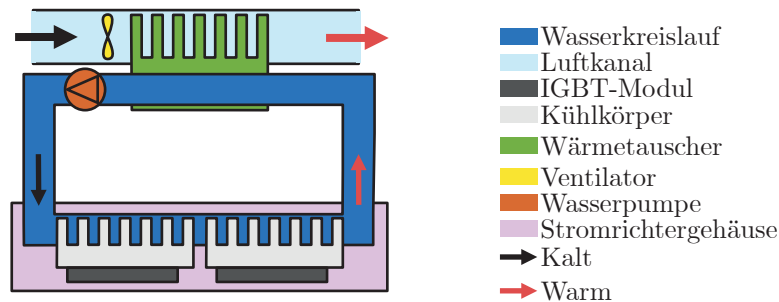


Abbildung 3.15: Illustration eines wassergekühlten Stromrichters mit einem separaten Luft/Wasser-Rückkühler. Der Rückkühler gibt die Wärme des Kühlwassers an die Umgebungsluft ab.

Wassergekühlte Stromrichter besitzen die folgenden Vor- und Nachteile [34, 63]:

- + Die Wasserkühlung ist leicht und effizient. Mit einer Wasserkühlung können kompaktere Stromrichter realisiert werden.
- + Die Wasserkühlung besitzt eine hohe Kühlleistung und kann viel Abwärme schnell abtransportieren.

- Die Wasserkühlung besitzt eine höhere Komplexität gegenüber einer Luftkühlung und benötigt zusätzliche Bauteile, wie beispielsweise Leitungen, Rückkühler und eine Wasserpumpe. Dies führt zu einem höheren Wartungsaufwand als bei luftgekühlten Stromrichtern.
- Ein wassergekühlter Stromrichter verlangt eine gute Isolationskoordination innerhalb des Stromrichters aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit des Wassers.

Gewählter Stromrichtertyp

Für die Anwendung als Traktions- und Hilfbetriebstromrichter in einem Reisezugwagen wird der wassergekühlte Stromrichter gewählt. Ausschlaggebend ist die höhere Leistungsdichte von wassergekühlten Stromrichtern gegenüber luftgekühlten Stromrichtern. Die benötigte Leistung ist wegen des Hilfsantriebs höher als bei einem normalen Reisezugwagen und erschwert die Verwendung einer Luftkühlung. Der Stromrichter soll möglichst kompakt sein, um im Fahrzeug zusätzlichen Platz für die Traktionsbatterie zu schaffen.

Die Luftkühlung mithilfe eines inneren Luftkreises kommt aufgrund der benötigten Traktionsleistung und der Anforderungen an die Kompaktheit des Geräts nicht in Frage. Die direkt mit Aussenluft gekühlten Stromrichter haben bei der Unterflurmontage Nachteile aufgrund der Verschmutzungsgefahr und den engen Platzverhältnissen, welche das Stromrichterdesign erschweren.

3.5.4 Getriebearten

Es werden zwei verschiedene Getriebearten betrachtet. Dazu gehören der Gruppenantrieb und der Einzelachsantrieb. Beim Einzelachsantrieb wird zwischen vier verschiedenen Getriebeaufhängungen unterschieden und es werden Tatzlager-Antrieb, achsreitendes Getriebe, Hohlwellen-Antrieb und Kardanwellen-Antrieb näher betrachtet. Das Getriebe muss in der Lage sein, die Motordrehzahl in die benötigte Drehzahl am Rad umzuwandeln. Dazu muss es eine gewisse Übersetzung aufweisen. Zudem soll es möglichst kompakt sein und wenige rotierende Teile beinhalten.

Gruppenantrieb

Der Gruppenantrieb kommt ursprünglich von Dampflokomotiven, bei welchen das Drehmoment über ein Gestänge auf verschiedene Achsen übertragen wird. Bei modernen Elektro- und Dieselloks wird ebenfalls dieses Konzept eingesetzt. Das Drehmoment wird vom Motor über ein ausgeklügeltes Getriebe auf zwei oder drei Achsen im Drehgestell übertragen. Diese Technik wurde vor allem in Frankreich von Alstom verwendet und heisst dort *Bogie Monomoteur*. Beispiele dafür sind die SNCF-Baureihen BB 8500 und BB 26000. Ein Gruppenantrieb weist folgende Vor- und Nachteile auf [11]:

- + Es wird nur ein Motor pro Drehgestell benötigt, was konstruktiv und preislich günstiger ist.
- + Die Kopplung der Achsen im Drehgestell reduziert die Schleudertendenz der einzelnen Achsen.
- Das Zahnradgetriebe besteht aus zahlreichen Zahnrädern. Dies führt zu einer hohen rotierenden Masse und nicht zuletzt auch zu Lärmemissionen.

- Der Gruppenantrieb ist sehr gross, da ein Motor mit doppelter Leistung eingebaut werden muss. Dadurch ist der Gestaltungsspielraum im Drehgestell deutlich kleiner und der Fahrmotor kann unter Umständen nicht mehr im Drehgestell untergebracht werden.
- Die zahlreichen zusätzlichen Teile haben ein grosses Gewicht.

Ein Beispiel für einen Gruppenantrieb ist in Abbildung 3.16 zu sehen.

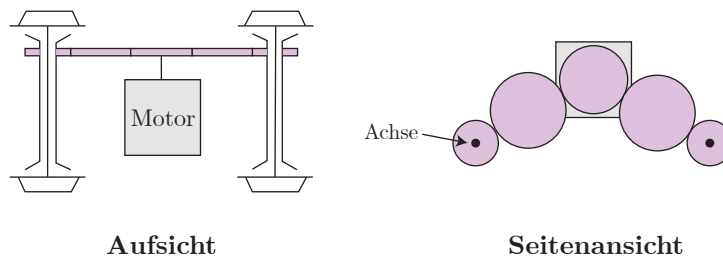


Abbildung 3.16: Schematische Zeichnung eines Gruppenantriebes. Links ist die Aufsicht des Drehgestells zu sehen. Rechts eine Seitenansicht des Zahnradgetriebes.

Einzelantrieb

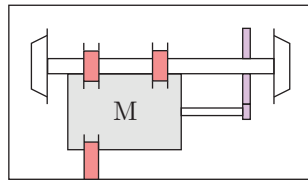
Im Unterschied zum Gruppenantrieb treibt ein Motor eines Einzelantriebs je nur eine Achse an. Dies ist heute die gängige Konstruktionsvariante bei Vollbahnfahrzeugen. Innerhalb der Kategorie des Einzelachsantriebs gibt es verschiedene Realisierungsvarianten, die sich in erster Linie im Grad der Abfederung und im Platzbedarf unterscheiden. Eine Übersichtszeichnung über die betrachteten Getriebearten befindet sich in Abbildung 3.17. Im folgenden Abschnitt werden diese Varianten genauer untersucht. Die theoretische Beschreibung basiert in grossen Teilen auf [14, 11].

Tatzlagerantrieb Das Tatzlager hat den einfachsten Aufbau und ist darum die geläufigste Getriebeaufhängung. Dabei stützen sich Getriebe und Motor auf der einen Seite unabgefedert auf die Achswelle und auf der anderen Seite ist das Getriebe mit dem Motor elastisch am Drehgestellrahmen aufgehängt. Ein Tatzlagerantrieb hat folgende Vor- und Nachteile:

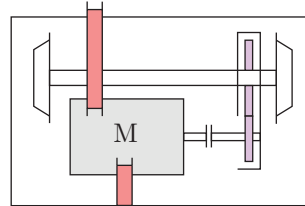
- + Sehr einfache und günstige Bauart.
- Die Masse des Fahrmotors ist unvollständig abgefedert, was zu einer höheren Beanspruchung der Fahrbahn führt.
- Nur bis zu Geschwindigkeiten von ca. 100 km/h sinnvoll einsetzbar.
- Durch den grossen Fahrbahnverschleiss entstehen höhere Trassengebühren.

Achsreitendes Getriebe Ein achsreitendes Getriebe ist der Kategorie der teilabgefederten Antriebe zuzuordnen. Ein solches Getriebe bildet einen Kompromiss aus dem einfachen Tatzlagerantrieb und dem aufwendigeren Hohlwellenantrieb. Der Fahrmotor ist dabei fest mit dem Drehgestell verbunden. Das Getriebe hingegen ist auf dem Grossrad der Achse sowie auf der Seite des Fahrmotors abgestützt. Um die dynamischen Verschiebungen aufzunehmen, ist zwischen Motor und Getriebe eine Lamellenkupplung angebracht. Ein solcher Antrieb eignet sich für Motoren mit kleiner Leistung bis zu hohen Geschwindigkeiten. Ein achsreitendes Getriebe hat folgende Vor- und Nachteile:

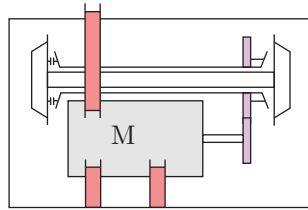
- + Kompromiss aus Einfachheit und geringer unabgefederter Masse.
- + Fahrmotor voll im Drehgestell integriert mit einem entsprechend kleineren Platzbedarf.
- + Relativ einfache Bauart und dadurch günstiger in grossen Stückzahlen.
- Weniger gut gefedert als vollabgefederte Antriebe.



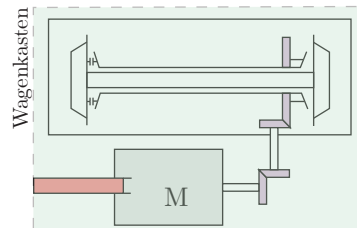
Tatzlagerantrieb



achreitendes Getriebe



Hohlwellenantrieb



Kardanwellenantrieb

Abbildung 3.17: Getriebetypen für Einzelantriebe. Der Fahrmotor ist in Grau, Aufhängungen und Befestigungen in Rot, Wellen in Weiss und Zahnräder in Violett dargestellt.

Hohlwellenantrieb Ein Hohlwellenantrieb ist ein vollabgefederter Antrieb. Das bedeutet, dass Motor und Getriebe vollständig im Drehgestell integriert und abgestützt sind. Dadurch kann eine sehr geringe dynamische Gleisbeanspruchung erreicht werden. Der Fahrmotor ist dabei fest im Drehgestell montiert. Auf der anderen Seite ist das Getriebe fest mit dem Grossrad und der Hohlwelle verbunden. Die Hohlwelle wiederum ist elastisch am Radsatz befestigt. Ein solcher Antrieb eignet sich für schwere Motoren bis zu hohen Geschwindigkeiten. Ein Hohlwellenantrieb weist folgende Vor- und Nachteile auf:

- + Der Motor und das Getriebe sind vollständig abgefedert. Dadurch weist eine solche Aufhängung die tiefste dynamische Belastung der Fahrbahn auf.
- + Der Fahrmotor ist voll im Drehgestell integriert.
- Der Hohlwellenantrieb ist eine sehr aufwendige und teure Konstruktion.

Kardanwellenantrieb Der Kardanwellenantrieb zählt zu den voll abgefederten Antrieben. Er kommt zur Anwendung, falls die Platzverhältnisse im Drehgestell sehr beengt sind und zum Beispiel der Fahrmotor nicht im Drehgestell untergebracht werden kann. Dies ist vor allem bei dieselhydraulischen und dieselmechanischen Loks der Fall, sowie bei Neigezügen. Das Getriebe ist dabei auf der Achse abgestützt. Weiter muss das Getriebe mit dem Drehgestellrahmen verbunden sein, weil sich der

Motor nicht im Drehgestell befindet und sich somit nicht am Motor abstützen kann. Ein Kardanwellenantrieb hat folgende Vor- und Nachteile:

- + Der Platzbedarf im Drehgestell ist sehr gering.
- + Die unabgefederte Masse ist sehr tief.
- Die rotierende Masse ist aufgrund der vielen beweglichen Teile hoch.
- Kardanwellen sind bei Beschädigungen sehr gefährlich und können zu schweren Unfällen führen.

Adhäsionskupplung

Das Getriebe wird zusammen mit dem Motor nur auf den Rangierbetrieb ausgelegt und soll, falls möglich, bei hohen Geschwindigkeiten von bis zu 200 km/h im Zugverband nicht mitdrehen, um eine akzeptable Laufruhe des Wagens zu gewährleisten. Dies bedingt irgendeine Form von Kupplung. Aus der Technik der Zahnradbahnen gibt es das Konzept der Adhäsionskupplung, welche den Adhäsionsantrieb auf Zahnstangenabschnitten auskoppelt. Dort kommt sie zum Einsatz, um die Abnutzung der (Zahn-)Räder zu vermindern [11]. Die Kupplung ist auf den Achsen des Triebdrehgestells verbaut und wird mit Druckluft oder Drucköl betätigt.

Für die angetriebenen Reisezugwagen ist dieses Konzept ideal, weil es erlaubt, das Getriebe während des normalen Betriebs vollkommen auszukuppeln und so die Beanspruchung von Motor und Getriebe auf ein Minimum zu beschränken. Es erlaubt auch eine bessere Abstimmung des Fahrmotors und der Getriebeübersetzung auf den reinen Rangierbetrieb.

Gewählter Getriebetyp

Aus all diesen Überlegungen folgt das achsreitende Getriebe als beste Kompromisslösung. Es überzeugt durch die relativ einfache Bauart und gute Federung. Es handelt sich ebenfalls um eine bereits bewährte und erprobte Technologie. Für den Einsatz im Rangierbetrieb ist es nicht sinnvoll, konstruktiv aufwendige Getriebe zu verwenden. Trotzdem ist eine gewisse Federung gerade bei Reisezugwagen wichtig, um die Wirtschaftlichkeit und die Laufruhe bei hohen Geschwindigkeiten sicherzustellen. Ein unabgefedertes Getriebe verursacht nicht nur während des Rangierbetriebs höheren Gleisverschleiss, sondern aufgrund des höheren Fahrbahnverschleisses auch während der Fahrt im Zugverband. Aus all diesen Gründen wird dem achsreitenden Getriebe mit zusätzlichen Adhäsionskupplungen auf den Triebachsen der Vorzug gegeben.

Ein Tatzlagerantrieb kommt aufgrund der hohen unabgefederten Masse für diese Anwendung nicht in Frage, da der Fahrbahnverschleiss minimiert werden soll. Der Hohlwellenantrieb ist eine denkbare Alternative. Es ist jedoch wegen der kleinen Motorgröße und der hohen Anzahl an Motoren und den damit verbundenen hohen Kosten nicht sinnvoll, in jedem angetriebenen Wagen ein Drehgestell mit einem Hohlwellenantrieb auszurüsten.

Beim verwendeten Drehgestell handelt es sich um ein normales Wagendrehgestell ohne Neigetechnik. Aus diesem Grund ist genug Platz für die Fahrmotoren im Drehgestell vorhanden und es kann auf ein konstruktiv aufwendiges Kardanwellengetriebe verzichtet werden.

Aus ähnlichen Überlegungen wird auf einen Gruppenantrieb verzichtet. Obwohl die Laufeigenschaften sehr gut sind und die Kupplung zum Auskuppeln des Getriebes einfach zu realisieren wäre, überwiegen die Nachteile. Zu diesen Nachteilen gehören

zum Beispiel die sehr grosse Bauweise, was zu Platzverlust im Wagen führen kann, sowie die zahlreichen rotierenden Teile, die Lärm verursachen und die dynamische Masse vergrössern.

3.6 Entscheid Fahrzeugkonzept

Abschliessend werden in diesem Kapitel die Resultate der Fahrzeugkonzeptbewertung dargelegt. Dabei wurden bereits einige technische Konzeptentscheide getroffen, sowie ein Fahrzeugkonzept mit Hilfe einer Nutzwertanalyse ausgewählt.

Die für den einstöckigen Zweiteiler resultierenden Kennzahlen sind in Tabelle 3.5 dargestellt.

Kennzahlen aus Nutzwertanalyse	
Anfahrzugkraft [kN]	54
Max. Leistung [kW]	225
Anz. angetriebene Achsen [-]	2
Achslast [t]	16
Kapazität Energiespeicher [kWh]	56
Masse Energiespeicher [t]	1300
Volumen Energiespeicher [l]	1755

Tabelle 3.5: Übersicht der aus der Nutzwertanalyse resultierenden Leistungsdaten des einstöckigen Moduls bestehend aus zwei Reisezugwagen.

Die Leistungsdaten, die Zugkraft, das Gewicht und das Volumen stammen allesamt aus der Leistungsanalyse wie in Abschnitt 2.4 beschrieben. Auch die Kennzahlen zu Achslast und Anzahl angetriebener Achsen leiten sich daraus ab. Zudem befindet sich eine vollständige Übersicht über die Kennzahlen zu allen Konzepten im Anhang C. Zum Schluss folgt die Grösse des Energiespeichers aus der Energiebilanz in Abschnitt 3.2.

Abschliessend konnten in diesem Kapitel bereits einige Konzeptentscheide getroffen werden:

- Das Fahrzeug muss definierten technischen Anforderungen betreffend Beschleunigung, Geschwindigkeit, Reichweite und Komfort genügen.
- Es müssen eine Vielfachsteuerung und eine Software zur Umschaltung zwischen Rangierbetrieb und Lokbetrieb verbaut und entwickelt werden.
- Es wird mit einem einstöckigen, zweiteiligen Modul gerechnet.
- Es wird eine Traktionsbatterie als Energiespeicher verwendet.
- Es werden zwei angetriebene Achsen benötigt, um den geforderten maximalen Haftwert nicht zu überschreiten.
- Es werden eigenbelüftete Asynchron-Fahrmotoren verbaut.
- Es wird ein wassergekühlter Traktionsstromrichter eingesetzt.
- Es wird auf ein achsreitendes Getriebe gesetzt.

Anhand dieser Merkmale kann nun in einem nächsten Schritt die Detailauslegung der technischen Komponenten angegangen werden. Dies dient ebenfalls der Verifikation des hier getroffenen Typenentscheids.

Kapitel 4

Detailauslegung des gewählten Konzepts

In der Detailauslegung des gewählten Konzepts werden die gegenüber einem gewöhnlichen Reisezugwagen veränderten Komponenten und die neu hinzugekommene Ausrüstung näher betrachtet. Des Weiteren wird das angedachte Leittechnik- und Bedienkonzept vorgestellt und eine Einbauplanung durchgeführt.

4.1 Konzeptübersicht

Dieser Abschnitt stellt das Konzept vor, welches in den folgenden Kapiteln im Detail ausgelegt wird. Für die angetriebenen Module müssen gegenüber einem gewöhnlichen Reisezugwagen mehrere Komponenten modifiziert und zusätzliche Ausrüstung eingebaut werden. Eine Übersicht über die im zweiteiligen Modul modifizierten und neu hinzugekommenen Komponenten ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Das Modul ist in einen angetriebenen und einen antriebslosen Wagen unterteilt. Auf dem angetriebenen Wagen wird die gesamte Antriebsausrüstung bestehend aus Traktionsbatterie, modifiziertem Stromrichter und den beiden Fahrmotoren inklusive Getriebe und Adhäsionskupplung installiert. Der Antrieb wird auf dem hinteren Drehgestell des vorderen Wagens angebracht, um eine gute Adhäsionsausnutzung zu erreichen.

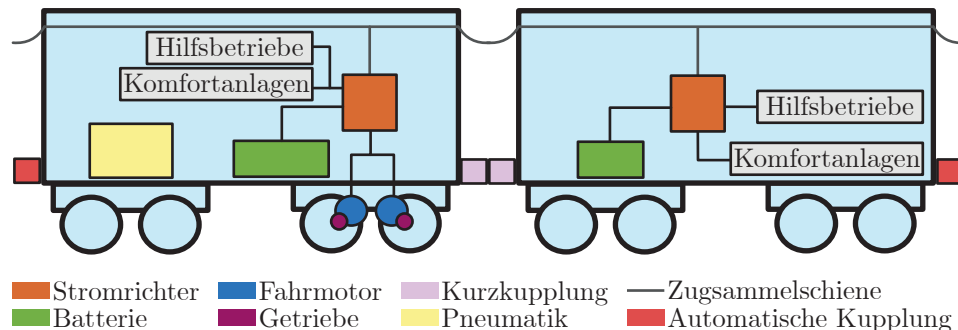


Abbildung 4.1: Übersicht über die modifizierten und neu hinzugekommenen Komponenten des Moduls bestehend aus zwei Reisezugwagen. Die gesamte Antriebsausrüstung ist auf dem vorderen Wagen konzentriert.

Da es nicht vorgesehen ist, die beiden Wagen während des Betriebs zu trennen, erfolgt die Verbindung der beiden Wagen über eine Kurzkupplung. An den beiden Enden des Wagenmoduls werden automatische Kupplungen für den einfacheren Rangierbetrieb verbaut. Der angetriebene Wagen wird mit zusätzlicher Pneumatik ausgerüstet, damit die pneumatischen Verbraucher und insbesondere die mechanischen Bremsen während des Rangierbetriebs einsatzfähig bleiben. Zur Sicherstellung der Druckluftversorgung wird die auf dem angetriebenen Wagen vorhandene Pneumatik mit einem Kompressor und einem Hauptluftbehälter ergänzt. Für die Bedienung der mechanischen Bremsen wird ein zusätzliches Führerbremventil in den angetriebenen Wagen eingebaut.

Die Anforderungen an den Betrieb der Komfortanlagen während des Rangierbetriebs erfordert eine Energieversorgung des antriebslosen Wagens. Eine Möglichkeit wäre die Versorgung des antriebslosen Wagens aus der Traktionsbatterie des angetriebenen Wagens über die Zugsammelschiene. Diese Lösung ist aus mehreren Gründen nicht praktikabel: Einerseits benötigt die grössere Traktionsbatterie zusätzlichen Platz im angetriebenen Wagen, dabei stünde im antriebslosen Wagen für einen zusätzlichen Energiespeicher mehr Platz zur Verfügung als im angetriebenen Wagen. Mit der Installation der zusätzlich benötigten Energie auf dem antriebslosen Wagen können die Einbussen in der Passagierkapazität der Reisezugwagenmodule minimiert werden. Zusätzlich spricht die geforderte Fähigkeit mit mehreren Reisezugwagen in Mehrfachtraktion zu verkehren und die technische Anforderung, dass die Zugsammelschiene nur von einer Quelle aus gespeist werden darf, für die Lösung mit zwei Batterien. Die Lösung mit nur einer Batterie hätte zur Folge, dass entweder der führende angetriebene Wagen alle antriebslosen Wagen mit Energie versorgt oder die Zugsammelschiene zwischen jedem Modul für den Rangierbetrieb unterbrochen werden muss. Aus diesen Gründen wird der Installation einer zusätzlichen Klima-Batterie im antriebslosen Wagen der Vorrang gegeben. Die Integration der Batterie erfordert auch eine Anpassung des Stromrichters im antriebslosen Wagen und die Batterien können entweder während der Fahrt über die Zugsammelschiene oder im Depot über die Depotsteckdose geladen werden. Die zusätzlich benötigte Leittechnik für die Steuerung der Wagen ist ebenfalls auf dem angetriebenen Wagen installiert. Das Modul besitzt an beiden Enden eine Möglichkeit zur Steuerung der Fahrzeuge, um die Anforderungen an den Rangierbetrieb zu erfüllen.

4.2 Energiespeicher

Für die Auslegung der beiden Energiespeicher muss in einem ersten Schritt der Energiebedarf ermittelt werden. Dafür wird eine an die Anwendung angepasste Fahrzeugsimulation aus [58] verwendet. In einem zweiten Schritt werden die Dimensionen der Batterien ermittelt und sichergestellt, dass die gewählten Batterien in der Lage sind, die benötigte Leistung bereitzustellen.

4.2.1 Ermittlung des Energiebedarfs

Zur Bestimmung der idealen Energiespeichergösse wird das Reichweitenszenario aus Kapitel 3.2.1 simuliert. Die Simulation berücksichtigt den Energieverbrauch aufgrund des Fahrwiderstands, der Hilfsbetriebe und der Komfortanlagen sowie die verschiedenen Verluste im Antriebsstrang. Zu diesen gehören die Energieverluste in der Batterie, im Stromrichter und im Fahrmotor. Mithilfe der ermittelten Verluste kann der benötigte Energieinhalt der Batterie berechnet werden. In den nachfolgenden Abschnitten wird kurz die Implementierung der verschiedenen Energieverbraucher und Verlustkomponenten erläutert.

Fahrwiderstand

Der Fahrwiderstand wird in der Simulation mit den gleichen Formeln und Faktoren wie in der Nutzwertanalyse in Kapitel 2.3.1 berechnet. In der Simulation wird die sich ändernde Fahrgeschwindigkeit bei der Berechnung des Anteils des Luftwiderstands berücksichtigt. In Abbildung 4.2 ist der Verlauf der Energieverluste durch den Fahrwiderstand während des Reichweitenszenarios abgebildet. Der resultierende Energiebedarf zur Deckung der Verluste durch den Fahrwiderstand beträgt 10.19 kWh.

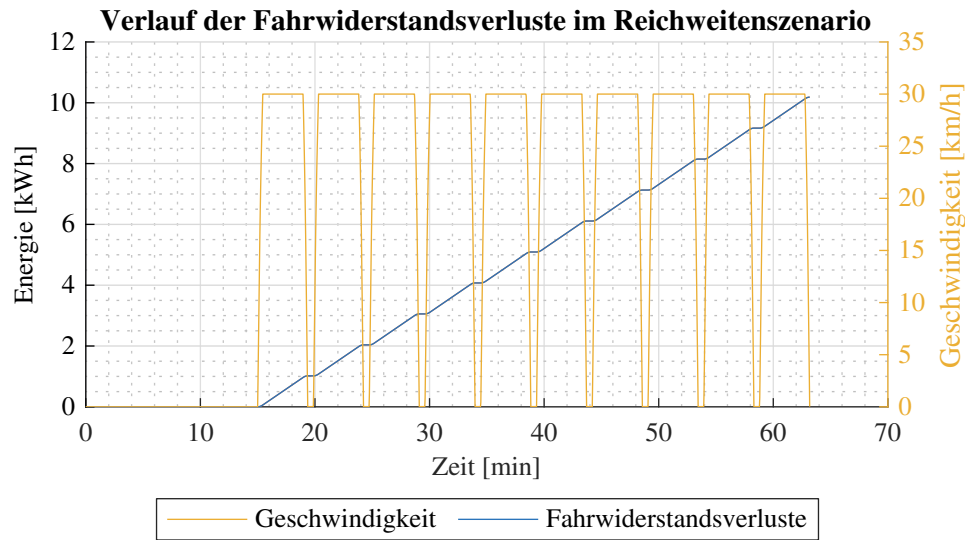


Abbildung 4.2: Darstellung der kumulierten Fahrwiderstandsverluste während des Reichweitenszenarios. Zusätzlich ist die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeugs mit abgebildet.

Hilfsbetriebe und Komfortanlagen

Für die Berechnung der benötigten Energiespeichergösse muss auch der Energieverbrauch der Hilfsbetriebe und Komfortanlagen berücksichtigt werden. Die angenommenen Werte für die Hilfsbetriebe basieren auf den unveröffentlichten Erfahrungswerten eines existierenden Triebzugs und werden für die Anwendung in einem Reisezugwagen angepasst. Die Annahmen für die Hilfsbetriebedauerleistungen der angetriebenen Wagen sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Für den antriebslosen Wagen sind die Annahmen zur Hilfsbetriebedauerleistung in Tabelle 4.2 aufgelistet.

Neben den Hilfsbetrieben muss auch der Energiebedarf der Komfortanlagen berücksichtigt werden. Die Komfortanlagen unserer Reisezugwagen bestehen aus der Klimaanlage/ Heizung und den 50-Hz-Verbrauchern. Die angenommenen Leistungswerte für einen einzelnen Wagen sind in Tabelle 4.3 dargestellt und gelten für beide Wagen des zweiteiligen Moduls.

Die resultierenden Dauerleistungen des angetriebenen Wagens werden in die Simulation des Reichweitenszenarios integriert, um die zusätzlichen Verluste in der Batterie und dem Stromrichter durch die Hilfsbetriebe zu berücksichtigen. Für die Abschätzung des Energiebedarfs der Komfortanlagen muss für den angetriebenen Wagen die Zeit im Stand und die Zeit während der Fahrt berechnet werden.

Leistungsbilanz Hilfsbetriebe Angetriebener Wagen		
Komponenten	Fahrt [kW]	Stand [kW]
Traktionsbatteriekühlung	3	1
Stromrichterlüfter	0.7	0.2
Kompressor	0.5	0.5
Stromrichterwasserpumpe	0.4	0.2
Bordnetzbatterieladung	5	5
Total Hilfsbetriebe	9.6	6.9

Tabelle 4.1: Auflistung der angenommenen Dauerleistungen für die einzelnen Hilfsbetriebekomponenten des angetriebenen Wagens. Es wird zwischen der benötigten Hilfsbetriebeleistung im Stand und während der Fahrt im Batteriebetrieb unterschieden.

Leistungsbilanz Hilfsbetriebe antriebsloser Wagen	
Komponenten	Dauerleistung [kW]
Klima-Batteriekühlung	0.5
Stromrichterlüfter	0.1
Stromrichterwasserpumpe	0.2
Bordnetzbatterieladung	5
Total Hilfsbetriebe	5.8

Tabelle 4.2: Übersicht über die geschätzten Dauerleistungen der einzelnen Hilfsbetriebekomponenten für den antriebslosen Wagen.

Leistungsbilanz Komfortanlagen	
Komponenten	Dauerleistung [kW]
Klimaanlage / Heizung	10
50-Hz-Verbraucher	1
Total Komfortanlagen	11

Tabelle 4.3: Übersicht über die angenommenen Dauerleistungen für die Komfortanlagen. Die Klimaanlage ist, wie in Kapitel 3.2 definiert, während der Rangierfahrt im reduzierten Betrieb.

Das Reisezugwagen-Modul ist im Reichweitenszenario während 43 Minuten in Bewegung und befindet sich während 20 Minuten im Stillstand. Dies führt zu einer für die Hilfsbetriebe und Komfortanlagen benötigten Energie von 20.73 kWh. Beim antriebslosen Wagen beträgt die benötigte Energie für die 63 Minuten dauernde Fahrt 17.64 kWh.

Fahrmotorverluste

Die Fahrmotorverluste werden mithilfe eines einfachen Modells einer Asynchronmaschine abgeschätzt. Das einphasige Ersatzschaltbild der in der Simulation modellierten Asynchronmaschine ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

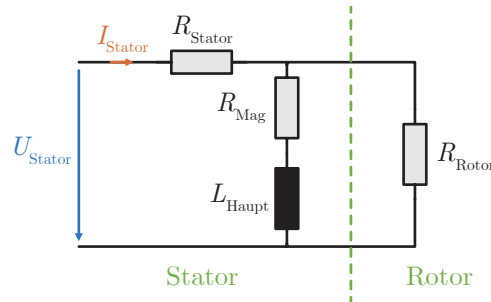


Abbildung 4.3: Ersatzschaltbild des verwendeten Fahrmotormodells.

Die für die Verlustberechnung verwendeten Motordaten sind in Tabelle 4.4 dargestellt. Diese Motordaten basieren grösstenteils auf einem realen Motor vom Hersteller TSA [64]. Die Werte für den Leistungsfaktor im Nennpunkt und den Wirkungsgrad im Nennpunkt werden geschätzt. Die benötigten Werte für den Statorwiderstand R_{Stator} , die Hauptinduktivität L_{Haupt} , den Magnetisierungswiderstand R_{Mag} und den Rotorwiderstand R_{Rotor} werden anhand der in Tabelle 4.4 vorhandenen Nennpunktdaten berechnet. Für diese Berechnungen wird angenommen, dass der Statorwiderstand für 80 % der Statorverluste im Nennpunkt verantwortlich ist. Die restlichen 20 % der Statorverluste werden durch den Magnetisierungswiderstand verursacht.

Fahrmotordaten		Wert
Nennleistung	P_{Nenn}	130 kW
Nennspannung	U_{Nenn}	505 V
Nennstrom	I_{Nenn}	185 A
Nennfrequenz	f_{Nenn}	50 Hz
Nennleistungsfaktor	$\cos(\phi)_{\text{Nenn}}$	0.893
Nennwirkungsgrad	η_{Nenn}	0.9
Nennzahl	n_{Nenn}	1479 rpm
Maximalzahl	n_{max}	4533 rpm
Anfahrmoment	M_{start}	1491 Nm
Polpaarzahl	p	2

Tabelle 4.4: Übersicht über die verwendeten Leistungsdaten für das Fahrmotormodell, welches auf einem Motor des Herstellers TSA basiert [64].

Das Modell simuliert das Betriebsverhalten einer Asynchronmaschine mit Frequenzumrichterspeisung. Der normale Betriebsbereich mit konstantem magnetischem Fluss und der Feldschwächbereich der Asynchronmaschine werden simuliert.

Für die Simulation wird angenommen, dass der Motor im Zugkraft-Geschwindigkeits-Diagramm immer im Bereich bleibt, in welchem die Kippgrenze des Motors das Motorverhalten noch nicht beeinflusst. Das Betriebsverhalten der Asynchronmaschine beim Anfahren auf Maximalgeschwindigkeit ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

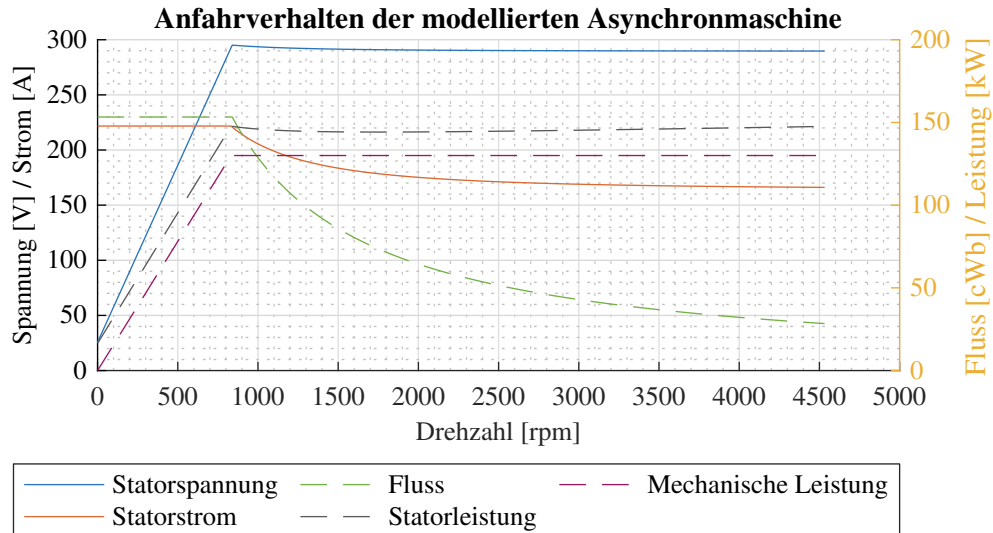


Abbildung 4.4: Darstellung des Anfahrverhaltens des Fahrmotors bis Maximalgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Motordrehzahl.

In der Grafik ist gut ersichtlich, wie beim Anfahren der Fluss und der Statorstrom bis zum Erreichen der Nennspannung konstant bleiben und die Leistung des Fahrmotors bis zum Erreichen der Nennspannung linear ansteigt. Bei einer weiteren Erhöhung der Drehzahl wechselt der Motor in den Feldschwächungsbereich und reduziert den magnetischen Fluss im Motor, um die Leistung des Motors konstant zu halten. Im Feldschwächungsbereich reduziert sich der Statorstrom aufgrund des kleiner werdenden Magnetisierungsstroms. Die Differenz zwischen der Statorleistung und der mechanischen Leistung entsteht aufgrund der Verluste im Fahrmotor.

Das elektrische Bremsverhalten der Asynchronmaschine ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Wegen des Spannungsabfalls im Fahrmotor ist die Statorspannung während des elektrischen Bremsens tiefer als beim Anfahren. Der Statorstrom ist negativ, da während des Bremsens Energie in den Zwischenkreis zurückgespeist wird.

Die Differenz zwischen der mechanischen Leistung und der Statorleistung ist wie beim Anfahren auf die Fahrmotorverluste zurückzuführen. Sobald die mechanischen Bremsen kurz vor dem Stillstand das Bremsen bis zum Anhalten übernehmen, wird keine Energie mehr in den Zwischenkreis zurückgespiesen. Der magnetische Fluss im Fahrmotor wird bis zum Stillstand aufrechterhalten und die zur Deckung der magnetischen Verluste erforderliche Energie wird aus dem Zwischenkreis bezogen. Dieser Wechsel ist in Abbildung 4.5 erkennbar durch den Sprung im Wert der Spannung, des Stroms und der Leistungen.

Der Verlauf der kumulierten Fahrmotorverluste während der Simulation des Reichweitenszenarios ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Die resultierenden Fahrmotorverluste betragen für beide Fahrmotoren 10.2 kWh und setzen sich aus den dominierenden Statorverlusten und den kleineren Rotorverlusten zusammen.

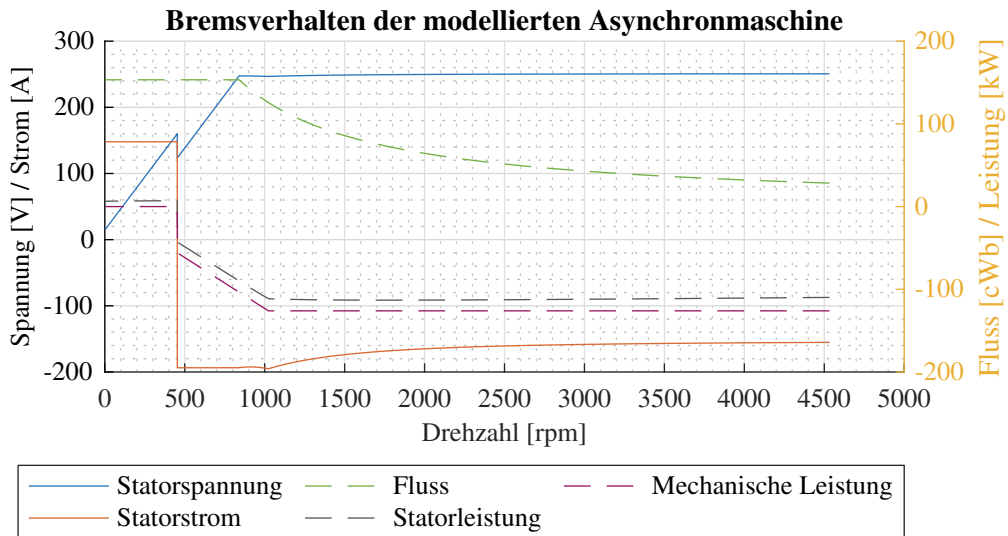


Abbildung 4.5: Darstellung des elektrischen Bremsverhaltens von der Maximalgeschwindigkeit bis zum Stillstand in Abhängigkeit der Motordrehzahl. Ab ca. 450 rpm wird mit den mechanischen Bremsen bis zum Stillstand verzögert.

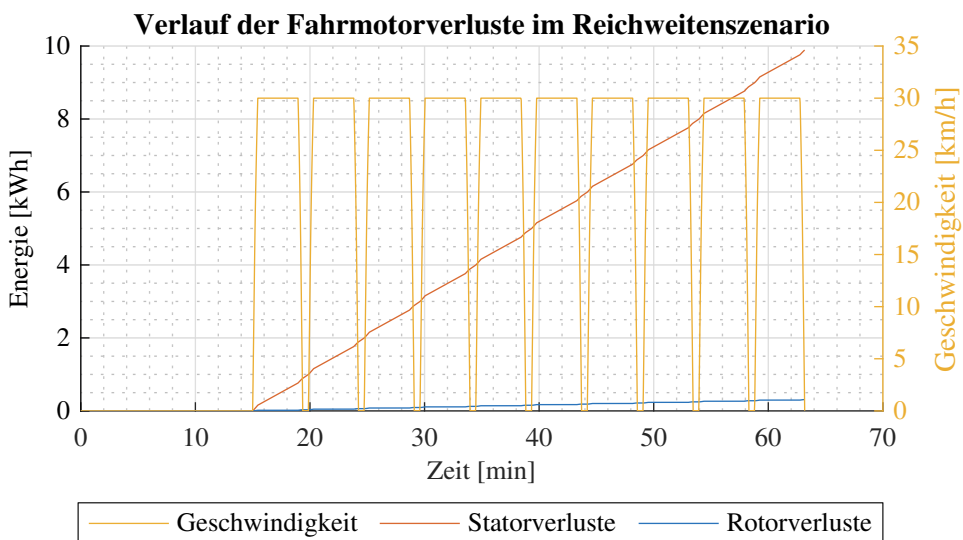


Abbildung 4.6: Abbildung der kumulierten Fahrmotorverluste im Reichweitenszenario in Abhängigkeit der Fahrzeit. Zusätzlich ist die aktuelle Geschwindigkeit abgebildet. Es werden die Verluste beim Fahren und beim Bremsen berücksichtigt. Ausserdem ist ersichtlich, dass die Statorverluste gegenüber den Rotorverlusten dominieren.

Batterieverluste

Zur Bestimmung der Batterieverluste wird das in [58] implementierte Batteriemodell verwendet. Die Batterie besteht aus mehreren Batteriezellen, wobei nur eine Batteriezelle simuliert wird. Das Ergebnis der Simulation der einzelnen Batteriezelle wird auf die anderen Batteriezellen übertragen, um die gesamte Batterie zu simulieren. Das Modell der Batteriezelle besteht aus einer ladezustandsabhängigen Spannungsquelle U_{OCV} , einem Innenwiderstand R_i und zwei RC-Gliedern, R_1C_1 und R_2C_2 , in Serie. Das Ersatzschaltbild einer Batteriezelle ist in Abbildung 4.7 aufgezeigt.

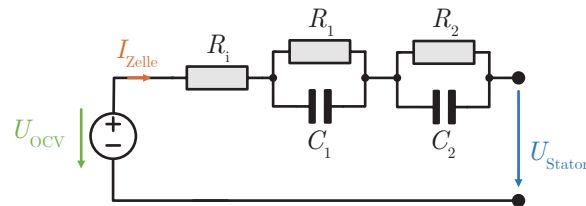


Abbildung 4.7: Illustration des Ersatzschaltbilds einer Batteriezelle bestehend aus einem Innenwiderstand und zwei RC Gliedern. U_{OCV} ist die ladezustandsabhängige Ruhespannungsquelle und I_{Zelle} der einzelne Zellenstrom.

Das Batteriemodell wird so abgestimmt, dass es möglichst die gleichen ladezustandsabhängigen Spannungsverläufe in der Ruhe und unter Last besitzt wie eine reale Batteriezelle. Aus diesem Grund wird zur Batteriemodell-Abstimmung der Spannungsverlauf eines LTO-Batteriemoduls des Herstellers ABB verwendet [65]. Das Resultat der Batterieabstimmung ist in Abbildung 4.8 dargestellt.

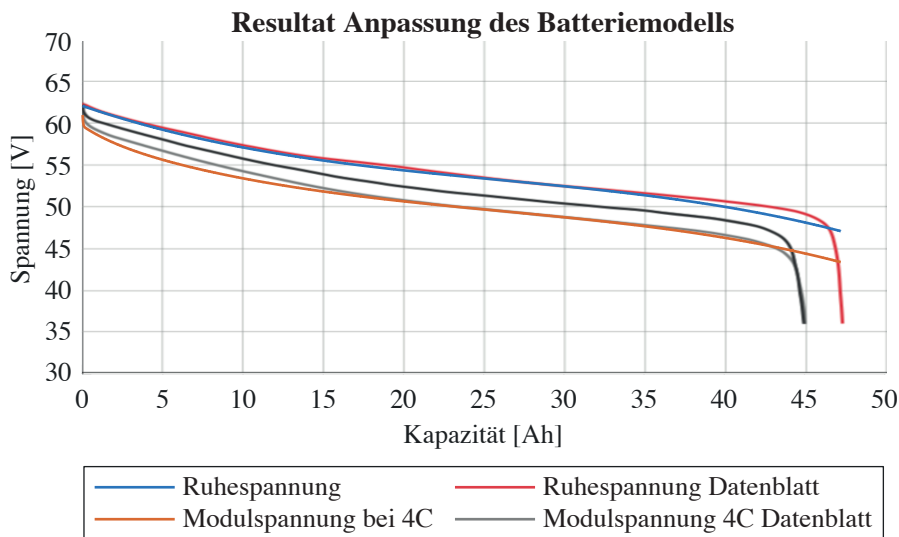


Abbildung 4.8: Vergleich der Modulspannungen in der Ruhe und unter Last zwischen dem Batteriemodell und der realen Batterie in Abhängigkeit der entnommenen Kapazität. Die Kurven für das reale Batteriemodul sind aus dem Datenblatt des Batteriemoduls [65] entnommen. Die resultierenden Kurven für das Batteriemodell sind in blau und orange dargestellt.

Bei sehr tiefen Ladezuständen sackt die Spannung des originalen Batteriemoduls stark ab. In der Abbildung ist sichtbar, dass dieses Verhalten mit dem Modell nicht

nachgebildet werden konnte. Diese Unstimmigkeiten bei sehr tiefen Ladezuständen ist vernachlässigbar, da die Batterie in der Batterieauslegung nicht unter einen Ladezustand von 10 % fallen sollte. Für den restlichen Bereich stimmt das Batteriemodell sehr gut mit dem realen Batteriemodul überein. Die aus der Batterie im angetriebenen Wagen bezogene Leistung und die kumulierten Batterieverluste während des Reichweitenszenarios sind in Abbildung 4.9 dargestellt.

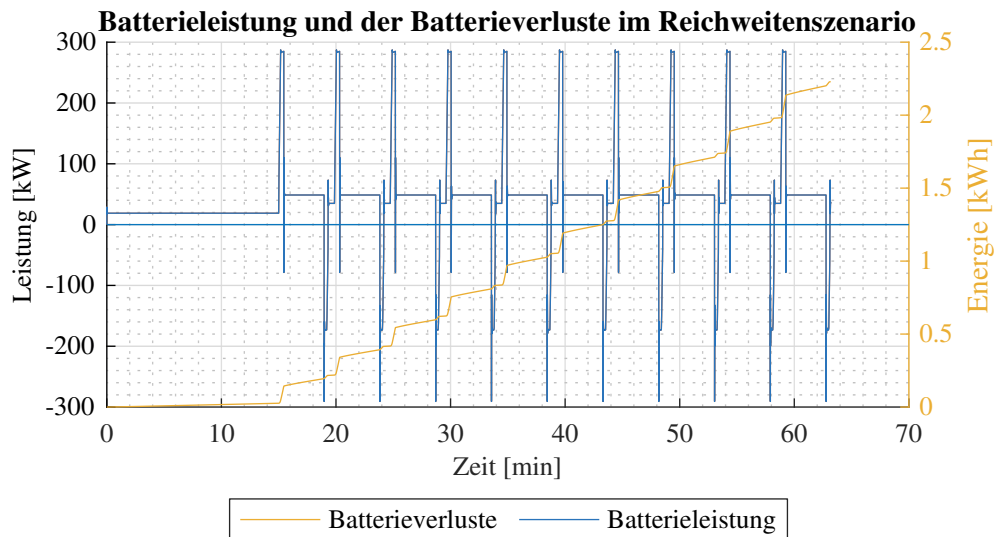


Abbildung 4.9: Zeitlicher Verlauf der Batterieleistung während des Reichweitenszenarios. Zusätzlich sind noch die kumulierten Batterieverluste aufgetragen.

Die maximal aus der Traktionsbatterie bezogene Leistung wurde mithilfe der Simulation ermittelt und beträgt 287 kW. Beim Bezug einer konstanten Leistung aus der Batterie wird der dafür benötigte Strom bei tiefer werdendem Ladezustand immer grösser. Ein höherer Batteriestrom erhöht die Verluste im Innenwiderstand und in den RC-Gliedern der Batterie. Innerhalb der Batterie wird der benötigte Strom auf mehrere Zellen aufgeteilt. Durch die quadratische Strom-Abhängigkeit der Verluste spielt die verwendete Batteriegröße eine entscheidende Rolle bei den resultierenden Batterieverlusten, welche im Vorhinein nur geschätzt werden können. Die Batterieverluste innerhalb des Reichweitenszenarios betragen für die in Kapitel 4.2.2 ausgelegte Traktionsbatterie insgesamt 1.73 kWh.

Die Batterieverluste in der Klimabatterie im antriebslosen Wagen sind aufgrund der geringeren benötigten Leistung relativ klein und betragen für das Reichweitenszenario 0.26 kWh.

Stromrichterverluste

Für die Energiebedarfsbestimmung werden die Verluste in den einzelnen Wandlerstufen des Stromrichters vereinfachend mit konstanten Wirkungsgraden angenommen. Alle Wandlerstufen besitzen einen konstanten Wirkungsgrad von 0.97 bezogen auf die transferierte Leistung. Zusätzlich werden noch die Verluste des Zwischenkreises durch den Entladewiderstand modelliert. Dieser ist parallel zur Zwischenkreiskapazität geschaltet. Die gesamten Stromrichterverluste, bestehend aus den Verlusten in den Wandlern und den Zwischenkreisverlusten, betragen für den Traktionsstromrichter 4.22 kWh. Der Verlauf der kumulierten Stromrichterverluste ist in Abbildung 4.10 dargestellt.

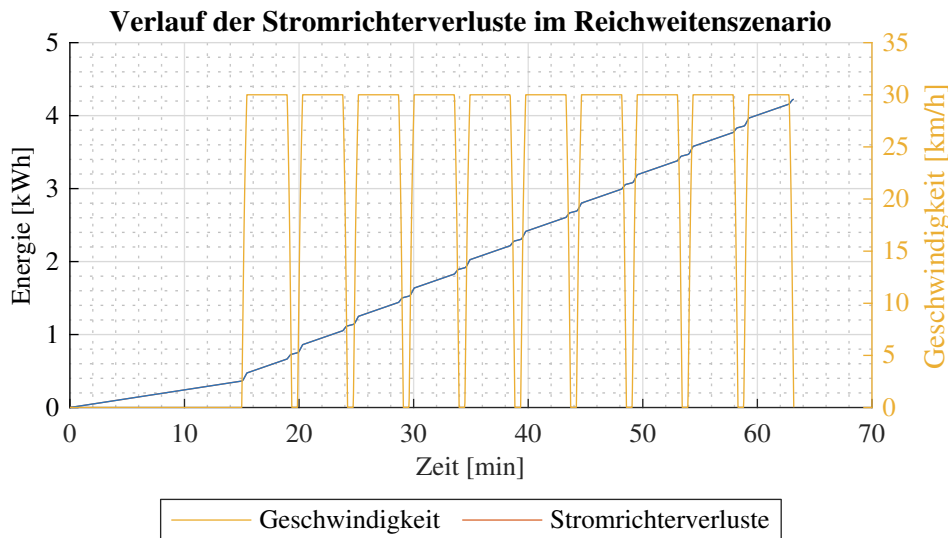


Abbildung 4.10: Verlauf der kumulierten Stromrichterverluste für den Traktionsstromrichter während des Reichweitenszenarios. Es ist gut sichtbar, wie die Verluste bei höherer geforderter Leistung stärker ansteigen.

Beim Klimastromrichter können die Verluste im Stromrichter dank der konstanten bezogenen Leistung relativ einfach berechnet werden. Die Stromrichterverluste des antriebslosen Wagens im Reichweitenszenario betragen 1.45 kWh.

Mechanische Getriebeverluste

Das mechanische Getriebe zwischen Fahrmotor und Achse verursacht zusätzliche Verluste. Für das Getriebe wird in der Simulation des Energiebedarfs ein konstanter Wirkungsgrad von 0.97 angenommen. Mit dieser Annahme verursacht das Getriebe während des Reichweitenszenarios Energieverluste von 1.07 kWh.

Mechanische Bremsverluste

Die beim vollständigen Anhalten benötigten mechanischen Bremsen verursachen zusätzliche Verluste. In der Reichweitesimulation wird bei einer Geschwindigkeit von 5 km/h die elektrische Bremse durch die mechanische Bremse ersetzt. Dies führt im Reichweitenszenario zu zusätzlichen Verlusten von 0.34 kWh.

Übersicht Energiebedarf

Eine Übersicht über alle berücksichtigten Energieverbraucher und Verluste zusammen mit dem resultierenden Energiebedarf für die Traktions- und Klimabatterie ist

in Tabelle 4.5 aufgestellt.

Energiebedarf Reichweitzenszenario		
Verlustkomponente	Traktion [kWh]	Klima [kWh]
Fahrwiderstand	10.19	0
Fahrmotorverluste	10.2	0
Batterieverluste	1.73	0.26
Stromrichterverluste	4.22	1.45
Getriebeverluste	1.07	0
mechanische Bremsverluste	0.34	0
Hilfsbetriebe und Komfortanlagen	20.73	17.64
Total Energiebedarf	48.5	19.35

Tabelle 4.5: Übersicht über den resultierenden Energiebedarf für die Traktionsbatterie (Traktion) und die Klimabatterie (Klima) für das Reichweitzenszenario.

4.2.2 Batterieauslegung

Nach der Ermittlung des Energiebedarfs der Reisezugwagen können die Traktionsbatterie und die Klimabatterie dimensioniert werden. Für die Dimensionierung des Energiespeichers wird das in Abbildung 4.11 gezeigte Batteriemodul des Herstellers ABB als Basis verwendet [65].



Abbildung 4.11: Bild des Batteriemoduls, welches für die Batterieauslegung als Grundlage verwendet wird.

Das Modul besteht aus zwei parallelen Batteriesträngen mit je 24 LTO-Zellen in Serie und besitzt eine Kapazität von 2.6 kWh. Es können bis zu 16 Module in Serie geschaltet werden [65]. Die Daten des Batteriemoduls sind in Tabelle 4.6 dargestellt.

Die Batterieauslegung für die Stromrichter und die Klimabatterie wird in mehrere Schritte unterteilt:

1. Berechnung der benötigten Batteriekapazität unter Berücksichtigung der maximalen Entladetiefe (DoD) von 0.8, um die spezifizierte Lebensdauer der Batteriemodule zu erreichen.
2. Überprüfung, ob die Batterie in der Lage ist, die geforderte Leistung zu erbringen.
3. Das resultierende Gewicht und Volumen berechnen und die optimale Modulordnung finden, damit die Batteriespannung im richtigen Bereich zur Zwi-

schenkreisspannung passt. Die Effizienz der DC-DC-Spannungswandlung zwischen Batterie und Zwischenkreis ist akzeptabel, solange das maximale Spannungserhöhungsverhältnis kleiner oder gleich drei ist [66]. Bei einer Zwischenkreisspannung von 750 V befindet sich der ideale Spannungsbereich zwischen 250 V und 750 V.

4. Verifikation mithilfe der Simulation, ob die verwendete Batterie in der Lage ist, das Reichweitenszenario zu absolvieren.

Batteriemodul Daten	
Zellentechnologie	LTO
Modulspannung	55 V
Modulkapazität	2.6 kWh
durchschnittlicher Lade-/Entladestrom	184 A (4C)
maximaler Lade-/Entladestrom (max. 30 Sekunden)	368 A (8C)
Anzahl möglicher Ladezyklen (Entladetiefe = 80%)	>20'000
Volumetrische Energiedichte	40 Wh/l
Gravimetrische Energiedichte	54 Wh/kg

Tabelle 4.6: Leistungsdaten der verwendeten Batteriemodule des Herstellers ABB [65]. Die Daten zur volumetrischen und gravimetrischen Energiedichte der Module stammen aus den Fachgesprächen (siehe Anhang A).

Traktionsbatterie

Mit dem Energiebedarf aus Tabelle 4.5 kann die benötigte Energiespeichergröße berechnet werden. Bei einer maximalen Entladetiefe von 0.8 muss die Traktionsbatterie mindestens eine Kapazität von 61.25 kWh besitzen.

Eine Batterie mit einer Kapazität von 62.4 kWh kann bei einer Modulnennspannung von 55 V dauerhaft eine Leistung von 243 kW bereitstellen, ohne den im Datenblatt spezifizierten Dauerentladestrom der Batterie zu überschreiten. Die Batterie muss in der Lage sein, eine Spitzenleistung von 287 kW bereitzustellen, um immer die volle Fahrzeugleistung zur Verfügung zu haben. Die Batterie kann bei einer Nennspannung von 660 V für maximal 30 Sekunden eine Leistung von 486 kW bereitstellen, danach muss die Leistung reduziert werden.

Die Lebensdauer der Batteriemodule ist für die Belastung mit dem durchschnittlichen Entladestrom von 4C angegeben [65]. Mit der Annahme, dass das regelmäßige Abrufen von Strömen über dem durchschnittlichen Entladestrom sich negativ auf die Lebensdauer der Batterie auswirkt, wird eine grössere Traktionsbatterie vorgesehen. Damit soll ein Betrieb der Batterie über den durchschnittlichen Lade- und Entladeströmen möglichst minimiert oder sogar verhindert werden.

Als Kompromiss wird eine Batterie mit einer Kapazität von 70.2 kWh gewählt. Diese erlaubt bei einer Modulnennspannung von 55 V eine Dauerleistung von 273 kW und liegt damit nur noch knapp unter den Leistungsspitzen von 287 kW.

Die vorgesehene Traktionsbatterie besteht aus insgesamt 27 Modulen, wobei je drei Stränge mit neun Modulen parallel geschaltet sind. Mit dieser Anordnung besitzt die Traktionsbatterie eine Nennspannung von 495 V, eine maximale Spannung von 567 V und eine minimale Spannung von 324 V. Die Spannung der Batterie befindet sich somit im gewünschten Bereich. Die Batterie besitzt ein Gewicht von 1287 kg und ein Volumen von 1.755 m³.

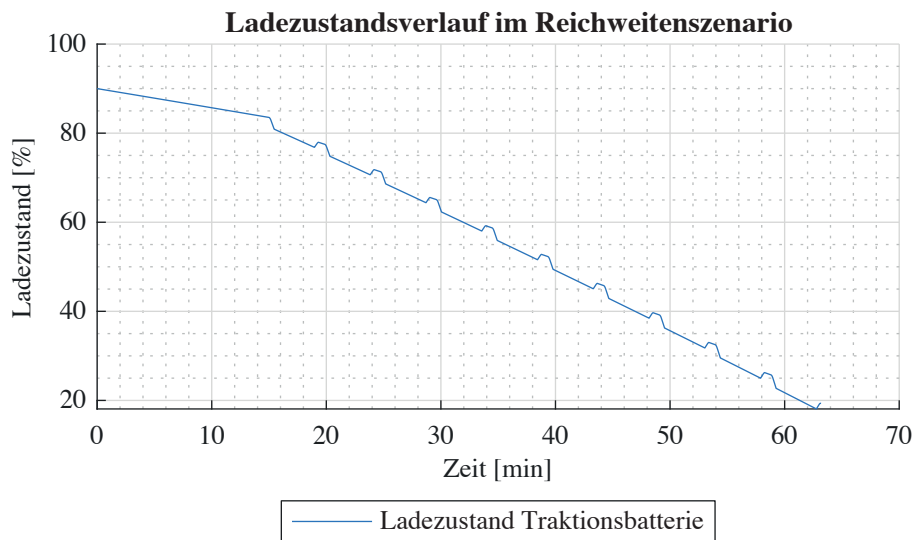


Abbildung 4.12: Verlauf des Ladezustands der Traktionsbatterie während des Reichweitenszenarios.

Für die Verifikation der Batterie wird die Simulation des Reichweitenszenarios mit der ausgelegten Traktionsbatterie durchgeführt. Der Ladezustandsverlauf ist in Abbildung 4.12 dargestellt. Die einzelnen Beschleunigungs- und Bremsphasen und die daraus folgende Änderung des Ladezustands sind gut ersichtlich. Ausserdem ist erkennbar, dass die Traktionsbatterie zusätzliche Reserven von knapp 10% der Batteriekapazität besitzt.

Klimabatterie

Mit dem abgeschätzten Energiebedarf aus Tabelle 4.5 wird die Klimabatterie dimensioniert. Die für das Reichweitenszenario benötigte Batteriegrösse beträgt bei einer Entladetiefe von 0.8 mindestens 24.2 kWh.

Die resultierende ideale Batterie hat eine Kapazität von 26 kWh. Zur Erhöhung der Flexibilität in der Dauer der Rangiervorgänge wird die Batteriekapazität leicht erhöht. Diese Massnahme minimiert das Risiko, dass die Kapazität der Klimabatterie bei länger dauernden Rangierszenarios zum Flaschenhals wird. Die neue Batteriekapazität beträgt damit 31.2 kWh.

Die Klimabatterie ist in der Lage, eine Dauerleistung von 139 kW bereitzustellen. Benötigt wird eine maximale Dauerleistung von ungefähr 18 kW, womit die Batterie die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit mehr als deutlich erfüllt.

Die Batterie besteht aus zwölf Modulen, welche alle in Serie geschaltet werden. Mit dieser Anordnung besitzt die Batterie eine Nennspannung von 660 V, eine maximale Spannung von 756 V und eine minimale Spannung von 432 V. Bei der maximalen Batteriespannung ist sie knapp über dem gewünschten Bereich, bei der Nennspannung und bei der minimalen Spannung ist sie innerhalb des Bereichs. Da die Batterie in den seltensten Fällen voll geladen wird, ist diese leicht zu hohe Spannung vernachlässigbar. Das resultierende Gewicht der Klimabatterie beträgt 572 kg und das Volumen beträgt 0.78 m³.

Für die Verifikation der Klimabatterie wird wie bei der Traktionsbatterie das Reichweitenszenario verwendet. Der resultierende Ladezustandsverlauf für beide Batte-

rievarianten ist in Abbildung 4.13 dargestellt. Die gewählte Batteriegrösse genügt nun auch für Rangierszenarien welche länger dauern als die im Reichweitzenszenario vorgesehenen 63 Minuten.

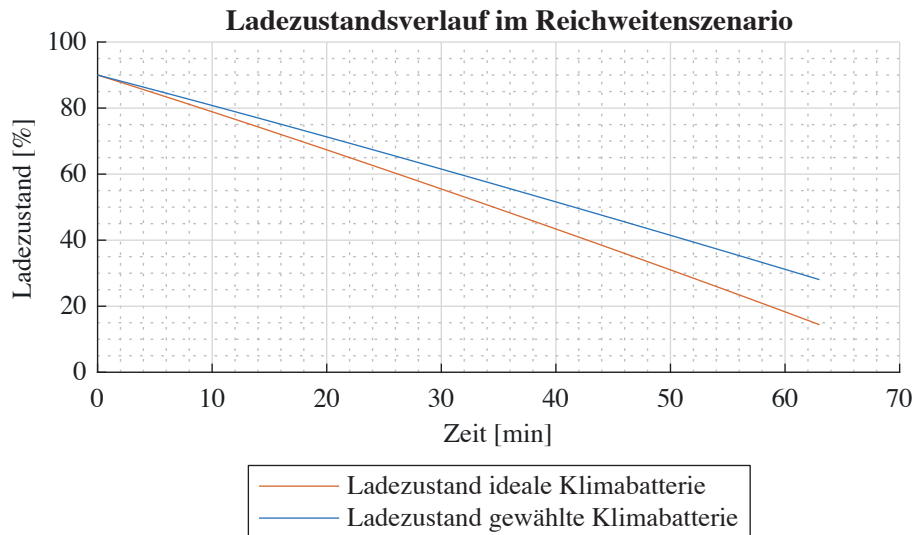


Abbildung 4.13: Vergleich der Ladezustände während des Reichweitzenszenarios für die ideal ausgelegte Batteriegrösse und die für flexiblere Einsätze gewählte Batteriegrösse.

4.2.3 Batteriekühlung

Mit einer guten Batteriekühlung im Sommer und einer Heizung im Winter kann die Lebensdauer der Batterie maximiert werden. Die Traktionsbatterie und die Klimabatterie werden mit einer Wasserkühlung gekühlt. Der Kühlkreislauf besteht neben den Leitungen aus einer Wasserpumpe, einem Rückkühler, einem Heizstab und einer Kältemaschine. Der Heizstab wird zur Heizung der Batterie bei kalten Aussentemperaturen verwendet und die Kältemaschine kommt bei hohen Aussentemperaturen zum Einsatz, um die Batterie ausreichend zu kühlen. Idealerweise soll die Batterie eine Temperatur von $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ besitzen. Die LTO-Zellchemie hat den Vorteil, dass sie in einem relativ grossen Temperaturbereich von $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ betrieben werden kann [65]. Die Kühlung der Batterie erfolgt separat von den Stromrichtern, denn die Kühlwassertemperatur des Stromrichters kann bis zu $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ erreichen und überschreitet die maximale Batterietemperatur von $45\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ein möglicher Kühlkreislauf für die Wasserkühlung ist in Abbildung 4.14 dargestellt.

Mit den Magnetventilen kann zwischen dem Rückkühler und der Kältemaschine die Kühlflüssigkeit aufgeteilt werden, um eine effiziente Kühlung zu ermöglichen. Meistens wird der Rückkühler als Lamellenkühler ausgeführt. Bei hohen Temperaturen wird der grösste Teil des Kühlwassers durch die Kältemaschine gekühlt. Der Umschalter kann bei kalten Temperaturen das Kühlwasser durch den Behälter mit dem Heizstab führen, um bei Bedarf die Batterie zu heizen.

Für die Kühlung der Traktionsbatterie wird ein Gewicht von 360 kg und ein Volumen von 0.25 m^3 angenommen und für das Kühlsystem der Klimabatterie ein Gewicht von 120 kg und ein Volumen von 0.15 m^3 . Diese Schätzungen basieren auf den unveröffentlichten Daten des Kühlsystems einer realen Lokomotive und den Fachgesprächen (siehe Anhang A) und werden für diese Anwendung angepasst.

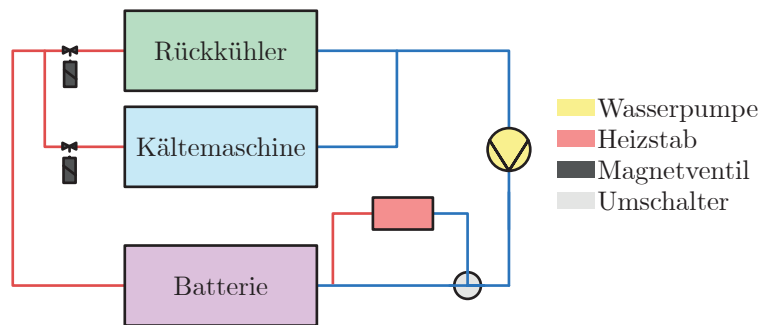


Abbildung 4.14: Illustration eines einfachen Kühlkreislaufs bestehend aus einem Rückkühler, einer Kältemaschine, einem Heizstab und einer Wasserpumpe für die Kühlung einer Batterie. Das kalte Wasser ist blau und das warme Wasser ist rot dargestellt.

4.3 Fahrmotor und Getriebe

Für die Auslegung des Antriebs werden als Grundlage die in Tabelle 4.7 dargestellten Resultate aus der Nutzwertanalyse verwendet. Mithilfe dieser Daten werden die benötigten Fahrmotoren und die Getriebeübersetzung ausgewählt.

Kennzahlen für die Fahrmotorauslegung	
Antriebsleistung	225 kW
Anfahrzugkraft	54 kN
Anzahl angetriebener Achsen	2

Tabelle 4.7: Übersicht der relevanten Kennzahlen aus der Nutzwertanalyse für die Fahrmotorauslegung.

4.3.1 Anforderungen Fahrmotor und Getriebe

Ausgehend von den Daten aus der Leistungsanalyse wird festgelegt, dass jeder Fahrmotor eine Spitzenleistung von 115 kW erreichen muss. Das benötigte Drehmoment des Fahrmotors ist nicht konstant und hängt stark von der maximalen Drehzahl des Motors und der verwendeten Getriebeübersetzung ab. Mit einem Getriebe kann durch eine höhere Übersetzung ein grösseres Drehmoment erzeugt werden. Der Motor muss dafür eine höhere Drehgeschwindigkeit aufweisen, denn das Getriebe wandelt die zusätzliche Drehgeschwindigkeit in ein höheres Drehmoment um [67]. Mit der frei wählbaren Getriebeübersetzung kann das Getriebe so ausgelegt werden, dass es den Anforderungen an die Beschleunigung und die Höchstgeschwindigkeit in Kapitel 3.2 genügt. Es ist vorgesehen, dass das Getriebe während der Fahrt im Zugverbund ausgekuppelt wird. Dies ermöglicht die Auslegung des Getriebes auf den Rangierbetrieb mit einer entsprechend niedrigen Höchstgeschwindigkeit. Die tiefe Höchstgeschwindigkeit ermöglicht es, eine hohe Übersetzung zu wählen. Der Motor ist so in der Lage die Anforderungen an die Beschleunigung und die dafür benötigte Zugkraft zu erfüllen, ohne dass er ein speziell hohes Drehmoment bereitstellen muss.

Die ideale Getriebeübersetzung i berechnet sich mit folgender Formel [11]:

$$i = 0.06 \cdot \pi \cdot \frac{d_{\text{Rad}} \cdot n_{\text{max}}}{v_{\text{max}}} \quad (4.1)$$

wobei d_{Rad} dem Raddurchmesser in Meter, n_{max} der maximalen Motordrehzahl in rpm und v_{max} der maximalen Geschwindigkeit in km/h entspricht. Die Abhängigkeit der Getriebeübersetzung vom Raddurchmesser hat zur Folge, dass die Abnutzung des Rads bei der Auslegung des Getriebes mitberücksichtigt werden muss. Der Raddurchmesser im neuen Zustand beträgt 0.92 m und es wird angenommen, dass er sich bis zum Ende seiner Lebensdauer um 0.06 m auf 0.86 m reduziert. Zur Berechnung der Getriebeübersetzung muss der minimale Raddurchmesser verwendet werden, da sonst die Gefahr besteht, dass der Motor durch eine zu hohe Drehzahl überlastet wird und Schaden nimmt.

In einem weiteren Schritt muss sichergestellt werden, dass die in den Anforderungen gewünschte Zugkraft am Rad auch erreicht wird. Die resultierende Zugkraft wird mit folgender Formel berechnet [11]:

$$Z_{\text{start}} = \frac{2 \cdot M_{\text{start}} \cdot i \cdot z \cdot \eta_{\text{Getriebe}}}{d_{\text{Rad}} \cdot 1000} \quad (4.2)$$

wobei M_{start} das Anfahrmoment, i die Getriebeübersetzung, z die Anzahl Fahrmotoren, η_{Getriebe} den Getriebewirkungsgrad und d_{Rad} den Raddurchmesser symbolisiert.

4.3.2 Fahrmotorwahl

Für diese Arbeit wird der in Abbildung 4.15 dargestellte Fahrmotor TME 35-33-4 des Herstellers TSA verwendet [68].



Abbildung 4.15: Bild des verwendeten Fahrmotors mit einem zusätzlichen Getriebe des Herstellers TSA. Der linke Teil ist der Fahrmotor und der rechte Teil ist das dazugehörige Getriebe [68]

Dieser Fahrmotor wird im Trambereich eingesetzt und eignet sich wegen seiner Leistungsdaten gut für die vorliegende Anwendung. Die Kenndaten des Fahrmotors sind in Tabelle 4.8 dargestellt. Die Werte zum Leistungsfaktor und zum Wirkungsgrad im Nennpunkt werden geschätzt.

Das Gewicht des gewählten Fahrmotors beträgt 410 kg und der Motor besitzt ein Volumen von 0.178 m^3 .

Fahrmotordaten		Wert
Nennleistung	P_{Nenn}	125 kW
Nennspannung	U_{Nenn}	481 V
Nennstrom	I_{Nenn}	186 A
Nennfrequenz	f_{Nenn}	64 Hz
Nennleistungsfaktor	$\cos(\phi)_{\text{Nenn}}$	0.892
Nennwirkungsgrad	η_{Nenn}	0.9
Nenndrehzahl	n_{Nenn}	2078 rpm
Maximaldrehzahl	n_{max}	5030 rpm
Anfahrmoment	M_{start}	1071 Nm
Polpaarzahl	p	2

Tabelle 4.8: Übersicht über die realen Leistungsdaten des gewählten Fahrmotors TME 35-33-4 [68]. Der Leistungsfaktor und der Nennwirkungsgrad wurden geschätzt.

Der verwendete Motor verfügt über kleinere Verluste im Reichweitenszenario als das in der Batterieauslegung verwendete Fahrmotormodell. Der Vergleich zwischen dem Fahrmotormodell und dem verwendeten Fahrmotor ist in Abbildung 4.16 ersichtlich und die Batterie wurde ausreichend gross dimensioniert.

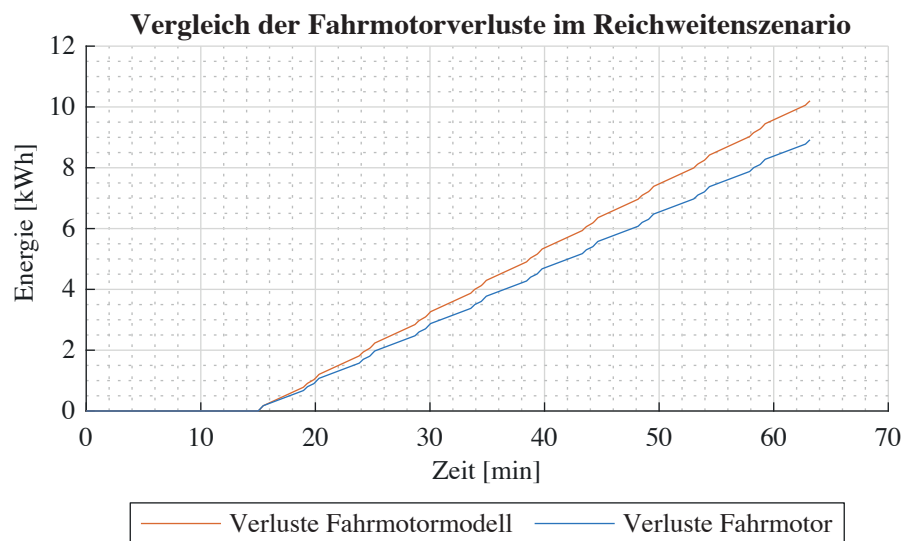


Abbildung 4.16: Übersicht über die kumulierten Fahrmotorverluste während des Reichweitenszenarios für das in der Batterieauslegung verwendete Fahrmotormodell und den in der Fahrmotorauslegung gewählten Motor.

Für den gewählten Fahrmotor resultiert eine Übersetzung von 16.31:1. Diese Übersetzung wird mit einem zweistufigen Getriebe realisiert, da einstufige Getriebe nur bis zu einer Übersetzung von 7:1 geeignet sind [11]. Die resultierende maximal mögliche Anfahrzugkraft beträgt 78.8 kN und übertrifft die in Kapitel 3.2 gestellten Anforderungen. Bei einem für diese Anwendung angepassten Motor könnte das Anfahrmoment reduziert werden, um Einsparungen im Gewicht und Volumen des Fahrmotors zu erzielen.

4.4 Stromrichter

In diesem Kapitel wird die Gewichts- und Volumenbestimmung des Traktionsstromrichters auf dem angetriebenen Wagen und die des Klimastromrichters auf dem antriebslosen Wagen erläutert. In einem ersten Abschnitt wird der Aufbau der beiden Stromrichter vorgestellt. Danach wird der Leistungsbedarf der Stromrichter ermittelt und die Gewichts- und Volumenbestimmung für die Stromrichter und deren Kühlung durchgeführt.

4.4.1 Aufbau der Stromrichter

Der Aufbau der beiden Stromrichter basiert auf einem typischen Bordnetzumrichter für Reisezugwagen des Herstellers ABB [69] und ist in Abbildung 4.17 illustriert. Der elektrische Aufbau ist für den Traktionsstromrichter und den Klimastromrichter identisch. Der Traktionsstromrichter ist zusätzlich mit den im Bild 4.17 grün eingrahmten Komponenten für den Antrieb ausgestattet.

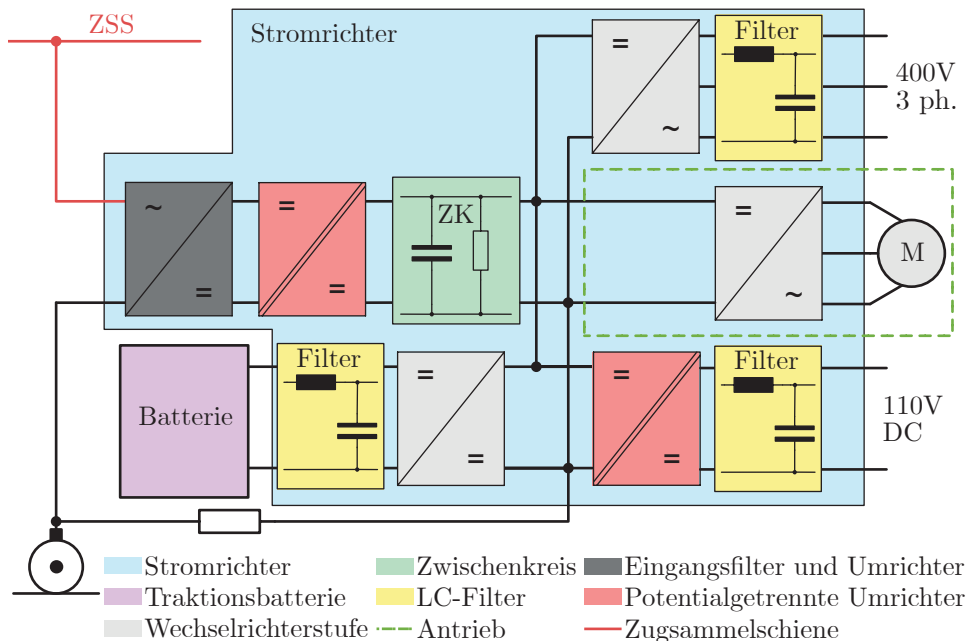


Abbildung 4.17: Übersichtsdarstellung des elektrischen Aufbaus der beiden verwendeten Stromrichter. Der Aufbau der Stromrichter basiert auf den Bordnetzumrichtern für Reisezugwagen des Herstellers ABB [69].

Der Stromrichter besteht aus folgenden Komponenten:

- **Eingangsfiler und Wandler:** Der Stromrichter muss die in Tabelle 4.9 aufgelisteten Eingangsspannungen beherrschen. Die Wechselrichterstufe am Eingang ist für die Gleichrichtung der Wechselfspannungen verantwortlich und korrigiert zusätzlich den Leistungsfaktor, um die bezogene Wirkleistung aus der Zugsammelschiene zu maximieren. Beim Betrieb mit Gleichspannungen wird die Zugsammelschienenspannung direkt an die anschliessende potentialgetrennte Wechselrichterstufe weitergeleitet. Der Eingangsfiler verhindert, dass die im Stromrichter verursachten Störströme ungefiltert auf die Zugsammelschiene übertragen werden.

- **Potentialgetrennte Wandler:** Zwischen der Eingangsstufe und dem Zwischenkreis ist eine potentialgetrennte Wechselrichterstufe geschaltet, um die Gleichspannung der Zugsammelschiene oder die gleichgerichtete Spannung im Wechselspannungsbetrieb auf die Zwischenkreisspannung von 750 V zu bringen. Die Potentialtrennung ist nötig und verhindert, dass bei einer Fehlfunktion des Stromrichters die Zugsammelschienenspannung von bis zu 3000 V am Zwischenkreis und im ungünstigsten Fall an den Ausgängen des Stromrichters anliegt. Für das Bordnetz mit einer Ausgangsspannung von 110 V DC wird ebenfalls eine potentialgetrennte Wechselrichterstufe eingesetzt, um die im UIC-Merkblatt 550 geforderte Isolation des Gleichspannungsbordnetzes gegenüber der Fahrzeugmasse sicherzustellen [70].
- **Zwischenkreis:** Der Zwischenkreis ermöglicht den Energieaustausch zwischen den einzelnen Komponenten im Stromrichter. Er wird auf eine Spannung von 750 V DC geregelt. Der Zwischenkreis des Stromrichters ist über die negative Schiene geerdet.
- **Wechselrichterstufe:** Für die aktive DC-DC-Spannungswandlung der Traktions- oder Klimabatteriespannung und die Erstellung der statischen dreiphasigen 400 V AC Hilfsbetriebeumrichter (HBU) Ausgangsspannung, sowie für die frequenzvariable DC-AC-Spannungswandlung zur Bereitstellung der Statorspannung und Statorfrequenz der Fahrmotoren werden Wechselrichterstufen ohne Potentialtrennung verwendet.
- **LC-Filter:** Die Filter bestehend aus Induktivitäten und Kondensatoren glätten die Ausgangsspannung. Sie kommen beim Gleichspannungsbordnetz, dem dreiphasigen HBU-Ausgang mit 400 V und dem Ausgang für die Traktionsbatterie zum Einsatz.

Eine Übersicht über die erforderlichen Eingangs- und Ausgangsspannungen der Stromrichter wird in Tabelle 4.9 gegeben. Die Spannung am Ausgang der Batterie und des Motors ist variabel und wird dynamisch während des Betriebs angepasst.

Kenndaten der Stromrichter	
	1000V 16.7 Hz
	1500V 50 Hz
Eingangsspannungen	1500V DC
	3000V DC
Zwischenkreisspannung	750V
HBU-Ausgang	400V 3 ph. AC
Batterie-Ausgang	110V DC
Traktionsbatterie	250...750V DC
Motor-Ausgang	0...500V 3 ph. AC

Tabelle 4.9: Übersicht über die geforderten Ein- und Ausgangsspannungen des Stromrichters und die verwendete Zwischenkreisspannung

4.4.2 Leistungsbedarf Traktionsstromrichter

Für die Dimensionierung des Stromrichters muss in einem ersten Schritt die benötigte Leistung abgeschätzt werden. Die maximalen Leistungen, welche die einzelnen Wechselrichterstufen im Stromrichter bewältigen müssen, werden mithilfe der Fahrzeugsimulation ermittelt. Im Gegensatz zu den Fahrmotoren, welche eine gute

thermische Trägheit besitzen, müssen die Halbleiterbausteine im Stromrichter immer auf Maximalleistung ausgelegt sein und dürfen nicht überlastet werden [14]. Aus diesem Grund werden bei jedem einzelnen Umrichter zur maximalen Leistung noch 10 % Reserve hinzuaddiert.

Für die Auslegung des Traktionsstromrichters sind Spitzenleistungen der Hilfsbetriebe und Komfortanlagen massgebend, daher können nicht die Dauerleistungswerte aus den Tabellen 4.1 und 4.3 verwendet werden. Die Spitzenleistungen sind in den Tabellen 4.10 und 4.11 aufgelistet. Die Maximalwerte der Hilfsbetriebeleistungen basieren genau wie die Dauerleistungen in den Tabellen 4.1 und 4.2 auf den unveröffentlichten Daten eines realen Triebzugs oder wurden in den Fachgesprächen (siehe Anhang A) geschätzt und werden für den Reisezugwagen angepasst. Die Daten zu den Komfortanlagen sind entweder aus Fachgesprächen (siehe Anhang A) hervorgegangen oder geschätzt worden.

Leistungsbilanz Hilfsbetriebe Traktionsstromrichter	
Komponenten	Maximalleistung [kW]
Traktionsbatteriekühlung	8
Stromrichterlüfter	2.5
Kompressor	2.2
Stromrichterwasserpumpe	0.9
Bordnetzbatterieladung	6
Total Hilfsbetriebe	19.6

Tabelle 4.10: Übersicht über die Maximalwerte der Hilfsbetriebeleistung für die Auslegung des Traktionsstromrichters des angetriebenen Wagens.

Leistungsbilanz Komfortanlagen	
Komponenten	Maximalleistung [kW]
Klimaanlage / Heizung	40
50-Hz-Verbraucher	1.5
Total Komfortanlagen	41.5

Tabelle 4.11: Auflistung der Maximalleistung der Komfortanlagen. Diese gelten sowohl für den angetriebenen als auch für den antriebslosen Wagen.

Abbildung 4.18 zeigt eine Übersicht über die maximalen Leistungsflüsse in den einzelnen Wechselrichterstufen des Stromrichters. Die internen Wechselrichterstufen müssen folgende Anforderungen erfüllen:

- Der DC/DC-Wandler zwischen der Traktionsbatterie und dem Zwischenkreis muss die bereits in Kapitel 4.2.1 ermittelte maximale Batterieleistung von 287 kW bereitstellen können. Zusätzlich benötigen die Hilfsbetriebe für die Traktion im ungünstigsten Fall 10 kW mehr als mit der Hilfsbetriebedauerleistung angenommen. Die Komfortanlagen werden in einem solchen Fall durch ein Leistungsmanagement auf die vorgesehene Dauerleistung begrenzt und müssen dadurch in der Stromrichterauslegung nicht gesondert berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird der DC/DC-Wandler für die Traktionsbatterie auf insgesamt 330 kW inklusive Reserve ausgelegt.
- Die Eingangsstufe verbindet die Zugsammelschiene mit dem Zwischenkreis

des Stromrichters und muss die Energie für die Komfortanlagen und Hilfsbetriebe bereitstellen. Zusätzlich soll die Eingangsstufe in der Lage sein, die Traktionsbatterie innerhalb von zwei Stunden vollständig zu laden. Die Zugsammelschiene kann nur eine beschränkte Leistung liefern, welche vom Spannungssystem und der Temperatur abhängt [25]. Aus diesem Grund wird die Eingangsstufe nicht dafür ausgelegt, allen Ausgängen gleichzeitig die maximale Leistung zur Verfügung zu stellen. Für die Batterieladung werden 35 kW angenommen, um die Anforderung an die Batterieladedauer zu erfüllen. Für die restliche Energieversorgung des Reisezugwagens werden 42 kW veranschlagt. Falls dies im ungünstigsten Szenario nicht zur Sicherstellung der Energieversorgung ausreichen sollte, wird die Batterieladung durch das Leistungsmanagement angepasst. Inklusive der Reserve von 10 % führt dies zu einer Auslegungsleistung von 85 kW.

- Der HBU-Ausgang versorgt alle dreiphasigen 400-V-Verbraucher mit Energie. Ausserdem soll der HBU in der Lage sein, neben der vollen Komfortanlagenleistung auch die Traktionsbatterieladung mit einer Leistung von 35 kW ab der Depotsteckdose zu versorgen. Dafür wird ein DC/AC-Umrichter mit einer Leistung von 100 kVA benötigt, der einen Energiefluss in beide Richtungen erlaubt.
- Der Motor-Ausgang muss die Fahrmotorenleistung inklusive der Fahrmotor- und Getriebeverluste bereitstellen können. Die Fahrmotorenleistung beträgt 230 kW und die maximale Verlustleistung kann mithilfe der Fahrzeugsimulation ermittelt werden und beträgt 33.6 kW. Der Motorstromrichter muss inklusive Reserven für eine Leistung von 290 kW ausgelegt werden. Er muss ebenfalls für einen Energiefluss in beide Richtungen ausgelegt sein, um die Energierückuperation zu ermöglichen.
- Der Batterieausgang ist für die Energieversorgung des Bordnetzes zuständig und wird auf die Maximalleistung von 6 kW ausgelegt.

Diese Anforderungen führen zu einer im Traktionsstromrichter verbauten Leistung von 811 kW.

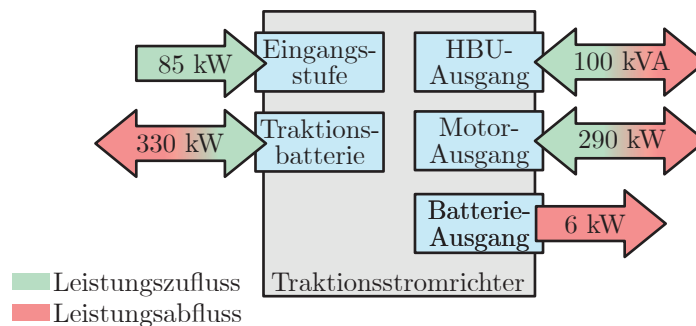


Abbildung 4.18: Übersicht über die geforderten Leistungsspitzen der einzelnen Wechselrichterstufen im Traktionsstromrichter. Die Wechselrichterstufen für die Traktionsbatterie, die Hilfsbetriebe und den Motorausgang müssen den Energieaustausch in beide Richtungen ermöglichen.

4.4.3 Auslegung Traktionsstromrichter

Das Gewicht und das Volumen der modifizierten Stromrichter wird ausgehend von einem real existierenden Stromrichter mithilfe der Skalierungsgesetze aus Kapitel

2.4.2 ermittelt. Die Berechnung gliedert sich in zwei Teile:

1. Das Volumen und das Gewicht des Hilfsbetriebeteils des Stromrichters, bestehend aus Eingangsstufe, HBU-Ausgang und Batterieausgang, werden mithilfe der an den realen Stromrichter angepassten Potenzfunktion berechnet. Damit kann den erhöhten Gewichten und Volumen von Hilfsbetriebeumrichtern durch die beispielsweise benötigten galvanischen Trennungen Rechnung getragen werden. Folgendes angepasstes Skalierungsgesetz wird verwendet:

$$x_{\text{soll}} = x_{\text{real}} \cdot \left(\frac{P_{\text{soll}}}{P_{\text{real}}} \right)^b \quad (4.3)$$

wobei x_{soll} für das Volumen oder Gewicht des Traktionsstromrichters und x_{real} für das Gewicht oder das Volumen des realen Stromrichters steht. P_{soll} und P_{real} stehen für die total verbauten Leistungen im Traktionsstromrichter und im realen Stromrichter und wurden für den Traktionsstromrichter im vorhergehenden Abschnitt ermittelt. Der Faktor b ist der Faktor für das Stromrichter-Skalierungsgesetz aus Tabelle 2.2 in Kapitel 2.4.2.

2. Das Volumen und das Gewicht des Traktionsteils, bestehend aus Traktionsbatterieanschluss und Motorausgang, werden mithilfe der in Kapitel 2.4.2 für Traktionsstromrichter gefundenen Skalierungsgesetze berechnet. Diese Resultate werden zu den Resultaten aus dem ersten Schritt addiert, um das Gesamtgewicht und Gesamtvolumen des Stromrichters zu bestimmen.

Für den Stromrichter auf dem angetriebenen Wagen wird als Ausgangslage der wassergekühlte Bordnetzumrichter M60 des Herstellers ABB gewählt [69]. Der Stromrichter ist für eine Zugsammelschienenspannung von 3 kV DC ausgelegt. Der aus dem Datenblatt abgeleitete Leistungsfluss dieses Stromrichters ist in Abbildung 4.19 dargestellt. Zur Abschätzung der durch die Eingangsstufe bereitgestellten Leistung wird ein Leistungsfaktor von 1 angenommen. Diese Annahme bedeutet, dass keine Blindleistung über die Wechselspannungsausgänge bezogen wird. Der betrachtete Stromrichter besitzt eine Masse von 1000 kg und ein Volumen von 1.6 m³ und ist für die Montage innerhalb des Reisezugwagens ausgelegt.

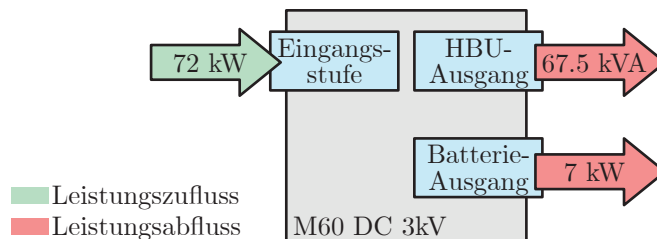


Abbildung 4.19: Darstellung des Leistungsflusses im DC-3-kV-Konverter M60 der ABB. Der Konverter besitzt einen DC/DC-Wandler als Eingangsstufe, einen AC-Ausgang für die Hilfsbetriebe (HBU-Ausgang) und einen DC-Ausgang für die Ladung der Bordnetzbatterie (Batterie-Ausgang).

Der Traktionsstromrichter des angetriebenen Wagens wird unterflur montiert und muss für alle vier in Europa üblichen Zugsammelschienenspannungen geeignet sein. Die benötigten Spannungen sind in Tabelle 4.9 aufgelistet. Für die gewünschte Unterflurmontage wird ein Zusatzgewicht von 200 kg und ein zusätzliches Volumen von 0.2 m³ geschätzt. Der M60-DC-3kV ist nur für 3 kV ausgelegt und braucht für die Mehrsystemfähigkeit noch eine zusätzliche Spannungsausrüstung. Diese wird mit einem Gewicht von 300 kg und einem Zusatzvolumen von 0.1 m³ angenommen.

Die Berechnung des Gewichts und des Volumens des Traktionsstromrichters ist in Tabelle 4.12 dargestellt. Als Faktor b für die Gewichts- und Volumenberechnung werden die Faktoren für wassergekühlte Stromrichter aus Tabelle 2.2 verwendet. Als Leistungswert wird im ersten Schritt die Summe der Leistungen der Eingangsstufe, des HBU-Ausgangs und des Batterie-Ausgangs in der Höhe von 191 kW verwendet. Im zweiten Schritt wird als Leistungswert die Summe der Traktionsbatterie und des Motor-Ausgangs in der Höhe von 620 kW verwendet.

Traktionsstromrichter-Auslegung		
Berechnungsschritte	Gewicht [kg]	Volumen [m ³]
Realer Stromrichter	1000	1.6
Zusatz Unterflur	+ 200	+ 0.2
Zusatz Spannungs-ausrüstung	+ 300	+ 0.1
Skalierungsbasis	1500	1.9
Schritt 1: Hilfsbetriebe-rechnung	1889	2.4
Schritt 2: Traktions-rechnung	+ 441	+ 1.03
Total	2330	3.43

Tabelle 4.12: Übersicht über die Gewichtsrechnung und die Volumenrechnung des resultierenden Traktionsstromrichters.

Die Wasserkühlung des Stromrichters benötigt noch zusätzliche Komponenten außerhalb des Stromrichters. Dazu gehören die Wasserpumpe, Kühlwasserleitungen und der Rückkühler, der die Wärme des Kühlwassers an die Umgebung abgibt. Das abgeschätzte Gewicht und Volumen der zusätzlichen Komponenten für die Kühlung des Traktionsstromrichters betragen 205 kg und 0.15 m³ und basieren auf den unveröffentlichten Daten eines realen Triebzuges und wurden für diese Anwendung angepasst.

4.4.4 Leistungsbedarf Klimastromrichter

Für die Abschätzung der Dimensionen des Klimastromrichters müssen wie beim Traktionsstromrichter zuerst die benötigten Maximalleistungen der einzelnen Wechselrichterstufen im Stromrichter ermittelt werden. Die Maximalwerte für die Hilfsbetriebe auf dem antriebslosen Wagen sind in Tabelle 4.13 dargestellt. Diese Werte basieren ebenfalls auf den unveröffentlichten Daten eines realen Triebzuges oder sind während der Fachgespräche (siehe Anhang A) geschätzt worden.

Leistungsbilanz Hilfsbetriebe Klimastromrichter	
Komponenten	Maximalleistung [kW]
Klimabatteriekühlung	2
Stromrichterlüfter	2.5
Stromrichterwasserpumpe	0.7
Bordnetzbatterieladung	6
Total Hilfsbetriebe	11.2

Tabelle 4.13: Übersicht über die Maximalleistungen der Hilfsbetriebe auf dem antriebslosen Wagen.

Die einzelnen Wechselrichterstufen des Klimastromrichters müssen folgende Anforderungen erfüllen:

- Die Eingangsstufe stellt die Verbindung des Zwischenkreises mit der Zugsammelschiene her und muss fähig sein, die Hilfsbetriebe und Komfortanlagen zu versorgen. Zusätzlich muss währenddessen genug Leistung bereitgestellt werden, um die Batterie aufzuladen. Für die vollständige Batterieladung innerhalb der geforderten zwei Stunden werden mindestens 12 kW benötigt. Wegen der Leistungsbegrenzung der Zugsammelschiene macht es wenig Sinn, die Eingangsstufe auf die maximal mögliche Leistung auszulegen. Aus diesem Grund werden während der Batterieladung reduzierte Werte von 36 kW anstatt 41.5 kW für die Komfortanlagen und 11 kW für die Hilfsbetriebe angenommen. Dies resultiert in einer benötigten Leistung von 65 kW inklusive Reserven. Der Leistungsfaktor wird in dieser Betrachtung wieder mit 1 angenommen.
- Der DC/DC-Wandler zwischen der Klimabatterie und dem Zwischenkreis des Stromrichters muss die Maximalleistung der Hilfsbetriebe inklusive der gewünschten Klimatisierungsleistung von 10 kW und der Leistung der 50-Hz-Verbraucher von 1 kW bereitstellen können. Mit einer Reserve von 10 % ergibt dies für den DC/DC-Wechselrichter eine maximale Leistung von ungefähr 24 kW.
- Der HBU-Ausgang muss alle dreiphasigen 400-Hz-Verbraucher mit Energie versorgen und in der Lage sein, die Batterie aus der Depotsteckdose zu laden, während das Fahrzeug vorgeheizt oder vorgekühlt wird. Mit maximaler Hilfsbetriebe- und Komfortanlagenleistung und einer Batterieladung von 12 kW resultiert eine benötigte Maximalleistung von ungefähr 70 kVA inklusive Reserve. Der angenommene Leistungsfaktor beträgt wieder 1.
- Der Batterie-Ausgang verbindet die Bordnetzatterie mit dem Stromrichter. Die Wechselrichterstufe muss eine maximale Leistung von 6 kW bereitstellen.

Die resultierende verbaute Leistung im Klimastromrichter beträgt 165 kW.

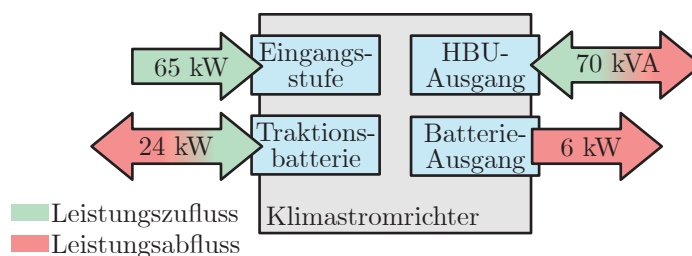


Abbildung 4.20: Illustration der Leistungsanforderungen an die einzelnen Wechselrichterstufen innerhalb des Klimastromrichters. Der HBU-Ausgang und der Wandler für die Klimabatterie müssen einen Leistungsfluss in beide Richtungen erlauben.

4.4.5 Auslegung Klimastromrichter

Die Auslegung des Klimastromrichters erfolgt nach dem gleichen Prinzip, wie beim Traktionsstromrichter in Kapitel 4.4.3. Als Ausgangslage für den Stromrichter des antriebslosen Wagens wird der luftgekühlte Bordnetzrichter M60-MS-UIC des

Herstellers ABB gewählt [71]. Der Stromrichter wird unterflur montiert und ist bereits für alle vier in Europa üblichen Zugsammelschienenspannungen geeignet. Der Stromrichter besitzt eine Luftkühlung mit einem getrennten inneren und äusseren Luftkreislauf wie in Abbildung 3.14 in Kapitel 3.5.3 illustriert. Die aus dem Datenblatt des Stromrichters entnommenen Leistungen der einzelnen Wechselrichterstufen sind in Abbildung 4.21 dargestellt. Zur Abschätzung der erforderlichen Leistung der Eingangsstufe wird wie beim Traktionsstromrichter ein Leistungsfaktor von 1 angenommen und somit keine Blindleistung an den Wechselspannungsanschlüssen berücksichtigt. Der Stromrichter besitzt ein Gewicht von 1500 kg, ein Volumen von 3.62 m^3 und hat eine totale Leistung von 144 kW verbaut.

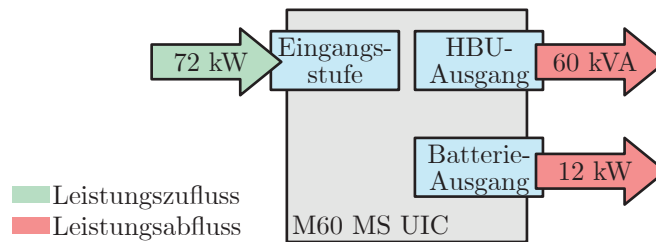


Abbildung 4.21: Illustration des Leistungsflusses innerhalb des M60-MS-UIC Stromrichters des Herstellers ABB.

Der Klimastromrichter wird wie der M60-MS-UIC unterflur montiert und hat die gleichen Anforderungen an die Zugsammelschiene. Aus diesem Grund wird für die Auslegung des Klimastromrichters kein Zusatzgewicht veranschlagt. Für die Kühlung des Klimastromrichters ist die Aufteilung in einen inneren und äusseren Luftkreislauf wie beim M60-MS-UIC nicht vorgesehen, um die Stromrichterdimensionen und das Gewicht möglichst tief zu halten. Dies wird berücksichtigt, indem das Volumen für die Skalierungsbasis um 0.15 m^3 reduziert wird. Als Faktor b werden die Faktoren für die Gewichts- und Volumenberechnung für luftgekühlte Stromrichter aus Tabelle 2.2 in Kapitel 2.4.2 verwendet. Die im ersten Schritt der Auslegung benötigte Leistung beträgt 141 kW und besteht aus der Leistung der Eingangsstufe, des HBU-Ausgangs und des Batterie-Ausgangs. Im zweiten Schritt wird die Leistung des Wandlers für die Klimabatterie in der Höhe von 24 kW verwendet. Die Gewichts- und Volumenberechnung für den Klimastromrichter ist in Tabelle 4.14 abgebildet.

Klimastromrichter-Auslegung		
Berechnungsschritte	Gewicht [kg]	Volumen [m^3]
Realer Stromrichter	1500	3.62
Abzug direkte Luftkühlung	- 0	- 0.15
Skalierungsbasis	1500	3.47
Schritt 1: Hilfsbetrieberrechnung	1467	3.40
Schritt 2: Traktionsrechnung	+ 19	+ 0.04
Total	1486	3.44

Tabelle 4.14: Übersicht über die Berechnung des Gewichts und des Volumens des Klimastromrichters.

Beim Klimastromrichter ist die Kühlung im Gegensatz zur Wasserkühlung bereits vollständig integriert und es müssen keine zusätzlichen Komponenten berücksichtigt werden.

4.5 Pneumatische Verbraucher

In einem Reisezugwagen gibt es zahlreiche Systeme, welche eine Druckluftversorgung benötigen. Daher behandelt dieser Abschnitt die Pneumatik respektive die pneumatischen Verbraucher. Es kommt hinzu, dass die Kurswagenmodule die Bremsen selbst versorgen müssen, wenn sie ohne Lok verkehren. Deshalb muss das Modul selbst über eine vollwertige elektropneumatische Bremse (ep-Bremse) verfügen. Das Übersichtsschema zur Pneumatik ist in Abbildung 4.22 dargestellt.

Die Bremse des Fahrzeugs ist als indirekte ep-Bremse ausgeführt, d.h. die Steuerbefehle für die Bremsen werden elektrisch übertragen. Durch die elektrische Übertragung der Steuerbefehle wird die Reaktionsgeschwindigkeit der automatischen Bremse beschleunigt [56]. Das ist für ein Kurswagenkonzept ideal, weil sehr lange Züge geführt werden können, ohne dass eine Verzögerung der Bremsung aufgrund der beschränkten Durchschlaggeschwindigkeit der automatischen Bremse wie bei Güterzügen in Kauf genommen werden muss.

Im Pneumatikschema kann grundsätzlich zwischen zwei Arten von Verbrauchern unterschieden werden:

- Die Verbraucher, die sowieso in einem Reisezugwagen verbaut werden, unabhängig davon, ob diese einen eigenen Antrieb besitzen. Dazu gehören Toiletten, Steuerventile, Hilfsluftbehälter, welche die indirekte Wirkung der Bremse sicherstellen, der Gleitschutz, welcher das Blockieren der Ränder beim Bremsen verhindert, die Luftfederung für den Fahrkomfort und die Federspeicherbremse zum Fixieren des Fahrzeuges. Wie oben bereits erwähnt, wird eine ep-Bremse verbaut, was bedeutet, dass die dazugehörigen elektrischen Steuerleitungen ebenfalls durch die Wagen führen. Dies ist aber auch im klassischen Kurswagen der Fall.
- Die Verbraucher, die neu auf dem Wagen sind. Zu dieser Kategorie gehören die automatischen Kupplungen für das schnelle Rangieren, das Führerbremsventil für den Hilfsführerstand und einen Kompressor mit Hauptluftbehälter für die Druckluftversorgung. Das Führerbremsventil kann identisch zu demjenigen einer Lok verbaut werden. Die automatische Kupplung wird hingegen in Abschnitt 4.8 näher beschrieben und der Kompressor wird im folgenden Abschnitt näher ausgelegt.

4.5.1 Kompressor

Zur Sicherstellung der Druckluftversorgung während des Rangierbetriebs wird auf dem angetriebenen Wagen ein zusätzlicher Kompressor mit einem Hauptluftbehälter als Druckluftspeicher installiert und an die Speiseleitung angeschlossen.

Die Druckluftverbraucher der angetriebenen Kurswagenmodule entsprechen nicht denjenigen eines klassischen Lok-Wagen-Zuges und deshalb wird der Druckluftverbrauch von der gegebenen Normenlage abgeleitet. Als Basis dient ein vollständiger 16-teiliger Zug mit einem Luftbedarf von 1800 L/min [72]. Wenn man diesen Luftbedarf auf ein zweiteiliges Reisezugwagenmodul skaliert, folgt ein Bedarf von ungefähr 225 L/min. Gemäss Norm muss der Kompressor in der Lage sein, die geforderte Luftmenge bei einem Druck von 6.5 bar im Hauptluftbehälter liefern zu

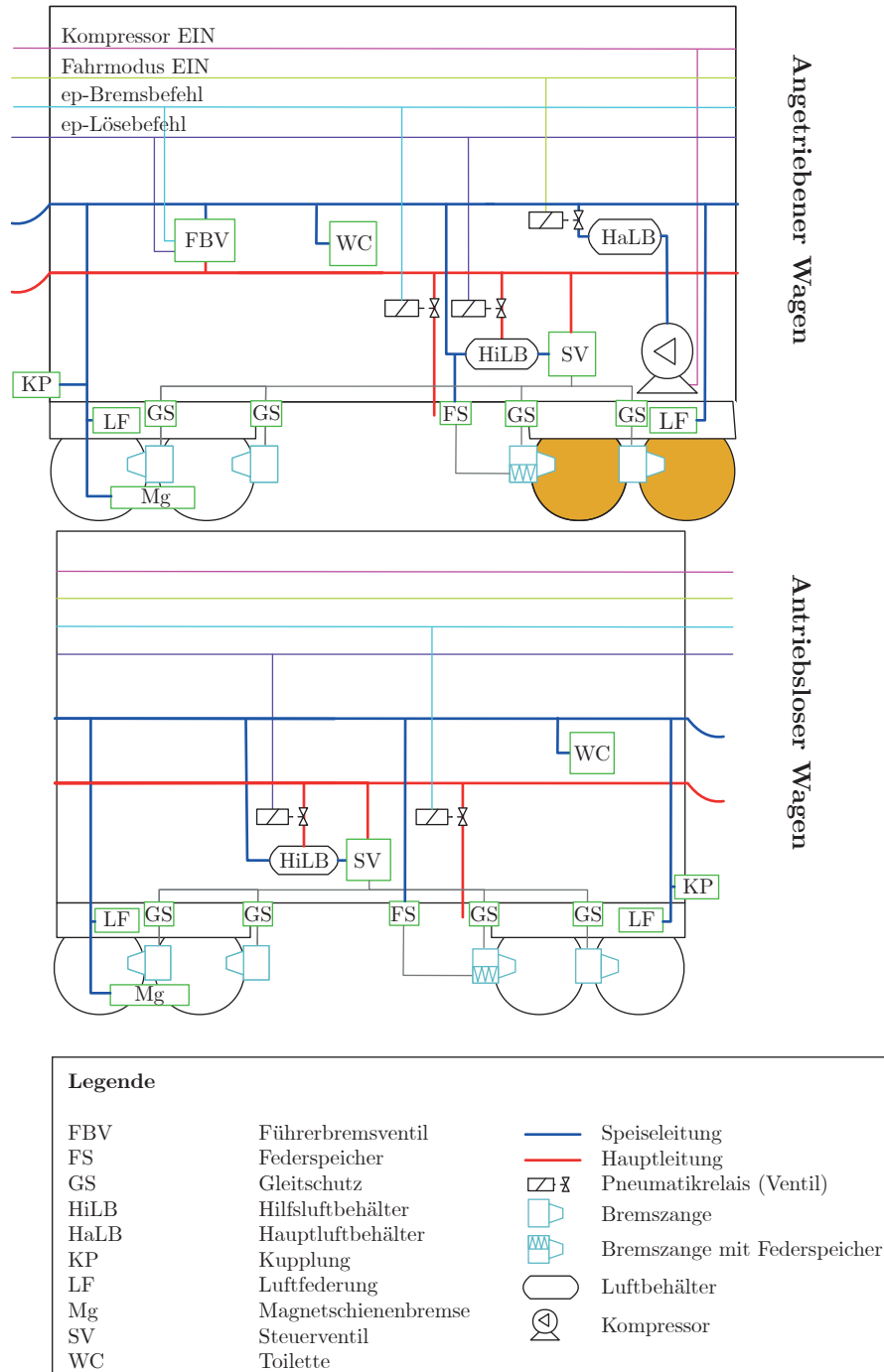


Abbildung 4.22: Pneumatikschema eines Kurswagenmoduls. Die gelben Räder stellen die angetriebenen Achsen dar.

können. Als Kompressor wird der Marathon 4 B-304 gewählt, dessen Kennlinie in Abbildung 4.23 dargestellt ist.

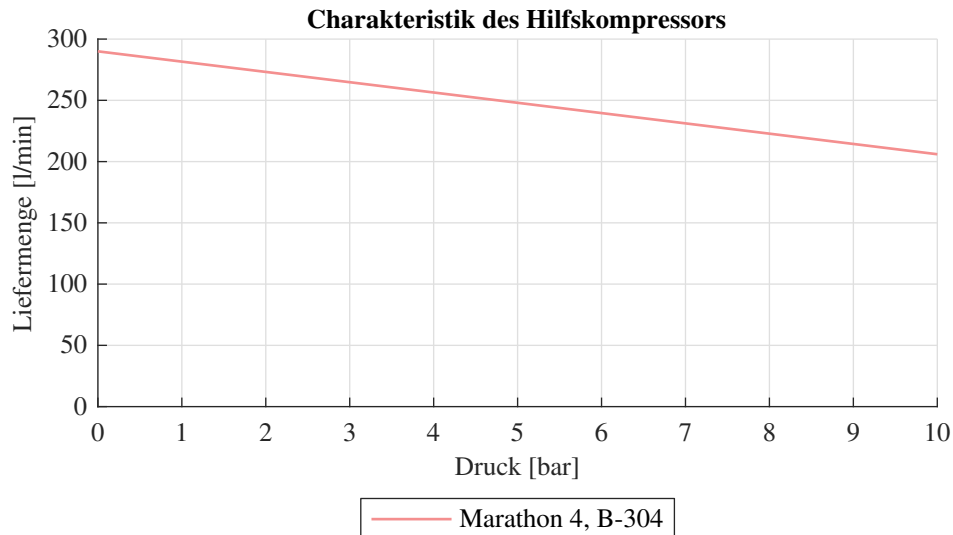


Abbildung 4.23: Charakteristik eines Marathon 4, B-304 Kompressors von Dürr Technik [73].

Bei dem geforderten Druck kann ca. 230 L/min geliefert werden, was die Anforderungen an den Kompressor erfüllt. Wie bereits erwähnt, ist zusätzlich ein Hauptluftbehälter nötig, um eine gewisse Druckluftreserve zu haben. Gemäss DIN EN 14198 [72] wird normalerweise auf einer Lokomotive ein Behälter von 800 L eingebaut. Etwas herunterskaliert und unter der Berücksichtigung existierender Luftbehälter, wird ein 200-Liter-Drucklufttank ausgewählt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die üblichen pneumatischen Anlagen eines Reisezugwagens um einen Kompressor, einen Hauptluftbehälter und ein Führerbremsventil ergänzt werden müssen. Damit kann eine genügende Versorgung mit Druckluft in allen Fällen sichergestellt werden.

4.6 Leittechnik

Dieses Unterkapitel beschreibt die Leittechnikstruktur der angetriebenen Kurswagen. Zuerst wird ein Überblick über die verschiedenen Leitebenen gegeben. Danach werden die Betriebszustände genauer erklärt. Schlussendlich wird speziell auf die Besonderheiten der Bremssteuerung eingegangen.

4.6.1 Betriebsmodi

Ein angetriebenes Kurswagenmodul kann sich in folgenden Betriebsmodi befinden:

- *Führende Lok:* In diesem Zustand verhält sich das Kurswagenmodul wie ein klassischer Kurswagen. Die Antriebskomponenten sind deaktiviert und das Getriebe ausgekoppelt. Die Hilfsbetriebe funktionieren normal und die Traktionsbatterie kann geladen werden. Alles wird über die Zugsammelschiene versorgt. Die Luftversorgung für die Bremsen erfolgt von der Lokomotive über die Speiseleitung. Die Hilfsführerstände auf dem Reisezugwagen sind inaktiv.

- *Führendes Modul:* Das Kurswagenmodul ist das führende Modul, d.h. der Hilfsführerstand auf diesem Fahrzeug ist bedient. Es können andere Module ferngesteuert werden. Alle Traktionsantriebe sind aktiv. Die Hilfsbetriebe sind in ihrer Leistung reduziert. Die Energieversorgung findet über die Traktionsbatterie statt. Die Zugsammelschiene ist ausgeschaltet. Die Luftversorgung geht vom lokalen Hilfskompressor aus.
- *Ferngesteuertes Modul:* Das Kurswagenmodul ist durch ein anderes Modul über eine Vielfachsteuerung ferngesteuert. Sonst verhält es sich gleich wie ein führendes Modul.
- *Neutraler Zustand:* Dieser Zustand ermöglicht den Wechsel zwischen den Zuständen und besitzt keine eigenen Merkmale. Wird von einem Zustand in den neutralen übergegangen, bleibt das Fahrzeug im vorherigen Zustand. Die sicherheitstechnischen Überlegungen dahinter werden weiter unten ausgeführt.

Transition zwischen Betriebsmodi

Der Wechsel zwischen den verschiedenen Betriebszuständen ist sicherheitsrelevant. Das Prozessdiagramm für die Übergänge zwischen den Zuständen ist in Abbildung 4.24 dargestellt. Es gilt zu verhindern, dass die angetriebenen Module im Zustand

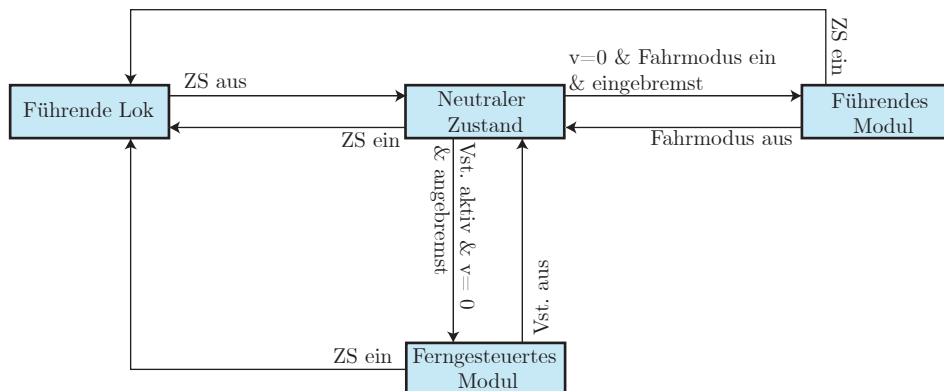


Abbildung 4.24: Prozessdiagramm zu den Übergängen zwischen den verschiedenen Betriebsmodi. Vst. steht für Vielfachsteuerung.

Führendes Modul oder *Ferngesteuertes Modul* sind, während eine Lok als Traktionsfahrzeug vorgesehen ist. Dies ist vor allem kritisch, da Motor und Getriebe nicht auf hohe Geschwindigkeiten ausgelegt sind. Deshalb ist das Getriebe immer ausgekoppelt, ausser es wird aktiv in den selbstfahrenden Zustand übergegangen. Zusätzlich muss folglich die Hürde, um in die selbstfahrenden Zustände zu gelangen, höher sein, als diejenige in den geführten Zustand. Deshalb wird der *Neutrale Zustand* eingeführt. Der Prozess, um selbstfahrend zu werden, ist damit zweistufig, während immer direkt in den geführten Zustand zurückgelangt werden kann. Der geführte Zustand kann dabei als sicherster Zustand betrachtet werden, weil sich das Kurswagenmodul wie ein passiver, klassischer Kurswagen verhält.

Beispiel

Um zum Beispiel nach einer Einfahrt in einen Bahnhof ein Modul abzukuppeln und wegzufahren, müssen folgende Abläufe passieren: Der Zug befindet sich zu Beginn im Zustand *Führende Lok*. Zuerst muss also die Zugsammelschiene abgetrennt

werden, damit in den neutralen Zustand vorgerückt werden kann. Um nun selbst losfahren zu können, muss sich das Fahrzeug im Stillstand befinden (gemessen durch v-Messanlage) und die Bremsen müssen angelegt sein (angebremst). Dieser Mechanismus ist notwendig, um gegen den Fall abgesichert zu sein, dass die ZSS während der Fahrt ausfällt oder gemäss FDV vor Perronbeginn ausgeschaltet wird und gleichzeitig eine Bedienhandlung auf dem Hilfsbedienpult stattfindet. Nun muss noch der Fahrmodus am Hilfsbedienpult aktiviert werden, wodurch der Zustand *Führendes Modul* initialisiert wird (dazu in Unterkapitel 4.7 mehr). Nach diesem Prozess kann die Bremse gelöst und selbständig losgefahren werden.

4.6.2 Leittechnikschema

Ein hierarchischer Aufbau der Leittechnik ist entscheidend für das korrekte Implementieren der Zugsoftware und Regelung. Wie oben erwähnt, haben die angetriebenen Kurswagen drei verschiedene Betriebsmodi. Das führt auch dazu, dass die detaillierte Systemarchitektur je nach Zustand unterschiedlich ist. Ein Überblick der Leittechnik ist in Abbildung 4.25 dargestellt.

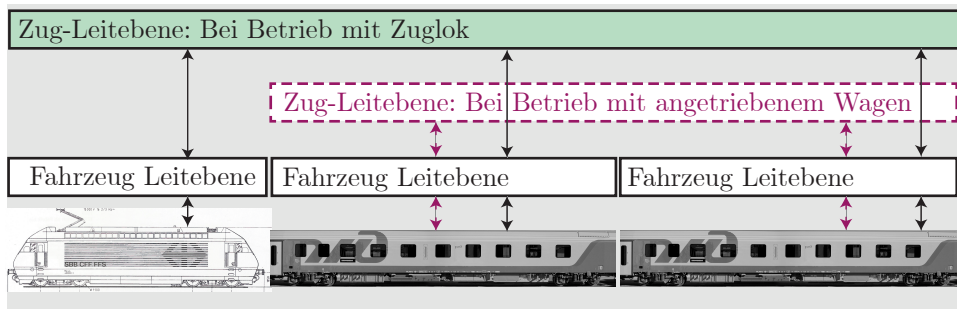


Abbildung 4.25: Übersicht zur Leittechnikarchitektur der angetriebenen Kurswagen im autonomen Betrieb und mit führender Lok.

Grundsätzlich ist der Aufbau der Leittechnik identisch für die Betriebsmodi. Die Zug-Leitebene umfasst jeweils die aktiven, unabhängigen Fahrzeuge. Im Betrieb mit führender Lok geht die Regelung und Steuerung des Zuges von der Lok aus. Im Betrieb ohne Lok umfasst die Zug-Leitebene alle miteinander verkehrenden Wagen. Die Steuerung findet hierbei im Kurswagenmodul mit aktivem Führerstand statt.

Im Detail unterscheiden sich jedoch die aktiven Komponenten der Leittechnik auf den Fahrzeugen in Abhängigkeit des Betriebszustands. Der genaue Aufbau ist in Abbildung 4.26 dargestellt. Im Folgenden ist der Aufbau näher beschrieben. Das Kurswagenmodul ist dabei aufgeteilt in den Wagen mit Hilfsantrieb und den Wagen ohne Hilfsantrieb.

Lok: Die Lok steuert den gesamten Zugverband. Dazu werden Zugsicherungs- und Führerstandsbeefehle direkt auf die Zug-Leitebene übertragen. Weiter befinden sich auf der Lok Traktionskomponenten und Hilfsbetriebe, welche beide ihre eigene Leitebene bilden. Zusammen mit der Energieverteilung werden diese Komponenten von der Fahrzeug-Leitebene des Fahrzeugs kontrolliert.

Angetriebener Wagen: Der angetriebene Wagen hat zwei Leittechnikmodi: Zum einen gibt es den Betrieb unter einer führenden Lok. In diesem Fall ist nur die Hilfsbetriebe-Leitebene aktiv. Speziell wichtig ist die Regelung der Traktionsbatterie. Auf Fahrzeug-Leitebene muss entschieden werden, ob und wie viel die Batterie geladen werden kann. Zum anderen gibt es den Betrieb als selbstfahrender Wagen. Hier findet die Steuerung von einem Hilfsführerstand aus statt,

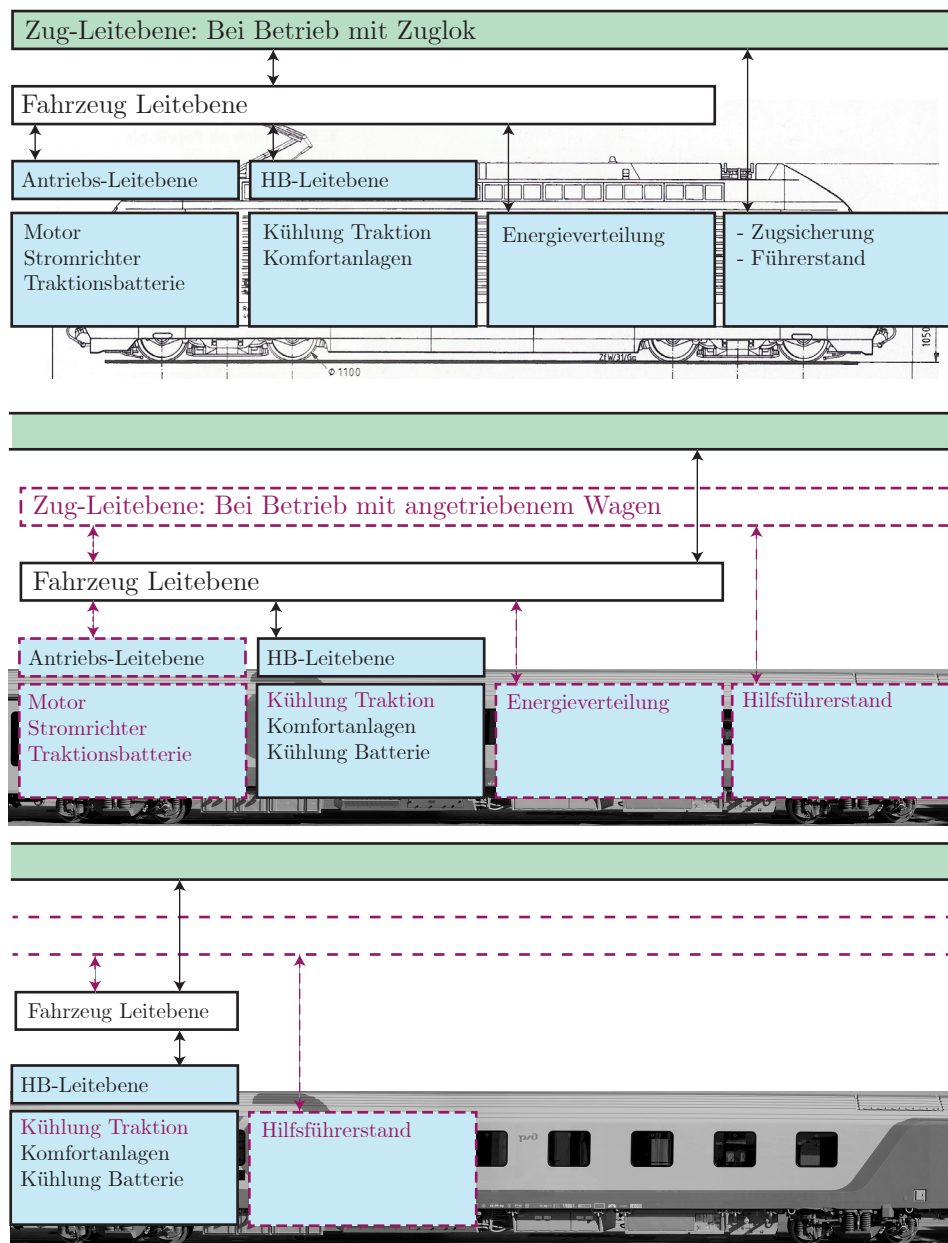


Abbildung 4.26: Detaillierte Aufstellung der Leittechnikarchitektur mit den relevanten Komponenten der Fahrzeug-Steuerung.

welcher auf die Zug-Leitebene kommuniziert. Zur Fahrzeugsteuerung kommt neu die Traktion, deren Kühlung und die Energieverteilung hinzu. Die Leittechnik ist nun bis auf die Traktionsbatterie und die fehlende Zugsicherung identisch zur Lok.

Antriebsloser Wagen: Dieser Wagen verhält sich unter dem Betrieb mit Lok identisch wie der angetriebene Wagen. Statt der Traktionsbatterie muss auf der Hilfsbetriebe-Leitebene die Klimabatterie gesteuert werden. Der autonome Betrieb unterscheidet sich davon nur, falls der Zugverband vom lokalen Hilfsführerstand gesteuert wird. Ist dies der Fall, findet die Zugsteuerung von diesem Wagen direkt auf die Zug-Leitebene statt.

Es gibt eine weitere Fallunterscheidung, falls das angetriebene Kurswagenmodul im Verbund mit anderen Modulen fährt. In diesem Fall geht die Steuerung immer vom besetzten und nur vom besetzten Hilfsführerstand aus. Die anderen Module werden via eigener Vielfachsteuerung gesteuert. Dies soll verhindern, dass Module in Mehrfachtraktion potentiell widersprüchliche Befehle ausführen. Das eigene Vielfachsteuerungssystem verhindert zudem, dass Vielfachsteuersignale von der Lokomotive zu einer Fehlfunktion im Modul führen.

Aus diesen Betrachtungen zur Leittechnik folgt direkt das Bedienkonzept der angetriebenen Kurswagen. Dies wird in Abschnitt 4.7 genauer diskutiert.

4.6.3 Bremssteuerung

Die Bremssteuerung ist auf Fahrzeug-Leitebene implementiert. In den angetriebenen Modulen unterscheidet sie sich wesentlich gegenüber dem Stand der Technik. Wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, ist das Getriebe koppelbar, damit es auf die tiefen Rangiergeschwindigkeiten ausgelegt werden kann. Daraus folgen auf Stufe Regelung zwei sicherheitskritische Fälle:

1. **Unbeabsichtigtes Einkuppeln:** Der Fall, dass sich das Getriebe bei einer Geschwindigkeit von $v > 45$ km/h einkoppelt. Dieser Fall ist sicherheitskritisch, da Getriebe und Motor nachhaltig beschädigt werden können und eine Entgleisung nicht ausgeschlossen werden kann.
2. **Unbeabsichtigtes Auskuppeln:** Der Fall, dass sich das Getriebe im eingekuppelten Zustand während der Fahrt auskuppeln will. Grundsätzlich ist dabei von keiner Gefahr für die Passagiere auszugehen. Eine Beschädigung des Getriebes kann aber nicht ausgeschlossen werden.

Es ist jedoch auch wichtig, dass der Kupplungsvorgang nur einen möglichst kleinen Einfluss auf die Zuverlässigkeit des Kurswagenmoduls hat. Deshalb scheint es akzeptabel, das Getriebe forciert auszukuppeln, falls damit verhindert werden kann, dass es in einem zu hohen Geschwindigkeitsbereich arbeiten muss. Grundsätzlich ist es entscheidend, dass das Getriebe in jedem Fall bei $v > 45$ km/h ausgekuppelt ist. Der Aufbau einer solche Schaltung zur Ansteuerung der Getriebekupplung ist in Abbildung 4.27 dargestellt.

Sie wird gemäss dem Ruhestromprinzip entworfen. Das Getriebe ist bei diesem Prinzip nur eingekuppelt solange Strom fliesst. Im Ruhezustand ist das Getriebe mithilfe einer Feder immer im ausgekuppelten Zustand. Die Schaltung besteht aus drei Schaltern S1 bis S3. Die Schalter werden geschlossen, wenn die dazugehörige Bedingung erfüllt wurde. Wenn der Stromkreis geschlossen wurde, kann Strom durch die Spule K1 fließen. Die Spule K1 kuppelt das Getriebe ein. Die dazugehörigen Bedingungen sind:

- Die Zugsammelschiene des Kurswagenmoduls ist spannungsfrei,

- der Fahrmodus auf dem aktiven Hilfsführerstand ist aktiviert,
- die Fahrgeschwindigkeit beträgt weniger als $v > 45$ km/h.

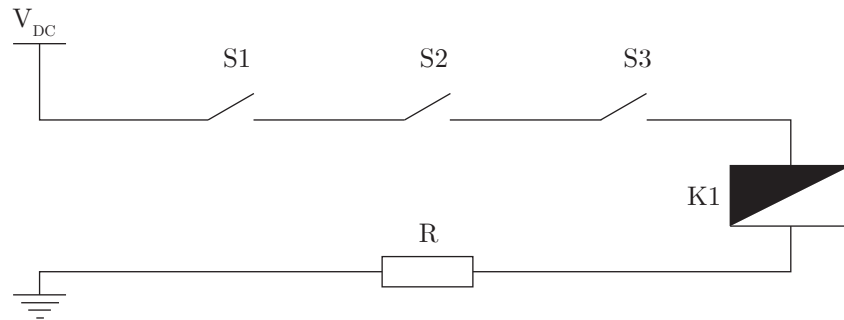


Abbildung 4.27: Schaltung zur Ansteuerung der Getriebekupplung. Sie besteht aus einer Spannungsquelle, drei Schaltern für die Bedingungen, der Spule, welche das Getriebe einkuppelt und einem Abschlusswiderstand.

Mit der Bedingung der spannungsfreien Zugsammelschiene wird verhindert, dass sich das Getriebe im Verbund mit einer Lokomotive während der Fahrt einkuppelt. Der Fahrmodus auf dem Hilfsführerstand kann nur zwischen AN und AUS umgeschaltet werden, wenn die aktuelle Geschwindigkeit des Zuges 0 km/h beträgt. Diese Bedingung soll die sicherheitskritischen Fälle 1 und 2 verhindern. Die dritte Bedingung verhindert, dass ein fehlerhaft eingekuppeltes Getriebe bei höheren Geschwindigkeiten eingekuppelt bleibt. Das Getriebe wird in diesem Notfall während der Fahrt ausgekuppelt, was im Regelbetrieb nicht vorgesehen ist. Dies entspricht dem Fall 2, kann aber in diesem Zusammenhang als Ausnahme verkraftet werden. Falls für den Sicherheitsnachweis zwei unabhängige Geschwindigkeitsmessungen nötig sind, können zwei Geschwindigkeitssensoren auf je einer Achse verbaut werden. Zusätzlich könnte auch die Umdrehungsgeschwindigkeit des Fahrmotors gemessen werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Leittechnikarchitektur auf den Kurswagen zwei Zustände kennen muss. Das Verhalten der Wagen unterscheidet sich grundlegend, je nachdem, ob eine führende Lok vorhanden ist oder sich der Wagen im autonomen Betrieb befindet. Sicherheitskritische Elemente wie der Kuppelvorgang des Getriebes sollen dabei als Relais-Schaltung (Hardware) ausgeführt werden, um eine umständliche Softwarezertifizierung zu umgehen.

4.7 Bedienkonzept

Dieses Kapitel gibt einen kurzen Überblick über das mögliche Bedienkonzept der angetriebenen Kurswagenmodule. Es wird zuerst näher auf die Betriebsabläufe eingegangen, danach wird der der Hilfsführerstand näher beschrieben.

4.7.1 Betrieblicher Ablauf

Im Kapitel Leittechnik wurden die drei Betriebsmodi sowie der neutrale Zustand näher beschrieben. Damit ein Wechsel zwischen diesen Zuständen zustande kommt, ist immer eine aktive Handlung durch das Rangier- oder, im Falle des Zustandes *geführte Lok*, das Lokpersonal nötig. In Abbildung 4.24 wurden bereits die Bedingungen dargestellt, um einen Zustandswechsel auszulösen. Es gilt nochmals zu erwähnen,

Die Übersichtsabbildung zeigt die Ablaufdiagramme für beide Rangiermodi, da sie sich nur geringfügig unterscheiden. Nach einer Initialisierung sind die Module bereit zur Fahrt. Nun kann der Fahrbefehl entweder über den Hilfsführerstand oder die Vielfachsteuerung erfolgen. Nun befinden sich die Module in ihrem fahrenden Grundzustand. Im Normalfall bleibt das Modul im fahrenden Zustand bis das Manöver abgeschlossen ist. Sobald es angehalten hat, kehrt es in den Bereitschaftszustand zurück. Im fahrenden Zustand ist der Gleit- und Schleuderschutz, welcher über die Regelung der Zugkraft ein Gleiten oder Schleudern verhindert, konstant aktiv. Als sicherheitskritische Überwachungen sind ein Notbremsbefehl und ein Übergeschwindigkeitsschutz implementiert. Der Notbremsbefehl kann durch das Rangierpersonal oder durch Fahrgäste erfolgen. Eine Übergeschwindigkeit wird durch eine redundante Geschwindigkeitsmessanlage überwacht. Tritt eines dieser Ereignisse ein, wird eine Schnellbremsung bis zum Stillstand eingeleitet. Exklusiv im Zustand *führendes Modul* kann auch die Wachsamkeitskontrolle (über das Sicherheitsleitgerät) eine Zwangsbremsung einleiten. Nach einer Zwangsbremsung wird automatisch in den *neutralen Zustand* übergegangen.

Um regulär die Rangiermodi zu verlassen, muss sich das Modul im Stillstand befinden. Wird dann eine Spannung an der Zugsammelschiene angelegt, wird direkt in den Zustand *geführte Lok* gewechselt. Dies soll eine schnelle Abwicklung des Rangierprozesses erlauben. Wird hingegen, je nach Ausgangszustand, die Vielfachsteuerung oder der Hilfsführerstand ausgeschaltet, findet der Übergang in den *neutralen Zustand* statt. Der Vorteil davon, dass nicht direkt in den Lokbetrieb übergegangen wird, ist, dass so auch zwei gekoppelte Module getrennt werden können und separat weiter rangieren dürfen. Dies wäre bei einem direkten Übergang nicht möglich.

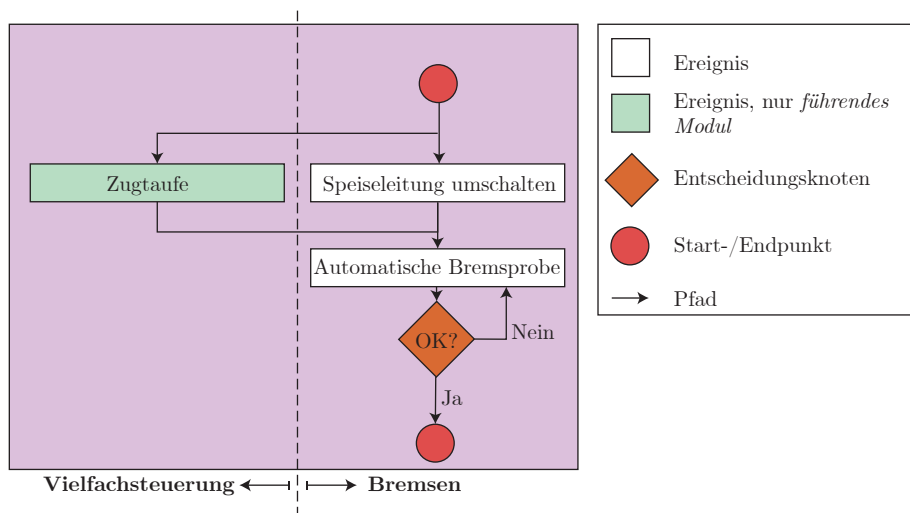


Abbildung 4.29: Initialisierungsprozess der Kurswagenmodule in den Zuständen *ferngesteuertes Modul* und *führendes Modul*.

In Abbildung 4.29 ist der Initialisierungsprozess in den beiden Rangiermodi dargestellt. Primär müssen zwei Systeme neu initialisiert werden. Auf der einen Seite muss nun die lokale Bremssteuerung übernehmen. Dazu muss als erstes die Druckluft-Speiseleitung den lokalen Kompressor und Hauptluftbehälter zuschalten. Falls das Modul das führende ist, löst es eine *Zugtaufe* aus. So kann festgestellt werden, ob und wie viele weitere Module über die Vielfachsteuerung ferngesteuert werden sollen.

Ist dies erfolgt, folgt eine automatische Bremsprobe aller zusammen verkehrenden Module. Nur wenn diese erfolgreich ist, wird die Initialisierung abgeschlossen. Falls die Bremsprobe nicht erfolgreich ist, wird diese wiederholt. Dies kann nötig sein, falls nicht allen Modulen die Umschaltung auf lokale Bremssteuerung und das damit verbundene Füllen des Hauptluftbehälters, gleich schnell gelingt.

4.7.2 Hilfsführerstand

Um die Module im autonomen Betrieb zu steuern, ist es nötig, auf allen Modulen zwei Hilfsführerstände zu verbauen. So kann lokal die Zustandsänderung oder der Fahr-/Bremsbefehl ausgelöst werden. Der Hilfsführerstand ist von der Ausstattung her vergleichbar mit den gängigen Funkfernsteuerungen von Rangierlokomotiven. Die Überwachung des Rangiervorgangs erfolgt dabei durch das Rangierpersonal im Wagenübergang, wo auch der Führerstand in einem Schrank untergebracht ist. Im inaktiven Zustand müssen die Hilfsführerstände verschlossen und für die Fahrgäste unerreichbar verstaut sein. Da sich das Modul nur im Bereich von Rangiergeschwindigkeiten bewegen kann, wird auf eine Zugsicherung verzichtet. Es darf im autonomen Betrieb nur als Rangierbewegung verkehren.

Alles in allem bedingen die Kurswagenmodule keine signifikant andere Bedienung als eine Rangierlokomotive. Neu sind die verschiedenen Betriebsarten, deren Umschaltung eine sichere Softwarearchitektur benötigt. Ein Vorschlag wurde in diesem Abschnitt präsentiert.

4.8 Kupplung

Da in Europa die klassische UIC-Schraubkupplung als Standard implementiert ist, verursacht die Kupplung von Kurswagen einen hohen Personal- und Zeitaufwand. Bei Triebzügen hingegen ist eine automatische Kupplung der Standard, welche in einer kurzen Zeit vollautomatisch zwei Fahrzeuge verbinden oder trennen kann. Dadurch ist das Stärken und Schwächen von Triebzügen heute auch üblich und ermöglicht viele direkte Zugläufe. Grundsätzlich ist eine automatische Kupplung auch für Wagenzüge denkbar, wie dies zum Beispiel bei der Montreux – Berner Oberland Bahn (MOB) der Fall ist. Dies ist allerdings nicht der Standard.

4.8.1 Automatische Kupplung

Um den Betriebsablauf mit den angetriebenen Modulen signifikant zu beschleunigen und den Personalbedarf zu verkleinern, werden automatische Kupplungen an beiden Enden des Moduls verbaut. Dazu gibt es verschiedene Systeme: In der Schweiz verbreitet sind das System *Schwab* und das System *Scharfenberg Typ 10*. Beide Kupplungsköpfe sind in Abbildung 4.30 zu sehen.

Für die angetriebenen Kurswagen wird die Typ 10 Kupplung gewählt, weil diese die einzige international normierte automatische Kupplung ist. Dies ist für das internationale Einsatzgebiet der Module entscheidend.

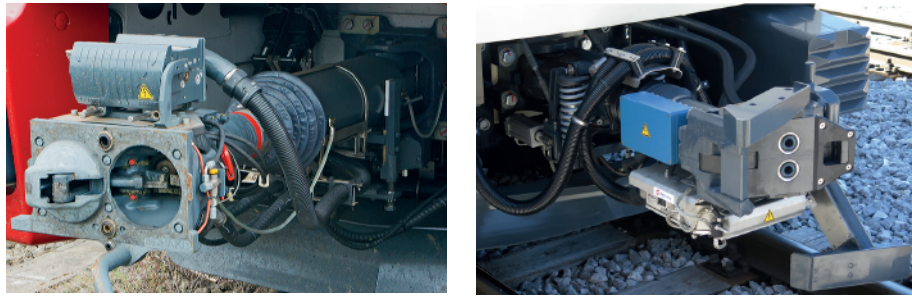


Abbildung 4.30: Wichtigste Bauarten von automatischen Kupplungen. Links wird der Typ *Scharfenberg Typ 10* gezeigt [74], während rechts der Typ *Schwab* zu sehen ist [75].

Die Schwab-Kupplung hat zwar den Vorteil, dass sie geheizt ist und nicht abgedeckt sein muss, doch ist die Normierung in EN 16019 ausschlaggebender.

Aus der Korrespondenz mit der Firma Voith ergab sich, dass die Typ 10 Kupplung ausserdem in der Lage ist, die Zugsammelschiene zu verbinden, was für die Energieversorgung der Wagen und das Laden der Batterien wesentlich ist. Weiter wurde erwähnt, dass jede automatische Kupplung eine Spezialanfertigung ist. Das erklärt auch die relativ hohen Stückkosten von 25'000-30'000 €, die bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung berücksichtigt werden müssen. Mehr dazu in Anhang A.

4.8.2 Kurzkupplung

Zwischen den beiden Wagenkästen der Module ist es nicht sinnvoll ebenfalls eine automatische Kupplung zu verbauen, weil diese ohnehin nicht unabhängig voneinander verkehren können. Deshalb wird dort eine Kurzkupplung respektive eine semipermanente Kupplung verbaut. Diese ist im Betrieb nicht mehr ohne Weiteres trennbar, was aber mit einem deutlich kleineren Platzbedarf, einem tieferen Gewicht und tieferen Kosten wettgemacht wird. Im Unterhalt ist es denkbar, die Kupplung zu trennen und die Wagen anders zusammenzustellen.

4.9 Einbauplanung

Als Schlusspunkt der technischen Auslegung muss eine Einbauplanung vorgenommen werden, um zu zeigen, dass alle Komponenten auch effektiv in die Wagenkästen hineinpassen. Es gilt hier das Lichtraumprofil einzuhalten. Bei den Gewichten ist entscheidend, dass die maximal zulässigen Achslasten nicht überschritten werden. Dieser Abschnitt stellt zuerst eine Gewichts- und Volumenbilanz auf. Danach folgen Detailzeichnungen des Kurswagenmoduls und des Triebdrehgestells.

4.9.1 Gewichte und Volumen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden viele Datenblätter herausgesucht, Fachgespräche geführt und Informationen gesucht. Daraus kann eine grobe Übersicht über die Gewichte und Volumen der wichtigsten Komponenten aufgestellt werden. Diese ist in Tabelle 4.15 dargestellt.

Korrekte Daten sind vor allem für die Hauptkomponenten im Antriebsstrang und in der Energieversorgung wichtig. Bei volumen- und gewichtsmässig kleinen Komponenten wurde eine Schätzung gemacht, fehlende Volumendaten sind durch einen

Gewichte/Vol.	Komponente	Anzahl	Gewicht [kg]	Vol. [l]	Quelle
Wagen klassisch	komplett	2	59'000	-	[76]
Antriebsstrang	Fahrmotor	2	410	178	[62]
	SR Traktion	1	2'330	3'434	[69]
	SR Klima	1	1'486	3'44	[71]
	Getriebe	2	300	-	[62]
Energieversorgung	Traktionsbatterie	1	1'300	1'755	[65]
	Klimabatterie	1	575	700	[65]
	Bordnetz BLG	2	10	11	[77]
Kühlung / Heizung	Traktionsbatterie	1	360	250	[78]
	Klimabatterie	1	120	150	-
	SR Traktion	1	205	150	-
Kupplung	aut. Kupplung	2	600	-	[29]
	Kurzkupplung	2	180	-	[30]
Pneumatik	Pauschal	1	185	350	-
Leittechnik	Pauschal	1	100	400	-
Abzüge	Alter SR	2	1'300	2'400	[79]
Total (gerundet)			126'000		

Tabelle 4.15: Gewichtsbilanz und Volumenübersicht über alle relevanten Komponenten der Kurswagenmodule. Als Basis dient ein klassischer Kurswagen.

Strich gekennzeichnet. In den weiter unten gezeigten Skizzen wurde für die Komponenten ohne Volumendaten ein Platzhalter eingefügt. Die Quellenverweise beinhalten entweder Gewichts- oder Volumendaten für die dazugehörigen Komponenten. In einem solchen Fall wurde für das Gegenstück eine Schätzung getätigt, während beim Stromrichter die in Kapitel 2 aufgestellten Skalierungsgesetze zum Zug kamen.

Als Gesamtgewicht für ein angetriebenes Kurswagenmodul resultiert eine Masse von 126 t, welche in den folgenden Wirtschaftlichkeitsberechnungen verwendet wird. Mit diesem Gewicht bleiben die Achslasten unter dem Achslast-Limit von 20 t bei ungefähr 16 t.

4.9.2 Typenskizze

Dieses Unterkapitel präsentiert die Typenskizze der Kurswagen mit eigenem Hilfsantrieb. Sie soll illustrieren, welche Komponente wie viel Platzbedarf verursacht und wo was verbaut wird.

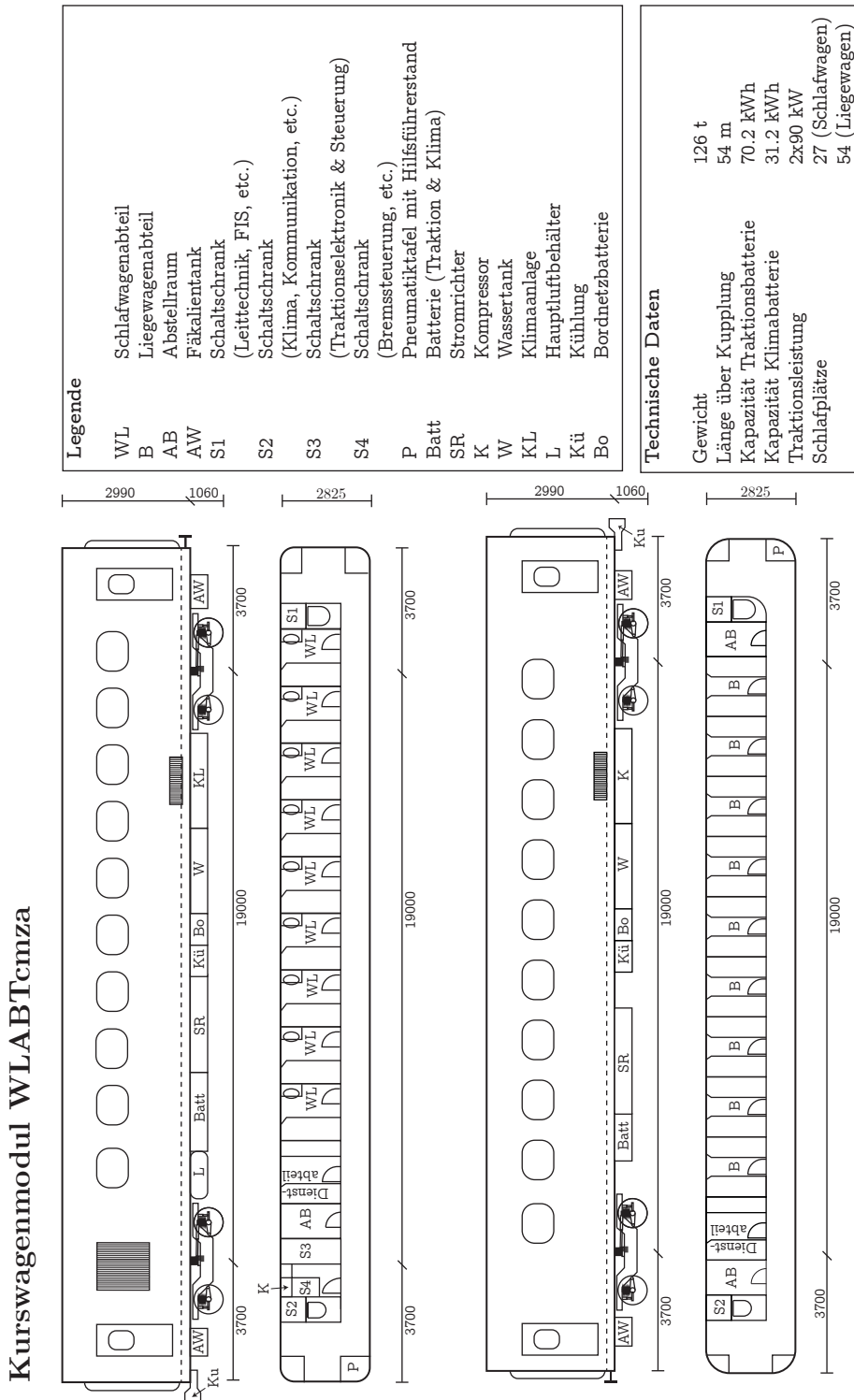


Abbildung 4.31: Typenskizze mit Legende des Kurswagenmoduls mit eigenem Hilfsantrieb. Es setzt sich aus einem Schlafwagen (WL-Wagen) und einem Liegewagen (B-Wagen) zusammen.

Ausserdem zeigt sie, dass es möglich ist, alle Komponenten ohne Aufgabe von allzu viel Fahrgastraum unterzubringen. Die Zeichnung ist in Abbildung 4.31 zu finden.

Die Komponenten sind an verschiedenen Orten in den Wagen untergebracht. Hier wird nun etwas genauer auf die Verteilung eingegangen:

Traktion: Die Traktionskomponenten, wie die Batterien (Batt) und die Stromrichter (SR), werden unterflur angebracht, wo sich ausserdem die Kühlung und Heizung (Kü) der Traktionskomponenten befinden. Der zugehörige Steuerschrank (S3) befindet sich jedoch in einem Maschinenraum im Schlafwagen.

Bremsen: Die Steuerung befindet sich ebenfalls im Maschinenraum (S4) im Schlafwagen, wo auch der Kompressor (K) untergebracht ist. Direkt darunter ist der benötigte Hauptluftbehälter (L) angebracht. Die Pneumatiktafeln befinden sich zusammen mit den Hilfsführerständen (P) direkt neben den Wagenübergängen.

Komfortanlagen: Das Klimagerät (KL), die Wassertanks (W) für die Abteile und Toiletten, sowie die Abwassertänke (AW) und die Bordnetzatterie (Bo) sind alle unterflur angebracht. Die Steuerung dazu ist im Maschinenraum (S2).

Leittechnik: Die Steuerschranke für die Leittechnik (S1) befinden sich in den jeweiligen Wagen.

Kupplung: Zwischen den beiden Wagen des Moduls befindet sich eine Kurzkupplung, während an den Enden jeweils eine automatische Kupplung (Ku) inklusive Übertragung der Zugsammelschiene verbaut ist.

Am besten werden alle grossen Komponenten unterflur, d.h. unter dem Boden, angebracht, da auf diese Weise kein Platz im Fahrgastraum verloren geht. Trotz dieser Bemühungen finden im Wagen zwei Schlafwagenabteile (WL) weniger Platz als in einem vergleichbaren ÖBB-Wagen. Aktuell hat das Modul eine Kapazität von 54 Plätzen im Liegewagen (B-Wagen) und von 27 Plätzen im Schlafwagen (WL-Wagen). Es wäre aber denkbar, auf Kosten eines Dienstabteils ein weiteres Schlafwagen-Abteil einzubauen. Die Installation aller zusätzlichen Komponenten und Steuerungen im Maschinenraum erhöht die Wartungsfreundlichkeit.

Insgesamt sind alle Komponenten auf Kosten zweier Abteile im Kurswagenmodul einbaubar. Die Typenskizze stellt dabei einen Einbauvorschlag dar.

Bauartbezeichnung

Ein interessanter Punkt im Zusammenhang mit der Typenskizze ist die Bauartbezeichnung des Kurswagenmoduls. Wie bei neuen Fahrzeugen üblich, wird dem Kurswagenmodul eine Kennzeichnung gegeben. Zwei Bezeichnungsschemata bieten sich dafür an: Das UIC-Schema zur Bezeichnung von Eisenbahnwagen und das Schweizer System zur Bezeichnung von Lokomotiven und Triebfahrzeugen. Eine Kombination erscheint sinnvoll, weil es sich zwar um Reisezugwagen handelt und ein Hilfsantrieb eingebaut ist, aber man trotzdem nicht von einem Triebwagen sprechen kann. Deshalb schlagen die Autoren die Bezeichnung **WLABTcmza** vor, wobei die Bedeutungen der einzelnen Kennbuchstaben in Tabelle 4.16 aufgelistet sind.

Natürlich steht diese Bezeichnung zur Disposition. Speziell das Prädikat *T* ist nicht eindeutig differenziert zwischen Traktor und Wagen mit Traktion. Der Vollständigkeit halber wird dieses Thema hier aber nicht ausgeklammert.

Bauartbezeichnung	Bedeutung
WLAB	Schlafwagen 1./2. Klasse
T	selbstfahrend
c	Wagen 2. Klasse mit Liegeabteilen
m	Länge über 24 m
z	Versorgung über Zugsammelschiene
a	Traktionsart: Batterie

Tabelle 4.16: Aufschlüsselung der Bauartbezeichnung des Kurswagenmoduls.

4.9.3 Drehgestellzeichnung

Dieser Abschnitt beschreibt eine Detailskizze des Drehgestells, wie sie in Abbildung 4.32 dargestellt ist. Das Ziel der Zeichnung ist es aufzuzeigen welche Komponenten im Drehgestell untergebracht werden sollen und die Volumeneinteilung darzustellen.

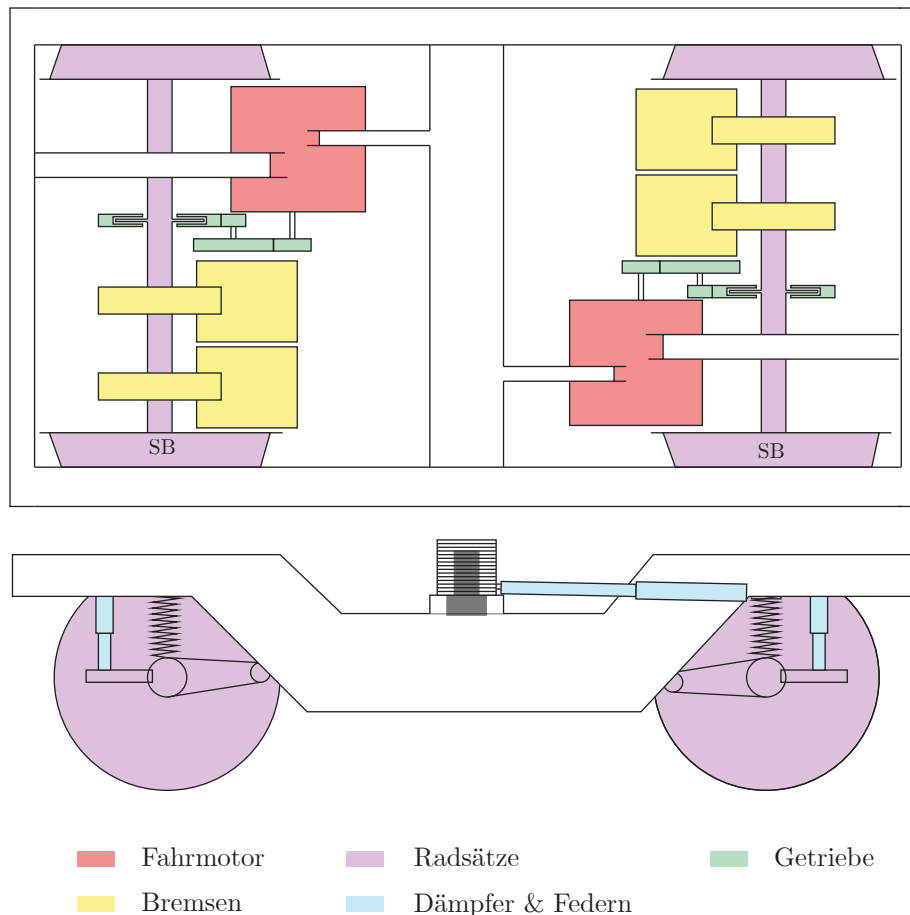


Abbildung 4.32: Übersichtszeichnung zum Drehgestell. In violett sind die Radsätze dargestellt. In rot die Fahrmotoren, gelb sind die Bremscheiben mit Bremszangen. Grün ist das Getriebe mit Kupplung. In hellblau sind die Dämpfer und Federn dargestellt. SB: Scheibenbremse.

Die wichtigsten Teile sind der Fahrmotor und das Getriebe, welches wie in Kapitel 2 beschrieben, als achsreitendes Getriebe ausgeführt ist. Der Fahrmotor ist dabei fest verbaut, während sich das Getriebe auf Achse und Fahrmotorwelle abstützt. Weil es eine Übersetzung von 16.3 aufweisen muss, reicht eine Übersetzungsstufe nicht aus und es muss ein zweistufiges Getriebe verbaut werden. Die Kupplung zum Auskuppeln des Getriebes bei höheren Geschwindigkeiten ist ebenfalls im Getriebe integriert.

Die Bremsen wurden als Scheibenbremsen mit Bremsscheiben und Bremszangen ausgeführt. Da für das nötige Bremsvermögen zwei Scheiben nicht genügen, muss pro Achse eine dritte Bremsscheibe als Rad-Scheibenbremse verbaut werden. Auf der Achse selber wäre dazu kein Platz mehr.

Die Primärfederung ist als Schraubenfeder mit parallelen Dämpfern ausgeführt, während die Sekundärfederung als Luftfeder realisiert wird. Um das Schlingern zu minimieren, wird ausserdem ein Schlingerdämpfer eingebaut.

Zusammenfassend kann man feststellen, dass alle relevanten Teilsysteme im Drehgestell unterzubringen sind, wobei der begrenzte Platz auf den Achsen die Verbauung einer Rad-Scheibenbremse zur Folge hat. Es ist also möglich ein Triebdrehgestell für die angetriebenen Kurswagenmodule zu entwickeln.

Kapitel 5

Betriebskonzept

Um zu zeigen, dass die angetriebenen Kurswagenmodule auf der vorhandenen Infrastruktur einsetzbar und in den bereits existierenden Betrieb integrierbar sind, wird ein Betriebskonzept entworfen. Zuerst wird die WAHL des Nachtzugs begründet. Nach der Beschreibung der betrieblichen Randbedingungen wird das gewählte Modell dargestellt. Zum Schluss wird das Konzept bewertet und mit bestehenden Betriebskonzepten verglichen.

5.1 Nachtzug

Das Konzept des Kurswagenmoduls mit eigenem Hilfsantrieb ist grundsätzlich auf jede Form des Reisezugwagens anwendbar. In diesem Betriebskonzept wird jedoch von einem Nachtzugnetz ausgegangen. Dies aufgrund der folgenden Faktoren:

- Der Nachtzugverkehr wird oft an oder unter der Grenze der Wirtschaftlichkeit betrieben. Deshalb wird erwartet, dass die Vorteile der Kurswagenmodule mit Hilfsantrieb hier am signifikantesten sind.
- Im Nachtzugverkehr wird Spezialrollmaterial in kleinen Flottengrößen eingesetzt. Dies vereinfacht die Einführung einer Neuentwicklung.
- Bei Nachtverbindungen ist Umsteigen besonders unbeliebt und unpraktisch. Deshalb leisten Kurswagen einen erheblichen Mehrwert.
- Im Nachtverkehr sind auch heute noch Kurswagen im Einsatz. Es ist deshalb einfacher, ein neues Kurswagenkonzept mit einem bestehenden zu vergleichen.
- Im Nachtverkehr gibt es keinen Taktfahrplan, sondern einzelne Relationen. Es ist deshalb deutlich einfacher ein robustes und flexibles Betriebskonzept zu entwerfen.

Aus diesen Gründen wird der Nachtzug als das geeignetste Konzept für die Kurswagenmodule betrachtet.

5.2 Randbedingungen

Ein Betriebskonzept ist von einer Reihe Randbedingungen technischer, kommerzieller und sozialer Natur abhängig. Dieses Kapitel behandelt diese Eigenheiten und beschreibt die Auswirkungen der Randbedingungen auf das Betriebskonzept.

5.2.1 Passagiere

Auf kommerzieller Ebene ist die Anzahl verkaufbarer Liegeplätze entscheidend. Je mehr Plätze vorhanden sind, desto mehr kann potentiell eingenommen werden. Jedoch ist auch der Fahrkomfort ein wichtiger Faktor, welcher bei mehr Liegeplätzen sinkt. Hier findet eine Interessensabwägung zwischen Anzahl Plätzen und Komfort statt. Aus Gesprächen mit Experten von ÖBB Personenverkehr konnte das Fazit gezogen werden, dass eine tiefere Platzdichte als in ihrem bestehenden NightJet nicht rentabel sein kann. Andererseits sollen keine weiteren Kompromisse beim Komfort gemacht werden. Deshalb wird im Folgenden von sechs Plätzen pro Liegewagenabteil (B-Wagen) ausgegangen und von drei Plätzen pro Schlafwagenabteil (WL-Wagen).

5.2.2 Nachfrage

Die Nachfrage nach Plätzen in Nachtzügen hängt von verschiedenen Faktoren ab. Einige Faktoren sind im Folgenden aufgelistet:

Wagenklassen: Im Nachtverkehr gibt es mehrere Wagenklassen. Dies ermöglicht es, auf der einen Seite ein breiteres Zielpublikum anzusprechen, auf der anderen Seite ist es schwieriger, flexibel auf Nachfrageschwankungen zu reagieren. Um die Komplexität zu reduzieren, wird in diesem Betriebskonzept von einem Liegewagen und einem Schlafwagen pro Modul ausgegangen.

Fahrzeiten: Nachtzüge verkehren grundsätzlich in Tagesrandlagen. Der ideale Ablauf einer Fahrt ist in Abbildung 5.1 zu sehen. Die Abfahrt findet am Abend oder in der Nacht statt. Danach werden grossräumig bis ca. 23:00 Fahrgäste eingesammelt. Darauf folgt eine Ruhephase bis am Morgen und schliesslich die Ankunftsphase mit Feinverteilung im Zielgebiet. Dieser Ablauf stellt den Idealzustand dar und sollte die höchste Auslastung aufweisen. Kommen die Züge jedoch erst am späten Morgen am Ziel an oder verlassen sie den Ausgangsbahnhof bereits am Nachmittag, sinkt die Auslastung respektive die Nachfrage. Deshalb wird im Betriebskonzept versucht, die Fahrzeiten möglichst entsprechend diesem Muster auszulegen. Nachtzugfahrten über mehrere Nächte werden nicht betrachtet.

Umsteigen: Während bei einem zuverlässigen Bahnbetrieb am Tag das Umsteigen keine negativen Auswirkungen auf die Nachfrage hat, führt dies bei Nachtzügen zu einem bedeutenden Passagierrückgang. Das hängt vor allem damit zusammen, dass bei den Passagieren eine Unterbrechung des Schlafs sehr unbeliebt ist und wenn möglich vermieden wird. Zusätzlich führt jeder Umsteigevorgang unabhängig von der Tageszeit zu einer wahrgenommenen Fahrzeitverlängerung von einer Stunde [38]. Aus diesen Gründen wird bei der Erstellung des Betriebskonzepts darauf verzichtet, Umsteigeverbindungen zu betrachten.

Hygiene: Eine hohe Nachfrage kann nur mit einem gewissen Qualitätsstandard gewährleistet werden. Deshalb werden im Betriebskonzept die Reinigungszeiten und die entsprechenden Personalkosten berücksichtigt.

5.2.3 Synergien

Für den effizienten Betrieb von Nachtzügen ist eine optimale Nutzung von Synergien entscheidend. Grundsätzlich ist das Stellen eines eigenen Trägerzugs für jeden Linienast nicht rentabel zu betreiben. Deshalb werden verschiedene Linien auf Teilstrecken kombiniert, auch wenn dies beispielsweise mit einer Fahrzeitverlängerung verbunden ist. Dies soll im Betriebskonzept berücksichtigt werden.

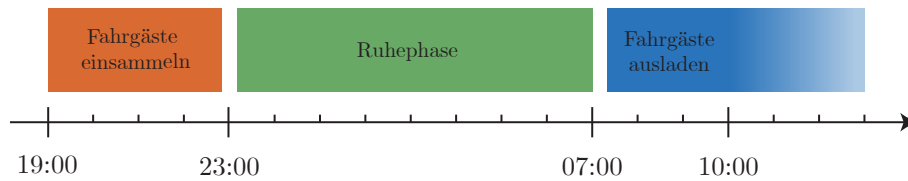


Abbildung 5.1: Idealer Ablauf einer Nachtzugfahrt. Am Abend werden Passagiere eingesammelt. In der Nacht wird Distanz zurückgelegt, während die Passagiere schlafen. Am Morgen werden die Passagiere im Zielgebiet verteilt. [37]

Folgende weitere Synergieaspekte spielen eine Rolle um eine genügend hohe Nachfrage zu erreichen:

- Intermodalität, d.h. das einfache Erreichen von lokalen Nah- und Fernverkehrsverbindungen, ist wichtig für die Attraktivität einer Verbindung. Dazu zählt vor allem die Gewährleistung von Anschlüssen.
- Einbindung in die regulären Ticketing-Systeme der Bahnanbieter. Eine möglichst einfache Zugänglichkeit zu Billetten ist entscheidend für den Erfolg eines Nachtzugkonzepts.
- Höhere Priorisierung von Nachtzügen durch die Leitzentralen. Häufige und grosse Verspätungen untergraben den Ruf des Nachtzuges als pünktliches und zuverlässiges Verkehrsmittel.

Diese weichen Faktoren werden im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht näher betrachtet und es wird angenommen, dass sie der Nachfrage nicht hinderlich sein werden.

5.2.4 Personal

Ein Nachtzug hat einen erheblich grösseren Personalaufwand als der konventionelle Fernverkehr. Neben der lokführenden Person wird für jeden Wagen eine Schaffner*in benötigt. Dazu kommt das Rangierpersonal, welches für jede Veränderung der Zugformation benötigt wird. Deshalb sind die Personalkosten ein wichtiger Kostentreiber, welcher nicht vernachlässigt werden darf. In diesem Betriebskonzept werden all diese Kosten berücksichtigt. Auch in Betracht gezogen wird die Zeit, welche für das Rangieren der Kurswagenmodule benötigt wird.

5.3 Betriebskonzept im Detail

Dieser Abschnitt beschreibt die detaillierten Inhalte und Abläufe des Betriebskonzepts für die selbstfahrenden Kurswagenmodule.

5.3.1 Liniennetz

Das Liniennetz beschreibt grafisch das Angebot eines Betreibers von öffentlichem Personenverkehr. Um zu zeigen, dass die angetriebenen Kurswagen ihre Vorteile ausspielen können, wird ein beispielhaftes Liniennetz entworfen, welches die betrieblichen Vorteile beinhaltet. Das betrachtete Netz ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Es ist so aufgebaut, dass eine Linie aus drei Ästen besteht, welche sich zu einem gemeinsamen Ziel verbinden lassen. Diese Linienäste werden von einzelnen Kurswagenmodulen gefahren, welche, wenn möglich, während der Fahrt mit Kurswagen

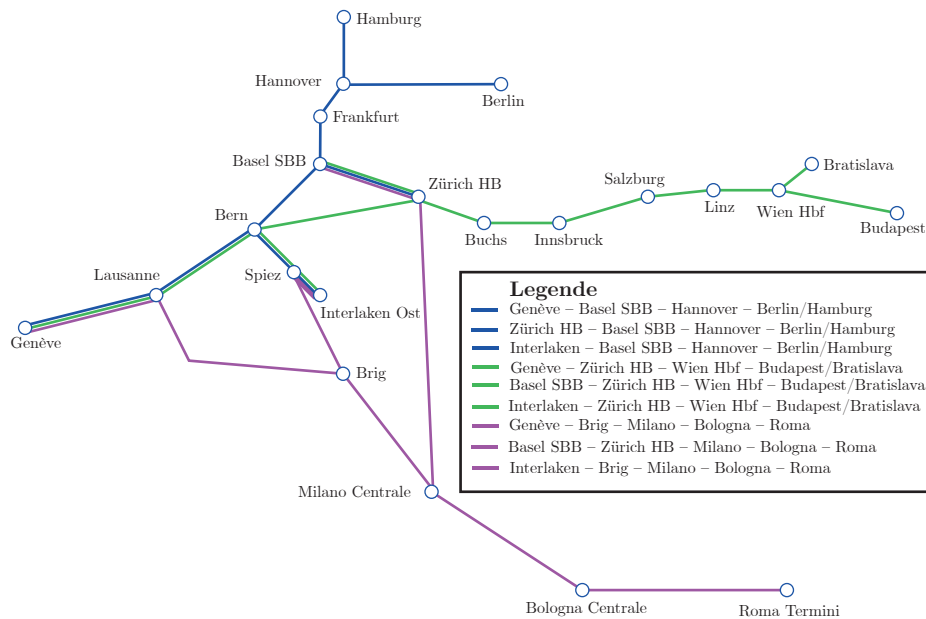


Abbildung 5.2: Betrachtetes Liniennetz zur Validierung und Veranschaulichung des gewählten Betriebskonzepts.

von anderen Linien zu einem Trägerzug kombiniert werden. So gibt es Bahnhöfe mit grösseren Rangiermanövern wie zum Beispiel Brig, Mailand oder Zürich, in welchen die Züge umgestellt werden müssen. Dieses Prinzip der Kurswagen wird nur noch selten angewendet und beinahe nie in diesem engmaschigen Sinne. Jedoch ist genau dies eine entscheidende Stärke der angetriebenen Kurswagen.

Folgende betriebliche Spezialitäten sind zusätzlich in das Netz eingebettet, um das Betriebskonzept ausgiebig zu testen:

- Es sind Sackbahnhöfe wie zum Beispiel in Zürich vorhanden. Diese haben die Eigenschaft, dass das Umsetzen von Lokomotiven nur bei vorhandener Spezialinfrastruktur möglich ist.
- Es sind Bahnhöfe mit Richtungswechseln wie zum Beispiel in Spiez und Basel vorhanden. Im Unterschied zum Sackbahnhof ist hier ein Umsetzen ohne Weiteres möglich.
- Längere Haltezeiten, um Synergien zwischen verschiedenen Linien zu nutzen, d.h. es sollen andere Züge abgewartet werden. Dies hat normalerweise eine relativ lange Belegung der Bahnhofinfrastruktur zur Folge.

Das Netz deckt zahlreiche betriebliche Abläufe ab und stellt aus diesem Grund einen guten Referenzfall dar. Falls die angetriebenen Kurswagen auf diesem Netz einsetzbar sind, darf angenommen werden, dass ihr Einsatz auch auf anderen Netzen mit wenigen Ausnahmen oder Anpassungen möglich sein wird.

5.3.2 Rangierkonzept

Ein Netzplan ist noch kein Beweis, dass ein Betriebskonzept effektiv umsetzbar ist. Deshalb wird in diesem Abschnitt untersucht, ob alle benötigten Rangierfahrten und Rangiermanöver für das Liniennetz machbar sind. Dazu wird der Fokus auf die Linie von Basel/Interlaken/Genève – Rom: dem Euronight (EN) *Romulus* gelegt.

Diese Linie ist im Liniennetz in Abbildung 5.2 pink dargestellt. Eine genaue Übersicht über den Linienablauf und alle Rangiermanöver befindet sich in Abbildung 5.3 und wird im Abschnitt Beispiel EN *Romulus* genauer beschrieben.

Es muss hier erwähnt werden, dass ein solch umfangreiches Rangierkonzept im heutigen Betrieb unter der Einhaltung der Fahrzeiten nicht mehr praktikabel. Die Hoffnung ist, dass die angetriebenen Kurswagen den Rangiervorgang vereinfachen und eine Kompatibilität mit dem heutigen Betrieb erreicht werden kann.

Rangiermanöver

Ein Rangiermanöver im Sinne dieser Arbeit ist ein Vorgang, der die Zusammensetzung eines Zugverbands ändert. Im Detail bedeutet dies, dass die Wagenreihung verändert wird. Die Rangiermanöver sind grob in fünf verschiedene Vorgänge aufgeteilt:

- Bereitstellen von Fahrzeugen. Wagenmodule oder Triebfahrzeuge werden für den Einsatz bereitgestellt.
- Wegstellen von Fahrzeugen. Nach erfolgtem Einsatz werden Wagen oder die Lok auf einem Abstellgleis abgestellt.
- Zugverband stärken. Ein Zug wird in einem Bahnhof oder auf einer Gleisanlage mit weiteren Wagen verstärkt und kann somit mehr Passagiere transportieren.
- Zugverband schwächen. Ein Zug wird in einem Bahnhof oder auf einer Gleisanlage um eine Anzahl Wagen geschwächt und kann somit weniger Passagiere transportieren.
- Zugverband umstellen. Der Zug wird entweder gestärkt oder geschwächt oder beides zusammen. Module wechseln den Trägerzug. Dies ist der klassische Rangiervorgang von Kurswagen.

Die oben genannten Rangierszenarien haben alle ein Gegenstück. So ist Stärken symmetrisch zu Schwächen und Bereitstellen zu Wegstellen. Auch ein Umstellen hat das symmetrische Gegenstück, welches sich aber aus den anderen Rangiervorgängen zusammensetzt. In Abbildung 5.3 sind alle Rangiervorgänge für die Zugfahrt des EN *Romulus* in Richtung Italien dargestellt. Für eine Linie soll der Ablauf der Rangierbewegungen für beide Richtungen symmetrisch stattfinden, denn diese Symmetrie ist entscheidend, damit ein Betriebskonzept gut funktionieren kann. Bei einer nicht symmetrischen Linie können Leerfahrten anfallen, weil das Rollmaterial nicht am richtigen Einsatzort ist.

Nutzung von Synergien

Der in Abbildung 5.2 dargestellte Netzplan zeigt, dass der Zuglauf auf Teilstrecken mit anderen Linien kombiniert ist. Dies dient der Vermeidung von unnötig kurzen Zugverbänden. So können die Module nach Rom von Genève bis Lausanne zusammen mit den Zügen nach Deutschland und Österreich fahren. Der Nachteil besteht darin, dass der ganze Zugverband in Richtung Rom den Bahnhof Brig erst später verlassen kann, da der Zugteil von Genève später ankommt. Da sich aber die gesamte Linie im Zeitbereich von Abbildung 5.1 befindet, ist dies ohne Weiteres verkraftbar. Solche Synergieeffekte sind wichtig, um das Konzept rentabel betreiben zu können und sollen, wenn immer möglich, genutzt werden.

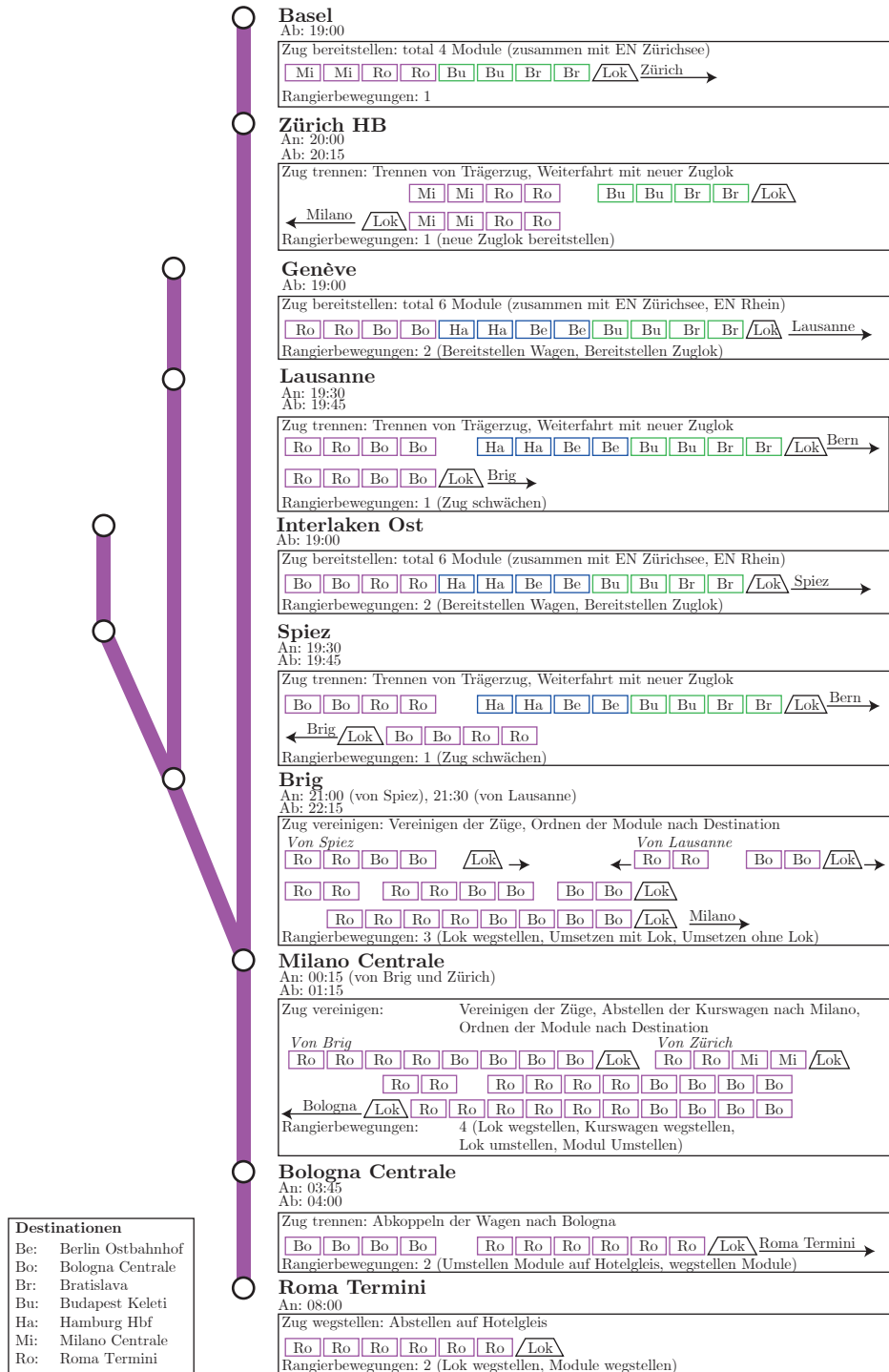


Abbildung 5.3: Detaillierter Ablauf aller Rangierbewegungen für den EN *Romulus*. Alle Rangiervorgänge sind mit den anderen Linien abgestimmt. Jedes Modul besteht aus zwei Reisezugwagen.

Fahrzeiten

Die Fahrzeiten im Betriebskonzept orientieren sich an Abbildung 5.1. Generell finden alle Abfahrten um 19:00 statt, um Geschäftskunden anzuziehen und eine Tangierung der Stosszeiten zu vermeiden. In der Schweiz werden dann bis ungefähr 22:00 weitere Fahrgäste eingesammelt. In Abbildung 5.3 sind nicht alle Halte eingezeichnet, sondern nur diejenigen mit Rangierabläufen. Die Ankunft am Endbahnhof findet in den frühen Morgenstunden statt. Damit hat der Zug einen entscheidenden Vorteil, da die Fahrgäste früher im Zentrum der Stadt sind, als dies mit dem ersten Flug möglich wäre. Damit andere Destinationen wie Bologna und Mailand ebenfalls zugänglich sind, wird das in Kapitel 5.3.2 erläuterte Hotelgleis vorgeschlagen.

Rangierzeiten

Für die Rangiervorgänge an den Bahnhöfen wird eine gewisse Zeit benötigt. Diese wird mit Hilfe einer Zuglaufrechnung basierend auf [58] bestimmt. Dabei wird zur Vereinfachung von zwei Rangierdistanzen ausgegangen: Von einer drei Kilometer langen und von einer sechs Kilometer langen Rangierstrecke. Die daraus resultierende Fahrzeit ist in Tabelle 5.1 dargestellt.

Rangierszenarien	Kurze Rangierdistanz	Lange Rangierdistanz
Länge [km]	3	6
Anz. Stopps [-]	5	10
Fahrzeit [min]	10	20

Tabelle 5.1: Vereinfachte Rangierszenarien für das Betriebskonzept.

Die Rangiermanöver, wie sie im vorangehenden Abschnitt beschrieben worden sind, werden einer Rangierdistanz zugeordnet. Das Bereitstellen und Wegstellen von Fahrzeugen wird als kurzes Rangiermanöver angesehen. Das Umstellen von Zugverbänden als langes Manöver. Diese Annahmen treffen nicht auf jeden Bahnhof zu, genügen aber für die konzeptuelle Betrachtung.

Hotelgleis

Ein Problem von vielen Linien wird in der Rangierübersicht ersichtlich: Mailand und Bologna als grosse Städte und Verkehrsknotenpunkte werden mitten in der Nacht angefahren. Als Passagier ist eine Ankunft zu diesen Zeiten äusserst umständlich. Als mögliche Lösung wird das Hotelgleis präsentiert. Die Idee ist folgende: Der Zug kommt um 4:00 morgens in Bologna an und koppelt die Module mit Destination Bologna ab. Diese abgekoppelten Module fahren selbständig auf das Hotelgleis. Das Hotelgleis muss mit einem Stromanschluss ausgestattet sein, um die Komfortanlagen weiter betreiben zu können. Grundsätzlich kann dazu ein normales Perrongleis ausgerüstet werden. Auf diesem Gleis können die Module bis zu einer bestimmten Zeit am Morgen stehen und die Fahrgäste können den Zug individuell verlassen. Im Gespräch mit der ÖBB wurde jedoch klar, dass die Infrastruktur an den Bahnhöfen es oft und insbesondere während der Stosszeiten nicht zulässt, Wagen für längere Zeiten auf einem Gleis stehen zu lassen. Deshalb ist es denkbar, dass der Zug zum Beispiel von 04:00-07:00 auf einem Abstellgleis mit Stromversorgung abgestellt wird und am Morgen nur kurz in den Bahnhof fährt, um die Passagiere auszuladen. In Abbildung 5.4 ist dieser Vorgang grafisch dargestellt. Nach der Einfahrt des aus Bstadt kommenden Zuges in einen fiktiven Bahnhof Adorf führen die selbstfahrenden Kurswagen eine Rangierfahrt auf ein Hotelgleis durch.

Dieses weist eine Depotspeisung auf, um die Komfortanlagen weiter zu betreiben. Zu einer passenden Zeit am Morgen fährt das Modul wieder auf das Perrongleis und die Passagiere verlassen den Zug. So kann die Beanspruchung der Bahnhofinfrastruktur auf ein Minimum begrenzt werden.

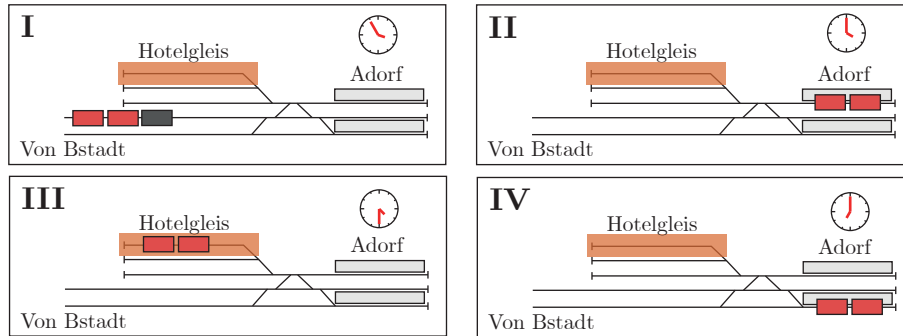


Abbildung 5.4: Ablauf der Verwendung eines Hotelgleises. I: Der Zug fährt mit Lok in den Bahnhof ein. II: Die Kurswagen stehen im Bahnhof und die Lok wurde weggestellt. III: Die Wagen fahren selbstständig auf das Hotelgleis. IV: Die Wagen fahren am Morgen in den Bahnhof.

Richtungswechsel

Ein Nebenschauplatz, aber dennoch ein nicht zu vernachlässigender Faktor sind die Richtungswechsel. Bahnhöfe wie Milano Centrale, Zürich HB (Gleishalle) oder Budapest Keleti sind allesamt Sackbahnhöfe. Zusätzlich muss bedingt durch die Infrastruktur in manchen Bahnhöfen gewendet werden. Dies ist zum Beispiel in Spiez der Fall. In einem Durchgangsbahnhof kann dies durch Umsetzen der Lok gelöst werden. In einem Sackbahnhof muss jedoch die richtige Infrastruktur vorhanden sein. Ist das nicht der Fall, muss eine weitere Lok zur Verfügung stehen oder es wird deutlich mehr Zeit benötigt. Bei einem schlanken und effizienten Betriebskonzept kann dies zu Problemen führen. Diese Tatsache wird jedoch nicht weiter berücksichtigt und es wird von einer ausreichend grossen Flotte an Lokomotiven ausgegangen.

Beispiel EN *Romulus*

Anhand der Grafik in Abbildung 5.3 soll nun das Beispiel der Relation des EN *Romulus* Interlaken Ost – Roma Termini genauer beschrieben werden.

1. Im Ausgangsbahnhof **Interlaken Ost** muss der Zug mit Zuglok bereitgestellt werden. Alle Kurswagenmodule fahren selbstständig auf das Perrongleis. Anschliessend wird die Lok an die Spitze des Zuges gesetzt und somit ebenfalls bereitgestellt. Hier verkehrt der Zug noch zusammen mit den EN *Zürichsee* und EN *Rhein*.
2. In **Spiez** findet ein Richtungswechsel statt für die Wagen des EN *Romulus*. Nach Einfahrt werden die entsprechenden Kurswagen abgetrennt und der Stammzug kann umgehend weiter nach Bern fahren. Gleichzeitig muss eine neue Zuglok Richtung Brig bereitgestellt werden.
3. Als nächstes kommt der Zug in **Brig** an. Dort wird zuerst die führende Zuglok weggestellt. Der Zug wartet 30 Minuten auf dem Perrongleis auf die Ankunft des Trägerzuges aus Lausanne. Es wird angenommen, dass ausserhalb der Stosszeiten das Warten auf dem Perrongleis möglich ist. Der Zug aus Lausanne

wird nach der Ankunft in der Mitte getrennt. Das Modul nach Bologna setzt mit der Lok an die Spitze des Zuges um. Das Modul nach Rom setzt selbstständig an das Ende des Zuges um.

4. Der nächste grosse Halt ist **Milano Centrale**. Der Trägerzug und die Kurswagen von Zürich kommen zur selben Zeit an, aber auf unterschiedlichen Bahnhofsgleisen. Milano Centrale ist ein Sackbahnhof. Deshalb bleiben beide Zugloks am Puffer. Währenddessen setzt das Modul von Zürich mit Ziel Rom um an (nun) die Spitze des Trägerzuges. Die Module nach Mailand bleiben im Bahnhof auf einem Hotelgleis. Befindet sich das Mailand-Modul auf dem Hotelgleis, kann dessen Zuglok an die Spitze des Hauptzuges umsetzen. Am Schluss wird die überzählige Lok weggestellt.
5. In **Bologna Centrale** werden die Module mit Ziel Bologna abgekoppelt und der Trägerzug somit geschwächt. Während der Trägerzug weiterfährt, fahren die Bologna-Module auf ein Hotelgleis.
6. Am Endbahnhof **Roma Termini** endet der Zug. Nachdem die Fahrgäste den Zug verlassen haben, wird der Zug weggestellt.

Sinngemäss ist dieses Rangierkonzept auch auf die anderen Linien anwendbar. Es zeigt, dass die geforderten Rangiervorgänge möglich sind und die Fahrzeiten trotzdem eingehalten werden können. Dies ist keine Selbstverständlichkeit, da Rangiermanöver in diesem Ausmass und dieser Komplexität bisher nicht möglich waren. In Knotenbahnhöfen sind solche Rangierbewegungen aus Kapazitätsgründen nur während der Nacht möglich.

5.3.3 Batteriezyklen

Dieser Abschnitt beschreibt die Beanspruchung und Verwendung der Traktionsbatterie und der Klimabatterie in den angetriebenen Kurswagenmodulen. Es soll aufgezeigt werden, dass die gewählten Batterien in dem oben beschriebenen Rangierkonzept genügen und eingesetzt werden können.

Randbedingungen

Als Batterien werden pro Modul zwei Batterien, wie in Kapitel 4 beschrieben, eingesetzt. Die wichtigsten Kennzahlen sind nochmals in Tabelle 5.2 dargestellt.

Batteriedaten	Traktionsbatterie	Klimabatterie
Kapazität [kW]	70.2	31.2
max. Entladerate [1/h]	4	4
norm. Laderate [1/h]	0.5	0.5

Tabelle 5.2: Für das Betriebskonzept relevante Kennzahlen der Batterie. Die Batterien können theoretisch ebenfalls mit 4C entladen werden. Dies wird jedoch bei der Ladung vermieden, um die Lebensdauer zu erhöhen.

Im angetriebenen Wagen befindet sich die Traktionsbatterie, während sich im antriebslosen Wagen die Klimabatterie befindet. Es werden verschiedene Szenarien für den Betrieb betrachtet. Dazu werden folgende Variablen betrachtet:

Temperatur: Die Temperatur hat auf zwei Arten Einfluss auf die Batterieladung : Zum einen ist bei kalten Temperaturen viel Heizenergie nötig und an heissen Tagen viel Klimaleistung. Zum anderen kann bei heissen Temperaturen nur ein begrenzter Strom aus der Zugsammelschiene gezogen werden.

Rangieren: Die Anzahl Rangierfahrten bestimmt sehr direkt den Ladezyklus der Batterie. Im Normalbetrieb kommt diese nicht an ihre Grenze. Es kann aber durchaus sein, dass ausserordentlich rangiert werden muss und die Batterie stärker beansprucht wird.

Als Grundlage dient die Strecke von Interlaken Ost nach Roma Termini. Es wird das Verhalten eines Moduls auf dieser Strecke betrachtet. Eine Zusammenfassung aller Szenarien befindet sich in Tabelle 5.3.

Simulationsreihen	T [°C]	Rangierszenario
Temperatur	25	
	35	normal
	-20	
Rangieren	25	normal
		ausserordentlich
	35	normal
		ausserordentlich

Tabelle 5.3: Simulationsszenarien für die Batteriezyklen. Rangierszenario „normal“ bedeutet Rangieren gemäss Betriebskonzept. Rangierszenario „ausserordentlich“ bedeutet zusätzliches Rangieren in Brig und Mailand.

Das Rangierszenario *normal* bedeutet das Rangieren gemäss Rangierkonzept von Interlaken bis Rom mit einer zusätzliche Rangierbewegung in Mailand, um die Lok im Sackbahnhof freizugeben. Das Szenario *ausserordentlich* beinhaltet weiterhin je eine zusätzliche Rangierbewegung des Moduls in Brig, Mailand und Rom. Weiter werden folgende Parameter angenommen:

- Der Energieverbrauch der Module während der Fahrt mit einer Lok wird gemäss UIC 550 [70] in Abhängigkeit der Temperatur angenommen.
- Der Energieverbrauch während der selbstständigen Fahrt wird als 17.5 W h km/t angenommen. Dieser Wert wurde mithilfe einer Matlab-Simulation des Fahrzeugs ermittelt.
- Der Energieverbrauch im Stand des angetriebenen Wagens ist gemäss Kapitel 2.3 17.9 kW h/h.
- Beim Rangieren und in Bahnhöfen ist die Klimaleistung auf 10 kW/h begrenzt.
- Der zulässige Strombezug aus der Zugsammelschiene wird gleichmässig auf alle gekoppelten Module verteilt. Der totale Strom basiert auf UIC 552 [25].
- Es wird angenommen, dass die Trägerzüge stets aus sieben Modulen respektive 14 Wagen bestehen.

Um die Ladezyklen zu berechnen, wurde eine Matlab-Simulation der Strecke durchgeführt. Die Ergebnisse sind im folgenden Abschnitt dargelegt.

Ladezyklen über die Strecke in Abhängigkeit der Temperatur

Die Resultate der Simulation in Abhängigkeit der Temperatur sind in den Abbildungen 5.5 und 5.6 zu sehen.

Es ist gut zu erkennen, dass die Traktionsbatterie von der Grösse her bei normalem Rangieraufwand den Anforderungen ohne Weiteres genügt. Es wird sogar nur knapp die Hälfte der verfügbaren Kapazität benötigt.

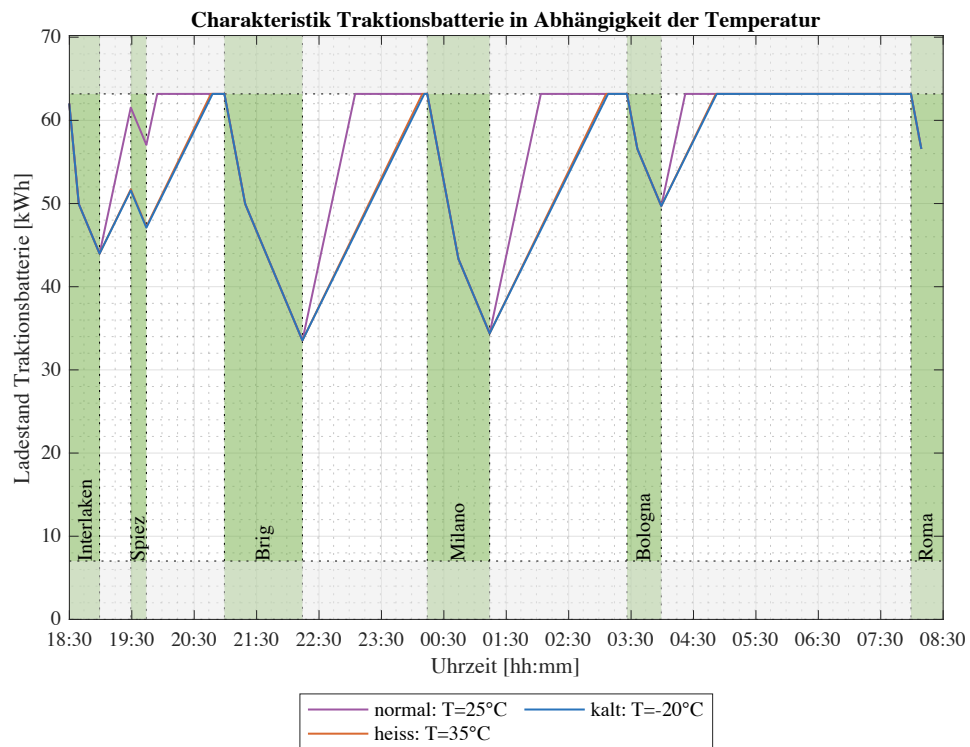


Abbildung 5.5: Lade-/ Entladecharakteristik der Traktionsbatterie in Abhängigkeit der Temperatur auf der Strecke Interlaken – Rom.

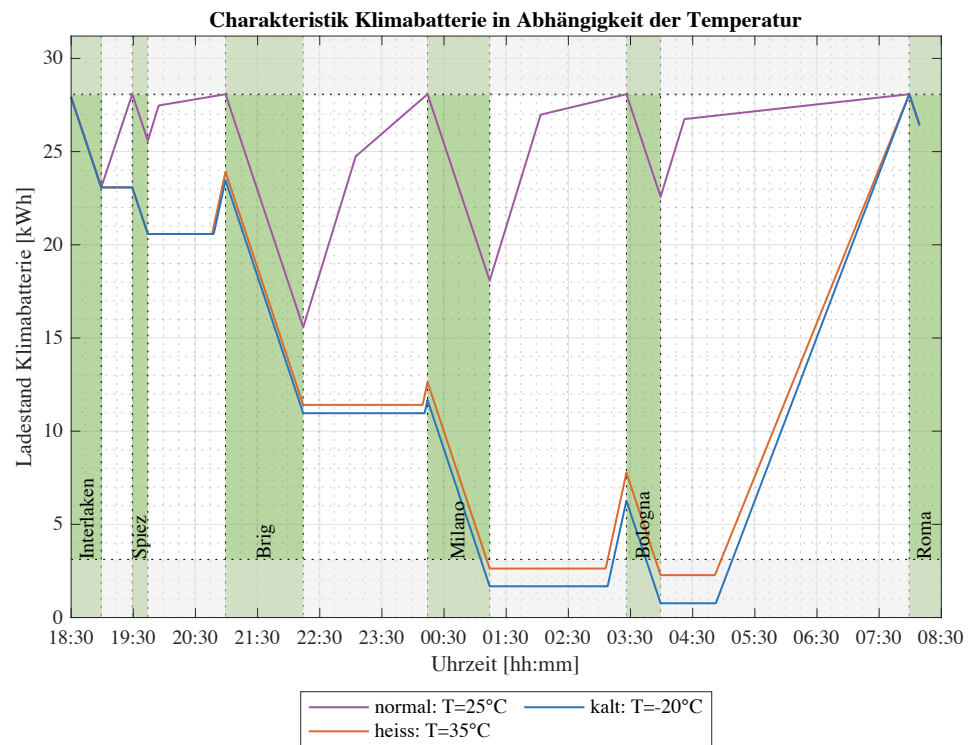


Abbildung 5.6: Lade-/ Entladecharakteristik der Klimabatterie in Abhängigkeit der Temperatur auf der Strecke Interlaken – Rom.

Dies liegt daran, dass der Auslegungsfall der Traktionsbatterie deutlich längere Rangierfahrten und mehr Standzeit vorsieht, als auf dieser Linie benötigt werden. Der Einfluss der Temperatur kann in den Ladephasen am besten erkannt werden. Bei heißen Temperaturen darf aus der Zugsammelschiene nur wenig Strom bezogen werden. Die Batterie muss langsamer geladen werden, da der Strom nicht mehr für alle Wagen eine schnelle Ladung zulässt. Ist es hingegen kalt, kann sogar mehr Strom bezogen werden. Das Heizen ist energieintensiver als das Klimatisieren. Deshalb kann auch hier nur langsam geladen werden und die Kurven decken sich beinahe. Das bedeutet, dass sich beide Effekte, mehr Strom aus der Zugsammelschiene und mehr Heizleistung, in etwa die Waage halten. Bei 25 °C hingegen kann mit der maximalen Ladeleistung von 0.5 C geladen werden.

Extremer ist die Situation bei der Klimabatterie. Bei 25 °C wird die Batterie zwar auch nur zur Hälfte ihrer Kapazität verwendet, aber bei heißen oder kalten Temperaturen wird mehr als das volle Spektrum genutzt. Das heisst, dass in diesen Fällen die Komfortanlagen gedrosselt werden müssen oder weniger Module mitgeführt werden dürfen. Die Fälle heiss und kalt sind auch hier wieder beinahe deckungsgleich. Das stimmt auch mit der Beobachtung bei der Traktionsbatterie überein. Der Grund für die grosse Entladetiefe ist, dass die Klimabatterie häufig nicht geladen werden kann, weil die Traktionsbatterie, welche Vorrang hat, die volle Leistung bereits bezieht. Folglich kann die Klimabatterie nur auf langen Strecken, wie zum Beispiel zwischen Bologna und Rom, kräftig geladen werden. Nach Mailand ist hingegen beinahe die ganze Kapazität erschöpft.

Ladezyklen über die Strecke in Abhängigkeit des Rangierszenarios

Im zweiten Szenario wurden die Rangierszenarien verändert. Als Grundlage dient weiterhin das gleiche Szenario wie in den Temperatursimulationen. Das ausserordentliche Rangierszenario berücksichtigt weiter einen Umstellvorgang in Brig und zwei zusätzliche Rangierfahrten in Mailand und Bologna. Als weiterer Freiheitsgrad wurde die Temperatur gewählt. Dabei wird zwischen 25 und 35 Grad variiert. Die Batterien sollen so an ihre Grenzen gebracht werden, damit das Limit dieses Konzepts aufgezeigt werden kann. Die Charakteristiken zu diesen Szenarien sind in den Abbildungen 5.7 und 5.8 zu sehen.

Die Traktionsbatteriecharakteristik zeigt auf der einen Seite die beiden bereits bekannten *normalen* Szenarien. Im Vergleich dazu benötigen die *aussergewöhnlichen* Szenarien mit höherer Temperatur einige kWh Energie mehr. Die Batterie befindet sich in Bezug auf die Kapazität jedoch weiterhin nicht in einem kritischen Bereich. Es sind immer noch ca. 15-20 kWh verfügbar. Interessant ist, dass die Traktionsbatterie im Falle einer Temperatur von 35 °C über viele Haltestellen hinaus nicht mehr voll geladen werden kann. Nur vor Brig und vor Rom ist das möglich.

Dieser Umstand führt auch dazu, dass die Klimabatterie bis auf diese Abschnitte gar nicht mehr geladen werden kann. Dies ist gut an der hellblauen Linie erkennbar, welche das Szenario 35 °C und ausserordentlich rangieren darstellt. Der Energieverbrauch ist nicht mehr zu decken. Dies geht darauf zurück, dass die Klimatisierung keine Priorität hat, solange die Traktionsbatterie nicht geladen ist. Vergleicht man die beiden Rangierszenarien bei 35 °C, sieht man, dass die längeren Rangiertätigkeiten dazu führen, dass die Klimabatterie erst später in den Bereich kommt, in dem die Ladegeschwindigkeit reduziert wird. Dadurch wird die Batterie zwar schneller aber weniger schonend geladen.

Ladestrategie

Für die Ladung der beiden Batterien wird je eine Strategie in Matlab entworfen.

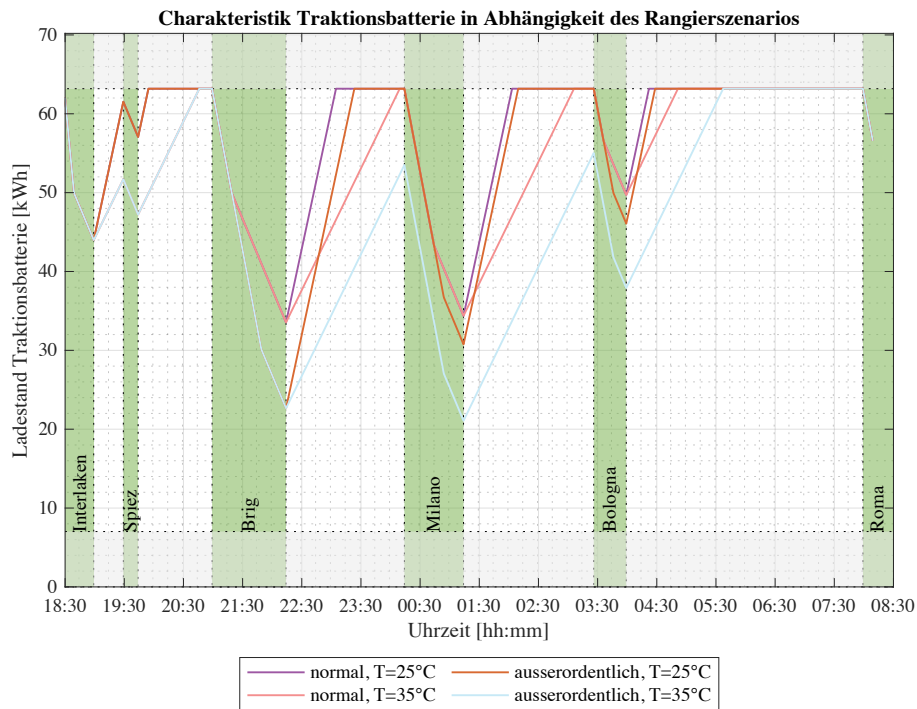


Abbildung 5.7: Traktionsbatteriecharakteristik in Abhängigkeit verschiedener Rangierszenarios. Das Szenario *ausserordentlich* beschreibt einen hohen Zusatzaufwand beim Rangieren.

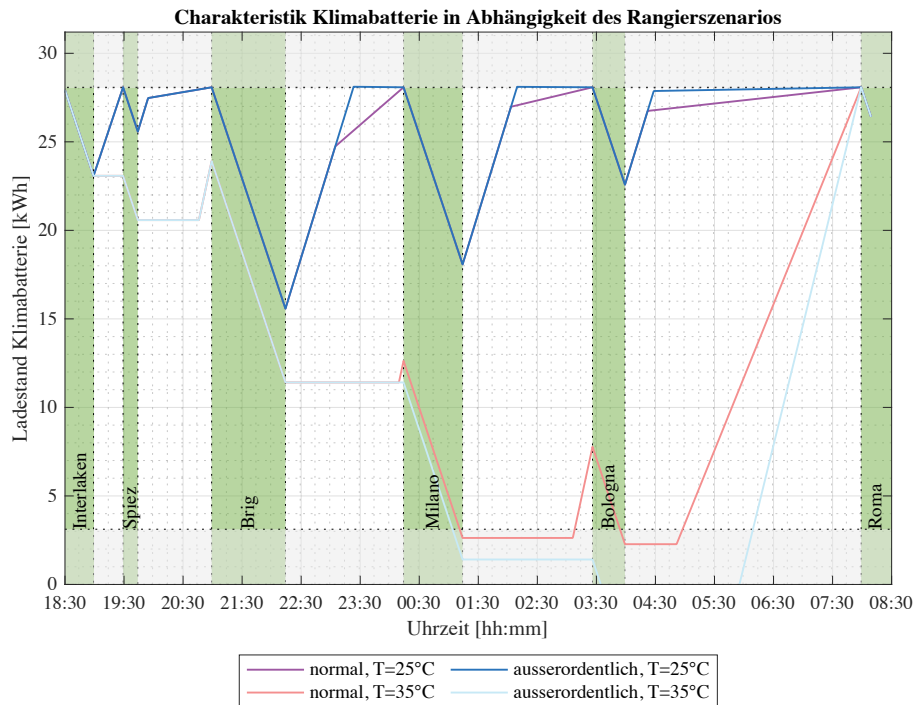


Abbildung 5.8: Klimabatteriecharakteristik in Abhängigkeit verschiedener Rangierszenarios. Das Szenario *ausserordentlich* beschreibt einen hohen Zusatzaufwand beim Rangieren.

Traktionsbatterie: Während der Fahrt unter Fahrleitung wird konstant mit einer Laderate von $C = 0.5$ geladen, bis ein Ladestand von 90 % erreicht ist. Dann wird die Batterie auf diesem Stand gehalten. Ist es nicht möglich die Batterie in einem Streckenabschnitt voll aufzuladen, wird diese bis zum nächsten Bahnhof mit der maximalen Laderate von 0.5 aufgeladen.

Klimabatterie: Die Traktionsbatterie soll jederzeit Priorität über die Klimabatterie haben, um zu verhindern, dass an einem Bahnhof nicht mehr rangiert werden kann. Während die Traktionsbatterie geladen wird, lädt sich die Klimabatterie mit der verbleibenden Leistung auf, jedoch maximal mit 0.5 C. Ist keine Leistung verfügbar, wird sie nicht geladen. Ist die Traktionsbatterie voll, kann die gesamte Energie für die Klimabatterie verwendet werden, jedoch maximal mit der angegebenen Laderate. Danach wird mit den Fahrplandaten extrapoliert, wie viel Fahrzeit, d.h. Ladezeit, bis zum nächsten Halt übrig ist. Aus diesem Ergebnis wird berechnet, mit welcher Geschwindigkeit die Batterie aufgeladen werden soll, so dass sie am Bahnhof voll ist. Dies soll die Batterie schonen und deren Lebenszeit erhöhen. Daraus kann die Situation erwachsen, dass die Batterie schneller geladen wird, wenn weniger Strom von der Zugsammelschiene verfügbar ist, als wenn viel vorhanden ist. In Abbildung 5.8 kann dies beobachtet werden.

Fazit

Das gewählte Betriebskonzept ist mit den ausgelegten Batterien problemlos fahrbar. Die Traktionsbatterie ist auch in Ausnahmefällen stets mit genügend Reserve ausgestattet. Die Klimabatterie benutzt teilweise die gesamte verfügbare Kapazität und muss im Extremfall sogar die Klimaleistung reduzieren. Grundsätzlich könnte anhand dieser Erkenntnis die Traktionsbatterie kleiner dimensioniert werden. Es ist aber durchaus sinnvoll, diese genügend gross auszulegen. Zum einen ist man mit einer grösseren Batterie im Einsatz flexibler und unabhängiger von äusseren Bedingungen, zum anderen sind weitere Rangierfahrten verkraftbar. Weiter haben Batterien generell eine höhere zyklische Lebensdauer, wenn diese mit einer kleineren Entladetiefe betrieben werden. Die gewählte Ladestrategie sichert, dass die Traktionsbatterie stets so voll wie möglich ist. Die Klimabatterie kommt hingegen in Extremszenarios an ihre Grenzen und es sollte hinterfragt werden, wieviel Klimaleistung für das menschliche Wohlbefinden nötig ist. Alternativ könnten auch nur sechs oder weniger Module zusammen mit einer Lok verkehren. Generell ist es vorstellbar, eine optimalere Strategie zu finden. Es gilt aber auch anzumerken, dass es sehr unrealistisch ist, dass über einen Zeitraum von 12 Stunden in der Nacht Temperaturen von über 30 °C oder unter -25 °C herrschen. Wenn dies nicht der Fall ist, wird die Klimabatterie deutlich entlastet.

Zusammenfassend passen Batterien und Betriebskonzept zusammen und sind damit so einsetzbar. Weitere Nachjustierungen sind jedoch bei einem konkreten Entwurf ratsam.

5.3.4 Personal

Ein Betriebskonzept enthält auch eine grobe Personalplanung. Da eine vollständige Disposition den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, werden hier nur die verschiedenen Einsatzgebiete näher erläutert und auf deren Besonderheiten aufmerksam gemacht. Mehr zur Planung findet sich in Kapitel 6. Die verschiedenen Aufgabengebiete können als Rangier-, Lok- und Betriebspersonal zusammengefasst werden.

Rangierpersonal

Obwohl bei den angetriebenen Kurswagenmodulen auf automatische Kupplungen gesetzt wird, kann auf Rangierpersonal nicht verzichtet werden. Die Verwendung der automatischen Kupplung ermöglicht die Reduktion des benötigten Rangierpersonals auf eine Person zur Steuerung der Wagen. Insgesamt kann der Personalaufwand deutlich reduziert werden.

Lokpersonal

Das Lokpersonal wird genau gleich benötigt wie im regulären Eisenbahnverkehr. Auf der Strecke wird immer mindestens eine Person benötigt. Bei zwölf Stunden pro Zuglauf wird jedoch in mehrere Schichten eingeteilt. Am besten findet der Personalwechsel an den Grenzbahnhöfen statt, da dies einfacher mit den lokalen Vorschriften vereinbar ist.

Betriebspersonal

Eine gute Servicequalität ist im Nachtverkehr entscheidend und kann nur mit ausreichend und kompetentem Personal erreicht werden. Es ist üblich, mindestens eine Begleitperson pro Kurswagen für das Wohlergehen der Fahrgäste einzusetzen. Zusätzlich ist pro Zugverband eine Zugchef*in nötig.

5.4 Bewertung der Betriebskonzepte

Dieser Abschnitt fasst die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Entwurf des Betriebskonzepts zusammen. Die Resultate werden kritisch eingeordnet und es werden Handlungsspielräume aufgezeigt. Abschliessend findet ein Vergleich mit bestehenden Nachtzugkonzepten statt, um das vorliegende Betriebskonzept einzuordnen.

5.4.1 Fazit und Zusammenfassung

Ein funktionierendes Nachtzugkonzept muss vielen Anforderungen genügen. Diese reichen von Kundenfreundlichkeit und Sauberkeit bis zu der Nutzung von Synergien und der Disposition von Rollmaterial und Personal. Der spezielle Fokus liegt auf der technischen Einbettung des Konzepts der selbstfahrenden Kurswagenmodule. Dazu gehören die neu machbaren Rangiermanöver aber auch die Batteriecharakteristiken, welche die Manöver ermöglichen.

Liniennetz

Ein auf die angetriebenen Wagen optimiertes Liniennetz beinhaltet deutlich mehr Synergien zwischen verschiedenen Linien. Auch auf relativ kurzen Streckenabschnitten kann sich nun eine Kombination zu einem einzigen Trägerzug lohnen. Das wiederum ermöglicht ein relativ feinmaschiges Netz. Ein Beispiel dafür ist in Abbildung 5.2 zu sehen. Das bedingt jedoch eine höhere Anzahl Rangierfahrten.

Rangierkonzept

Das Rangierkonzept zeigt anhand einer beispielhaften Linie auf, wie der Ablauf betrieblich auszusehen hätte und mit welchen Zeithorizonten und Fahrzeiten zu rechnen ist. Die idealen Fahrzeiten eines Nachtzuges können mit dem neuen Konzept eingehalten werden und bei einer geschickten Wagenreihung bleibt die Anzahl an benötigten Rangierfahrten übersichtlich. So kann der Vorteil des Kurswagenmoduls ausgespielt werden, ohne es an sein Limit zu bringen. In einem nächsten Schritt

könnten alle Linien zusammen in einem grossen, engmaschigen Liniennetz betrachtet werden. Eine weitere Möglichkeit ist das sogenannte Hotelgleis. Es ermöglicht die Nachfrage zu erhöhen, indem unattraktive Ankunftszeiten durch ein Verweilen auf einem solchen Gleis attraktiv gemacht werden.

Batteriezyklen

Die Kurswagenmodule enthalten je zwei Batterien. Eine für die Klimatisierung des antriebslosen Wagens und eine für die Traktion und die Klimatisierung des angetriebenen Wagens. Es wird anhand eines Linienastes aufgezeigt, dass mit der gewählten Traktionsbatterie das Betriebskonzept ohne Probleme fahrbar ist. Dies ist auch bei einer heissen oder sehr kalten Temperatur über einen langen Zeitraum, sowie bei ausserordentlichen Rangiermanövern möglich. Anders sieht es bei der Klimabatterie aus. Normale Rangierszenarien sind bei allen Temperaturen zu fahren, wobei die Leistung geringfügig reduziert werden muss. Bei ausserordentlich heissen Temperaturen und vielen zusätzlichen Rangierbewegungen kann die Klimaleistung nicht mehr bereitgestellt werden. Dies geht auf die Ladestrategie und auf die extreme Wahl des Szenarios zurück, welches dazu diente, die Grenzen aufzuzeigen.

Fazit

Eine Zusammenfassung der Vorteile, offenen Punkten und Herausforderungen befindet sich in Tabelle 5.4.

Vorteile	offene Punkte	Herausforderungen
engmaschiges Netz möglich	bessere Ladestrategie zur Schonung der Klimabatterie	Extreme Temperaturen
Synergien zwischen Linien	normierte automatische Kupplung in naher Zukunft	Verbote in Bahnhöfen für nicht verpendelte Züge
Angenehme Reisezeiten durch Hotelgleis	Mehrsystem-Lok für das gesamte Einsatzgebiet erhältlich und zahlbar	internationale Personalrichtlinien
Effizienz durch weniger Trägerzüge		
deutlich mehr Rangieren möglich		
sinnvolle Fahrpläne einhaltbar		

Tabelle 5.4: Zusammenfassung der wichtigsten Vorteile des Betriebskonzeptes. Weiter werden offene Punkte und Herausforderungen für den Betrieb genannt.

Mit dem gefundenen Betriebskonzept sind die Betriebsabläufe klar und die Fahrzeiten können mit Reserven eingehalten werden. Die Batterien genügen den Anforderungen, ausser in Szenarien, welche extreme Wetter- und Rangierbewegungen kombinieren und unter der maximal möglichen Bespannung einer Lokomotive durchgeführt werden. Grundsätzlich erscheint ein Einsatz dieser Module als machbar. Es bleiben jedoch auch einige offene Fragen und Probleme nicht technischer Natur:

- Das Konzept ist nicht sehr robust gegenüber Störungen, da speziell viele Rangierbewegungen auch viel Fehlerpotential bergen.

- Die Koordinierung des internationalen Personaleinsatzes muss beachtet werden. Oft muss lokales Rangier- und Lokpersonal eingesetzt werden.
- Nicht alle Bahnhöfe, speziell in Italien, sind gemäss ÖBB Personenverkehr für nicht verpendelte Züge anfahrbar.
- Ein Fortschritt bei international normierten Kupplungen wäre hilfreich für das Projekt.

5.4.2 Vergleich zu bestehenden Konzepten

Das Betriebskonzept soll nun in Konzepte anderer Bahnen eingeordnet werden. In Europa ist der wichtigste Nachtnetzanbieter die ÖBB. Ausserdem unterhalten die Ferrovie dello Stato (FS) in Italien ein umfangreiches Netz. Die SNCF unterhält nur ein sehr kleines Netz von Nachtzügen und wird nicht betrachtet. Diese Konzepte werden nun grob in Tabelle 5.5 verglichen.

Es ist zu erkennen, dass die ÖBB ein sehr grosses Liniennetz unterhält. Die genaue Anzahl Linien ist anhand der engen Vermaschung nicht klar zu definieren, total sind aber 28 Äste ausgewiesen. Die Fahrzeiten entsprechen meist den idealen Zeiten. Rangiert wird bei den vermaschten Linien bis zu drei Mal, oft aber weniger. Die FS unterhalten ein sehr dichtes Netz auf der italienischen Halbinsel, reicht aber nicht bis ins Ausland. Dies ist in den 6 Linien mit 14 Ästen zu sehen. Die Fahrzeiten sind auf den Hauptachsen durchaus gut. Auf den langen Relationen nach Sizilien ist die Ankunft aber bereits am späten Nachmittag. Rangiert wird maximal zweimal.

Konzeptvergleich	Kurswagenmodule	ÖBB [80]	FS [81]
Linien	offen	28	6
Äste	offen	-	14
Fahrzeiten	sehr gut	sehr gut	gut
Rangieren	>4	<2	<2
Netzdichte	sehr gut	gut	gut
Fokus	international	international	national

Tabelle 5.5: Vergleich der Liniennetze und der Betriebsabläufe des Konzepts dieser Arbeit mit denjenigen der ÖBB, FS und SNCF.

Im Gegensatz dazu präsentiert sich das vorgestellte Betriebskonzept als äusserst attraktiv. Die Anzahl Linien und Äste sind sehr frei wählbar. Speziell die Anzahl Äste kann dank dem kleinen Aufwand beim Rangieren gross gewählt werden. Die ÖBB kommen am ehesten an die Vorstellung eines eng vermaschten Nachtzugangebots heran. Die enge Vermaschung geht dort jedoch auf Kosten der Fahrzeit, weil viel rangiert wird. Dies wird bei den Kurswagenmodulen minimiert. Das italienische Angebot hat als grösstes Handicap die langen Fahrzeiten. Auch hier kann mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Rollmaterial viel herausgeholt und das Rangieren vereinfacht werden. Auf einem kleinen Netz wie in Frankreich ist der Einsatz der Kurswagenmodule nicht mit einem signifikanten Mehrwert verbunden. Sie würden es jedoch ermöglichen, das Angebot effizient zu machen und bedeutend zu erweitern.

Zusammenfassend sind die Netze im nahen Ausland, bis auf das der ÖBB, stark lokal ausgerichtet. Das neue Betriebskonzept ermöglicht es, ein international orientiertes, höchst engmaschiges Netz effizient aufzubauen und zu betreiben. Dabei müssen keine oder nur wenig Kompromisse bei den Fahrzeiten eingegangen werden.

Kapitel 6

Wirtschaftliche Analyse

Damit ein Betriebskonzept umgesetzt und ein langfristiger Betrieb sichergestellt werden kann, muss dessen Wirtschaftlichkeit sichergestellt werden. Dieses Kapitel beschreibt die Kosten- und Einnahmenstruktur der angetriebenen Kurswagen. Danach wird anhand dieser Informationen eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt. Zum Schluss werden die Ergebnisse diskutiert und eingeordnet.

6.1 Einleitung

Der internationale Schienenpersonenverkehr und insbesondere der Nachtverkehr müssen meist eigenwirtschaftlich betrieben werden. Damit es für ein Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) rentabel ist, ein Netz oder eine Verbindung zu betreiben, muss eine Wirtschaftlichkeitsanalyse durchgeführt werden. In dieser Arbeit werden mithilfe einer Lebenszyklusanalyse die Kosten eines Kurswagenmoduls auf dessen gesamte Lebensdauer berechnet.

Nachtzüge weisen einige speziell kostentreibende Faktoren auf:

- Das Rollmaterial ist relativ teuer, da es sich um Spezialanfertigungen handelt.
- Der Nachtverkehr ist sehr personalintensiv, weil mehr Personal pro Anzahl Fahrgäste vorhanden ist.
- Der Nachtverkehr ist im Betrieb teuer, da das Rollmaterial am Tag wegen Reinigungsarbeiten nicht eingesetzt werden kann.

Aus diesen Gründen ist es besonders wichtig, ein nachhaltiges Betriebskonzept aufzuziehen und eine gut begründete Analyse durchzuführen. In der Vergangenheit wurden verschiedene Nachtzugkonzepte mit beinahe identischen Betriebskonzepten wirtschaftlich unterschiedlich beurteilt. Zur Einordnung der hier erstellten Lebenszyklus-Betrachtung wird diese mit dem Nachtzugkonzept den ÖBB verglichen. Dazu wird dieselbe Analyse mit den Parametern des Nightjet-Netzes parallel durchgeführt. Diese basieren auf einem Interview mit den Verantwortlichen von ÖBB Personenverkehr (siehe Anhang A). Die ÖBB sind in der Lage den Nachtverkehr kostendeckend zu betreiben und sind deshalb eine gute Referenz, um das hier vorliegende Konzept einzuordnen.

Im folgenden Abschnitt werden die Kostenstruktur und die daraus resultierenden Parameter für beide Szenarien genauer vorgestellt.

6.2 Kostenstruktur

Dieser Abschnitt teilt sich in sechs Unterabschnitte auf. Zuerst wird die Berechnung der Trassen- und Energiekosten genauer ausgeführt. Nach der Definition der benötigten Rollmaterial-Reserven werden die Beschaffungskosten und die Unterhaltskosten im Detail dargelegt. Am Schluss wird auf die Personalkosten eingegangen. Die Kosten hängen jeweils von technischen und betrieblichen Faktoren ab und beeinflussen sich teilweise auch gegenseitig. Eine Übersicht über die Kostenstruktur befindet sich in Abbildung 6.1.

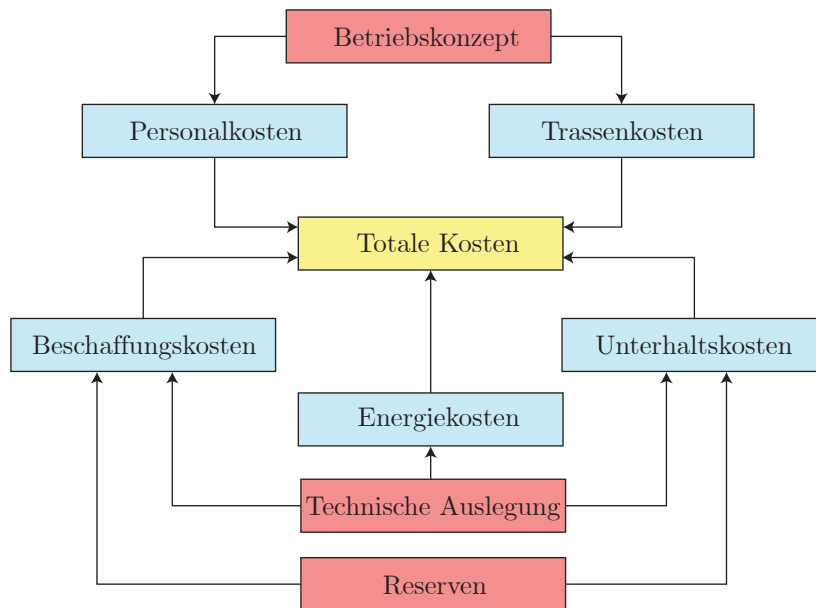


Abbildung 6.1: Übersicht über die Kostenstruktur eines Betriebskonzeptes. Zusätzlich sind die wichtigsten Einflussgrößen auf die Kostenpunkte dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Personal- und Trassenkosten in erster Linie vom Betriebskonzept beeinflusst werden. Die Beschaffungs- und Unterhaltskosten hängen von der technischen Auslegung und der gewählten Rollmaterialreserve ab. Die Energiekosten wiederum sind abhängig von der Auslegung der Kurswagenmodule. Eine detailliertere Beschreibung der einzelnen Komponente wird in den folgenden Abschnitten gegeben.

6.2.1 Trassenkosten

Die Trassenkosten beinhalten die Kosten für die Nutzung der Fahrbahn und werden normalerweise dem Infrastrukturbetreiber vergütet. Der exakte Trassenpreis wird je nach Betreiber sehr unterschiedlich erhoben. In Europa gibt es zahlreiche Trassenpreissysteme. In der Schweiz sind diese Regulierungen und Tarife im *Leistungskatalog Infrastruktur* [82] festgehalten. Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschliesslich das schweizerische Trassenpreissystem verwendet, da es sehr differenziert ist und viele verschiedene Faktoren berücksichtigt, so werden zum Beispiel Zuggattung, Gewicht und Trassenqualität berücksichtigt. In Abbildung 6.2 ist eine Übersicht über das Schweizer Trassenpreissystem und dessen Komponenten dargestellt.

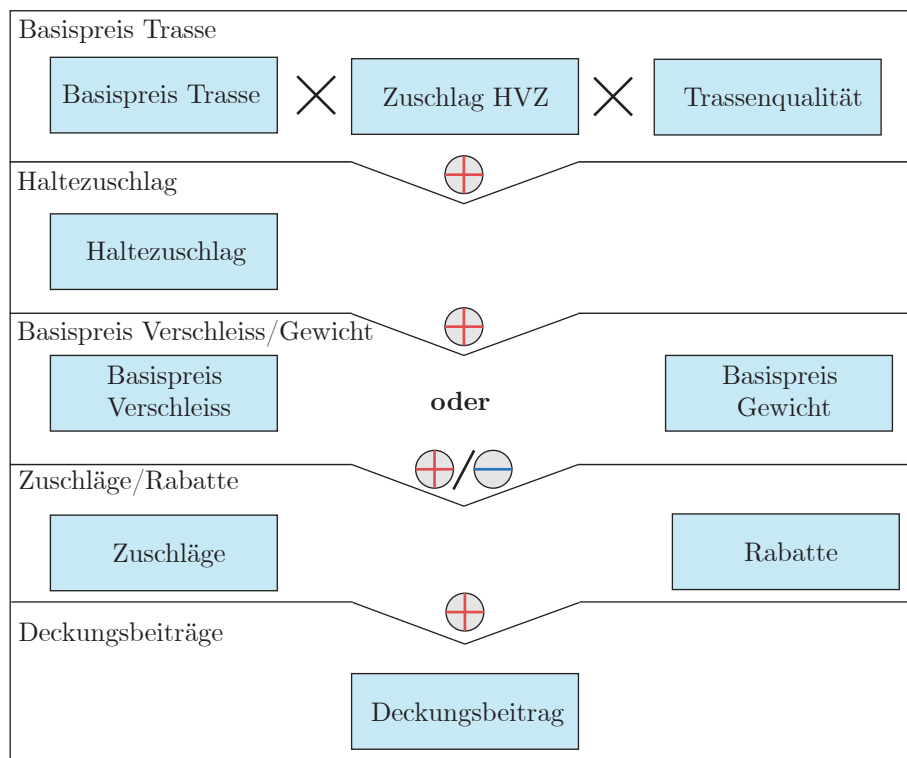


Abbildung 6.2: Aufbau des Trassenpreises in der Schweiz gemäss *Leistungskatalog Infrastruktur* [82]. Die vier verschiedenen Komponenten werden addiert respektive subtrahiert.

Basispreis Trasse

Der Basispreis beschreibt die Qualität und Art der Trasse. So wird die Streckenkategorie und die Trassenqualität berücksichtigt. Ausserdem gibt es einen Zuschlag für die Hauptverkehrszeiten (HVZ). Diese drei Faktoren werden zusammen multipliziert. Für das erarbeitete Betriebskonzept gelten folgende Parameter:

Basispreis Trasse: Der Basispreis P_{Basis} hängt von der Streckenkategorie ab. Es werden ausschliesslich Strecken der Kategorie B benutzt [83]. Dies bedeutet einen Preis von $1.50 \frac{\text{CHF}}{\text{Btkm}}$.

Zuschlag HVZ: Dieser Zuschlag c_{HVZ} berücksichtigt den Umstand, dass Trassen zu den Hauptverkehrszeiten knapp sind. Er fällt nur je nach Strecke an und ist gleich Faktor 2. Auf den Strecken, welche in diesem Konzept gefahren

werden, ist dieser zu den HVZ zu begleichen [84]. Als HVZ gilt alles zwischen 06:00-08:59 und 16:00-18:59.

Trassenqualität: Die Trassenqualität $P_{\text{Qualität}}$ berücksichtigt die Prioritätenregelung gemäss Eisenbahngesetz. Für den nicht konzessionierten Fernverkehr gilt Kategorie C, also ein Faktor von 0.7.

Für den Trassenpreis P_{Trasse} gilt deshalb im Folgenden ein Preis von:

$$P_{\text{Trasse}} = P_{\text{Basis}} \cdot c_{\text{HVZ}} \cdot P_{\text{Qualität}} = 1.50 \frac{\text{CHF}}{\text{Btkm}} \cdot [1, 2] \cdot 0.7 \quad (6.1)$$

Dieser Preis ist identisch für das Vergleichsszenario des Netzes der ÖBB, wenn auf den selben Strecken verkehrt wird.

Haltezuschlag

Für den Halt in einem Bahnhof wird ein Zuschlag von $2.00 \frac{\text{CHF}}{\text{halt}}$ erhoben. Dies gilt zwar grundsätzlich nur in Bahnhöfen mit viel Verkehr, doch in diesem Szenario betrifft es alle angefahrenen Halteorte. Falls ein Zug gestärkt oder geschwächt wird, wird der Zuschlag nur einmal erhoben. In dieser Analyse wird der Zuschlag einmal an allen angefahrenen Bahnhöfen erhoben. Auch dieser Zuschlag unterscheidet sich nicht im Vergleichsszenario.

Basispreis Verschleiss/Gewicht

Der Basispreis Verschleiss berücksichtigt den Fahrbahnverschleiss in Abhängigkeit der Infrastruktur. Der Preis ist je nach Trassierung in verschiedene Kategorien unterteilt. Unter einem Kurvenradius von 1200 m sind diese abhängig vom Radius, über dem Radius hingegen von der Geschwindigkeit. Der Einfachheit halber und weil auf den wenigsten Hauptstrecken Radien unter 1200 m vorkommen, wird in dieser Arbeit nur mit den Geschwindigkeitsbändern gerechnet. Es wird zwischen dem Preis für das Kurswagenmodul und dem Preis für die Zuglok unterschieden. Die Werte müssen pro Fahrzeugeinheit bezahlt werden, d.h. ein Kurswagenmodul zählt als zwei Wagen. Die Parameter werden aus Anhang 1C der Verordnung über den Eisenbahn-Netzzugang (NZV-BAV) des Bundesamtes für Verkehr (BAV) übernommen [85]. Eine Auflistung der Faktoren ist in Tabelle 6.1 zu finden und für das Vergleichsszenario werden dieselben Faktoren verwendet.

Basispreis Verschleiss	0-80 km/h	80-100 km/h	100-120 km/h
Lok (Re 460) [CHF/km]	0.2553985	0.2713608	0.2966504
Wagen [CHF/km]	0.1131772	0.120434	0.1321417

Basispreis Verschleiss	120-140 km/h	140-160 km/h	>160 km/h
Lok (Re 460) [CHF/km]	0.3269567	0.3627587	0.479455
Wagen [CHF/km]	0.1464285	0.1635772	0.2208173

Tabelle 6.1: Faktoren für den Basispreis Verschleiss in Abhängigkeit der verschiedenen Geschwindigkeitsbänder. Es wurden die Fahrzeuge Re 460 und ein Schlafwagen berücksichtigt.

Falls der Basispreis Verschleiss nicht angewendet werden kann, kommt alternativ der Basispreis Gewicht zur Anwendung. Im vorliegenden Fall wird der Preis für Verschleiss verwendet.

Zuschläge und Rabatte

Für diverse Charakteristiken eines Zuges gibt es Zuschläge oder Rabatte. So ist ein Zuschlag für thermische Fahrzeuge zu entrichten oder es wird einem Güterzug Rabatt für besonders lärmarme Laufwerke gewährt. Auf die angetriebenen Kurswagenmodule sind keine dieser Zuschläge oder Rabatte anwendbar. Dasselbe gilt für das ÖBB-Vergleichsszenario.

Zusammenfassend ergibt sich ein Trassenpreis der sich aus variablen und fixen Kosten zusammensetzt. Fix ist der Basispreis. Er hängt nur von den gefahrenen Kilometern ab, da die Streckenkategorie immer als gleich angenommen wird. Nur zur HVZ fällt ein Zuschlag an. Auch der Haltezuschlag ist konstant für alle betrachteten Bahnhöfe. Der Preis für den Fahrbahnverschleiss ist variabel und hängt von den oben erwähnten Geschwindigkeitsbändern ab. Für die Kurswagenmodule und das Vergleichsszenario konnte beim Trassenpreis kein Unterschied festgestellt werden.

Deckungsbeitrag

Zusätzlich zum Trassenpreis fällt ein Deckungsbeitrag an. Mit diesem Beitrag wird ein Teil an die Fixkosten der Infrastruktur bezahlt. Im nicht-konzessionierten Personenverkehr, zu welchem der Nachtverkehr gehört, ist dieser abhängig vom Angebot und beträgt $0.0027 \frac{\text{CHF}}{\text{km}}$.

6.2.2 Energiekosten

Die Energiekosten sind im weiteren Sinne ebenso zu den Trassenkosten zu zählen. Sie sind auch im *Leistungskatalog Infrastruktur* geregelt. Als Basis dient der Energiepreis. Im Unterschied zum öffentlichen Stromnetz ist dieser konstant und auf $0.11 \frac{\text{CHF}}{\text{kWh}}$ festgelegt. Um die verbrauchte Energie zu bestimmen, gibt es zwei Möglichkeiten. Wird der Verbrauch auf dem Triebfahrzeug gemessen, kann dieser Wert verrechnet werden. Ist dies nicht der Fall, werden pauschale Ansätze verwendet. Für einen internationalen Zug mit Rekuperation fällt so ein Verbrauch von $0.0271 \frac{\text{kWh}}{\text{Btkm}}$ an. Der genaue Preis ist weiter von der Tageszeit abhängig. Während in der Nacht ein Faktor von 0.6 dazu multipliziert wird, ist der Strom in den HVZ teurer als der Standardsatz.

Energieverbrauch

Grundsätzlich wird erwartet, dass die pauschalen Sätze für den Energieverbrauch diesen zu hoch ansetzen, um einen Anreiz zu schaffen, den Verbrauch lokal zu messen. Der pauschale Satz berücksichtigt nur eine Abhängigkeit vom Gewicht. Da die Kurswagenmodule schwerer sind als reguläre Wagen, würden mit den pauschalen Sätzen hohe Kosten anfallen. Jedoch ist bei hohen Geschwindigkeiten in erster Linie der Luftwiderstand entscheidend. Dieser ändert sich mit dem höheren Gewicht nur marginal. Deshalb wird es als günstiger erachtet, mit dem selbst berechneten Energieverbrauch zu arbeiten.

Mithilfe der Zuglaufrechnung aus [58] konnte der Energieverbrauch für zwei Geschwindigkeiten berechnet werden. In Tabelle 6.2 ist dies dargestellt. Es fällt auf, dass der Verbrauch bei 160 km/h beinahe identisch zum Pauschalsatz ist. Das bedeutet, dass diese Geschwindigkeit angenommen wird, falls keine eigene Messung stattfindet. Im Fall der angetriebenen Kurswagenmodule kann jedoch von einer tieferen Durchschnittsgeschwindigkeit von 120 km/h ausgegangen werden. Dies hat einen entscheidenden Einfluss auf den Verbrauch, wie aus der Tabelle ersichtlich wird.

Energieverbrauch	120 km/h	160 km/h	Pauschalsatz
Verbrauch [kWh/Btkm]	17.6	27	27.1

Tabelle 6.2: Energieverbrauch in Abhängigkeit der Geschwindigkeit. Zusätzlich ist als Vergleichswert der Pauschalsatz aus dem *Leistungskatalog Infrastruktur* aufgelistet.

Als Basis zur Berechnung diente ein Zug bespannt mit einer BLS Re 465 und zwölf Anhängewagen à je 60 t. Es wird eine Distanz von 100 km gefahren ohne Halt. Zusätzlich sind 20 kW Hilfsbetriebe berücksichtigt.

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Pauschalsätze für diesen Fall tendenziell zu teuer ausgelegt sind. Deshalb wird in der Lebenszyklusanalyse mit dem oben berechneten Wert für 120 km/h gearbeitet. Im Nachtverkehr ist weniger die Geschwindigkeit entscheidend als vielmehr die sinnvolle Einhaltung von Fahrzeiten, wie im Kapitel 5 beschrieben wurde. Diese Werte sind identisch für den ÖBB-Vergleichsfall. Allerdings wird in der Berechnung das kleinere Gewicht bedingt durch den fehlenden Traktionsantrieb kleinere Kosten verursachen.

6.2.3 Rollmaterialreserven

Um einen stabilen Betrieb sicherzustellen, ist es notwendig eine gewisse Reserve an Rollmaterial zu haben. Die Reserven können grob in drei Kategorien unterteilt werden [3]:

Geplante Werkstattreserve: Diese Reserve beinhaltet den geplanten Ausfall von Rollmaterial, also Reparaturen und Instandhaltungen. Wie oft dies notwendig ist, hängt stark von der Qualität der Fahrzeuge ab.

Ungeplante Werkstattreserve: Wie der Name sagt, beinhaltet diese Reserve die ungeplanten Störungen und Ausfälle des Fahrzeugs. Ist ein Wagen defekt, muss jeweils ein ganzes Modul ausser Betrieb genommen werden.

Betriebsreserve: Diese Reserve deckt den Fall ab, dass es Störungen im Betrieb oder technische Störungen an der Anlage gibt. Auch kurzfristige Änderungen im Rollmaterialeinsatz sind denkbar. Um hier flexibel zu sein, ist eine weitere Reserve nötig.

Gemäss obiger Quelle sind diese Reserven ungefähr gleich verteilt. Im Fachgespräch mit den ÖBB zeigte sich, dass die totale Reserve zehn Prozent nicht übersteigt. Aus diesem Grund wird im Folgenden mit einer Reserve von 10% gerechnet. Die Reservenvorhaltung hat einen Einfluss auf die Beschaffungskosten des Rollmaterials, sowie auf die Unterhaltskosten und die Kosten für einen Refit.

6.2.4 Beschaffungskosten

Die Investitionskosten für ein Eisenbahnfahrzeug sind generell hoch. Es müssen zahlreiche hochwertige elektronische und mechanische Komponenten verbaut werden. Die hohen Beschaffungskosten werden jedoch durch die lange Lebensdauer von Eisenbahnfahrzeugen kompensiert. Normalerweise darf eine Zeitspanne von bis zu 40 Jahren angenommen werden [14], wovon auch in dieser Arbeit ausgegangen wird.

Nichts desto trotz spielt die Beschaffung in einer Lebenszyklusbetrachtung eine wesentliche Rolle. Für die angetriebenen Kurswagen wurden diverse Fachexpert*innen aus der Industrie nach ihren Kostenschätzungen für die relevanten Komponenten

gefragt. Aus diesen Daten ist es möglich, eine relativ genaue Kostenschätzung für die Beschaffung der Module aufzustellen. Diese Zusammenstellung sowie die entsprechenden Quellen ist in Tabelle 6.3 zu finden.

Beschaffungskosten	Komponente	Anzahl	Kosten	Quelle
Wagen klassisch	komplett	2	3'000'000	[14, 86]
Antriebsstrang	Fahrmotor	2	10'000	Stadler
	Stromrichter	2	150'000	Stadler
	Übriges	1	<5'000	-
Energieversorgung	Traktionsbatterie	1	100'000	VDE
	Klimabatterie	1	45'000	VDE
	Bordnetz BLG	2	10'000	Stadler
Kühlung / Heizung	Traktionsbatterie	1	40'000	-
	Klimabatterie	1	15'000	-
Kupplung	aut. Kupplung	2	25'000	Voith
	Kurzkupplung	2	5'000	Voith
Pneumatik	Pauschal	1	20'000	-
Leittechnik	Pauschal	2	20'000	-
Abzüge	Alter Stromrichter	2	50'000	-
Total			6'565'000	

Tabelle 6.3: Kostenschätzung für die Beschaffungskosten eines Kurswagenmoduls. Wo kein Quellenverweis vorhanden ist, wurde eine Schätzung getroffen.

Die Kostenzusammenstellung zeigt, dass in erster Linie die neuen Mehrsystemstromrichter und die Traktions- und Klimabatterie die Kostentreiber sind. Komponenten wie Bremssysteme und Leittechnik sind von den Kosten her vernachlässigbar. Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Einmalkosten für die Entwicklung nicht berücksichtigt wurden, da die angenommene genügend hohe Stückzahl diese vernachlässigbar macht. Im Folgenden wird mit Beschaffungskosten von 6'565'000 CHF pro Modul gerechnet. Für das Vergleichsszenario mit ÖBB-Material wird mit 3'000'000 pro Wagen gerechnet (d.h. 6'000'000 für zwei Wagen, was einem Modul entspricht). Hinzu kommen jedoch noch die Kosten für die Triebfahrzeuge. Für eine Mehrsystemlok muss mit weiteren ca. 5'000'000 Franken gerechnet werden [3].

6.2.5 Unterhaltskosten

Die Beschaffungskosten sind jedoch nicht alle Kosten, die auf die Lebensdauer für Rollmaterial anfallen. Neben den anfallenden Kosten für die geplanten und ungeplanten Unterhaltsarbeiten ist es notwendig, nach der halben Lebensdauer ein umfassendes Refit zu machen. Dann müssen neben den elektrischen Komponenten auch die mechanischen Konstruktionen ertüchtigt werden. Gemäss [14] kann von Unterhaltskosten von ungefähr einem Drittel der Beschaffungskosten über die Lebensdauer ausgegangen werden. Hinzu kommen die Kosten für das Refit. Hier wird mit ungefähr der Hälfte der Beschaffungskosten gerechnet. Wichtig im vorliegenden Fall ist, dass die Batterie nur eine Lebensdauer von 20 Jahren hat und danach ebenfalls ausgetauscht werden muss. Die Kostenzusammensetzung für die Unterhaltskosten sind in Tabelle 6.4 dargestellt. Es ist wichtig zu beachten, dass diese Kosten über die gesamte Lebensdauer verteilt anfallen und deshalb in ihrer Dimension zu relativieren sind. Für das ÖBB-Vergleichsszenario fallen diese Kos-

Unterhaltskosten	Kosten pro Modul [CHF]
Unterhalt	2'200'000
Refit plus Batterien	3'280'000 145'000
Total	5'770'000

Tabelle 6.4: Kostenzusammenstellung der Beschaffungskosten. Sie setzen sich aus Unterhalt und Refit zusammen. Speziell für die Kurswagenmodule ist die Batterie, die beim Refit komplett ersetzt werden muss.

ten proportional zu den Beschaffungskosten ebenfalls an. Bedingt durch die tieferen Beschaffungskosten werden auch die Unterhaltskosten tiefer sein. Ausserdem muss keine Traktionsbatterie oder Klimabatterie ersetzt werden.

6.2.6 Personalkosten

Als letzter Teil der Kostenstruktur sind die Personalkosten zu nennen. Der Nachtzugverkehr zeichnet sich dadurch aus, dass er einen sehr hohen Personalaufwand im Vergleich zu konventionellem Schienenverkehr aufweist. So fällt Personal in drei Bereichen an:

Lokpersonal: Jeder Zugverband braucht zu jedem Zeitpunkt Lokpersonal. Es wird davon ausgegangen, dass auf einer Leistungsbasis abgerechnet wird. Das heisst, dass der Lohn pro Stunde effektiven Betriebs verrechnet wird. Reserven und Piquet werden nicht berücksichtigt.

Rangierpersonal: Wenn ein Zug umgestellt werden soll, ist eine Rangierequipe nötig. Eine Rangierequipe besteht klassisch aus zwei bis drei Personen plus Rangierlokfürher. Bei den Kurswagenmodulen wird keine Rangierlok benötigt, sondern automatisch gekuppelt. Nur eine Person zum Führen der Module wird eingesetzt.

Kundenbetreuung: Jeder Kurswagen benötigt eine Schaffner*in. Zusätzlich braucht es eine Zugchef*in.

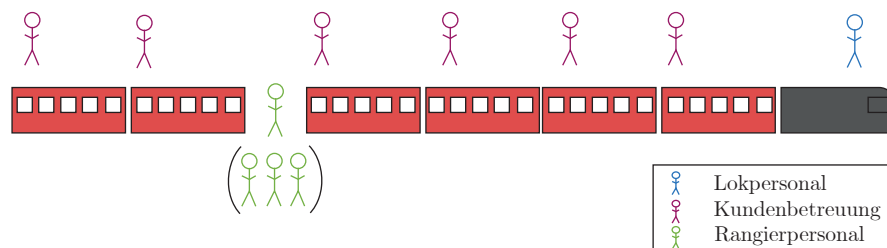


Abbildung 6.3: Schematische Übersicht des Personaleinsatzes in einem Zugverband. Die verschiedenen Aufgaben sind einem Einsatzort zugeordnet. Das eingeklammerte Rangierpersonal wird nur nötig, wenn nicht die angetriebenen Kurswagenmodule eingesetzt werden, wie zum Beispiel bei den ÖBB.

Eine schematische Darstellung des Personalbedarfs findet sich in Abbildung 6.3. Was den Kostenansatz der verschiedenen Berufsgattungen angeht, wird wie folgt vorgegangen:

- Ein Zugchef oder eine Lokomotivführerin kostet pro Jahr ca. 200'000 Franken.
- Eine Rangierarbeiterin oder ein Schaffner kostet 100'000 Franken pro Jahr.
- Rangierpersonal kostet pro aktive Arbeitsstunde 60 CHF, wie aus einem Fachgespräch herausgefunden werden konnte.

Für das Vergleichsszenario der ÖBB sieht der Personalbedarf im Bereich Lok- und Fahrgastbetreuungspersonal identisch aus. Der Unterschied befindet sich beim Rangieren, wo die ÖBB eine volle Equipe von drei bis vier Personen benötigt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Kosten für die Kurswagenmodule einem klassischen Konzept stark ähneln. Ein Unterschied zugunsten des klassischen Konzepts findet sich bei Beschaffung und Unterhalt. Bei den Personalkosten hat das Kurswagenmodul die Nase vorn. Im Gesamten wurde die Kostenstruktur vorgestellt und die Parameter definiert und begründet, die in der Lebenszyklusanalyse verwendet werden. Im nächsten Kapitel wird die Einnahmestruktur näher erläutert.

6.3 Einnahmen

Der Kostenseite stehen die Einnahmen entgegen. Ertrag kann in erster Linie aus dem Erlös aus Billettverkäufen erzielt werden. Diese sind wiederum von der Nachfrage und vom Fahrpreis abhängig. Eine Übersicht über die verschiedenen Abhängigkeiten befindet sich in Abbildung 6.4. Im diesem Abschnitt werden die Faktoren,

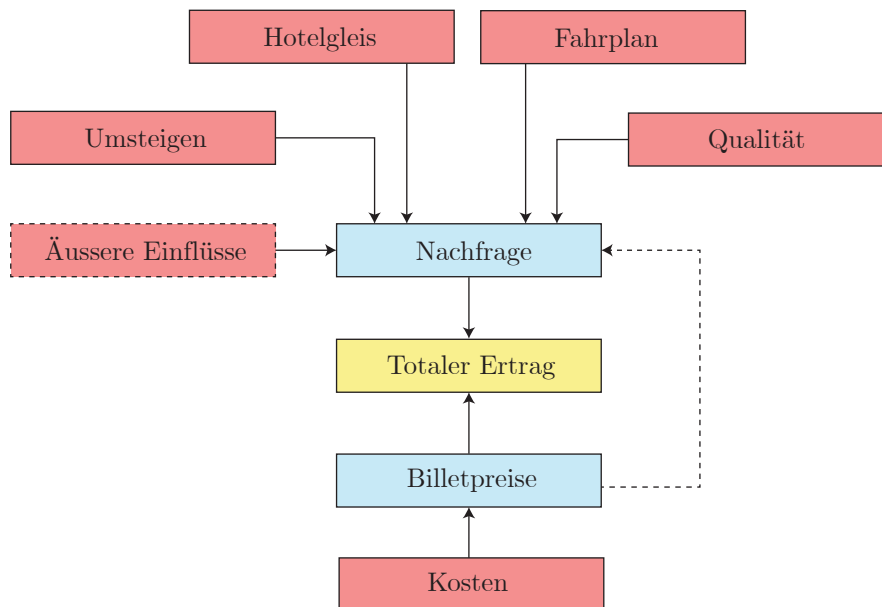


Abbildung 6.4: Übersicht über die verschiedenen Einflussfaktoren auf den Ertrag des Betriebskonzeptes. Die gestrichelten Pfade und Faktoren werden in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt.

welche den Ertrag beeinflussen genauer erläutert und es wird dargelegt, wie diese in der Lebenszyklusanalyse berücksichtigt werden.

6.3.1 Nachfrage

Die Nachfrage ist eine sehr volatile Grösse, die von vielen, schwer kontrollierbaren Faktoren abhängt. Auf einige soll nun etwas näher eingegangen werden.

Fahrplan: Der Fahrplan ist entscheidend für ein attraktives Angebot. Wichtig ist ein Ablauf der Nachtzugfahrt gemäss Abbildung 5.1. Vor allem die Ankunftszeit am Morgen spielt gemäss dem Interview mit den ÖBB eine grosse Rolle. Eine Verbindung muss früh ankommen, aber nicht mitten in der Nacht. Das ist die wichtigste Marktlücke für den Nachtzug. Weniger entscheidend ist die Abfahrt am Abend. Wird auf diese Umstände Rücksicht genommen, kann eine hohe Nachfrage erreicht werden.

Umsteigen: Jedes Umsteigen führt zu einer gefühlten Verlängerung der Reisezeit um eine Stunde [37]. Nicht zu vergessen sind die unterbewussten Faktoren wie Stress und Unsicherheit. Die Nachfrage nach einer Verbindung kann also erhöht werden, indem direkte Kurswagen angeboten werden.

Qualität: Ein sauberes, komfortables und gepflegtes Reisemittel erhöht die Nachfrage. Nachtzüge weisen im Vergleich zum Flugzeug relativ viel individuellen Platz und einen hohen Komfort auf. Durch die Bereitstellung verschiedener Wagenklassen kann auch ein differenzierteres Preismodell für verschiedene Kunden angeboten werden.

Hotelgleis: Das Hotelgleis ermöglicht es, attraktive Ankunftszeiten an Bahnhöfen zu erreichen, welche zu ungünstigen Zeiten angefahren werden. Nach einer frühen Ankunft kann ein Kurswagenmodul auf einem Hotelgleis ausharren und am Morgen im Bahnhof die Fahrgäste entladen. Dies erhöht oder kreiert eine Nachfrage auf Relationen, die durch einen Nachtzuglauf bisher unattraktiv kurz waren.

Billettpreis: Der Preis für die Nachtzugfahrt beeinflusst die Nachfrage. Für den sehr hohen Komfort sind Kunden bereit mehr zu zahlen als zum Beispiel für einen Fernbus. Werden die Preise jedoch zu hoch, sinkt die Nachfrage. Dem kann mit verschiedenen Wagenklassen entgegengewirkt werden. Es gilt jedoch zu beachten, dass extrem preissensitiven Kunden keine sinnvolle Zielgruppe für ein Nachtzugkonzept sind, da neben dem Preis andere Vorteile des Nachtzuges keine Auswirkung auf deren Verhalten haben.

Äussere Faktoren: Unvorhergesehene Ereignisse wie Streckensperrungen können einen grossen Einfluss auf das Reiseverhalten der Kunden haben und die Nachfrage beeinflussen.

Bei der Erstellung des Betriebskonzepts wurde speziell darauf geachtet, dass mit umsteigefreien Verbindungen inkl. Hotelgleis, attraktivem Fahrplan und hoher Qualität ein gutes Konzept mit einer tendenziell höheren Nachfrage erstellt wird. Aus der Nachfrage folgt zusammen mit dem Betriebskonzept (Angebot) die Auslastung. In einem realistischen Szenario kann von einer Auslastung von etwa 66 % für Schlaf- und Liegewagen ausgegangen werden [87].

Für das Konzept der angetriebenen Kurswagenmodule wird von einer möglichen Erhöhung der Auslastung auf bis zu 80 % ausgegangen. Das Ziel der Lebenszyklusanalyse ist jedoch zu erfassen, welche Auslastung erreicht werden muss, damit das Betriebskonzept rentabel ist. Für das Vergleichsszenario mit den ÖBB wird der Standardsatz von 60 % für die Auslastung verwendet.

6.3.2 Fahrpreise

Der am einfachsten zu kontrollierende Parameter auf Ertragsseite ist der Billettpreis. Im internationalen Fernverkehr wie auch bei Nachtzügen gibt es ein relativ umfangreiches Preissystem. Neben den Grundpreisen für bestimmte Wagenklassen kann für eine tiefere Belegung der Abteile mehr verlangt werden. Diese Preise sind jedoch fix für die definierten Kategorien. Ein anderer Ansatz ist die Verwendung eines Preisansatzes pro Kilometer. Dies ist zum Beispiel bei den SBB im Fernverkehr der Fall [88].

Für die Lebenszyklusanalyse ist ein kilometerbezogener Preis deutlich zweckdienlicher. So kann für die ÖBB der fixe Preis auf die Distanz heruntergerechnet werden. Daraus resultiert deren Kilometeransatz. Dieser Satz ist zusammen mit demjenigen für die Schweiz in Tabelle 6.5 dargestellt. 1. Klasse wird als äquivalent zu Schlafwagen und 2. Klasse als äquivalent zu Liegewagen gesehen. Für diese Arbeit wird

Fahrpreise	2. Klasse [Rp/km]	1. Klasse [Rp/km]
SBB	19.85	34.75
ÖBB	8	12

Tabelle 6.5: Fahrpreise pro Kilometer für den SBB Fernverkehr und ÖBB Nightjet. Die ÖBB-Preise wurden auf den Kilometer umgerechnet.

mit dem Modell der ÖBB gerechnet, um deren Auslastungszahlen als Vergleich benutzen zu können. Somit darf die Rückkopplung des Preises auf die Nachfrage vernachlässigt werden.

6.4 Lebenszyklusanalyse

Das Ziel der Lebenszyklusanalyse ist es, herauszufinden, ob das Konzept der Kurswagenmodule überhaupt wirtschaftlich betrieben werden kann. Dieser Abschnitt zeigt die Resultate der Lebenszyklusanalyse mit den weiter oben dargestellten Parametern. Wichtig für die gesamte Betrachtung ist der Vergleich mit einem Referenzszenario, welches in diesem Fall der ÖBB Nightjet ist. Zuerst wird die Simulation genauer vorgestellt. Danach werden die Kostenstrukturen vorgestellt. Nach der Präsentation der Break-Even-Berechnungen folgt eine Überlegung zur Rendite in Abhängigkeit der Auslastung.

6.4.1 Lebenszyklussimulation

Als Grundlage für die Simulation dienen die in den vorherigen Abschnitten erwähnten Parameter für Kosten und Erträge. Simuliert wird das in Kapitel 5 vorgestellte Betriebskonzept. Zum Verständnis werden die wichtigsten Randbedingungen der Lebenszyklussimulation aufgezählt:

- Es werden alle drei Linien gemäss Abbildung 5.2 parallel simuliert.
- Es wird davon ausgegangen, dass 365 Tage im Jahr in beide Richtungen gefahren wird.
- Es wird pro Linie je Richtung ein Stammzug mit sechs Modulen verkehren (d.h. 12 Wagen).
- Die Rangierszenarien und Fahrzeiten werden sinngemäss vom EN *Romulus* auf die anderen Linien übertragen.

- Das Vergleichsszenario findet auf demselben Netz statt, obwohl die ÖBB diese Linien aktuell nicht alle bedient.
- Auf jedem Streckenabschnitt wird eine Durchschnittsgeschwindigkeit berechnet, welche für die Kosten verwendet wird.

In der Simulation werden alle variablen Kosten in Abhängigkeit von Uhrzeit, Gewicht, Geschwindigkeit und Energieverbrauch berechnet. Die Fixkosten werden am Ende dazugerechnet. Die Einnahmen werden in Abhängigkeit der Auslastung berechnet. Das Angebot gilt hierbei als fix. Am Ende können so sowohl der Break-Even-Punkt als auch die Rendite berechnet werden.

6.4.2 Kostenstruktur

Die totalen Kosten des Betriebskonzepts mit Kurswagenmodulen und klassischen Nachtzug-Garnituren kann in die verschiedenen Komponenten aufgeschlüsselt werden. Diese sind die Trassen-, Energie-, Personal-, Beschaffungs-, Unterhalts- und Refitkosten. Eine Übersicht ist in Abbildung 6.5 zu sehen.

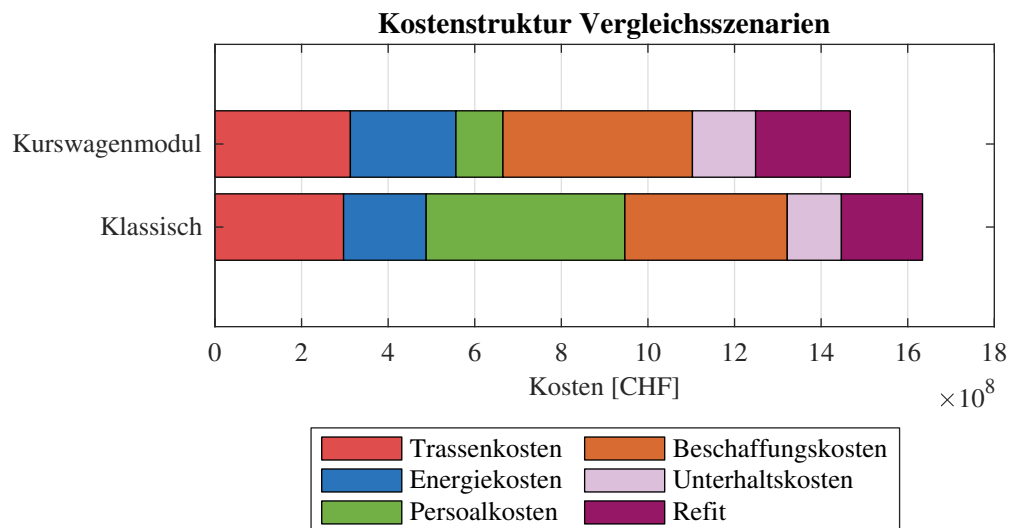


Abbildung 6.5: Kostenstruktur für die angetriebenen Kurswagenmodule und das ÖBB Vergleichsszenario.

Die Abbildung zeigt, dass die grössten Kostenunterschiede der Szenarien bei den Personalkosten zu finden sind. Das hier verwendete Betriebskonzept beruht auf sehr vielen Rangierbewegungen, wobei im klassischen Fall für jede Bewegung eine Equipe von drei bis vier Personen dabei sein muss. Bei den neuen Kurswagenmodulen reicht jedoch eine Person. Da die Rangierkosten die Personalkosten dominieren, hat dies einen starken Effekt auf das Total.

Ein weiterer Unterschied findet sich bei den Energiekosten. Diese sind für die Kurswagenmodule etwas höher. Das lässt sich durch das im Vergleich zu klassischen Wagen höhere Gewicht erklären. In kleinerem Umfang ist dieser Einfluss auch im Trassenpreis zu sehen.

Ebenfalls nur einen geringen Einfluss haben die höheren Beschaffungskosten. Da diese sich um nur 500'000 CHF unterscheiden, fallen sie nicht so stark ins Gewicht. Daraus abgeleitet folgt dasselbe für den Unterhalt und das Refit.

Insgesamt dominieren Beschaffung und Trassenkosten die Kosten beim angetriebenen Kurswagenmodul. Beim klassischen Konzept hingegen überwiegen die Personal- und Beschaffungskosten. Zusammenfassend kann das Kurswagenmodul mit seinen Einsparungen beim Personal den finanziellen Mehraufwand bei Beschaffung, Energie und Trasse kompensieren.

6.4.3 Break-Even-Betrachtungen

In einem nächsten Schritt soll herausgefunden werden, ob und ab wann das Betriebskonzept rentabel wird. Hierfür wird der Break-Even Punkt berechnet. Dazu wurden Ertrag und Aufwand auf die Lebensdauer der Fahrzeuge linearisiert. Die Kosten für die Beschaffung und das Refit wurden zu dem Zeitpunkt hinzugefügt, an dem sie anfallen. Um die Ergebnisse besser einordnen zu können, wurden zwei Szenarien berechnet: Ein realistisches und ein pessimistisches. Ersteres rechnet mit Auslastungen wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben. Das pessimistische rechnet mit einer Auslastung von 40 % für das klassische und mit einer Auslastung von 60 % für das Kurswagenmodul-Szenario. Das realistische Szenario ist in Abbildung 6.6 zu sehen.

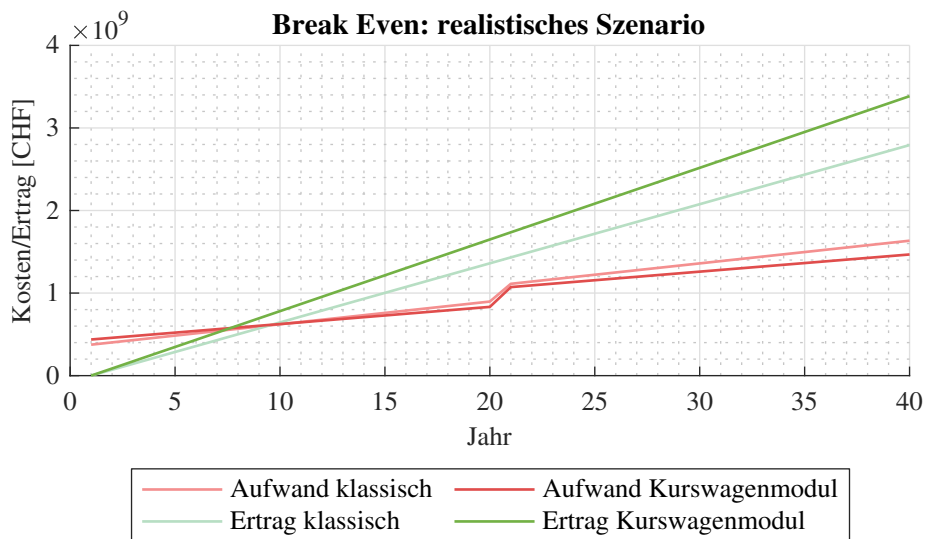


Abbildung 6.6: Break-Even-Kalkulation für das klassische Konzept und das angetriebene Kurswagen-Konzept. Es werden realistische Auslastungen angenommen. Das klassische Konzept erreicht den Break-Even nach zehn Jahren. Das Kurswagenmodul-Konzept nach acht Jahren.

Wie erkennbar ist, erreichen beide Szenarien bereits in der ersten Dekade der Lebensdauer ihren jeweiligen Break-Even Punkt: Das klassische Szenario nach zehn Jahren und das Kurswagenmodul-Konzept nach acht Jahren. Der Unterschied ist nicht sonderlich gross und fällt nicht speziell ins Gewicht. Über die gesamte Lebensdauer rentieren beide Szenarien.

Ein etwas anderes und spannenderes Bild präsentiert sich im pessimistischen Szenario. Dieses ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Das Kurswagenmodul-Konzept erreicht seinen Break-Even-Punkt nach elf Jahren. Das klassische jedoch erst nach 37 Jahren kurz vor Ende der Lebensdauer. Das bedeutet, dass das pessimistische Szenario für das klassische Konzept nur noch knapp rentabel ist, während die Module noch Reserve haben.

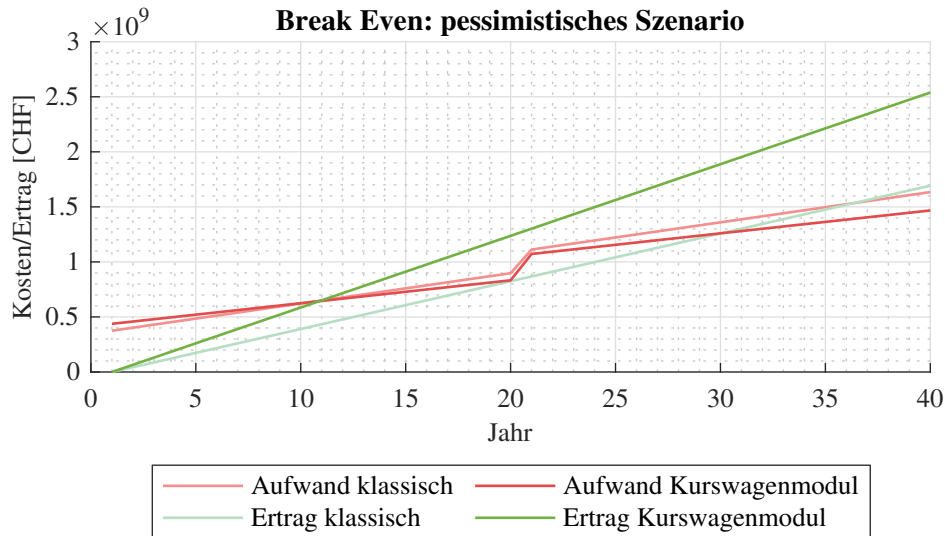


Abbildung 6.7: Break-Even-Kalkulation für das klassische Konzept und das angetriebene Kurswagen-Konzept. Es werden pessimistische Auslastungen angenommen. Das klassische Konzept erreicht den Break-Even nach 37 Jahren. Das Kurswagenmodul-Konzept nach elf Jahren.

Daraus folgt, dass die Module robuster auf Nachfrageschwankungen reagieren. Durch das im Verhältnis attraktivere Angebot, sind sie länger finanziell nachhaltig betreibbar.

6.4.4 Rendite

Im letzten Abschnitt wurde gezeigt, dass die Rentabilität stark von der Auslastung abhängt. In diesem Abschnitt soll untersucht werden, was für einen Einfluss eine Nachfrageschwankung auf die Rendite der beiden Szenarien hat. Dazu wurde die Lebenszyklussimulation für beide Szenarien für Auslastungen zwischen 10 und 100 % durchgeführt. Die Rendite wurde nach folgender Formel berechnet:

$$Rendite = \frac{Ertrag - Aufwand}{Ertrag} = \frac{Gewinn}{Ertrag} \quad (6.2)$$

Die Resultate dieser Simulation sind in Abbildung 6.8 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die angetriebenen Kurswagenmodule generell eine etwas bessere Rendite aufweisen. Bei ganz hohen Auslastungen beträgt dieser Unterschied lediglich noch 4 %. Vergleicht man jedoch die Renditen für die beiden Szenarien von oben, so schliesst das Modul um ca. 15 % besser ab. Bei identischer Auslastung bleiben die Unterschiede aber gering. Insgesamt zeigt sich, dass ein Nachtzugkonzept unter einer Auslastung von 40 % nicht rentabel betrieben werden kann. Mit den Modulen kann generell eine höhere Rendite erreicht werden, auch ohne Berücksichtigung der Unterschiede in der Auslastung.

6.5 Fazit und Diskussion

Nachdem die Resultate verschiedener Lebenszyklus- und Renditenbetrachtungen vorgestellt wurden, folgt nun eine Diskussion und Interpretation der Resultate.

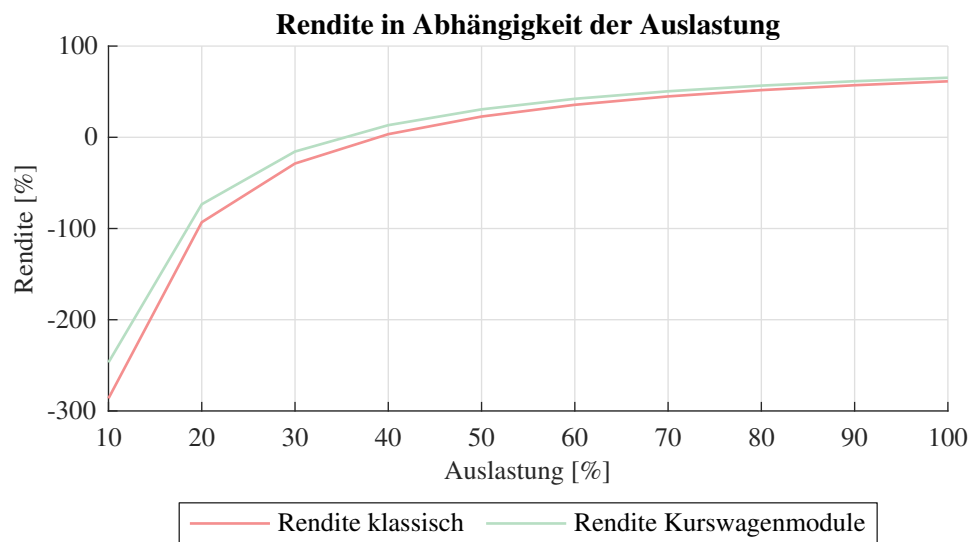


Abbildung 6.8: Renditen des klassischen Zugkonzeptes und des Konzeptes mit angetriebenen Kurswagen in Abhängigkeit der Auslastung der Wagen.

Unter der Annahme, dass die Parameter genügend genau geschätzt wurden, kann festgestellt werden, dass die angetriebenen Kurswagen wirtschaftlich betrieben werden können. Grundsätzlich scheinen die Annahmen solide zu sein, da für das ÖBB-Szenario realistische Werte erzeugt wurden, die sich mit deren Betrieb decken.

Das Kurswagenmodul weist generell eine höhere Rendite auf als das Vergleichsszenario. Dies geht vor allem auf die signifikanten Einsparungen beim Rangieren zurück, welche die Mehrkosten für Beschaffung, Trasse und Energie aufwiegen.

In einem realistischen Szenario wird mit den Modulen in der ersten Dekade der Break-Even-Punkt erreicht, im pessimistischen kurz danach. Die Kurswagenmodule sind deutlich robuster gegenüber Nachfrageschwankungen. Dies vor allem, weil die Module auch im schlechten Szenario eine relativ höhere Auslastung als das klassische Konzept aufweisen. Dies ist entscheidend, weil die Unterschiede bei gleicher Auslastung nur gering sind.

Unter einer Auslastung von 35-40% sind die Module nicht mehr wirtschaftlich zu betreiben. Es muss deshalb im Einzelfall genau geprüft werden, ob eine Linie dies erfüllt. In dieser Analyse wurde nicht berücksichtigt, ob eine explizite Linie eine Nachfrage aufweist. Die Nachfrage wurde nur im Zusammenhang mit betrieblichen und technischen Faktoren berücksichtigt.

Obwohl es aus rein finanzieller Perspektive nicht direkt sinnvoll erscheint in die angetriebenen Module zu investieren, ermöglichen sie aus Sicht der Nachfrage, also der Kunden, ein attraktives Nachtzugangebot, das mehr Verbindungen zu besseren Konditionen bietet. Das wiederum führt zu geringfügig tieferen Kosten. Es ist wichtig zu sehen, dass solche Faktoren zu einer Dynamik und einer stark erhöhten Beliebtheit von Nachtzügen führen können, sodass die Auslastung stark steigen kann. So wird auch die Wirtschaftlichkeit zunehmen. Die angetriebenen Kurswagenmodule können den Nachtverkehr wieder für ein breites Publikum attraktiv machen.

Kapitel 7

Fazit

Kurswagen mit eigenem Hilfsantrieb sind technisch und betrieblich unter den hier dargelegten Randbedingungen einsetzbar. Es wurde eine konzeptionelle, technische, betriebliche und wirtschaftliche Betrachtung durchgeführt.

Konzeptionelle Ebene: Mithilfe der Evaluation verschiedener Fahrzeugentwürfe konnte das einstöckige, zweiteilige Modul als guter Kompromiss zwischen der Anforderung an eine hohe betriebliche Flexibilität und der Minimierung der Anschaffungs- und Betriebskosten gefunden werden. Dies wird auch durch die Konzentration der Antriebsausrüstung auf einem Wagen erreicht. Der Wagen wurde mit einem Motordrehgestell mit zwei angetriebenen Achsen ausgestattet, um eine gute Adhäsionsausnutzung sicherzustellen. Zusätzlich wird durch die Verwendung einer automatischen Kupplung der Rangiervorgang beschleunigt und vereinfacht.

Technische Ebene: In der technischen Auslegung des Fahrzeugs konnte gezeigt werden, dass das Konzept eines Reisezugwagens mit Hilfsantrieb machbar ist. Die Anforderungen an die Module, insbesondere die Erreichung einer Beschleunigung von 0.4 m/s^2 , konnten erfüllt werden. Mithilfe der Einbauplanung wurde gezeigt, dass die zusätzliche Antriebsausrüstung in einem einstöckigen Modul mit einem minimalen Verlust an Passagierkapazität untergebracht werden kann und sich das Zusatzgewicht mit 7 t pro Modul in Grenzen hält. Im Drehgestell ist ausserdem genug Platz für die zwei Fahrmotoren mit je 125 kW Leistung und das Getriebe. Zur Sicherstellung der Energieversorgung werden auf beiden Wagen Batterien auf LTO-Basis installiert. Der angetriebene Wagen ist mit einer Batteriekapazität von 70.2 kWh und der antriebslose Wagen mit 31.2 kWh ausgestattet.

Betriebliche Ebene: Die Kurswagenmodule erweitern den Einsatz von Kurswagen und erhöhen so die Flexibilität in einem Betriebskonzept. Es konnte gezeigt werden, dass viele verschiedene Rangiermanöver möglich sind, ohne Fahrzeitverluste in Kauf nehmen zu müssen. Durch mehr direkte Kurswagen kann die Nachfrage erhöht werden. Weiter wurde aufgezeigt, wie die Kurswagenmodule rangieren müssen, damit alle gängigen Manöver gut und schnell möglich sind. Wichtig ist ausserdem, dass die Traktions- und Klimabatterien für das Betriebskonzept einsetzbar sind. Die Traktionsbatterie hat bewusst Reserven und ist in jedem Szenario einsetzbar. Die Klimabatterie kann in einem Extremszenario aber an ihre Grenzen kommen. Um mehr neue Verbindungen zu schaffen, wird das Hotelgleis vorgeschlagen. Dieses soll es ermöglichen, für zusätzliche Städte ein attraktives Angebot bereitstellen zu können.

Im Vergleich zu bestehenden Konzepten kann mehr rangiert werden und ein engmaschigeres Netz aufgezogen werden.

Wirtschaftliche Ebene: Für die Umsetzbarkeit des Betriebskonzepts ist die Wirtschaftlichkeit sehr wichtig. Es wurde aufgezeigt, dass trotz der höheren Investitionskosten das Kurswagenmodul besser abschneidet als ein klassisches Wagenkonzept, vor allem wegen der Einsparungen bei den Personalkosten. Die Module haben aufgrund des attraktiven Betriebskonzepts eine generell höhere Auslastung bei gleichen Randbedingungen. Bei realistischen Auslastungen erreichen die Module früher den Break-Even Punkt als klassische Nachtzugkonzepte. Auch bei pessimistischen Szenarien sind die Module rentabel, was bei dem klassischen Konzept nicht mehr der Fall ist. Die Kurswagenmodule erreichen bei gleicher Auslastung eine geringfügig bessere Rentabilität als das klassische Konzept. Unter 35-40% ist aber auch dieses Konzept nicht rentabel zu betreiben.

Ausblick

Diese Arbeit konnte viele Punkte und konzeptionelle Fragen zur Machbarkeit von angetriebenen Kurswagen beantworten. Nichtsdestotrotz bleiben einige Punkte offen und dienen als Ansatz zu weiteren Untersuchungen:

- Die Entwicklung eines Fahrmotors speziell für die Anforderungen dieser Anwendung, um weitere Gewichtseinsparungen zu realisieren.
- Die konkrete Realisierung der Leittechnik und die Kompatibilität mit den auf Lokomotiven bereits vorhandenen Systemen wie zum Beispiel der Vielfachsteuerung. Dies beinhaltet die Definition der benötigten Schnittstellen zur Lokomotive und den Wagen. Weitere Themen wie beispielsweise die Türsteuerung, Durchsagen und Notbremse müssen ebenfalls genauer untersucht werden, um die Sicherheit im Betrieb gewährleisten zu können.
- Die Entwicklung von doppelstöckigen Kurswagen mit eigenem Hilfsantrieb für Strecken mit hoher Nachfrage. Bei doppelstöckigen Reisezugwagen ist aufgrund der beengten Platzverhältnisse das Unterbringen der Antriebsausrüstung mit minimalen Einbussen in der Passagierkapazität eine Herausforderung.
- Die Evaluation verschiedener Inneneinrichtungsentwürfe, um den Komfort und die Attraktivität von Nachtzügen weiter zu steigern
- Die Entwicklung eines Steuerwagenmoduls, um eine Verpendelung der Trägerzüge zu ermöglichen.
- Das Funktionieren des Betriebskonzepts hängt stark von der automatischen Bremsprobe ab. Daher soll der Entwicklungsstand geprüft werden und allenfalls selbst ein funktionierendes Konzept entworfen werden.

Zusammenfassend hat diese Arbeit zahlreiche Punkte zur erfolgreichen Realisierung von Kurswagen mit eigenem Hilfsantrieb aufgearbeitet. Insbesondere konnte aufgezeigt werden, dass ein Kurswagenkonzept entgegen den Trends durchaus effizient, attraktiv und rentabel sein kann. Schliesslich wurde auch die technische Machbarkeit unter Beweis gestellt. Grundsätzlich steht einem Wiederaufleben des Kurswagens im Personenverkehr nichts mehr im Weg.

Literaturverzeichnis

- [1] BORMANN, ROBÉR: *Wirtschaftlichkeit von lokbespannten Zügen versus Triebzügen – Untersuchung einer Masterarbeit der ETH Zürich auf Praxistauglichkeit und Abgleich mit der SBB-Flottenstrategie*, 2018. Höhere Fachprüfung Dipl. Manager/in öffentlicher Verkehr, Verband Öffentlicher Verkehr (VöV).
- [2] WALTER VON ANDRIAN: *Ein Rollmaterialkonzept der SBB für das nächste Jahrzehnt*. Schweizerische Eisenbahnrevue SER, 28(7):333, 2006.
- [3] BALLO, LUKAS: *Abgrenzung der Wirtschaftlichkeit von lokbespannten Reisezügen gegenüber Triebzügen*. Diplomarbeit, ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, 2016.
- [4] SCHWEIZERISCHE BUNDESBAHNEN SBB: *Unsere Züge*. <https://www.sbb.ch/de/bahnhof-services/waehrend-der-reise/unsere-zuege.html>. Zugriff: 2020-07-20.
- [5] DVOŘÁK, PAVEL: *Wagenreihungen 2020 - ÖBB NJ*. <https://www.vagonweb.cz/razeni/razeni.php?zeme=0eBB&kategorie=NJ&rok=2020>. Zugriff: 2020-07-17.
- [6] OLIVER SCHUMACHER: *Mehr Komfort, mehr Verlässlichkeit, mehr Platz: Deutsche Bahn stellt neuen Fernverkehrs zug „ECx“ vor*. https://www.deutschebahn.com/resource/blob/3932958/6fc79419d625d9c1756fcb30e5dd8b79/Themendienst_ECx-data.pdf. Zugriff: 2020-07-20.
- [7] RUSSIAN RAILWAYS RZD: *High Speed Trains – Strizh*. <https://eng.rzd.ru/en/9873/page/103290?id=18021#main-header>. Zugriff: 2020-07-20.
- [8] ENNING, MANFRED: *FlexCargoRail – Effizient und ökologisch von der ersten bis zur letzten Meile: Definitionsprojekt und Ausblick*. Braunschweiger Verkehrskolloquium, 2008.
- [9] PFAFF, RAPHAEL und MANFRED ENNING: *Güterwagen 4.0 – Der Güterwagen für das Internet der Dinge. Teil 2: Ausgewählte technische Aspekte und Prozesse*. ETR, 66(5):74–77, 2017.
- [10] WIJNAKKER, SIMON: *Siemens: A built-in shunting module for passenger coaches*. <https://railcolornews.com/2016/09/30/innovation-shunting-coaches-without-locomotive/>. Zugriff: 2020-07-18.
- [11] FILIPOVIĆ, ŽARKO: *Elektrische Bahnen - Grundlagen, Triebfahrzeuge, Stromversorgung*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 5. Auflage Auflage, 2015.
- [12] OMLIN, ADRIAN: *Antriebssysteme I*. Vorlesungsskript, 2018. ETH Zürich, Power Electronic Systems Laboratory.

- [13] BOMBARDIER TRANSPORTATION: *TWINDEXX Swiss Express IC200*. https://www.swissdosto.ch/files/media/files/f5c1117cb9b6ee764056997b8b818d72/20200317_12012_TWINDEXX-Swiss-Express-IC200_fs_de_screen.pdf, 2020.
- [14] MEYER, MARKUS: *Eisenbahnsystemtechnik I*. Vorlesungsskript, 2018. ETH Zürich, Power Electronic Systems Laboratory.
- [15] FRIEDRICH, HORST und MARIO FALABRETTI: *Alternative Antriebskonzepte für Rangier- und Baufahrzeuge der Schweizerischen Bundesbahnen SBB*, 2015. Abschlussbericht BAV Vorstudie.
- [16] SCHEIER, BENEDIKT, HOLGER DITTUS, MATHIAS BÖHM und CHRISTIAN MEIRICH: *Stand der Technik von Antriebskonzepten für Rangier- und Streckenlokomotiven*. ETR, 67(12):51–56, 2018.
- [17] KLEBSCH, WOLFGANG, PATRICK HEININGER und JONAS MARTIN: *Alternativen zu Dieseltriebzügen im Schienenpersonennahverkehr – Einschätzung der systemischen Potenziale*. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., 2019.
- [18] METRO REPORT INTERNATIONAL: *ABB targets battery traction applications*. <https://www.railwaygazette.com/long-reads/abb-targets-battery-traction-applications/55496.article>, 2019.
- [19] KLEBSCH, WOLFGANG, PATRICK HEININGER, JAN GEDER und ANDREAS HAUSER: *Batteriesysteme für Schienentriebzüge – Emissionsfreier Antrieb mit Lithium-Ionen-Zellen*. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., 2018.
- [20] STADLER RAIL AG: *Stadler: Erfolge in Norddeutschland – erstmals "Flirt Akku" bestellt*. Schweizerische Eisenbahnrevue SER, 41(8-9):413, 2019.
- [21] KLEIN, SVEN: *Fragen zur Nachlade-Infrastruktur von Batteriezügen*. Schweizerische Eisenbahnrevue SER, 42(2):83, 2020.
- [22] COOP GENOSSENSCHAFT: *Weltweit erster Wasserstoff-LKW mit Anhänger, der die LKW-Anforderungen für die Coop-Logistik erfüllen kann*. https://h2energy.ch/wp-content/uploads/2017/06/Factsheet_Lastwagen_D.pdf, 2016.
- [23] STADLER RAIL AG: *Wasserstoff-Flirt für die USA*. Schweizerische Eisenbahnrevue SER, 42(1):40, 2020.
- [24] BELMER, FRANZ, BORIS BENSMANN, TORSTEN BRANDT, CARSTEN CREMERS, MONIKA DEFLINGER, RICHARD HANKE-RAUSCHENBACH, THOMAS GRUBE, ANGELIKA HEINZEL, WILLI HORENKAMP, THOMAS JUNGMANN, STEFAN KAIMER, PAUL KARZEL, MARTIN KLEIMAIER, PHILIPP LETTENMEIER, MARTIN POKOJSKI, GERD SANDSTEDTE, MICHEL SUERMANN, THOMAS VON UNWERTH und ERIK WOLF: *Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeuge – Bedeutung für die Elektromobilität*. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., 2019.
- [25] UIC: *Versorgung der Züge mit elektrischer Energie - Technische Einheitsmerkmale der Zugsammelschiene (ZS)*. UIC Union Internationale de Chemin de Fer, 2005. UIC 552.
- [26] UIC: *Vereinbarung über den Austausch und die Benutzung der Reisezugwagen im internationalen Verkehr*. UIC Union Internationale de Chemin de Fer, 2014. RIC.

- [27] SIEMENS MOBILITY: *Viaggio Classic – Mehrsystem-Komfort-Schlafwagen für RŽD*. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:96179755fe0dd93c31eababaa780a0d53d15959e/viaggio-classic-rzd-german.pdf>, 2012.
- [28] RAIL INDUSTRY SAFETY AND STANDARDS BOARD RISSB: *Coupler and draw gear*. Norm, 2018. AS 7524.
- [29] SCHWAB WABTEC CORPORATION: *Automatic Coupler – Latch Type 10*. Datenblatt, 2018.
- [30] SCHWAB WABTEC CORPORATION: *Semipermanent Couplers*. Datenblatt, 2018.
- [31] ALLENBACH, JEAN-MARC: *Eisenbahntechnik*. Vorlesungsskript, 2014. École Polytechnique Federale Lausanne, Laboratoire de Machines Electriques.
- [32] BINDER, A. und O. KÖRNER: *Was treibt den ICE 3 und den TRANSRAPID?* Vorlesungsfolien, 2018. TU Darmstadt, Institut für Elektrische Energiewandlung.
- [33] IHME, J.: *Schienenfahrzeugtechnik*. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019.
- [34] MEYER, MARKUS: *Eisenbahnsystemtechnik II*. Vorlesungsskript, 2019. ETH Zürich, Power Electronic Systems Laboratory.
- [35] DVOŘÁK, PAVEL: *Wagenreihungen 2020 - EN 50467*. <https://www.vagonweb.cz/razeni/vlak.php?zeme=CD&kategorie=EN&cislo=50467&nazev=&rok=2020>. Zugriff: 2020-07-27.
- [36] DETIG, RAPHAEL: *Eine Zukunft für die Nachtreisezüge in Europa – Leben am Konkurrenzmarkt zwischen HGV, Luft- und Fernbusverkehr*. Diplomarbeit, ETH Zürich, Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme, 2016.
- [37] WALTHER, CHRISTOPH, TANJA SCHÄFER, DANIEL KARTHAUS und WOLFGANG SCHADE: *Schlussbericht – „Entwicklung eines attraktiven europäischen Nachtzugsystems und Potenziale für den Nachtzugverkehr von, nach und innerhalb Deutschlands“*. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, 2017.
- [38] BEAUVAIS, JEAN-MARIE, JONAS FRÖLICHER, SIMON MAARFIELD, NORA MERKEL, WIDAR VON ARX und WEGELIN: *Studie zum internationalen Personenverkehr (Bahn/Bus)*. KCW GmbH, Hochschule Luzern, 2017.
- [39] MÖCKLI, URS: *Positionspapier Nachtzüge*. Pro Bahn Schweiz, 2019.
- [40] ROSEN, PER ERIC: *Night Trains in Europe, 2020*. <http://rosnix.net/~per/tag/night-trains-map/>, 2020.
- [41] STEFAN SCHIRMER: „*Wisst ihr eigentlich, was ihr da tut?*“. <https://www.zeit.de/2017/51/nachtzuege-oebb-deutschland-schweiz-oesterreich/seite-3>. Die Zeit, Zugriff: 2020-07-27.
- [42] SBB, SCHWEIZERISCHE BUNDESBAHNEN: *Vincent Ducrot aktuell. 15.07.2020*. <https://news.sbb.ch/artikel/96918/vincent-ducrot-meinersten-100-tage-als-ceo-und-ein-blick-nach-vorn?printpdf=1>, 2020.
- [43] ANDERSSON, BOSSE und LISA BERGLUND: *Nattågstrafik till Europa*. Trafikverket, 2020.
- [44] WOLFF, WINFRIED: *LunaLiner© – Die neue Nachtzug-Kooperation der Europäischen Bahnen*. Bündnis Bahn für Alle, 2016.

- [45] RELLSTAB, MATHIAS: *Wie die Bahnen den internationalen Verkehr abwürgen*. Schweizerische Eisenbahnrevue SER, 36(7):364, 2014.
- [46] THOMMEN, JEAN-PAUL: *Betriebswirtschaft und Management : Eine managementorientierte Betriebswirtschaftslehre*. Versus, Zürich, 10. Auflage Auflage, 2016.
- [47] MATHWORKS: *Power Series*. <https://ch.mathworks.com/help/curvefit/power.html>. Zugriff: 2020-08-29.
- [48] MATHWORKS: *Least-Squares Fitting*. <https://de.mathworks.com/help/curvefit/least-squares-fitting.html#bqxtsia-1>. Zugriff: 2020-08-19.
- [49] VIDMAR, MILAN: *Der wirtschaftliche Aufbau der elektrischen Maschine*. J. Springer, 1918.
- [50] STARLINGER, ALOIS, REINHARD BÜHL und THOMAS LEGLER: *Das Zulassungskonzept für den EC 250 / Giruno Hochgeschwindigkeitszug*. Stadler Rail Group, 2016.
- [51] MESSNER, MELANIE: *Berechnung des Energieverbrauchs für Triebfahrzeuge*. Diplomarbeit, TU Graz, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, 2014.
- [52] ÖSTEREICHISCHE BUNDESBAHNEN ÖBB: *Bcmz 61 81 59-90*. Typenskizze, 2004.
- [53] DVOŘÁK, PAVEL: *Wagenreihungen 2020 - NJ 446*. <https://www.vagonweb.cz/razeni/vlak.php?zeme=SBB&kategorie=NJ&cislo=466&nazev=&rok=2020>. Zugriff: 2020-08-03.
- [54] SCHWEIZERISCHE BUNDESBAHNEN SBB: *Betriebsvorschrift SBB Verkehr [0.0] – Übersicht der Betriebsvorschriften*. Regelwerk SBB, 2018.
- [55] HITACHI RAIL SPA: *ETR 1000 – The new Frecciarossa*. http://italy.hitachirail.com/en/etr-1000_380.html, 2014.
- [56] BUNDESAMT FÜR VERKEHR: *Schweizerische Eisenbahn – Schweizerische Fahrdienstvorschriften FDV(R 300.1–15)*. Vorschriften BAV, 2016.
- [57] Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation: *Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung AB - EBV*. Verordnungen UVEK, 2016.
- [58] ALEXANDER STAUB: *Ausrüstung eines Schmalspur-Dieseltriebzugs mit Traktionsbatterien*. Semesterarbeit – ETH Zurich: Power Electronic Systems Laboratory, 2019.
- [59] DIN-NORMENAUSSCHUSS FAHRWEG UND SCHIENENFAHRZEUGE (FSF): *Entwurf: Bahnanwendungen – Streckenklassen zur Behandlung der Schnittstelle zwischen Lastgrenzen der Fahrzeuge und Infrastruktur*. Norm, 2020.
- [60] MÜLLER, ANDRÉ: *Wissenschaftliche Bewertung von alternativen, emissionsarmen Antriebskonzepten für den bayerischen SPNV*. Technischer Bericht 2017-EB-008-1, Technische Universität Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List" Institut für Bahnfahrzeuge und Bahntechnik Professur für Elektrische Bahnen, November 2017. Auftraggeber: Bayerische Eisenbahngesellschaft mbH (BEG).
- [61] KLEBSCH, WOLFGANG, NINA GUCKES und PATRICK HEININGER: *Bewertung klimaneutraler Alternativen zu Dieseltriebzügen - Wirtschaftlichkeitsbe-*

- trachtung am Praxis-Beispiel 'Netz Düren'*. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., 2020.
- [62] TSA – TRAKTIONSSYSTEME AUSTRIA: *Product Catalog – Electric motors, generators and gearboxes for rail cars.*, 2016.
- [63] GRADINGER, THOMAS: *Design of Power-Electronics Cooling Systems - Overview and Industrial Applications*. Vorlesungsskript, 2018. ETH Zürich.
- [64] TRAKTIONSSYSTEME AUSTRIA (TSA): *Stadler Rail DMU for FAL Italy*. Zugriff: 26.08.2020.
- [65] ABB SWITZERLAND LTD: *BORDLINE® Battery Module – For high performance applications*. Datenblatt, 2019.
- [66] CICCARELLI, FLAVIO, DIEGO IANNUZZI und PIETRO TRICOLI: *Control of metro-trains equipped with onboard supercapacitors for energy saving and reduction of power peak demand*, Mar 2012.
- [67] KOLAR, PROF. DR. JOHANN WALTER: *Power Electronic Systems II*. Vorlesungsskript, 2019. ETH Zürich, Power Electronic Systems Laboratory.
- [68] TRAKTIONSSYSTEME AUSTRIA (TSA): *Stadler Rail CITYLink for VBK Karlsruhe*. Zugriff: 26.08.2020.
- [69] ABB SWITZERLAND LTD: *BORDLINE® M60-DC-3kV – For passenger coaches*. Datenblatt, 2018.
- [70] UIC: *Elektrische Energieversorgungseinrichtungen für Wagen der Reisezugwagenbauart*. UIC Union Internationale de Chemin de Fer, 2005. UIC 550.
- [71] ABB SWITZERLAND LTD: *BORDLINE® M60-MS-UIC – For passenger coaches*. Datenblatt, 2018.
- [72] DIN-NORMENAUSSCHUSS FAHRWEG UND SCHIENENFAHRZEUGE (FSF): *Bahnanwendungen – Bremsen – Anforderungen an die Bremsausrüstung lokbespannter Züge*. DIN Deutsches Institut für Normung e. V, 2018. DIN EN 14198.
- [73] DÜRR TECHNIK GMBH & CO. KG: *Ölfreie Kompressor-Aggregate – Marathon 4-Zylinder*. Montage- und Gebrauchsanweisung, 2020.
- [74] SCHWARZ, ARMIN: *Detail Scharfenbergkupplung (Schaku) Typ 10 mit obenliegender Elektrokontaktkupplung.*, 2014. Zugriff: 26.08.2020.
- [75] EHRBAR, JÜRIG: *ABe 4/4 9302*, 2016. Zugriff: 26.08.2020.
- [76] ÖSTEREICHISCHE BUNDESBAHNEN ÖBB: *Schlafwagen WLABmz 61 80 72-90*. Typenskizze, 2018.
- [77] ABB SWITZERLAND LTD: *BORDLINE® BC Compact battery charger module for all rolling stock applications*. Datenblatt, 2020.
- [78] JUSTIN SCHOT: *DC 14004 LIQUID-AIR CHILLER*. Datenblatt, 2018.
- [79] ABB SWITZERLAND LTD: *BORDLINE® M45 MS UIC – For passenger coaches*. Datenblatt, 2018.
- [80] ÖBB PERSONENVERKEHR: *Entspannt über Nacht Reisen – Angebot NJ 2020*, 2020.
- [81] TRENITALIA SPA: *IN TRENO ORARIO INTERCITY digitale – 2018/2019*, 2018.

-
- [82] SBB AG INFRASTRUKTUR – FAHRPLAN UND NETZDESIGN: *Leistungskatalog Infrastruktur 2020*, 2020.
- [83] SBB AG INFRASTRUKTUR – FAHRPLAN UND NETZDESIGN: *Basispreis Trasse*, 2017.
- [84] SBB AG INFRASTRUKTUR – FAHRPLAN UND NETZDESIGN: *Nachfragefaktor Hauptverkehrszeiten (HVZ)*, 2017.
- [85] BUNDESAMT FÜR VERKEHR BAV: *Verordnung des BAV über den Eisenbahn-Netzzugang (NZV-BAV)*. <https://www.bav.admin.ch/bav/de/home/rechtliches/rechtsgrundlagen-vorschriften/verordnungen-uek-bav/verkehrstraeger-eisenbahn/nzv-bav.html>, 2019.
- [86] RAMIREZ, MANUEL und CHRISTIAN BÖTTGER: *Neue Nachtzüge: Die ÖBB wollen vorne mit dabei sein*. <https://www.srf.ch/news/wirtschaft/interview-mit-verkehrsexperte-neue-nachtzuege-die-oebb-wollen-vorne-mit-dabei-sein-2>. Zugriff: 2020-08-18.
- [87] STEER DAVIS, GLEAVE und EUROPEAN PARLIAMENT: *Research for TRAN Committee - Passenger night trains in Europe: the end of the line?* Europäisches Parlament – DIRECTORATE-GENERAL FOR INTERNAL POLICIES, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, Transport and Tourism, 2017.
- [88] ALLIANCE SWISSPASS: *T601 – Allgemeiner Personentarif*, 2020.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Häufige Zugkonzepte im Personenverkehr. Die Antriebskomponenten sind rot eingefärbt.	2
1.2	Optimales Einsatzgebiet für die verschiedenen Traktionsarten.	4
1.3	Gemeinsamer Zahnrad- und Adhäsionsantrieb (schematische Anordnung). Der Adhäsionsantrieb ist bei Bedarf auskoppelbar. [11]	6
1.4	Angebotene Nachtzüge in Europa im Jahre 2020. [40]	7
2.1	Darstellung des generellen Aufbaus einer Nutzwertanalyse.	12
2.2	Aufbau der Nutzwertanalyse. Ausgehend von den Eingangsdaten (gelb) werden zuerst die Vorbereitungsschritte (violett), dann die drei Hauptschritte (blau) durchgeführt, was zum Resultat in Form einer Konzeptbewertung führt (grün). Dieser Ablauf wird für jeden Fahrzeugentwurf durchgeführt.	13
2.3	Übersicht über die Ein- und Ausgänge der Energiespeicheranalyse. Die Eingangswerte sind gelb und die Einschränkungen rot eingefärbt. In Grün sind die Resultate der Energiespeicheranalyse dargestellt.	14
2.4	Ein- und Ausgänge der Leistungsanalyse. In Gelb sind die benötigten Eingangsdaten für die Leistungsanalyse dargestellt. Aus diesen Angaben werden die in Grün dargestellten Ausgangsdaten berechnet. Die verwendeten Einschränkungen für die Leistungsanalyse sind rot markiert.	15
2.5	Aufbau der Leistungsanalyse. Mithilfe der Eingangsdaten (gelb) wird die benötigte Leistung und die daraus folgenden Fahrmotor- und Stromrichtergerichte berechnet (blau). Diese Gewichte (grün) haben einen Einfluss auf das Fahrzeuggewicht und die Berechnungen werden wiederholt. Zusätzlich wird das Volumen der Komponenten berechnet (grün).	16
2.6	Darstellung des Gewichts in Abhängigkeit der Leistung der erfassten Stromrichter. Die durchgezogenen Geraden entsprechen den ermittelten und die gestrichelten Linien den optimierten Skalierungsgesetzen, welche für die Nutzwertanalyse verwendet werden. Mit dieser Modifikation werden die resultierenden Stromrichtergerichte anhand der optimalen Auslegungen abgeschätzt.	17
2.7	Abbildung des Stromrichtervolumens in Abhängigkeit der Leistung für alle erfassten Stromrichter. Die Datenpunkte und die resultierenden Volumen-Skalierungsgesetze sind für die wassergekühlten Stromrichter in Blau und für die luftgekühlten Stromrichter in Orange dargestellt. Die für die Abschätzung in der Nutzwertanalyse verwendeten optimierten Skalierungsgesetze sind mit einer gestrichelten Linie dargestellt.	18

2.8	Darstellung der Gewichte in Abhängigkeit der Leistung der betrachteten Fahrmotoren. Die Daten und Resultate der fremdbelüfteten Fahrmotoren sind blau und die Daten und Resultate der eigenbelüfteten Fahrmotoren sind orange gekennzeichnet. Die durchgezogene Linie entspricht den aus den Daten resultierenden Skalierungsgesetzen und die gestrichelte Linie den in der Nutzwertanalyse verwendeten optimierten Skalierungsgesetzen.	20
2.9	Abbildung des Fahrmotorvolumens in Abhängigkeit der Leistung für alle betrachteten Fahrmotoren. Die Datenpunkte und Skalierungsgesetze sind für die fremdbelüfteten Fahrmotoren blau und für die eigenbelüfteten Fahrmotoren orange eingefärbt. Das resultierende Skalierungsgesetz ist mit einer durchgezogenen Linie und das in der Nutzwertanalyse verwendete optimierte Skalierungsgesetz mit einer gestrichelten Linie eingezeichnet.	21
2.10	Übersicht über die Kostenanalyse.	22
3.1	Darstellung des verwendeten Rangierszenarios und der zurückgelegten Strecke für die Bestimmung des benötigten Beschleunigungsvermögens.	27
3.2	Resultate der Rangierszenario-Simulation für verschiedene Anfahrbeschleunigungen. Die Zeit des Referenz-Triebzugs ist in Grün abgebildet und die Zeit, welche der Reisezugwagen maximal benötigen darf, ist rot eingefärbt.	27
3.3	Illustration des definierten Reichweitenszenarios für die Evaluation der benötigten Energiespeichergrösse. Die Streckenlänge beträgt 20 km bei einer Steigung von 0‰ und es sind zehn Halte auf der Strecke vorgesehen. Die Dauer eines Halts beträgt 30 Sekunden.	28
3.4	Darstellung des Geschwindigkeitsverlaufs und der Energiebilanz über die Zeit für ein Beispiel des gesamten Reichweitenszenarios. Der Rückgang in der Energiebilanz kommt durch die Rekuperation während des Bremsens zustande.	29
3.5	Darstellung der betrachteten Fahrzeugvarianten, welche aus Modulen mit bis zu vier Reisezugwagen bestehen. Zusätzlich werden sowohl einstöckige als auch doppelstöckige Module betrachtet. Die Antriebsausrüstung ist rot eingefärbt und befindet sich immer auf einem einzelnen Wagen.	31
3.6	Übersichtsdarstellung des Dieselantriebs. Der hier betrachtete Dieselantrieb besteht aus einem Dieseltank und einem Dieselmotor, welcher über ein Schaltgetriebe mit dem Radsatz verbunden ist. Zusätzlich besitzt der Dieselmotor einen Generator, um die elektrischen Hilfsbetriebe mit Energie zu versorgen. In Grün ist der Energiefluss dargestellt.	35
3.7	Aufbau eines Wasserstoffantriebs. Der Antrieb ist in der Lage, die Bremsenergie in die Traktionsbatterie zu rekuperieren.	36
3.8	Übersichtsgrafik eines Antriebstrangs mit Traktionsbatterie. Der Antrieb besteht aus einer Traktionsbatterie, welche über den Zwischenkreis die Hilfsbetriebe und die Fahrmotoren mit Energie versorgt. Die Energieversorgung der Traktionsbatterie wird über die Batterieladung sichergestellt und kann optimal auf den spezifischen Anwendungsfall ausgelegt werden. In Grün sind die möglichen Energieflüsse dargestellt.	37
3.9	Darstellung der Kühlung bei einem fremdbelüfteten Fahrmotor bestehend aus einem Luftkreislauf, dessen Luftstrom durch einen Ventilator im Fahrzeuginneren erzeugt wird.	40

3.10	Darstellung des Kühlkonzepts eines eigenbelüfteten Fahrmotors. Diese Kühlung besteht aus einem Ventilator, welcher direkt auf der Motorwelle angebracht ist.	41
3.11	Darstellung der Wasserkühlung eines Fahrmotors bestehend aus einem inneren Luft-Kühlkreislauf für die Rotorkühlung und äusseren Wasser-Kühlkreislauf für die Kühlung des gesamten Fahrmotors. . .	42
3.12	Illustration der Kühlung eines IGBT-Moduls. Das IGBT-Modul ist mit Wärmeleitpaste auf einem Kühlkörper montiert, welcher entweder mit Wasser oder Luft durchströmt wird.	43
3.13	Darstellung eines luftgekühlten Stromrichters ohne inneren geschlossenen Kühlkreislauf. Die Aussenluft wird direkt in den Stromrichter geleitet.	44
3.14	Illustration eines luftgekühlten Stromrichters mit einem separaten, internen Kühlluftkreislauf. Die Wärme der IGBT-Module wird über den Wärmetauscher an die Umgebungsluft abgegeben.	45
3.15	Illustration eines wassergekühlten Stromrichters mit einem separaten Luft/Wasser-Rückkühler. Der Rückkühler gibt die Wärme des Kühlwassers an die Umgebungsluft ab.	45
3.16	Schematische Zeichnung eines Gruppenantriebes.	47
3.17	Getriebetypen für Einzelantriebe. Der Fahrmotor ist in Grau, Aufhängungen und Befestigungen in Rot, Wellen in Weiss und Zahnräder in Violett dargestellt.	48
4.1	Übersicht über die modifizierten und neu hinzugekommenen Komponenten des Moduls bestehend aus zwei Reisezugwagen. Die gesamte Antriebsausrüstung ist auf dem vorderen Wagen konzentriert. . . .	51
4.2	Darstellung der kumulierten Fahrwiderstandsverluste während des Reichweitenszenarios. Zusätzlich ist die aktuelle Geschwindigkeit des Fahrzeugs mit abgebildet.	53
4.3	Ersatzschaltbild des verwendeten Fahrmotormodells.	55
4.4	Darstellung des Anfahrverhaltens des Fahrmotors bis Maximalgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Motordrehzahl.	56
4.5	Darstellung des elektrischen Bremsverhaltens von der Maximalgeschwindigkeit bis zum Stillstand in Abhängigkeit der Motordrehzahl. Ab ca. 450 rpm wird mit den mechanischen Bremsen bis zum Stillstand verzögert.	57
4.6	Abbildung der kumulierten Fahrmotorverluste im Reichweitenszenario in Abhängigkeit der Fahrzeit. Zusätzlich ist die aktuelle Geschwindigkeit abgebildet. Es werden die Verluste beim Fahren und beim Bremsen berücksichtigt. Ausserdem ist ersichtlich, dass die Statorverluste gegenüber den Rotorverlusten dominieren.	57
4.7	Illustration des Ersatzschaltbilds einer Batteriezelle bestehend aus einem Innenwiderstand und zwei RC Gliedern. U_{OCV} ist die ladezustandsabhängige Ruhespannungsquelle und I_{Zelle} der einzelne Zellenstrom.	58
4.8	Vergleich der Modulspannungen in der Ruhe und unter Last zwischen dem Batteriemodell und der realen Batterie in Abhängigkeit der entnommenen Kapazität. Die Kurven für das reale Batteriemodul sind aus dem Datenblatt des Batteriemoduls [65] entnommen. Die resultierenden Kurven für das Batteriemodell sind in blau und orange dargestellt.	58
4.9	Zeitlicher Verlauf der Batterieleistung während des Reichweitenszenarios. Zusätzlich sind noch die kumulierten Batterieverluste aufzutragen.	59

4.10	Verlauf der kumulierten Stromrichterverluste für den Traktionsstromrichter während des Reichweitenszenarios. Es ist gut sichtbar, wie die Verluste bei höherer geforderter Leistung stärker ansteigen.	60
4.11	Bild des Batteriemoduls, welches für die Batterieauslegung als Grundlage verwendet wird.	61
4.12	Verlauf des Ladezustands der Traktionsbatterie während des Reichweitenszenarios.	63
4.13	Vergleich der Ladezustände während des Reichweitenszenarios für die ideal ausgelegte Batteriegrösse und die für flexiblere Einsätze gewählte Batteriegrösse.	64
4.14	Illustration eines einfachen Kühlkreislaufs bestehend aus einem Rückkühler, einer Kältemaschine, einem Heizstab und einer Wasserpumpe für die Kühlung einer Batterie. Das kalte Wasser ist blau und das warme Wasser ist rot dargestellt.	65
4.15	Bild des verwendeten Fahrmotors mit einem zusätzlichen Getriebe des Herstellers TSA. Der linke Teil ist der Fahrmotor und der rechte Teil ist das dazugehörige Getriebe [68]	66
4.16	Übersicht über die kumulierten Fahrmotorverluste während des Reichweitenszenarios für das in der Batterieauslegung verwendete Fahrmotormodell und den in der Fahrmotorauslegung gewählten Motor. . .	67
4.17	Übersichtsdarstellung des elektrischen Aufbaus der beiden verwendeten Stromrichter. Der Aufbau der Stromrichter basiert auf den Bordnetzumrichtern für Reisezugwagen des Herstellers ABB [69].	68
4.18	Übersicht über die geforderten Leistungsspitzen der einzelnen Wechselrichterstufen im Traktionsstromrichter. Die Wechselrichterstufen für die Traktionsbatterie, die Hilfsbetriebe und den Motorausgang müssen den Energieaustausch in beide Richtungen ermöglichen. . . .	71
4.19	Darstellung des Leistungsflusses im DC-3-kV-Konverter M60 der ABB. Der Konverter besitzt einen DC/DC-Wandler als Eingangsstufe, einen AC-Ausgang für die Hilfsbetriebe (HBU-Ausgang) und einen DC-Ausgang für die Ladung der Bordnetzatterie (Batterie-Ausgang). .	72
4.20	Illustration der Leistungsanforderungen an die einzelnen Wechselrichterstufen innerhalb des Klimastromrichters. Der HBU-Ausgang und der Wandler für die Klimabatterie müssen einen Leistungsfluss in beide Richtungen erlauben.	74
4.21	Illustration des Leistungsflusses innerhalb des M60-MS-UIC Stromrichters des Herstellers ABB.	75
4.22	Pneumatikschema eines Kurswagenmoduls.	77
4.23	Charakteristik eines Marathon 4, B-304 Kompressors von Dürr Technik [73].	78
4.24	Prozessdiagramm zu den Übergängen zwischen den verschiedenen Betriebsmodi.	79
4.25	Übersicht zur Leittechnikarchitektur der angetriebenen Kurswagen im autonomen Betrieb und mit führender Lok.	80
4.26	Detaillierte Aufstellung der Leittechnikarchitektur mit den relevanten Komponenten der Fahrzeug-Steuerung.	81
4.27	Schaltung zur Ansteuerung der Getriebekupplung.	83
4.28	Übersicht der Prozesse der Zustände <i>führendes Modul</i> und <i>ferngesteuertes Modul</i>	84
4.29	Initialisierungsprozess der Kurswagenmodule in den Zuständen <i>ferngesteuertes Modul</i> und <i>führendes Modul</i>	85
4.30	Wichtigste Bauarten von automatischen Kupplungen.	87
4.31	Typenskizze mit Legende des Kurswagenmoduls mit eigenem Hilfsantrieb.	89

4.32	Übersichtszeichnung zum Drehgestell.	91
5.1	Idealer Ablauf einer Nachtzugfahrt.	95
5.2	Betrachtetes Liniennetz zur Validierung und Veranschaulichung des gewählten Betriebskonzeptes.	96
5.3	Detaillierter Ablauf aller Rangierbewegungen für den EN <i>Romulus</i> . . .	98
5.4	Ablauf der Verwendung eines Hotelgleises.	100
5.5	Lade-/ Entladecharakteristik der Traktionsbatterie in Abhängigkeit der Temperatur auf der Strecke Interlaken – Rom.	103
5.6	Lade-/ Entladecharakteristik der Klimabatterie in Abhängigkeit der Temperatur auf der Strecke Interlaken – Rom.	103
5.7	Traktionsbatteriecharakteristik in Abhängigkeit verschiedener Ran- gierszenarien.	105
5.8	Klimabatteriecharakteristik in Abhängigkeit verschiedener Rangiers- zenarien.	105
6.1	Übersicht über die Kostenstruktur eines Betriebskonzeptes.	112
6.2	Aufbau des Trassenpreises in der Schweiz gemäss <i>Leistungskatalog</i> <i>Infrastruktur</i>	113
6.3	Schematische Übersicht des Personaleinsatzes in einem Zugverband. . . .	118
6.4	Übersicht über die verschiedenen Einflussfaktoren auf den Ertrag des Betriebskonzeptes.	119
6.5	Kostenstruktur für die angetriebenen Kurswagenmodule und das ÖBB Vergleichsszenario.	122
6.6	Break-Even-Kalkulation für das klassische Konzept und das ange- triebene Kurswagen-Konzept. Es werden realistische Auslastungen angenommen.	123
6.7	Break-Even-Kalkulation für das klassische Konzept und das ange- triebene Kurswagen-Konzept. Es werden pessimistische Auslastun- gen angenommen.	124
6.8	Renditen des klassischen Zugkonzeptes und des Konzeptes mit ange- triebenen Kurswagen in Abhängigkeit der Auslastung der Wagen. . .	125

Tabellenverzeichnis

2.1	Übersicht über die verwendeten Faktoren und deren Werte für die Fahrwiderstandsberechnung.	14
2.2	Auflistung der optimierten Faktoren der Stromrichter-Skalierungsgesetze, jeweils für das Gewicht und das Volumen und abhängig von der Kühlmethode. Diese Faktoren werden in die Potenzfunktion in Formel 2.4 eingesetzt und für die Auslegung in der Nutzwertanalyse verwendet.	19
2.3	Auflistung der Faktoren für die berechneten Fahrmotor-Skalierungsgesetze für das Gewicht und das Volumen abhängig von der Kühlmethode. Die Faktoren werden in die Potenzfunktion in Formel 2.4 eingesetzt. Dabei handelt es sich um die in der Nutzwertanalyse verwendeten optimierten Werte.	21
2.4	Standardabweichung und Mittelwert der Gaussverteilung zur Modellierung der effektiven Nachfrage.	23
2.5	Übersicht über die Bewertungskriterien der Nutzwertanalyse und deren jeweilige Gewichte.	23
3.1	Typische Leistungsdichten von ausgewählten Zuggarnituren der SBB, ÖBB und FS. Railjet-Garnitur mit sieben Anhängewagen. Nightjet-Garnitur wie NJ 446 von Wien nach Zürich / Venedig mit zwölf Anhängewagen. IC 2000 mit neun Anhängewagen (inkl. Steuerwagen Bt).	25
3.2	Alle verwendeten Bewertungsskalen für die Nutzwertanalyse.	32
3.3	Übersicht der Punkteverteilung für die Nutzwertanalyse.	33
3.4	Resultate der Nutzwertanalyse.	34
3.5	Übersicht der aus der Nutzwertanalyse resultierenden Leistungsdaten des einstöckigen Moduls bestehend aus zwei Reisezugwagen.	50
4.1	Auflistung der angenommenen Dauerleistungen für die einzelnen Hilfsbetriebekomponenten des angetriebenen Wagens. Es wird zwischen der benötigten Hilfsbetriebeleistung im Stand und während der Fahrt im Batteriebetrieb unterschieden.	54
4.2	Übersicht über die geschätzten Dauerleistungen der einzelnen Hilfsbetriebekomponenten für den antriebslosen Wagen.	54
4.3	Übersicht über die angenommenen Dauerleistungen für die Komfortanlagen. Die Klimaanlage ist, wie in Kapitel 3.2 definiert, während der Rangierfahrt im reduzierten Betrieb.	54
4.4	Übersicht über die verwendeten Leistungsdaten für das Fahrmotormodell, welches auf einem Motor des Herstellers TSA basiert [64].	55
4.5	Übersicht über den resultierenden Energiebedarf für die Traktionsbatterie (Traktion) und die Klimabatterie (Klima) für das Reichweitenzenario.	61

4.6	Leistungsdaten der verwendeten Batteriemodule des Herstellers ABB [65]. Die Daten zur volumetrischen und gravimetrischen Energiedichte der Module stammen aus den Fachgesprächen (siehe Anhang A). . .	62
4.7	Übersicht der relevanten Kennzahlen aus der Nutzwertanalyse für die Fahrmotorauslegung.	65
4.8	Übersicht über die realen Leistungsdaten des gewählten Fahrmotors TME 35-33-4 [68]. Der Leistungsfaktor und der Nennwirkungsgrad wurden geschätzt.	67
4.9	Übersicht über die geforderten Ein- und Ausgangsspannungen des Stromrichters und die verwendete Zwischenkreisspannung	69
4.10	Übersicht über die Maximalwerte der Hilfsbetriebeleistung für die Auslegung des Traktionsstromrichters des angetriebenen Wagens. . .	70
4.11	Auflistung der Maximalleistung der Komfortanlagen. Diese gelten sowohl für den angetriebenen als auch für den antriebslosen Wagen. . .	70
4.12	Übersicht über die Gewichtsrechnung und die Volumenrechnung des resultierenden Traktionsstromrichters.	73
4.13	Übersicht über die Maximalleistungen der Hilfsbetriebe auf dem antriebslosen Wagen.	73
4.14	Übersicht über die Berechnung des Gewichts und des Volumens des Klimastromrichters.	75
4.15	Gewichtsbilanz und Volumenübersicht über alle relevanten Komponenten der Kurswagenmodule.	88
4.16	Aufschlüsselung der Bauartbezeichnung des Kurswagenmoduls. . . .	91
5.1	Vereinfachte Rangierszenarien für die Verwendung im Betriebskonzept. . .	99
5.2	Für das Betriebskonzept relevante Kennzahlen der Batterie.	101
5.3	Simulationsszenarien für die Batteriezyklen.	102
5.4	Zusammenfassung der wichtigsten Vorteile des Betriebskonzeptes. . .	108
5.5	Vergleich der Liniennetze und der Betriebsabläufe des Konzepts dieser Arbeit mit denjenigen der ÖBB, FS und SNCF.	109
6.1	Faktoren für den Basispreis Verschleiss in Abhängigkeit der verschiedenen Geschwindigkeitsbänder.	114
6.2	Energieverbrauch in Abhängigkeit der Geschwindigkeit.	116
6.3	Kostenschätzung für die Beschaffungskosten eines Kurswagenmoduls. . .	117
6.4	Kostenzusammenstellung der Beschaffungskosten.	118
6.5	Fahrpreise pro Kilometer der Billette für den SBB Fernverkehr und ÖBB Nightjet.	121

Anhang A

Fachgespräche

Die Inhalte der verschiedenen Anhänge enthalten vertrauliche Daten. Deshalb werden die Anhänge nur in der abgegebenen Version mitgeliefert. Bei Fragen wenden Sie sich bitte an die Autoren.

Anhang B

Fachkorrespondenz

Die Inhalte der verschiedenen Anhänge enthalten vertrauliche Daten. Deshalb werden die Anhänge nur in der abgegebenen Version mitgeliefert. Bei Fragen wenden Sie sich bitte an die Autoren.

Anhang C

Nutzwertanalyse

Die Inhalte der verschiedenen Anhänge enthalten vertrauliche Daten. Deshalb werden die Anhänge nur in der abgegebenen Version mitgeliefert. Bei Fragen wenden Sie sich bitte an die Autoren.



Eigenständigkeitserklärung

Die unterzeichnete Eigenständigkeitserklärung ist Bestandteil jeder während des Studiums verfassten Semester-, Bachelor- und Master-Arbeit oder anderen Abschlussarbeit (auch der jeweils elektronischen Version).

Die Dozentinnen und Dozenten können auch für andere bei ihnen verfasste schriftliche Arbeiten eine Eigenständigkeitserklärung verlangen.

Ich bestätige, die vorliegende Arbeit selbständig und in eigenen Worten verfasst zu haben. Davon ausgenommen sind sprachliche und inhaltliche Korrekturvorschläge durch die Betreuer und Betreuerinnen der Arbeit.

Titel der Arbeit (in Druckschrift):

Antriebs- und Betriebskonzept für Kurswagen mit eigenem Hilfsantrieb

Verfasst von (in Druckschrift):

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich.

Name(n):

Staub

Althaus

Vorname(n):

Alexander

Patrick

Ich bestätige mit meiner Unterschrift:

- Ich habe keine im Merkblatt [„Zitier-Knigge“](#) beschriebene Form des Plagiats begangen.
- Ich habe alle Methoden, Daten und Arbeitsabläufe wahrheitsgetreu dokumentiert.
- Ich habe keine Daten manipuliert.
- Ich habe alle Personen erwähnt, welche die Arbeit wesentlich unterstützt haben.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die Arbeit mit elektronischen Hilfsmitteln auf Plagiate überprüft werden kann.

Ort, Datum

Zürich, 31.08.2020

Unterschrift(en)

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich. Durch die Unterschriften bürgen sie gemeinsam für den gesamten Inhalt dieser schriftlichen Arbeit.