



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Verkehr BAV
Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050
im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

eco 4.0

Vorstudie zur: Traktionsbasierten energieorientierten Echtzeitfahrplanoptimierung

Schlussbericht

Dipl.-Ing. Michael Nold

ETH Zürich - Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT)
Stefano-Francini-Platz 5, 8093 Zürich, Schweiz,
michael.nold@ivt.baug.ethz.ch,
<https://ethz.ch/>, <https://www.ivt.ethz.ch/ts.html>

Prof. Dr. Francesco Corman

ETH Zürich - Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT)
Stefano-Francini-Platz 5, 8093 Zürich, Schweiz,
francesco.corman@ivt.baug.ethz.ch,
<https://ethz.ch/>, <https://www.ivt.ethz.ch/ts.html>

Impressum

Herausgeberin:

Bundesamt für Verkehr BAV

Programm Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr (ESöV 2050)

CH-3003 Bern

Programmleiter

Tristan Chevroulet, BAV

Projektnummer: P-163

Bezugsquelle

Kostenlos zu beziehen über das Internet

www.bav.admin.ch/energie2050

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.

Bern, den 21.12.2020

Haftungsausschluss

Dieses Dokument beschreibt den Wissensstand, welcher sich aus dem Projekt ergeben hat. Es erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Trotz sorgfältiger Kontrolle sind Fehler nie auszuschliessen. Für die Folgen der Nutzung dieses Dokuments wird keine Haftung übernommen.

Datennutzung von Industriedaten im Rahmen dieser Studie

Für diese Studie wurden von verschiedenen Unternehmen hochpräzise Daten zur Verfügung gestellt. Zum Schutz des geistigen Eigentums dieser Unternehmen werden diese Daten nicht veröffentlicht.

Das nicht veröffentlichten dieser Daten reduziert in keinerlei Weise den Inhalt dieser Studie, da alternativ Daten dargestellt werden, welche auf allgemein zugänglichem Wissen und/oder daraus hergeleiteten Wissen basieren und nicht auf Produkten dieser Unternehmen.

Wenn Herstellerdaten veröffentlicht werden, wurden diese schon vor dieser Studie veröffentlicht oder explizit genehmigt.

Danksagung

Dieses Forschungsprojekt wurde durch das Bundesamt für Verkehr (BAV) im Rahmen des Programmes Energiestrategie 2020 im öffentlichen Verkehr (ESÖV 2050) finanziert.

Dadurch wurde es ermöglicht, die energiesparende Fahrweise zu untersuchen. Für diese Unterstützung des Projektes und die damit erreichten Energieeinsparungen soll Herrn Dr. Tristan Chevroulet, Herrn Daniel Schaller, Herrn Jean-Loup Robineau und allen weiteren Beteiligten des BAVs recht herzlich gedankt werden. Dabei ist zu betonen, dass es sicher ist, dass dieses Projekt ohne diese Unterstützung nicht zustande gekommen wäre und daher auch nicht die Energieeinsparungen erkannt worden wären.

Sehr gerne soll allen Unternehmen gedankt werden, die im Rahmen dieses Projektes tätig waren und es durch ihre Mitarbeit ermöglicht haben.

An die SBB geht ein besonderer Dank an Johannes Estermann, welcher als Leiter des Energiesparprogramms durch seine strategische Weitsicht, das Energiesparpotential erkannt hat und diese Studie unterstützt hat. Weiter geht ebenfalls ein besonderer Dank an Tobias Schluer, Thomas Graffagnino und Roland Schäfer für die Unterstützung.

An die Bahnindustrie geht ein besonderer Dank an Thomas Huggenberger, welcher als Projektleiter durch seine hohe technische Fachkompetenz und Weitsicht, das Energiesparpotential erkannt hat. Thomas Huggenberger, war mit seiner tiefgreifenden technischen Kompetenz im Bereich Schienenfahrzeugtraktionsstrang, in Kombination mit seinem grossen Engagement essenziell für diese Studie. Weiter geht ebenfalls ein besonderer Dank an Urs Bikle und Thomas Koller für die Unterstützung.

Weiter geht ein Dank an Markus Meyer, welcher zwar nicht an dem Projekt beteiligt war, aber der wohl meist zitierte Autor in dieser Studie ist und durch seine Publikationen wichtige fachliche Grundlagen für diese Studie bereitgestellt hat.

Inhalt

Executive Summary	8
Zusammenfassungen	9
Deutschsprachige Zusammenfassung	9
Riassunto Italiano	14
English Summary	19
1 Ausgangslage	21
2 Ziel der Arbeit	22
3 Forschungsansatz und aktueller Wissensstand	23
3.1 Forschungsansatz	23
3.1.1 Kurzbeschreibung der Ansätze/Arbeitspakete	24
3.1.1.1 Stand der Technik	24
3.1.1.2 Mathematische Grenzwertbetrachtung	24
3.1.1.3 Algorithmen-Entwicklung und Simulation	24
3.2 Aktueller Wissensstand	26
3.2.1 Entwicklung des energiesparenden Fahrens	26
3.2.1.1 Frühes Interesse an Verbrauchsreduktionen und am Energiesparen	26
3.2.1.2 Computergestützte Fahrprofiloptimierungen	27
3.2.2 Verluste im Traktionsstrang	29
3.2.2.1 Komponenten	29
3.2.2.2 Haupttransformator	30
3.2.2.2.1 Betriebspunktabhängige Verluste im Widerstand	31
3.2.2.2.2 Betriebspunktabhängige Verluste im Eisenkern	32
3.2.2.2.3 Betriebspunktabhängige Verluste durch Oberschwingungen	33
3.2.2.2.4 Übersicht der Einflüsse auf den Transformatorenwirkungsgrad	33
3.2.2.3 Traktionsstromrichter	34
3.2.2.3.1 Leit- und Schaltverluste	35
3.2.2.3.2 Weitere Verluste	39
3.2.2.4 Fahrmotoren	39
3.2.2.4.1 Motorkennlinie und Motorverluste	40
3.2.2.4.2 Einflussfaktoren für die Verluste	44
3.2.2.4.3 Wirkungsgradkennlinien	45
3.2.2.5 Wirkungsgradkennfelder und Verlustkennfelder	47
3.2.3 Verluste in den Hilfsbetrieben	48
3.2.4 Fahrwiderstandsverluste	49
3.2.4.1 Aufbau der Fahrwiderstandsformeln	49
3.2.4.1.1 Vereinfachte rein quadratische Formel ohne konstantes und lineares Glied	49
3.2.4.1.2 Quadratische Formel mit konstantem und linearem Glied	50
3.2.4.2 Vergleich der Fahrwiderstandsformel-Vereinfachungen	51
3.2.4.2.1 Vereinfachte und genaue Fahrwiderstandsformel	51
3.2.4.2.2 Problematik Masseskaliierung des Luftwiderstandes	53

3.2.4.3	Empfehlung hinsichtlich der Fahrwiderstandsformeln.....	55
3.2.5	Fazit zu den beschriebenen Verlusten.....	55
4	Ergebnisse.....	56
4.1	Algorithmus-Implementierbarkeit	56
4.1.1	Ausgangssituation	56
4.1.2	Optimierungen für eine effiziente Berechnung	58
4.1.2.1	Diskretes Geschwindigkeits- und Weg-Raster	58
4.1.2.2	Kontinuierliche Optimal-Wertbestimmung	59
4.1.2.2.1	Vorgehensweise.....	59
4.1.2.3	Ausführungsformen.....	60
4.1.2.3.1	Erläuterung zu den Ausführungsformen	63
4.1.2.4	Weitere Methoden zur Datenmengenreduktion.....	63
4.1.3	Architektur.....	65
4.1.4	Fazit und allgemeine Aspekte zur Berechnung	66
4.2	Berechnungen	67
4.2.1	Beispiel 1 - Normale Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit	67
4.2.1.1	Fall 1 - Nur Fahrwiderstände	68
4.2.1.2	Fall 2 - Mit Komponentenverlusten des Fahrzeugs 1	71
4.2.1.3	Fall 3 - Mit Komponentenverlusten des Fahrzeugs 2	75
4.2.1.4	Fazit zu Berechnungs-Beispiel 1.....	76
4.2.2	Beispiel 2 – Verluste bei der normalen Fahrt (ohne Optimierung)	77
4.2.2.1	Fall 1 – Nur Fahrwiderstände.....	79
4.2.2.2	Fall 2 – Mit Komponentenverlusten	82
4.2.2.3	Fazit zu Berechnungs-Beispiel 2.....	86
4.2.3	Beispiel 3 – Effiziente Geschwindigkeitserhöhung.....	87
4.2.3.1	Fall 1 – Reduktion der Fahrwiderstandsverluste	87
4.2.3.2	Fall 2 – Reduktion der Fahrwiderstands- und Traktionsverluste	89
4.2.3.3	Vergleich Berechnungsbeispiel 3 – Fall 1 und 2.....	91
4.2.3.4	Fazit zu Berechnungsbeispiel 3.....	93
4.2.4	Beispiel 4 – Effiziente Geschwindigkeitsreduktion.....	94
4.2.4.1	Fall 1 – Reduktion der Fahrwiderstandsverluste	95
4.2.4.2	Fall 2 – Reduktion der Fahrwiderstands- und Traktionsverluste	96
4.2.4.3	Vergleich Berechnungsbeispiel 4 – Fall 1 und 2.....	97
4.2.4.4	Fazit zu Berechnungsbeispiel 4.....	98
4.2.5	Beispiel 5 – Befahren von Längsneigungen.....	99
4.2.5.1	Fall 1 - Verlustreduktion durch Anpassung an die Topographie.....	100
4.2.5.2	Fall 2 – Geschwindigkeitsreduktionsvarianten	101
4.2.5.3	Fazit zu Berechnungsbeispiel 5.....	103
4.2.6	Beispiel 6 – Fahrt zwischen zwei Bahnhöfen	104
4.2.6.1	Fall 1 – Fahrt zwischen zwei Bahnhöfen.....	104
4.2.6.2	Fall 2 – Variationen bei der Fahrt zwischen zwei Bahnhöfen	105
4.2.6.3	Fazit zum Berechnungsbeispiel 6.....	106

5 Diskussion	107
5.1 Antworten auf die Forschungsfragen	107
5.1.1 Frage 1.....	107
5.1.2 Frage 2	107
5.1.3 Frage 3.....	108
5.1.4 Frage 4.....	108
5.1.5 Frage 5	109
5.1.6 Frage 6.....	109
5.1.7 Frage 7	110
5.1.8 Frage 8	110
5.2 Diskussion der Resultate.....	111
5.2.1 Nachteile.....	112
5.2.2 Vorteile	113
5.2.3 Zusätzliche Einsparungen	114
6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen	116
6.1 Mögliche Anwendung.....	117
6.1.1 Lokführerbetrieb	117
6.1.2 Teilautomatischer Betrieb bis zum vollautomatischen Betrieb	118
6.2 Das ideale Fahrprofil.....	118
6.3 Energiesparen durch Geschwindigkeitserhöhungen	119
7 Verzeichnisse	121
7.1 Symbol- und Abkürzungsverzeichnis	121
7.1.1 Abkürzungen	121
7.1.2 Formelsymbole.....	122
7.1.3 Spezielle Formelzeichen.....	123
7.2 Abbildungsverzeichnis	124
7.3 Tabellenverzeichnis	128
7.4 Formelverzeichnis	128
7.5 Literaturverzeichnis	129

Executive Summary

Deutsche

Diese Vorstudie untersucht den Einfluss der Verluste der Schienenfahrzeugtraktionskomponenten für energieoptimierte Fahrweisen. Dabei ist es das Ziel herauszufinden, ob es möglich ist, durch eine Gesamtenergieverlustbetrachtung, welche auch die Traktionskomponentenverluste berücksichtigt, Fahrzeitverlängerungen effizienter zu nutzen um mehr Energie zu sparen. Dadurch soll eine wegweisende Grundlage für eine Anwendung bei der späteren Echtzeitfahrplanoptimierungen gelegt werden. Hierfür wurden in dieser Studie zuerst die Einflüsse der Traktionskomponenten auf die Energieverluste untersucht. Basierend auf diesen Daten wurde ein Algorithmus entwickelt, welcher das Fahrzeug abbildet und Simulationen ermöglicht, sodass letztendlich diverse Beispielsimulationen durchgeführt werden konnten. Im Rahmen dieser Beispielsimulationen konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, Fahrzeitverlängerungen bei Echtzeitfahrplanoptimierungen durch optimierte Fahrstrategien besser zu nutzen und durch diese Gesamt betrachtung mehr Energie zu sparen.

Italiano

Questo studio preliminare esamina l'influenza delle perdite dai componenti di trazione dei veicoli ferroviari per stili di guida ottimizzati dal punto di vista energetico. L'obiettivo è scoprire se sia possibile utilizzare tempi di percorrenza più lunghi in modo più efficiente per risparmiare più energia considerando la perdita totale di energia, che considera anche le perdite della componente trazione. Ciò consentirà di creare una base per un'applicazione nella successiva ottimizzazione della pianificazione in tempo reale. A tal fine, in questo studio sono stati esaminati gli effetti dei componenti di trazione sulle perdite di energia. Sulla base di questi dati, è stato sviluppato un algoritmo che descrive il veicolo e consente simulazioni in modo da poter eseguire varie simulazioni di esempio. I risultati degli esempi mostrano che è possibile utilizzare meglio i tempi di viaggio più lunghi con queste strategie di guida ottimizzate per risparmiare più energia.

English

This preliminary study examines the influence of the losses from the rail vehicle traction components for energy-optimized driving styles. The aim is to find out whether it is possible to use longer travel times more efficiently, in order to save more energy by considering the total energy loss, which considers also the traction component losses. This shall makes it possible to create a basis for a later application to real-time schedule optimization. For this purpose, the effects of the traction components on the energy losses were examined in this study. Based on this data, an algorithm was developed that describes the vehicle and enables simulations so that various example simulations could be carried out. The results of the examples show that it is possible to use longer travel times better with this optimized driving strategies to save more energy.

Zusammenfassungen

Deutschsprachige Zusammenfassung

Ausgangssituation Energieverluste

Die Energieverluste eines Schienenfahrzeuges für eine Fahrt von A nach B lassen sich in drei Kategorien einteilen:

- 1) Energieverluste durch die Verwendung nicht rückspeisefähiger Bremsen (beispielsweise mechanische Bremsen)
- 2) Energieverluste zur Überwindung der Fahrwiderstände
- 3) Energieverluste in den Triebfahrzeugkomponenten

In jedem dieser drei Bereiche entstehen signifikante nicht vernachlässigbare Verluste, wobei die jeweilige Größenordnung sehr stark vom jeweiligen Fahrprofil und diversen weiteren Einflussgrößen abhängt. So gibt es Zugfahrten, bei denen die Fahrwiderstandsverluste überwiegen, aber es gibt auch Fahrten bei denen die Energieverluste in den Triebfahrzeugkomponenten oder die Energieverluste durch nicht rückspeisefähiges Bremsen überwiegen.

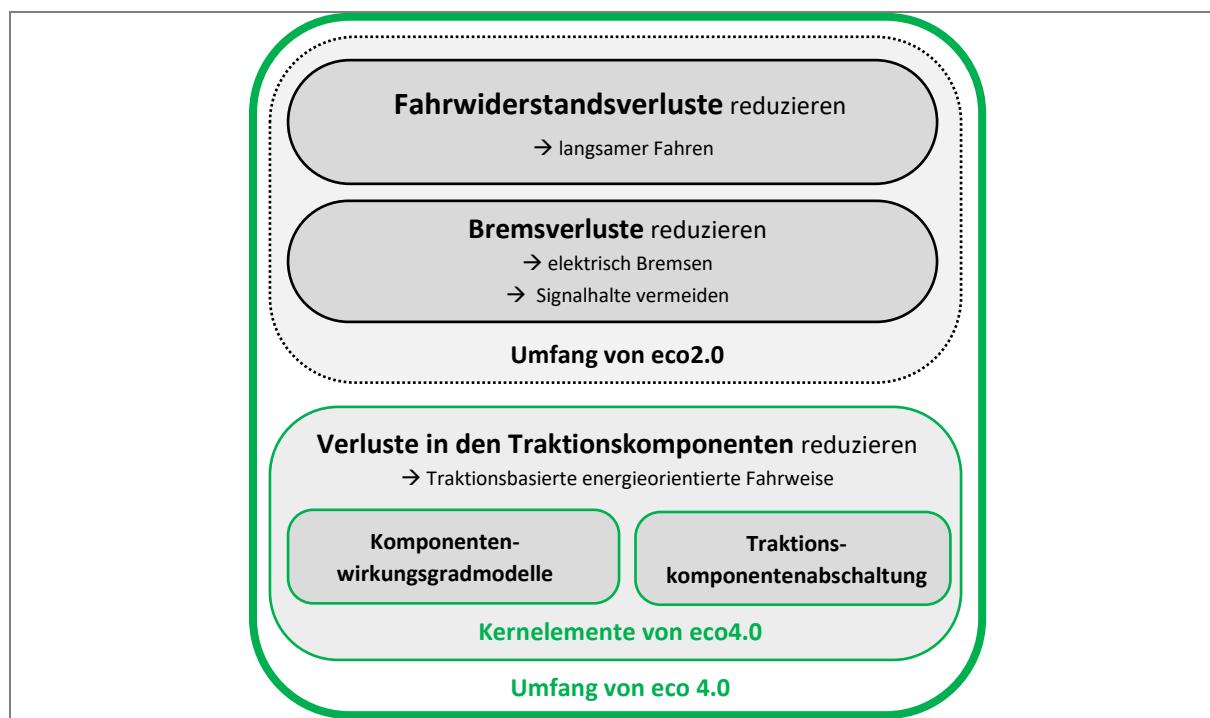


Abbildung 1 Umfang des Detailierungsgrades des Projektes eco 4.0 im Vergleich zum Projekt eco 2.0.

Durch den Aspekt, dass in diesem Projekt (eco4.0) auch die Energieverluste in den Triebfahrzeugkomponenten berücksichtigt werden, hat die Optimierung einen grösseren

Umfang, eine grössere Komplexität und führt zu einer grösseren Realitätsnähe, als andere Projekte. So ist dieses eco4.0 Projekt hinsichtlich des Umfangs der Fahrprofiloptimierung eine Erweiterung im Vergleich zu dem abgeschlossenen BAV-Projekt eco2.0 (siehe auch Abbildung 1).

Fahrzeitreserven und bisherige Nutzung

Zur Realisierung eines stabilen Fahrplans, welcher in der Lage ist, geringfügige Verspätungen zu kompensieren, werden üblicherweise Fahrplanreserven eingeplant. Das heisst es wird mehr Fahrzeit eingeplant, als die kürzeste Fahrzeit zwischen zwei Bahnhöfen. Im Verspätungsfall dienen diese Fahrplanreserven dazu, die Verspätungen aufzuholen. Bei pünktlichen Zügen ohne Verspätung steht diese Fahrzeitreserve zur Verfügung.

Es ist Stand der Technik, dass diese Fahrzeitreserve genutzt wird um eine Fahrweise mit weniger Energieverlusten zu realisieren.

So gibt es Fahrempfehlungen, welche den Lokführern empfehlen, möglichst wenig mit den mechanischen Bremssystemen zu Bremsen und möglichst viel mit der rückspeisefähigen elektrischen Bremse zu Bremsen. Dies erhöht die Fahrzeit minimal, reduziert aber zugleich die Energieverluste signifikant und ist schon seit vielen Jahren Stand der Technik.

Ein weiterer Ansatz besteht darin, im Rahmen einer Echtzeitfahrplanoptimierung mit Assistenzsystemen dem Lokführer in Echtzeit Fahrempfehlungen mitzuteilen, damit dieser durch eine reduzierte Geschwindigkeit Fahrzeitreserven effizient nutzen kann. Dies wird in der Schweiz beispielweise im Rahmen des Projektes eco2.0 umgesetzt. Dabei ist das Ziel durch Geschwindigkeitsreduktionen die Fahrwiderstandsverluste zu reduzieren¹. Die fahrzeugspezifischen Verluste in den Fahrzeugkomponenten werden für diese Fahrprofiloptimierung bisher aber noch nicht berücksichtigt. So stellt sich die Frage:

Können die Verluste für eine Fahrt von einem Ausgangspunkt A zu einem Zielpunkt B bei gegebener Fahrzeitreserve durch das zusätzliche Berücksichtigen der Fahrzeugkomponentenverluste zusätzlich reduziert werden?

Triebfahrzeugkomponentenverluste

Zum Beantworten der genannten Frage sind zuerst die Verluste in den Fahrzeugkomponenten zu erörtern. Energieverluste entstehen in quasi allen Komponenten. So gibt es einmal die Verluste in den Hilfsbetrieben und einmal die Verluste im Traktionsstrang.

¹ Weiter werden beispielsweise damit auch unnötige Halte vermieden.

Im Antriebsstrang sind die Schwerpunkte der Transformator, der Stromrichter und die Motoren (siehe Abbildung 2). Dabei entstehen die Verluste direkt durch die Komponentenverluste aber auch durch die Interaktionen. So reduziert beispielsweise ein neuer 3-Punkt-Stromrichter auch die Verluste in den Traktionsmotoren.



Abbildung 2 Antriebsstrang eines Frequenzumrichterfahrzeugs²

Mathematisch lassen sich die Verluste durch eine Kombination aus konstanten, linearen und nichtlinearen Anteilen beschreiben. So ist der Fahrzeugwirkungsgrad durch diverse physikalische Aspekte nicht konstant und zwangsläufig betriebspunktabhängig. Daher ist es sinnvoll, zur Beschreibung fahrzeugspezifische Wirkungsgradkennfelder anzuwenden.

Innerhalb des Zugkraftdiagramms gibt es Bereiche, mit einem besseren und einem schlechteren Wirkungsgrad.

Optimierungsansatz

Der derzeit im eco2.0 Projekt praktisch angewandte Ansatz darin, besteht Geschwindigkeiten zu reduzieren. Dadurch wird der Zug in einem Bereich gefahren, welcher weniger grosse Fahrwiderstandsverluste verursacht. Zusätzlich dazu wird im Rahmen von eco4.0 auch noch berücksichtigt, dass das Fahrzeug in Bereichen mit einem guten Wirkungsgrad fährt.

Um dies zu realisieren wurde ein spezieller Algorithmus entwickelt, welcher in wenigen Sekunden viele Millionen Möglichkeiten effizient und zielgerichtet vergleicht, sodass die sinnvollen Fahrprofilvarianten ermittelt werden. Dadurch werden Fahrprofilvarianten vorgeschlagen, welche durch eine Fahrzeitverlängerung den Gesamtenergieverbrauch für eine Fahrt von A nach B reduzieren.

Optimierungsbeispiel Beschleunigung

Der Optimierungsalgorithmus, welcher den Gesamtenergieverbrauch reduziert, bevorzugt in Abhängigkeit von der Fahrzeitverlängerung und den weiteren Energieverbrauchern effizientere Bereiche innerhalb des Zugkraftdiagramms.

² Details siehe Abschnitt 3.2.2 (ab Seite 22) und Abbildung 8 (Seite 21)

So zeigt die Abbildung 3 qualitativ ein Zugkraftdiagramm und deutet an, dass es Bereiche mit einem schlechteren und besseren Wirkungsgrad gibt.

Ein normaler Geschwindigkeitsregler geht bei einer Beschleunigung üblicherweise den Weg der roten Pfeile durch das Zugkraftdiagramm. Die hier angewandte Optimierung findet vollautomatisch effizientere Wege, wie die angedeuteten grünen Pfeile.

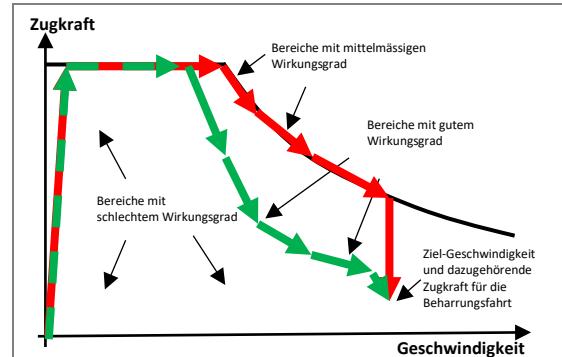


Abbildung 3 Mögliche Wege durch ein Zugkraftdiagramm beim Beschleunigen³

Vergleich der beiden Optimierungsansätze

Mit einer kompletten simulierten Fahrt lässt sich ein direkter Vergleich der Optimierungsstrategien machen. Hierzu zeigt die Abbildung 4 die Energieverlustreduktion in Abhängigkeit der Fahrzeitverlängerung für eine Fahrt von einem Haltepunkt A zu einem Haltepunkt B. Die grüne Linie stellt eine Optimierung dar, welche die Gesamtverluste berücksichtigt (also auch die fahrzeugspezifischen Komponentenverluste) und die schwarz gestrichelte Linie stellt eine Optimierung dar, welche nur die Fahrwiderstände berücksichtigt. Ohne Fahrzeitverlängerung ist in beiden Fällen keine Energieverlustreduktion möglich und beide Fahrten sind identisch. Die einzige Energieoptimierung ist das Nutzen der elektrischen rückspeisefähigen Bremse.

Mit zunehmender Fahrzeitverlängerung wird deutlich, dass eine Optimierung welche auch die Komponenten berücksichtigt (grüne Linie) die Energieverluste stärker reduziert, als eine Optimierung, welche nur die Fahrwiderstandsverluste berücksichtigt.

Die Energieverlustreduktionen sind bei jeder berechneten Fahrt vorhanden, sie fallen aber schon bei der gleichen Fahrzeitverlängerung grundsätzlich stark fallspezifisch aus. Das liegt daran, dass schon ein anderer Fahrzeugtyp andere Verluste hat und somit auch ein anderes Optimierungspotential. Weiter hat die jeweilige Strecke einen deutlichen Einfluss auf die

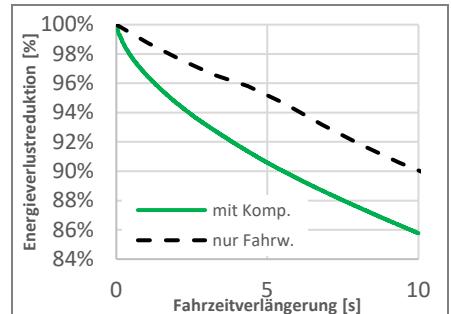


Abbildung 4 Energieverlustreduktion in Abhängigkeit der Fahrzeitverlängerung.⁴

³ Details siehe Abschnitt 4.2.3 (ab Seite 80) und Abbildung 57 (Seite 87)

⁴ Details siehe Abschnitt 3.2.2 (ab Seite 22) und Abbildung 8 (Seite 21)

Verlustreduktion. Insbesondere bei einer hügeligen Alpenvorlandstrecke besteht ein grosses Potential.

So führt eine Optimierung, welche die Fahrwiderstands- und Komponentenverluste berücksichtigt und die Fahrzeitverlängerung für die Fahrprofiloptimierung nutzt, dass sich das Fahrprofil bei einer Fahrt über eine hügelige Strecke an das Gelände anpasst. Dabei wird der Schwung ausgenutzt, sodass die Traktionskomponenten möglichst wenig Zug- und Bremskraft aufbringen müssen. Auch hier ist die Optimierung durch den Algorithmus vollautomatisch, sodass die jeweils optimale Zug- und Bremskraft gewählt wird und auch (sofern beim Fahrzeug vorhanden) Funktionen, wie die Motorabschaltung oder teilweise Motorabschaltung in Betracht gezogen wird.

Eine Optimierung, welche nur die Fahrwiderstandsverluste berücksichtigt, würde in diesem Fall eine konstante gegebenenfalls reduzierte Geschwindigkeit fahren und bei Steigungen mehr Energie aus der Fahrleitung beziehen und bei anschliessendem Gefälle diese Energie sofort wieder zurückspeisen. Da jeder Energieaustausch Verluste erzeugt, entstehen durch die konstante Geschwindigkeit mehr Verluste, als bei einer Fahrt, welche sich an das Gelände anpasst. Zudem belastet der Energieaustausch das Bahnstromnetz.

Fazit

Im Rahmen dieser Studie konnte eindeutig gezeigt werden, dass durch eine Berücksichtigung der Traktionskomponenten, Energie gespart werden kann, indem Fahrzeitreserven effizienter und mit geringeren Verlusten genutzt werden.

Dabei ist die zusätzliche Energieersparnis sehr stark vom jeweiligen Fahrzeugtyp, der jeweiligen Strecke und diversen Randbedingungen abhängig, sodass jeder Fall individuell optimiert werden muss und eine sehr grosse Spannweite bei der Einsparung besteht. Eine Reihe von Simulationen hat gezeigt, dass die zusätzlichen Einsparungen in der Größenordnung von 1 bis 8 % liegen.

Riassunto Italiano

Situazione iniziale, perdite di energia

Le perdite di energia di un veicolo ferroviario per un viaggio da A a B possono essere suddivise in tre categorie:

- 1) Perdite di energia dovute all'utilizzo di frenata non rigenerativa (es. Freni meccanici)
- 2) Perdite di energia per superare la resistenza al moto
- 3) Perdite di energia nei componenti della locomotiva

Perdite significative e non trascurabili si verificano in ciascuna di queste tre aree, il rispettivo ordine di grandezza dipende molto dal profilo di guida e da altre variabili tecniche. Per alcune traiettorie predominano le perdite di resistenza al moto, per altre predominano le perdite di energia nei componenti della locomotiva o le perdite di energia dovute a frenate non rigenerative.

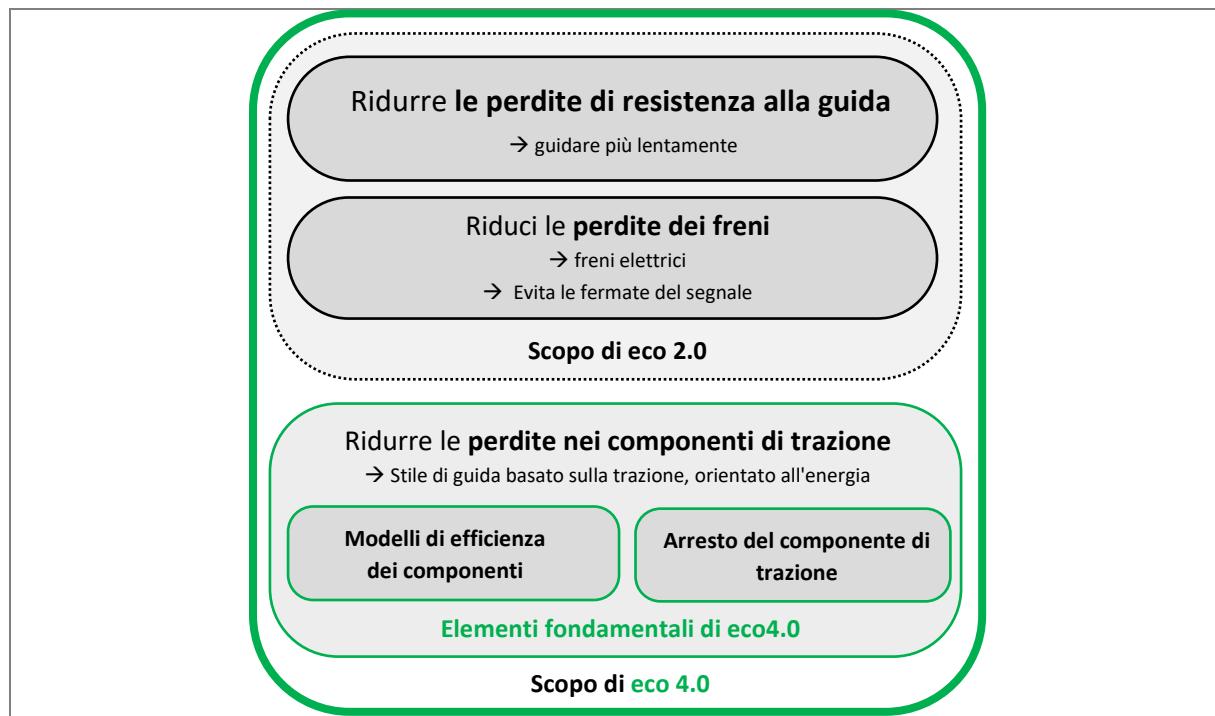


Figura 1 Estensione del livello di dettaglio del progetto eco 4.0 rispetto al progetto eco 2.0.

Dato che in questo progetto (eco4.0) vengono considerate anche le perdite di energia nei componenti del veicolo di trazione, l'ottimizzazione ha un ambito più ampio. Ciò risulta in una maggiore complessità e in un maggiore realismo, rispetto ad altri progetti. Per quanto riguarda l'ottimizzazione del profilo di guida, questo progetto eco4.0 è un'espansione rispetto al progetto BAV eco2.0 già completato (vedere anche la Figura 1).

Utilizzo corrente delle riserve di tempo di percorrenza

Al fine di implementare un orario ferroviario stabile, ossia in grado di compensare ritardi minori, vengono comunemente pianificate delle riserve nel tempo di percorrenza. Ciò significa che nell' orario è previsto un tempo di percorrenza maggiore rispetto al tempo di percorrenza più breve tra due stazioni ferroviarie. In caso di ritardo, queste riserve vengono utilizzate per compensare i ritardi. Questa riserva di tempo di percorrenza è disponibile per i treni puntuali senza ritardi.

Nella teoria e nella pratica, questa riserva di tempo di percorrenza viene utilizzata per implementare una traiettoria di viaggio che consenta un minore consumo energetico.

Esistono linee guida operative che raccomandano ai macchinisti di frenare il meno possibile con i sistemi di frenatura meccanica e il più possibile con il freno elettrico rigenerativo. Ciò aumenta in maniera minima il tempo di percorrenza, ma allo stesso tempo riduce notevolmente le perdite di energia; questa soluzione è stata di avanguardia tecnica per molti anni.

Un altro approccio consiste nel fornire al macchinista istruzioni di guida in tempo reale. Questo è parte di un'ottimizzazione dell'orario e circolazione in tempo reale, basato su sistemi di assistenza, e permette di utilizzare le riserve di tempo di percorrenza in modo efficiente, riducendo la velocità di crociera. Ciò viene implementato in Svizzera, ad esempio, nell'ambito del progetto eco2.0. L'obiettivo è ridurre le perdite di energia (e di conseguenza i consumi energetici) dovute alla resistenza, che è presente e dipendente dalla velocità. Le perdite energetiche specifiche nei componenti del veicolo non sono state ancora prese in considerazione per questa ottimizzazione del profilo di guida. Quindi sorge la domanda:

È possibile ridurre ulteriormente le perdite energetiche per un viaggio da un punto di partenza A a una destinazione B, data una determinata riserva di tempo di percorrenza, tenendo conto anche delle perdite energetiche nei componenti del veicolo?

Perdite nei componenti della locomotiva

Per rispondere alla domanda citata, è necessario prima discutere le perdite nei componenti del veicolo. Le perdite di energia si verificano praticamente in tutti i componenti. Ci sono perdite nelle operazioni ausiliarie e perdite nella catena di trasmissione della trazione.

Nella trasmissione, il ruolo principale è svolto dal trasformatore, dal convertitore e dai motori (vedere la Figura 2). Le perdite derivano direttamente dalle perdite dei componenti ma anche dalle interazioni di più componenti. Ad esempio, un nuovo convertitore a 3 fasi riduce anche le perdite nei motori di trazione.

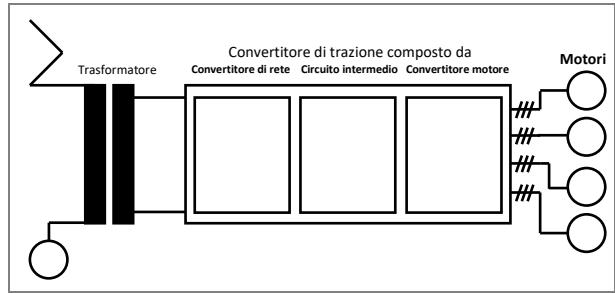


Figura 2 Trasmissione di un veicolo con convertitore di frequenza

Matematicamente, le perdite possono essere descritte da una combinazione di componenti costanti, lineari e non lineari. L'efficienza del veicolo non è costante per vari aspetti fisici ed è inevitabilmente dipendente dal punto di lavoro. Ha quindi senso utilizzare mappe di efficienza specifiche del veicolo per descriverle.

All'interno del diagramma di trazione ci sono aree con un'efficienza migliore, e altre con un'efficienza peggiore.

Approccio di ottimizzazione

L'approccio attualmente utilizzato nella pratica nel progetto eco2.0 è quello di ridurre la velocità. Di conseguenza, il treno viene controllato in un'area del diagramma di trazione, che causa una minore perdita di resistenza al moto. Invece, eco4.0 tiene conto anche del fatto che il veicolo viaggia in aree con una buona efficienza dal punto di vista delle perdite nei componenti.

Per ottenere ciò, è stato sviluppato uno speciale algoritmo che confronta in modo efficiente e mirato milioni di possibilità in pochi secondi in modo da poter determinare le varianti del profilo di guida più sensate. Ciò suggerisce varianti del profilo di guida che riducono il consumo totale di energia (includendo perdite per resistenza al moto e perdite nei componenti) per un viaggio da A a B aumentando il tempo di percorrenza.

Ottimizzazione dell'accelerazione: esempio

L'algoritmo di ottimizzazione riduce il consumo totale di energia, facendo in modo che la traiettoria del treno sia sempre nelle aree più efficienti del diagramma di trazione, attraverso opportune scelte di un tempo di percorrenza più lungo, anche considerando i consumi di energia aggiuntivi dovuti a resistenze e perdite.

La Figura 3 mostra un diagramma di trazione qualitativo e indica che ci sono aree con una minore e migliore efficienza

Durante l'accelerazione, un normale regolatore di velocità di solito segue il percorso delle frecce rosse attraverso il diagramma di trazione. L'ottimizzazione proposta in questo progetto invece identifica e sfrutta, in modo automatico, regioni del diagramma di trazione più efficienti, come le frecce verdi indicate.

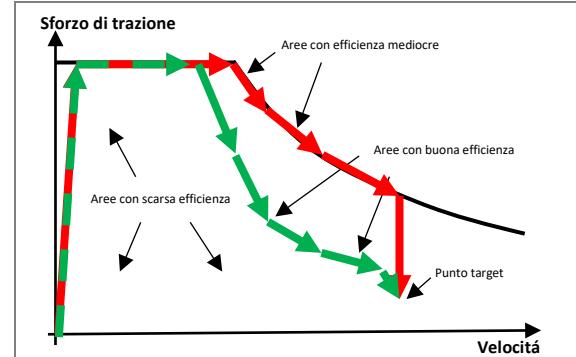


Figura 3 Possibili percorsi attraverso un diagramma di trazione durante l'accelerazione

Confronto dei due approcci di ottimizzazione

È possibile effettuare un confronto diretto delle strategie di ottimizzazione con un viaggio simulato completo. A tal fine, la Figura 4 mostra la riduzione della perdita di energia in funzione dell'estensione del tempo di percorrenza, per un viaggio da una partenza A a una destinazione B. La linea verde rappresenta il risultato di un'ottimizzazione che tiene conto delle perdite totali (cioè anche le perdite specifiche nei componenti del veicolo); la linea tratteggiata nera rappresenta un'ottimizzazione che tiene conto solo delle perdite dovute alla resistenza al moto.

Senza un prolungamento del tempo di percorrenza, non è possibile ridurre la perdita di energia in nessuno dei due casi; i viaggi sono quindi identici. L'unica possibile ottimizzazione energetica è l'uso del freno elettrico rigenerativo.

All'aumentare del tempo di percorrenza, diventa chiaro che un'ottimizzazione che tiene conto anche dei componenti (linea verde) riduce le perdite di energia in maniera maggiore rispetto a un'ottimizzazione che tiene conto solo delle perdite di resistenza al moto.

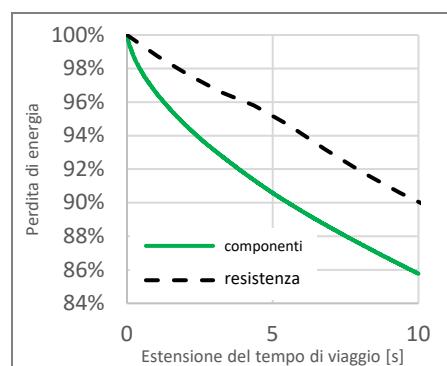


Figura 4 Riduzione della perdita di energia in base all'estensione del tempo di percorrenza.

Le riduzioni delle perdite di energia sono presenti in ogni viaggio calcolato, ma sono in generale dipendono molto dal caso specifico, anche considerando una stessa estensione del tempo di percorrenza. Ciò è dovuto al fatto che diversi tipi di veicolo hanno perdite diverse, e quindi anche un diverso potenziale di ottimizzazione. Il percorso seguito dal veicolo ha anche un impatto significativo sulla riduzione delle perdite. In particolare, c'è un grande potenziale in tratti collinari, tipici delle Prealpi.

L'ottimizzazione tiene conto dell'energia richiesta per la resistenza al moto, e per le perdite nei componenti, e suggerisce tempi di guida più lunghi per un profilo di guida ottimizzato. Questi aspetti sono molto adatti ad un profilo di guida lungo un percorso collinare. La quantità di moto viene utilizzata in modo che i componenti della trazione debbano applicare la minor forza di trazione e frenata possibile. Anche qui l'ottimizzazione da parte dell'algoritmo è completamente automatica, in modo da selezionare la forza di trazione e frenata ottimale, tenendo conto anche di funzioni come lo spegnimento completo o parziale del motore (se disponibile nel veicolo).

In questo caso, un'ottimizzazione che tenga conto solo della perdita di resistenza al moto porterebbe a una velocità costante, eventualmente ridotta, e userebbe più energia dalla rete salendo sui pendii, restituendola immediatamente scendendo lungo una pendenza successiva. Poiché ogni scambio di energia genera perdite, la velocità costante si traduce in più perdite rispetto a un viaggio che si adatta al profilo del terreno. Inoltre, lo scambio di energia mette a dura prova la rete della corrente di trazione.

Conclusione

Nel corso di questo studio si è potuto chiaramente dimostrare che, considerando le componenti di trazione, è possibile risparmiare energia utilizzando le riserve di tempo di percorrenza in modo più efficiente e con minori perdite.

I risparmi energetici aggiuntivi dipendono in gran parte dal tipo di veicolo, dal percorso e dalle varie condizioni al contorno; ogni caso deve essere ottimizzato individualmente. Come conseguenza, i risparmi energetici spaziano una gamma piuttosto ampia. Numerose simulazioni hanno dimostrato che i risparmi energetici aggiuntivi sono dell'ordine dell'1-8%.

English Summary

Energy consumption is an increasingly important aspect in railway systems, and much efforts are and an actual goal of the railway research. In an electric railway system, the energy is supplied over the overhead line and can be fed back by regeneration. The energy losses describe the amount of energy, which is irreversibly lost during the journey and cannot be regenerated.

The energy losses of rail vehicles for a journey from A to B can be divided into three areas:

- 1) Energy losses due to the use of brakes that cannot be regenerated (e.g. mechanical brakes)
- 2) Energy losses to overcome the driving resistance
- 3) Energy losses in vehicle components (for example, traction components, auxiliaries, comfort systems)

In real operations, significant losses occur in each of these three areas. The respective order of magnitude is depending from the individual driving profile and various other influencing variables.

Current state of the art recommends, for drivers to save energy, to reduce the usage of the non-regenerating brake. Optimization approaches compute a real time timetable, trading off time reserves for lower running speed. An approach, currently used in practice, reduces the energy consumption by reducing the driving resistance, and avoiding unnecessary stops. The typical results relate to a lower cruising speed as speed has a large influence of the driving resistance. However, the losses inside the several traction components are not considered in the model. The current study targets such components losses, and the energy saving potential due to an optimization considering the energy losses, to answer the question:

How much, and how can the rail vehicle energy losses for a journey from a starting point A to a destination B, with a given travel time reserve, be additionally reduced, when modelling the traction components (traction motors, power inverter and transformer) losses?

Energy losses occur in all vehicles components. The heaviest impact inside the traction components is due to the traction motors, the transformer, and the power converter. The losses arise from both component losses and mutual influences. For example, a 3-phase power converter also reduces (compared to a 2-phase converter) the losses in the traction motors. Mathematically, the losses can be described by a combination of constant, linear and non-linear components. The vehicle efficiency is not constant due to various physical aspects and inevitably depends on the operating point; there are areas in a (traction, force) space with a better and a worse efficiency. Those areas are specific of the vehicle type, and even of the single vehicle.

Consider for instance a traction-force-diagram in Figure 1, with operation points with a higher and a worse efficiency. A normal speed controller usually accelerate a vehicle without considering the energy efficiencies. Due to this path through the traction-force-diagram is usually like the red arrows in the Figure 1. With the proposed optimization algorithm, the phases through the traction-force diagram are usually through areas with a higher efficiency, resulting in higher efficiency.

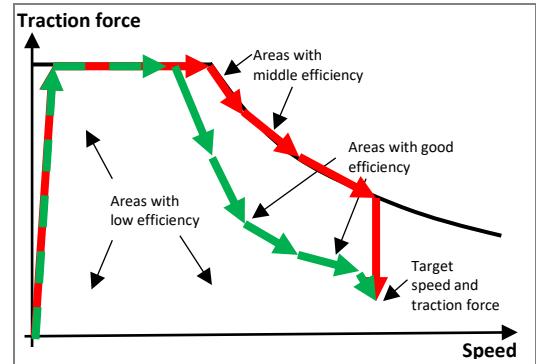


Figure 1 Possible paths through a traction diagram when accelerating

To solve the problem, an algorithm was developed, which calculates all advantageous speed-way-variants for a trip between two points in (speed, way) A to B. speed and space have been discretized, with each waypoint in the (speed, way) space determined the technically possible speed change until the next waypoint. For each transition in the (speed, way) space, the energy losses, the driving resistance, and the energy losses due to the vehicle components can be calculated. A combination of dominance rule with shortest path has been employed to reduce the computational effort.

The example highlighting the results, specifically the difference of the speed profiles is shown in Figure 2, on a railway line with up- and down-slopes. An optimization with only considers the driving resistances, drives with a constant speed, and does not consider the topography. However, an optimization which considers the entire losses, adapts to the topography, and drives with a continuously changing speed profile, to avoid unnecessary traction force (while on a slope up) and braking force (on a slope down), because also a regenerative braking generates losses in the vehicle components. Overall, the optimization considering the traction components losses can reduce additionally the losses on the order of 1 to 8% compared to a model which neglects it.

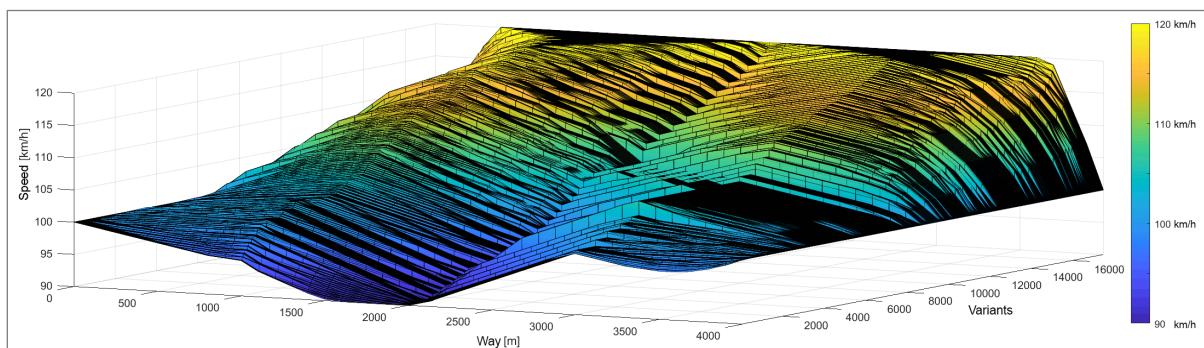


Figure 2 Driving variants, with different travel times, considering a slope, the driving resistance and component losses (slope parameters: 0% at 0 m; +10% at 1000 m; -10% at 2000 m; 0% at 3000 m)

1 Ausgangslage

Die Reduktion des Energieverbrauchs und die Steigerung der Energieeffizienz wird eine zunehmendere gesellschaftlich und politisch relevante Thematik. In den letzten Jahren wurden dazu im Bahnbereich diverse Massnahmen erforscht, entwickelt und realisiert. Trotzdem sind die Ziele noch lange nicht erreicht, sodass es weitere neue Ansätze braucht.

Einer dieser Ansätze ist die energiesparende Fahrweise. Grundsätzlich war der Energieverbrauch, das Energiesparen und auch der Einfluss der Fahrweise schon zu Dampflokomotiven ein relevantes Thema (Leitzmann, 1897; Rihosek, 1921; Lok 1923) und ist bis heute noch relevant.

Häufig betrachten die Ansätze lediglich die Geschwindigkeitsreduktionen, Reduktion von unnötigen Halten, sowie eine Erhöhung der elektrischen Bremskraft. Grundsätzlich geht dies in die richtige Richtung und trägt im Allgemeinen zum Sparen bei. Umgesetzt wurden solche Ansätze beispielsweise auch im ECO 2.0 Projekt der SBB.

Geschwindigkeitsreduktionen und Erhöhung der elektrischen Bremskraft reduzieren lediglich, die folgenden beiden Verluste durch:

1. **nicht rekuperierende Bremsen** und
2. **die Fahrwiderstände**.

Der dritte verlustverursachende Anteil - die Verluste durch:

3. **die Fahrzeugkomponenten**

werden bei diesen Ansätzen (bspw. Geschwindigkeitsreduktionen) nicht berücksichtigt.

Zur Einordnung der Größenordnung rechnet Meyer (2020) für eine Fahrt von Luzern über Rotkreuz nach Zug mit einer Rekuperationsbremse (also keine Verluste durch mechanisches Bremsen) vor, dass sich die Verluste wie ungefähr folgt einteilen:

- Schnellzug: 2/3 Fahrwiderstand und 1/3 Fahrzeugkomponenten (Meyer, 2020)
- S-Bahn-Zug: 1/3 Fahrwiderstand und 2/3 Fahrzeugkomponenten (Meyer, 2020)

Hieraus wird deutlich, dass:

1. Die Verluste in den Fahrzeugkomponenten hinsichtlich ihrer Größenordnung nicht zu vernachlässigen sind.
2. Der Anteil der Fahrwiderstandsverluste und der Fahrzeugkomponenten bei der gleichen Strecke von dem Zugtyp, bzw. der Fahrweise abhängt.

Aus diesem Sachverhalt ergeben sich die Fragestellungen und Ziele, wie sie in dem folgenden Kapitel beschrieben werden.

2 Ziel der Arbeit

Basierend auf der Ausgangslage und den Sachverhalten,

- dass die fahrzeugkomponentenbedingten Verluste einen signifikanten Anteil an den Energieverlusten haben und
- dass sie derzeit noch nicht bei der Fahroptimierung berücksichtigt werden,

ergeben sich die folgenden Fragestellungen, welche durch diese Vorstudie beantwortet werden sollen:

1. Können die Verluste für eine Fahrt von einem Ausgangspunkt A zu einem Zielpunkt B bei gegebener Fahrzeitreserve durch das zusätzliche Berücksichtigen der Fahrzeugkomponentenverluste zusätzlich reduziert werden?⁵

In diesem Zusammenhang resultieren die folgenden, grundlegenden Fragestellungen zum Stand der Technik:

2. Wie setzen sich die Verluste im Traktionsstrang zusammen?⁶
3. Kann der Traktionskomponentenwirkungsgrad als konstant betrachtet werden oder nicht?⁷
4. Wie sind die fahrwiderstandsbedingten Verluste aufgebaut?⁸

Weiter ergeben sich in diesem Zusammenhang die folgenden Fragestellungen, welche im Rahmen der Studie untersucht werden.

5. Lässt sich überhaupt ein Algorithmus implementieren, welcher effizient und schnell alle Verluste (auch die Traktionsverluste) für eine Fahrt von A nach B berechnet?⁹
6. Reduzieren sich die Verluste mit zunehmender Geschwindigkeitsreduktion?¹⁰
7. Sind energieeffiziente Geschwindigkeitsänderungen möglich?¹¹
8. Ist eine Berücksichtigung der Längsneigung für eine Optimierung vorteilhaft?¹²

Im Rahmen dieser Studie wird sich mit diesen Fragestellungen beschäftigt, sodass diese in den folgenden Kapiteln dieses Berichtes beantwortet werden. Letztendlich erzeugten diese Antworten dabei die Grundlage für die energieorientierte Echtzeitfahrplanoptimierung.

⁵ Siehe Abschnitt 4.2.3 bis 4.2.6 ab Seite 82

⁶ Siehe Abschnitt 3.2.2 ab Seite 21

⁷ Siehe Abschnitt 3.2.5 ab Seite 44

⁸ Siehe Abschnitt 3.2.4 ab Seite 36

⁹ Siehe Abschnitt 4.1 ab Seite 45

¹⁰ Siehe Abschnitt 4.2.1 ab Seite 57

¹¹ Siehe Abschnitt 4.2.3 bis 4.2.4 ab Seite 82

¹² Siehe Abschnitt 4.2.5 ab Seite 90

3 Forschungsansatz und aktueller Wissensstand

Dieses Kapitel beschreibt im ersten Teil die Forschungsansätze und die Vorgehensweise. Der zweite Teil beschreibt den aktuellen Stand der Technik.

3.1 Forschungsansatz

Um die im Abschnitt 2 (siehe Seite 22) genannten Ziele zu erreichen, bedarf es der folgenden drei Ansätze:

- Die Fragestellungen 2, 3 und 4 lassen sich durch eine Vertiefung in den Stand der Technik beantworten.
- Die Fragestellungen 6 und teilweise auch die Fragestellungen 1 lassen sich durch eine mathematische Untersuchung und Grenzwertbetrachtung mit Anwendung des Stands der Technik beantworten.
- Die Frage 1, 5, 7 und 8 erfordern eine aufwendige Algorithmen-Entwicklung und Simulationen.

Diese Zusammenhänge zwischen den Ansätzen und Fragen lassen sich grafisch durch die Abbildung 5 beschreiben.

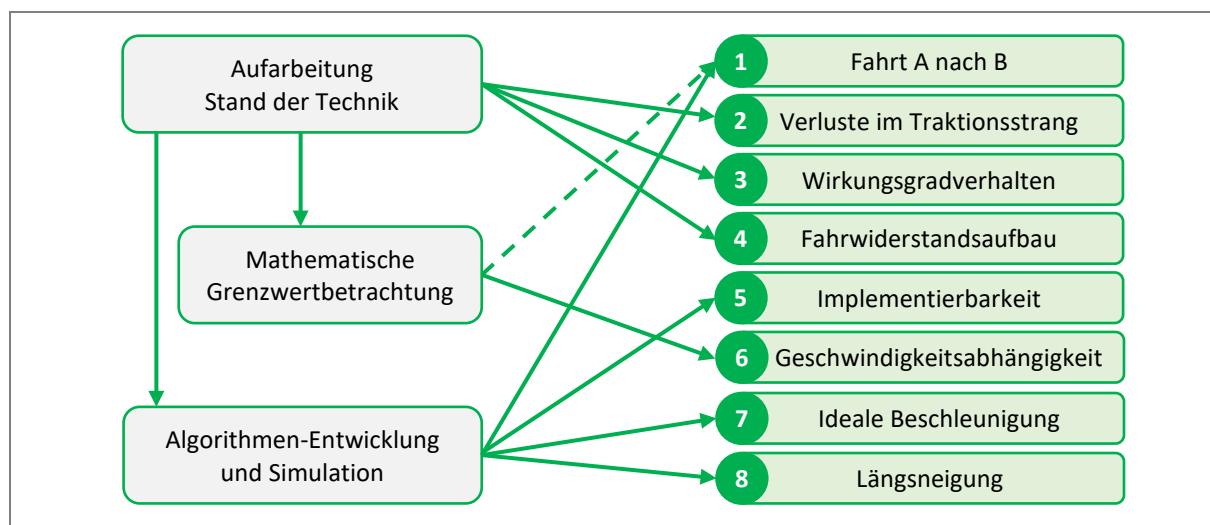


Abbildung 5 Zusammenhang zwischen den Ansätzen/Arbeitspaketen und der Beantwortung der Forschungsfragen

3.1.1 Kurzbeschreibung der Ansätze/Arbeitspakete

3.1.1.1 Stand der Technik

Dieser Ansatz, welcher einem der Hauptarbeitspakete entspricht, wird in Abschnitt 3.2 ab Seite 26 beschrieben. Er dient dazu, ein tiefgreifendes Verständnis zu den Fahrzeugverlusten aufzuarbeiten, um:

- direkte Fragestellungen zu beantworten und um
- den weiteren Arbeitspakten, sowie deren Ansätzen als Wissensgrundlage zu dienen.

3.1.1.2 Mathematische Grenzwertbetrachtung

Ein Beantworten der Fragestellung 6 "Reduzieren sich die Verluste mit zunehmender Geschwindigkeitsreduktion?" lässt sich mit einer mathematischen Grenzwertbetrachtung beantworten und ist dadurch für Außenstehende auch ohne ein Simulationsprogramm einfach nachvollziehbar. Daher wird basierend auf dem Stand der Technik eine mathematische Grenzwertbetrachtung angewandt.

3.1.1.3 Algorithmen-Entwicklung und Simulation

Dieser Ansatz ist der aufwändigste und zeitintensivste Ansatz und dient dazu, die essenziellen Fragestellungen zu beantworten. Es wird basierend auf dem Stand der Technik ein Simulationsprogramm entwickelt, welches dazu dient das optimale Fahrprofil zu bestimmen.

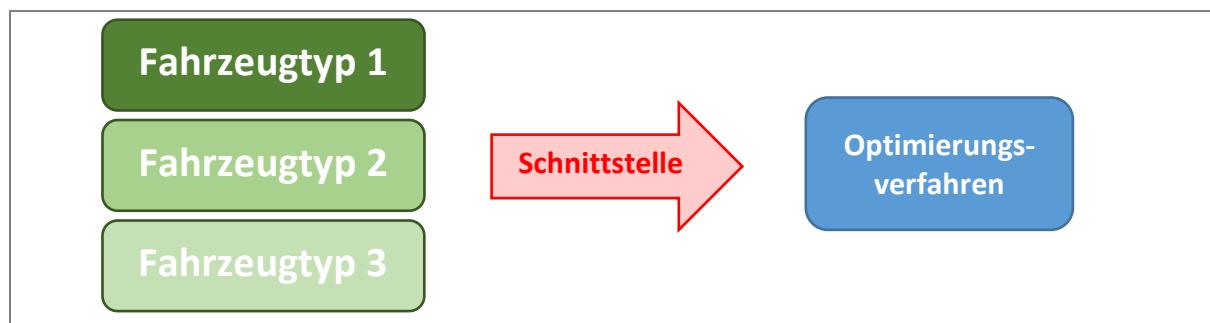


Abbildung 6 Das Ziel der Simulation ist es, dass das Optimierungsverfahren, mit einer einheitlichen Schnittstelle auf die Fahrzeugdaten zugreift, sodass die Optimierung mit verschiedenen Fahrzeugtypen gemacht werden kann.

Eine tiefgreifende Beschreibung von Schienenfahrzeugen ist sehr komplex, sodass eigentlich jeder Fahrzeugtyp ein eigenes Optimierungsprogramm benötigt. Um dies zu vermeiden, wird soweit wie möglich ein Ansatz verfolgt, sodass die Fahrzeugdaten standardisiert werden. Über eine Schnittstelle werden die Berechnungsdaten von dem Optimierungsalgorithmus eingelesen und das optimale Fahrprofil berechnet (siehe auch Abbildung 6).

Dabei werden die Verluste im Fahrzeug möglichst genau implementiert, sodass alle Verluste betrachtet werden. Dadurch unterscheidet sich dieser Ansatz gegenüber dem Vorgängerprojekt eco 2.0 deutlich. Im Gegensatz zu eco 2.0 werden nicht nur die Bremsverluste betrachtet, sondern auch die Verluste der Traktionskomponenten, wie es auch die Abbildung 7 veranschaulicht.

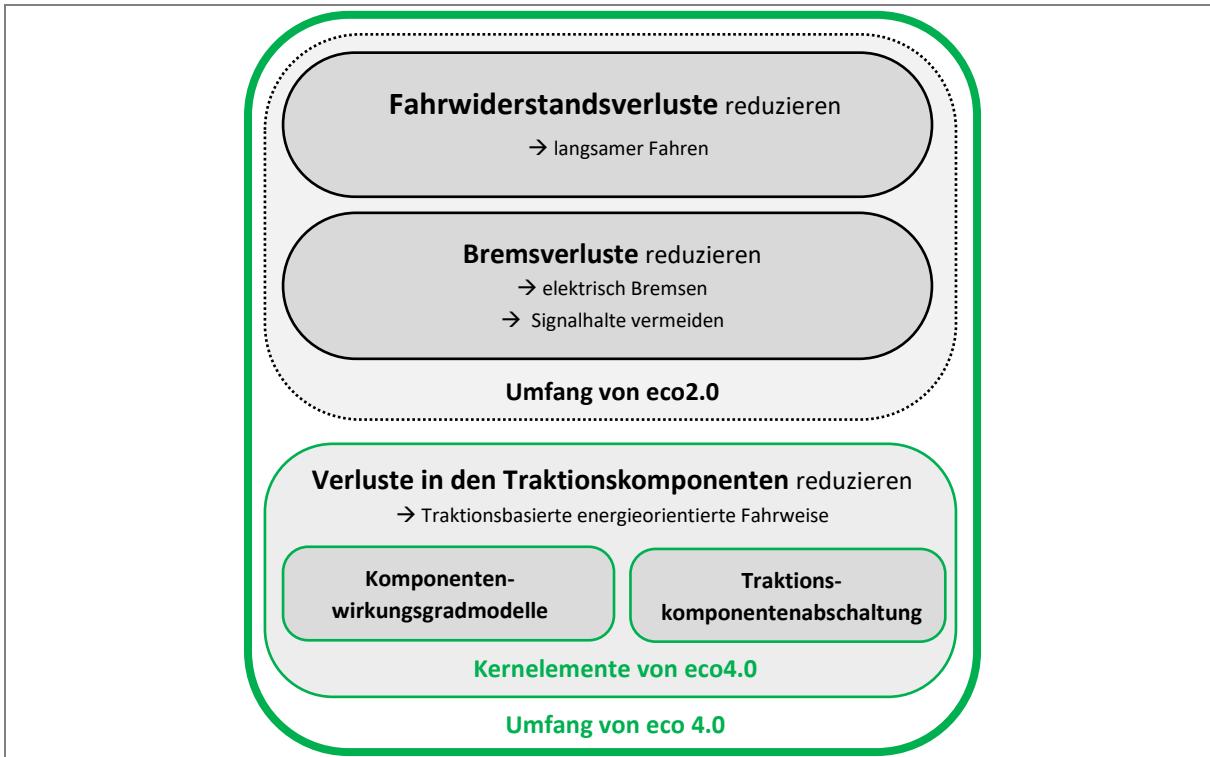


Abbildung 7 Umfang des Detailierungsgrades des Projektes eco 4.0 im Vergleich zum Projekt eco 2.0.

3.2 Aktueller Wissensstand

Dieses Kapitel dient dazu, die Grundlagen und den Stand der Technik zu beschreiben. Diese Grundlagen ergeben sich zum einen aus dem Stand der Technik bezüglich des energiesparenden Fahrens, weiter werden die Grundlagen hinsichtlich der Verluste im Traktionsstrang beschrieben. Beendet wird das Kapitel mit einem Fazit zum ersten Beantworten von Forschungsfragen.

3.2.1 Entwicklung des energiesparenden Fahrens

Im Folgenden wird kurz auf den Stand der Technik hinsichtlich der Entwicklung des energiesparenden Fahrens eingegangen. Dabei wird zuerst verdeutlicht, dass es schon zu Dampflokzeiten ein Interesse am Energiesparen gab. Anschliessend wird der neuere Entwicklungstand mit den computergestützten Fahrproloptimierungen beschrieben. Abschliessend wird ein Trivialansatz zum Energiesparen beschrieben. Darauf folgend wird auf das ECO 2.0 Projekt eingegangen.

3.2.1.1 Frühes Interesse an Verbrauchsreduktionen und am Energiesparen

Obwohl in den letzten Jahren das öffentliche Interesse am Energiesparen gestiegen ist, sind Untersuchungen, Studien und Optimierungen zum Energiesparen im Eisenbahnbereich nichts Neues. So wurden im Rahmen der Recherche schon sehr alte Publikationen gefunden. Schon im Jahr 1921 publizierte Rihosek unter dem Titel "Wie kann man bei einer Dampflokomotive Kohle sparen" (Rihosek, 1921). Im Jahr 1923 wurde beispielsweise "Über den Mehrverbrauch an Kohle und die Mehrkosten für das Anhalten in Stationen gegenüber dem Durchfahren derselben" publiziert (Lok, 1923). Zusätzlich zu diesen genannten Beispielen, konnten schon allein in den 1920er Jahren rund ein Dutzend Publikationen gefunden werden, welche sich mit dem Energiesparen im Zusammenhang mit den Kosten beschäftigen. Aber auch schon im 19. Jahrhundert beschäftigen sich die Ingenieure mit dem Verbrauch der Dampflokomotiven (Lüders, 1882; Leitzmann, 1897).

Viele Abwägungen und Optimierungen im Zusammenhang mit dem Energieverbrauch, die es schon im ersten Jahrhundert der Eisenbahn gab, begründen sich aus dem Aspekt, dass der Energieverbrauch stets mit Kosten verbunden ist und stets ein Interesse bestand, jegliche Kosten zu reduzieren.

Weiter besteht insbesondere bei Dampflokomotiven der logistische Aufwand des Kohle- und Wasserfassens, welcher sich negativ auf den Fahrplan ausgewirkt hat. Lediglich das

Wasserfassen konnte bei Bedarf mit speziellen Vorrichtungen während der Fahrt durchgeführt werden (Stoker, 1901; Railway Magazine, 1934).

Zusätzlich zu den Kosten, war eine energieoptimierte Fahrweise für die Zugführung und den Heizer essenziell. Diese begründet sich daraus, dass es bei Dampflokomotiven ein Zeitversatz zwischen dem Zeitpunkt, bei diesem die Kohle in die Feuerbüchse geschaufelt wird und dem Zeitpunkt, bei diesem ausreichend Druck zum Antreiben der Dampflok zur Verfügung steht. Denn die Kohle muss erst verbrennen, den Kessel und das Wasser erhitzten bis ausreichend Dampf und Druck vorhanden ist.

Daher muss der Heizer situationsgerecht und rechtzeitig ausreichend Kohle in die Feuerbüchse schaufeln, um eine Steigung zu überwinden. Wurde nicht rechtzeitig und ausreichend Kohle geschaufelt, wird der Zug zu langsam und bleibt im Extremfall in der Steigung stehen. Wenn der Heizer vor dem Bahnhof zu viel Kohle geschaufelt hat, wird die Kohle/Energie nicht/kaum genutzt und es muss im ungünstigsten Fall unnötig Dampf abgelassen werden. Insbesondere bei einem unerwarteten Signalhalt wird bei einer Dampflok nicht nur Energie durch das Bremsen vernichtet, sondern zusätzlich auch durch gegebenenfalls erforderliches Druckablassen¹³ (die Kohle ist verbrannt, hat Dampf erzeugt und wird nicht gebraucht).

Letztendlich mussten die Heizer und Lokführer von Dampflokomotiven eine vorausschauende energiesparende Fahrweise anwenden, damit der Zug ausreichend schnell fährt und der Heizer nicht unnötig viel Kohle schaufeln muss. Zudem war das Kohleschaufeln für den Heizer mit einer grossen Anstrengung verbunden.

So ist abschliessend festzustellen, dass eine vorausschauende energiesparende Fahrweise etwas sehr Altes und ganz und gar nichts Neues ist.

3.2.1.2 Computergestützte Fahrprofiloptimierungen

Durch die Erfindung des Computers und dessen Weiterentwicklung ergab sich die Möglichkeit, die energiesparende Fahrweise zu optimieren. Was zu Dampflokzeiten durch einfache Abschätzungen kombiniert mit einem Ausprobieren gemacht wurde, lässt sich durch leistungsfähige Rechner und Algorithmen weitestgehend ersetzen.

Die vermutlich ersten computerbasierten Untersuchungen zum energieoptimierten Fahren fanden im Jahr 1968 durch den Japaner Ichikawa statt, indem mathematisch der

¹³ Teilweise kann das Druckablassen umgangen werden, indem beispielsweise neues Wasser in den Kessel gespeist wird.

Energieverbrauch zwischen zwei Bahnhöfen reduziert werden sollte (Ichikawa, 1968). In den Folgejahren wurden sehr viele Publikationen über die energieoptimierte Fahrweise verfasst, wobei auch noch im Jahr 2020 neue Erkenntnisse entstanden.

Es wurden viele Aufzählungen und Beschreibungen über die verschiedenen Publikationen und die daraus resultierende Entwicklungsgeschichte veröffentlicht (siehe bspw. Bomhauer 2019 – Kapitel 4.3.3). Eine Nennung der ganzen Publikationen würde den Rahmen sprengen. Zusammengefasst können folgenden Punkte festgestellt werden:

- Es wurden häufig nur die direkten geschwindigkeitsabhängigen Verluste betrachtet.
- Die meisten älteren Publikationen betrachten die Maschinenverluste nicht.
- Diverse Publikationen stellen fest, dass im mittleren Geschwindigkeitsbereich die Maschinenverluste zu vergleichbar hohen Verlusten, wie die Fahrwiderstände, führen.
 - So quantifizierte beispielsweise Gonzales-Gil (2014) im Rahmen einer gesamtheitlichen Studie, dass 16 % der Gesamtverluste durch die Fahrwiderstände kommen und 14 % der Gesamtverluste bei Traktionskomponenten entstehen. Dies entspricht etwa für den mittleren Geschwindigkeitsbereich: 1/2 Fahrwiderstand und 1/2 Fahrzeugkomponenten.
 - Meyer (2020) quantifizierte die folgenden Verhältnisse/Größenordnungen:
Schnellzug: 2/3 Fahrwiderstand und 1/3 Fahrzeugkomponenten
S-Bahn-Zug: 1/3 Fahrwiderstand und 2/3 Fahrzeugkomponenten
- Bei genauerer Betrachtung der Arbeiten lag die Vernachlässigung der Maschinenverluste meist daran, dass dies zu erheblichen Rechenmehraufwänden führt und dies die mathematischen Modelle erheblich komplexer macht.
- Die wenigen verbliebenen Publikationen, welche die Maschinenverluste betrachten, sind vereinfacht. Sie vernachlässigen etliche maschinenbedingte Details, beispielsweise die Einzelmotorabschaltung.

3.2.2 Verluste im Traktionsstrang

Im Rahmen dieser Studie werden primär Frequenzumrichterfahrzeuge betrachtet. Dies begründet sich durch den Sachverhalt, dass seit circa 1990 die meisten elektrischen neuen Schienenfahrzeuge mit dieser Technologie gebaut werden. Der verwendete Optimierungsalgorithmus wird aber so implementiert, dass er auch auf andere Fahrzeugtypen anpassbar ist.

In den folgenden Unterabschnitten werden zuerst kurz die Komponenten der Frequenzumrichterfahrzeuge genannt und im Anschluss kurz erläutert. Dabei wird der Schwerpunkt auf deren Verluste und Nichtlinearitäten gesetzt.

3.2.2.1 Komponenten

Der Traktionsstrang von schweizerischen Ein-System-Frequenzumrichterfahrzeugen beinhaltet üblicherweise die folgenden Komponenten (vereinfacht):

- Haupttransformator
- Traktionsstromrichter (bestehend aus Netzstromrichter, Zwischenkreis, Motorstromrichter und weiteren Komponenten)
- Fahrmotoren

Die Abbildung 8 zeigt hierzu eine stark vereinfachte Prinzipdarstellung.

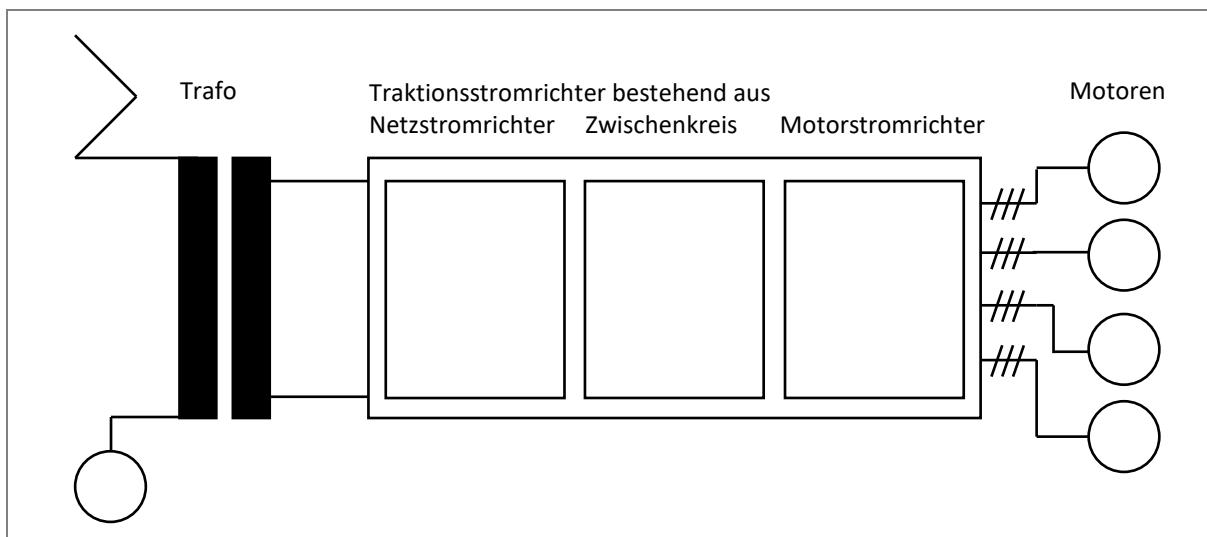


Abbildung 8 Vereinfachtes Prinzip der Darstellung des Antriebsstranges eines Frequenzumrichterfahrzeugs
(Eigene Zeichnung in Anlehnung an die Quellen: (Geber et al, 1991; Filipovic, 2005; Janicki und Reinhard, 2008; Nold et al, 2018; Meyer, 2020))

3.2.2.2 Haupttransformator

In der Schweiz liegt die Fahrleitungsspannung von Vollbahnen und Bahnen mit einer höheren Transportleistung auf einem Level von 15 kV (SBB und Zentralbahn) oder 11 kV (RhB und MGB) bei einer Frequenz von 16.7 Hz. Die hohe Fahrleitungsspannung ist unter anderem erforderlich um hohe Leistungen möglichst verlustarm über weitere Distanzen zu übertragen. Daher benötigen diese Fahrzeuge auf diesen Netzen einen Haupttransformator, dessen primäre Aufgabe es ist, das Fahrleitungsspannungslevel auf ein niederes fahrzeuginternes Spannungslevel zu wandeln. Bei Frequenzumrichterfahrzeugen ist dieses interne Spannungslevel üblicherweise das Level des Stromrichters.

Der Haupttransformator hat mindestens eine Primärwicklung und mindestens eine Sekundärwicklung. Dabei ist anzumerken, dass es nicht ungewöhnlich ist, dass ein Haupttransformator einer Lokomotive, in der Summe häufig zehn Wicklungen hat. Die Funktionsweise des Haupttransformators wird im Folgenden beschrieben.

Primärseitig wird eine Spannung angelegt. Durch diese Spannung fließt primärseitig ein Magnetisierungsstrom, welcher ein magnetisches Feld aufbaut. Durch die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses wird sekundärseitig eine Spannung induziert.

Im Fall, dass sekundärseitig keine Last anliegt, fließt primärseitig trotzdem der Magnetisierungsstrom. Wenn sekundärseitig eine Last anliegt, fließt sekundärseitig ein Strom, durch diesen Strom wird die Magnetisierung des Trafos (auf der Primärseite wird eine Spannung eingeprägt) so beeinflusst, dass primärseitig mehr Strom durchfließt. Die Abbildung 9 veranschaulicht hierzu das Ersatzschaltbild eines Transformators.

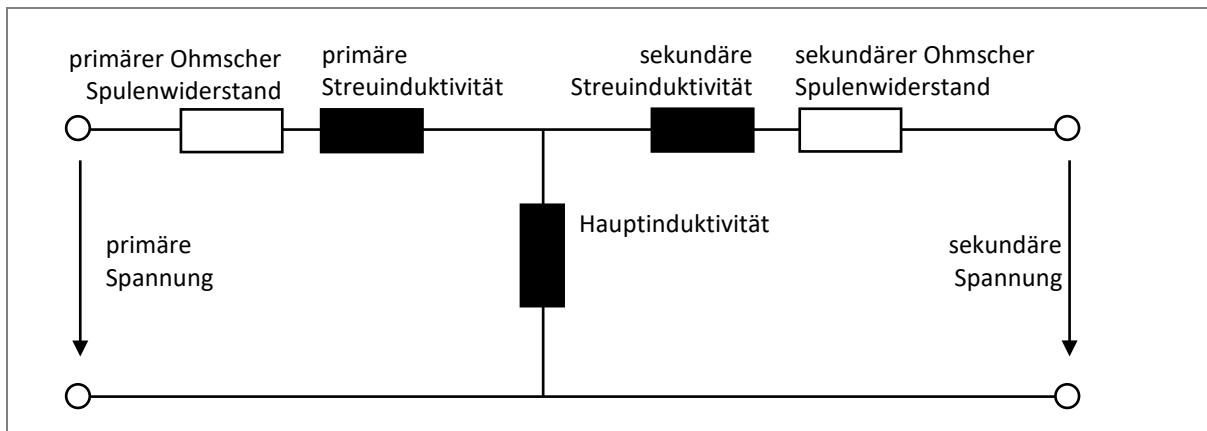


Abbildung 9 Ersatzschaltbild eines Transformators. (Eigene Zeichnung in Anlehnung an die Quelle: (Meyer, 2020))

3.2.2.2.1 Betriebspunktabhängige Verluste im Widerstand

Durch den zuvor beschriebenen Sachverhalt, dass bei einem Transformator jederzeit ein Magnetisierungsstrom durch die Primärwicklung fliesst, wird in Kombination mit der Abbildung 9 deutlich, dass ein konstanter lastunabhängiger Verbraucher vorhanden ist. Dieser Verbraucher ist im Leerlauf, sowie unter Vollast vorhanden.

Durch den Aspekt, dass der Wirkungsgrad Nutzen pro Aufwand ist, ergibt sich bei einem Betriebspunkt mit geringer Last (nahe dem Leerlauf) durch diesen Leerlaufstrom für die Magnetisierung ein Aufwand bei geringem Nutzen und somit einen geringen Wirkungsgrad. Bei hoher Last fällt dieser Grundmagnetisierungsstrom wenig ins Gewicht. Bei hoher Last wird der Laststrom dominant.

Durch den Strom, im Trafo entstehen direkte Verluste durch den Ohm'schen Widerstand. Diese Verluste werden in Wärme umgewandelt. Mathematisch lässt sich der widerstandsabhängige Verlustleistungsanteil eines Transformatoren mit folgender Formel beschreiben (Meyer, 2020).

$$P_{Verlust.Widerstandsabh.} = R \cdot (I_{Leerlaufanteil} + I_{Lastanteil})^2 \quad \text{Formel 1}$$

Qualitativ skizziert, ergibt sich dadurch der in Abbildung 10 gezeigte Zusammenhang für den Wirkungsgrad. Dabei wird deutlich, dass dieser stark vom Betriebspunkt bzw. der Auslastung abhängt.

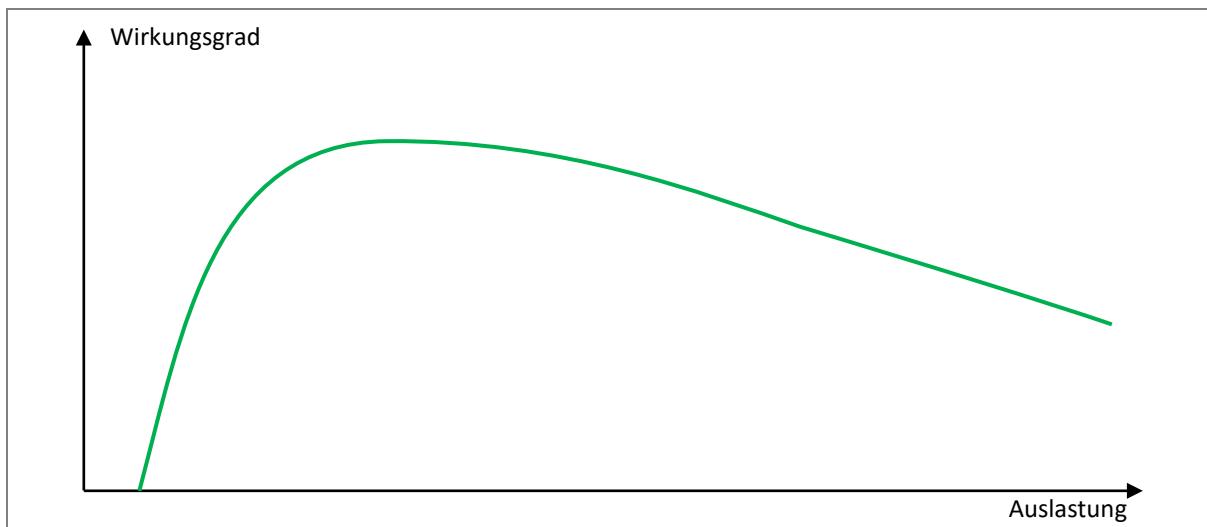


Abbildung 10 Qualitative skizzierte Darstellung des Transformator-Wirkungsgrades (Eigene Zeichnung in Anlehnung an die Quelle: (Blesl und Kessler, 2017))

3.2.2.2.2 Betriebspunktabhängige Verluste im Eisenkern

Schienenfahrzeuge haben grundsätzlich einen begrenzten Bauraum und eine Begrenzung hinsichtlich ihrer Achslast, Meterlast und Gesamtmasse.

Daher muss ein Schienenfahrzeug-Transformator im Vergleich zu stationären ortsfesten Transformatoren deutlich kompakter gebaut werden. Dies hat unter anderem zur Folge, dass der Eisenkern zur Führung des magnetischen Flusses Φ relativ klein ausgelegt werden muss, was wiederum zu einer hohen Flussdichte B im Eisenkern führt.

Weiter ist die geringere Frequenz von 16.7 Hz nachteilhaft für einen Transformator, da bekannterweise gilt:

$$U \sim \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{Formel 2}$$

So führt also die geringe Frequenz im Zusammenhang mit dem Bauraum zu einer Erhöhung der Flussdichte B im Eisenkern.

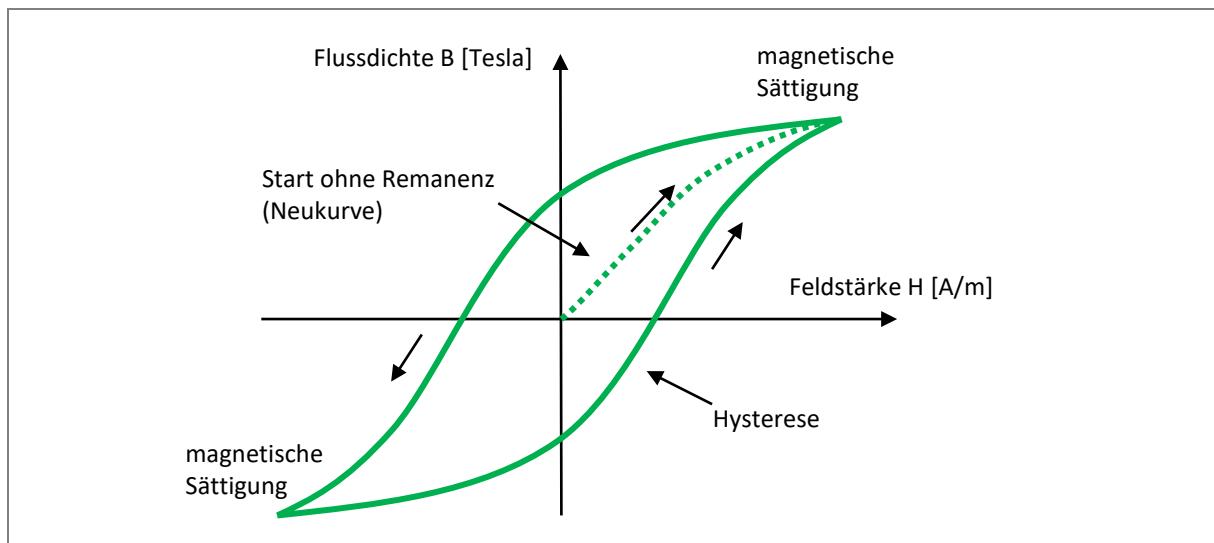


Abbildung 11 Qualitative Darstellung einer Magnetisierungshysterese. (Eigene Zeichnung in Anlehnung an die Quelle: (Kallenbach et al, 2008))

Bei einer geringen Feldstärke H erhöht sich die Flussdichte B annähernd linear im Eisenkern. Mit zunehmender Feldstärke geht der Eisenkern in seine magnetische Sättigung, da die magnetische Permeabilität des Eisens begrenzt ist. In Folge dessen, steigt die Flussdichte mit zunehmender Feldstärke langsamer und der Zusammenhang wird nichtlinear. Geht die magnetische Feldstärke wieder auf Null zurück (Phasennulldurchgang) bleibt ein Restmagnetismus, die sogenannte Remanenz bestehen. Letztendlich wird durch dieses materialspezifische Verhalten, bei jeder Netzperiode eine Hysterese durchfahren. (siehe

Abbildung 11). Jeder dieser Ummagnetisierungsvorgänge benötigt Energie und es entstehen Energieverluste, welche sich in Wärme umwandeln.

Mathematisch lassen sich diese Hysteresenverluste mit folgender Funktion beschreiben (Veigel, 2018):

$$P_{Verlust.Hysterese} \sim f \cdot \hat{B}^2 \quad \text{Formel 3}$$

Die Frequenz f bleibt zwar annähernd konstant, jedoch durch den quadratischen Einfluss der Flussdichte B wird deutlich, dass auch hier nichtlineare Verluste entstehen.

Darüber hinaus gibt es Wirbelstromverluste in den Blechen. Diese lassen sich mit folgender Funktion beschreiben (Veigel, 2018):

$$P_{Verlust.Wirbelstrom} = \int_0^{d/2} \frac{U_{ind}(x)^2}{R_i} \quad \text{Formel 4}$$

Darüber hinaus gibt es Exzessverluste, welche durch zusätzliche Wirbelstromanteile entstehen und sich mit der folgenden Funktion beschreiben lassen (Veigel, 2018):

$$P_{Verlust.Exz} \sim f^{3/2} \cdot \hat{B}^{3/2} \quad \text{Formel 5}$$

Grundsätzlich wird deutlich, dass auch die Verluste im Eisenkern signifikant nichtlinear beeinflusst werden. Dadurch sind auch diese Verluste stark betriebspunktabhängig, sodass sie wiederum den Wirkungsgrad betriebspunktabhängig beeinflussen.

3.2.2.2.3 Betriebspunktabhängige Verluste durch Oberschwingungen

Grundsätzlich ist bekannt, dass Oberschwingungen unter anderem durch die Taktung des Netzstromrichters erzeugt werden. Auch die Taktung ist stark vom Betriebspunkt abhängig und erzeugt daher einen betriebspunktabhängigen Einfluss auf den Wirkungsgrad.

3.2.2.2.4 Übersicht der Einflüsse auf den Transformatorenwirkungsgrad

Der dominierende Faktor für die Transformatorenverluste bei Schienenfahrzeugen ist der Strom. Die Eisenverluste und die Verluste durch die Oberschwingungen sind sekundär. Grundsätzlich gibt es aber auch noch weitere Einflüsse, wie beispielsweise die Skineffekte (frequenzabhängig). Zusätzlich gibt es noch Verluste durch die Einwirkung auf die Umgebung, wie beispielsweise Wirbelströme im Kessel (Meyer, 2020).

3.2.2.3 Traktionsstromrichter

Der Stromrichter, beziehungsweise der Frequenzumrichter, befindet sich zwischen dem Transformator und den Motoren. Er besteht bei Wechselstromfahrzeugen üblicherweise aus dem Netzstromrichter, dem Zwischenkreis, dem Bremssteller und dem Motorstromrichter (siehe Abbildung 12).

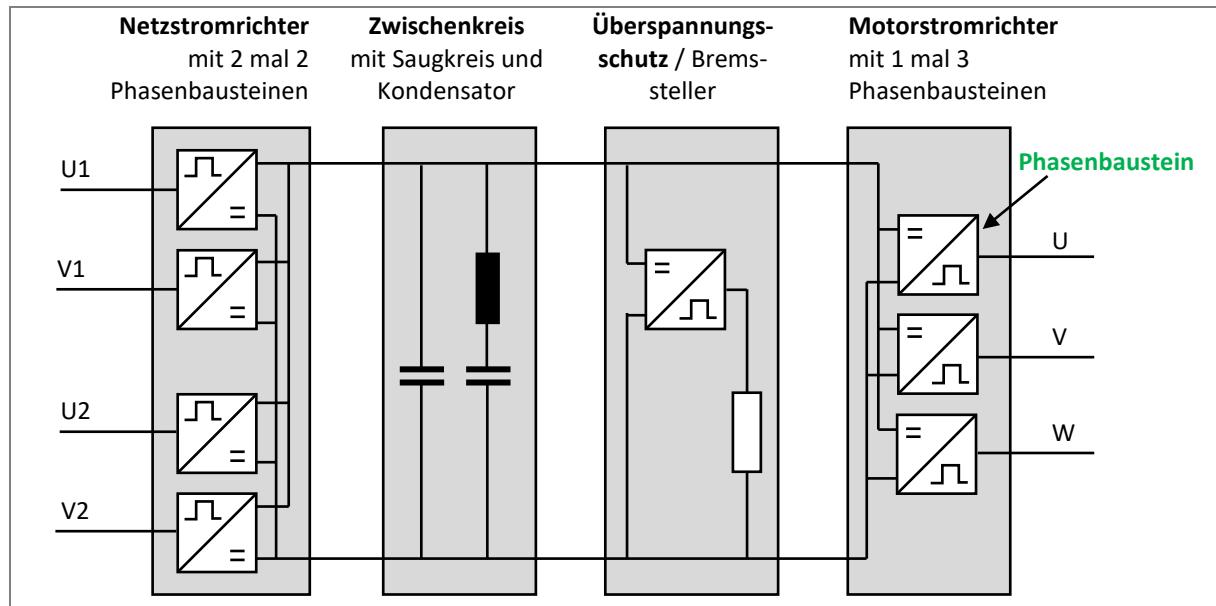


Abbildung 12 Vereinfachte Darstellung des Aufbaus eines 2-Punkt-Traktionsstromrichters mit einem Modulationsgrad von 4 zu 3 und insgesamt 8 Phasenbausteinen. (Eigene Zeichnung in Anlehnung an die Quellen: (Geber et al, 1991; Steimel, 2006; Meyer, 2020))

Die Aufgabe des Netzstromrichters bei Wechselstromfahrzeugen besteht primär darin, die Eingangsspannung für den Zwischenkreis gleichzurichten, die Zwischenkreisspannung zu regeln und die Zwischenkreisspannung (beim Rückspeisen) wechselzurichten. Weiter regelt er den Leistungsfaktor und somit die Blindleistung.

Die Aufgabe des Zwischenkreises bei Wechselstromfahrzeugen besteht primär in der Funktion als Zwischenglied bei der Frequenzumwandlung und in der Funktion des Energiespeichers (für üblicherweise 25 bis 60 Millisekunden Nennleistungsbezug).

Die Aufgabe des Motorstromrichters bei Wechselstromfahrzeugen besteht primär im wechselrichten der Gleichspannung in eine dreiphasige Wechselspannung mit einer variablen Frequenz und Amplituden zum Aufbau und der Führung des magnetischen Flusses. Er regelt das Drehmoment. Beim Rückspeisen richtet er die Motorströme gleich.

Weiter wird noch ein Bremssteller verbaut. Bei Wechselstromfahrzeugen besteht seine Aufgabe primär darin, einen transienten Überspannungsschutz zu realisieren.

Wechselstromfahrzeuge, werden nur extrem selten so konstruiert, dass der Bremssteller Bremsenergie in Wärme umwandelt. Dies liegt daran, dass ein Wechselstromnetz fast immer rückspeisefähig ist und sofern das Netz ein zu hohes Spannungsniveau aufweist, erzeugt der Netzstromrichter induktive Blindleistung, um durch einen entsprechenden $\cos \varphi$ das Netz zu stabilisieren. In Anbetracht dessen, da es die Aufgabe des Bremsstellers ist, Energie zu vernichten, ist eine Berechnung der Verluste des Bremsstellers nicht notwendig, da er letztendlich 100 % der Energie vernichtet und im Rahmen dieser Studie ist es nicht relevant, ob die Energie im Halbleiter oder im Bremswiderstand verheizt, beziehungsweise vernichtet wurde.

Der dominierende Anteil der Stromrichterverluste resultiert aus den Schaltverlusten in den Phasenbausteinen während der Pulsweitenmodulation. Daher wird im Folgenden auf die Phasenbausteine, deren Verluste und im Anschluss auf die betriebspunktabhängige Modulation eingegangen.

3.2.2.3.1 Leit- und Schaltverluste

Der Phasenbaustein ist das Bauelement, welches benötigt wird um eine Pulsweitenmodulation zu realisieren. Er ist quasi ein leistungselektronischer Umschalter. Er hat einen DC-Plus und einen DC-Minus-Eingang, sowie einen Ausgang (Abbildung 13 und Abbildung 14).

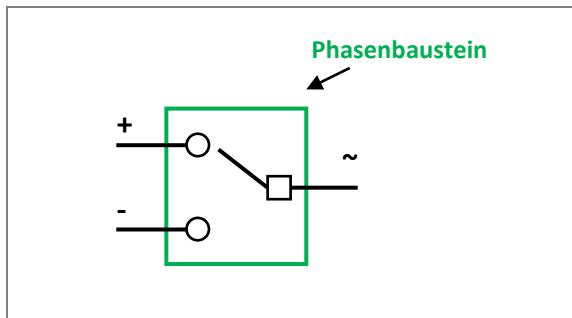


Abbildung 13 Vereinfachte Veranschaulichung und Analogie des Umschaltschaltkontakte bei einem Phasenbaustein. (Zeichnung basierend auf der Quelle: Meyer, 2020 und Meyer 1990)

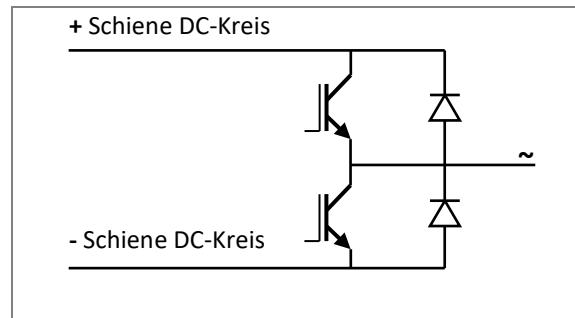


Abbildung 14 Vereinfachte Veranschaulichung des Aufbaus eines Phasenbausteins (Zeichnung basierend auf der Quelle: Meyer, 2020)

Am Halbleiter des Phasenbausteins entstehen Verluste. Diese Verluste lassen sich mit folgender Formel beschreiben (Specovius, 2009):

$$P_{\text{Verlust}} = I_{\text{Kollektor}} \cdot U_{\text{Kollektor}/\text{Emitter}}$$

Formel 6

Während den Betriebszuständen des Halbleiters entstehen folgende Verluste:

- Im **ausgeschalteten Zustand** liegt eine Sperrspannung an, es fliesst aber kein Strom. Daher sind die Verluste beim gesperrten Bipolartransistor gleich Null.
- Im **eingeschalteten Zustand** fliesst ein Strom $I_{Kollektor}$ durch den Halbleiter und es liegt ein minimaler Spannungsabfall $U_{Kollektor/Emitter}$ an. Dadurch entstehen Leitverluste, während der Halbleiter leitet.
- Beim **Anschalten** eines Halbleiters entstehen weitere Verluste. Grundsätzlich ist ein Schaltvorgang nicht unendlich kurz. So steigt der Kollektorstrom $I_{Kollektor}$ während der Anstiegszeit an. Gleichzeitig fällt die Spannung $U_{Kollektor/Emitter}$ ab. Durch diese Rampen entsteht aus dem Produkt $I_{Kollektor}$ multipliziert mit $U_{Kollektor/Emitter}$ eine Verlustleistung. Die Abbildung 15 veranschaulicht diese Schaltverluste.

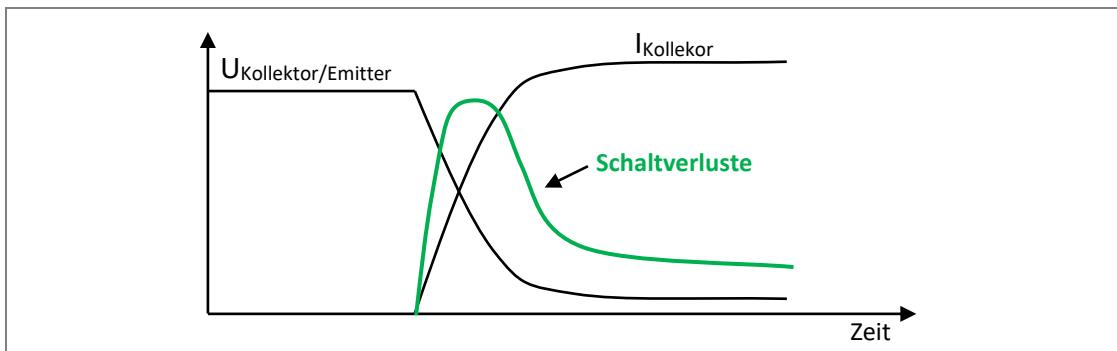


Abbildung 15 Qualitative Veranschaulichung der Anschaltverluste in einem Halbleiter (Zeichnung basierend auf der Quelle: Specovius, 2009)¹⁴

- Beim **Ausschalten** eines Halbleiters entstehen ebenfalls Verluste. Durch eine kurzzeitige Spannungsspitze zwischen dem Kollektor und Emitter werden diese sogar etwas erhöht.

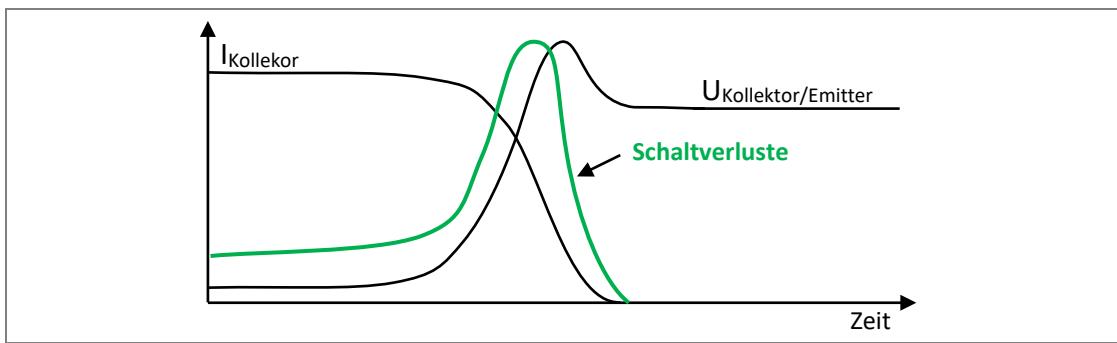


Abbildung 16 Qualitative Veranschaulichung der Ausschaltverluste in einem Halbleiter (Zeichnung basierend auf der Quelle: Specovius, 2009)¹⁴

¹⁴ Diese Abbildung zeigt eine Überlagerung der Spannung, des Stromes und der Schaltverluste, sodass die Ordinatenachse mehrfach verwendet wird und jeweils die einzelnen Größen darstellt.

Zusammengefasst lassen sich diese Verluste in einem Halbleiter mit der Abbildung 17 beschreiben.

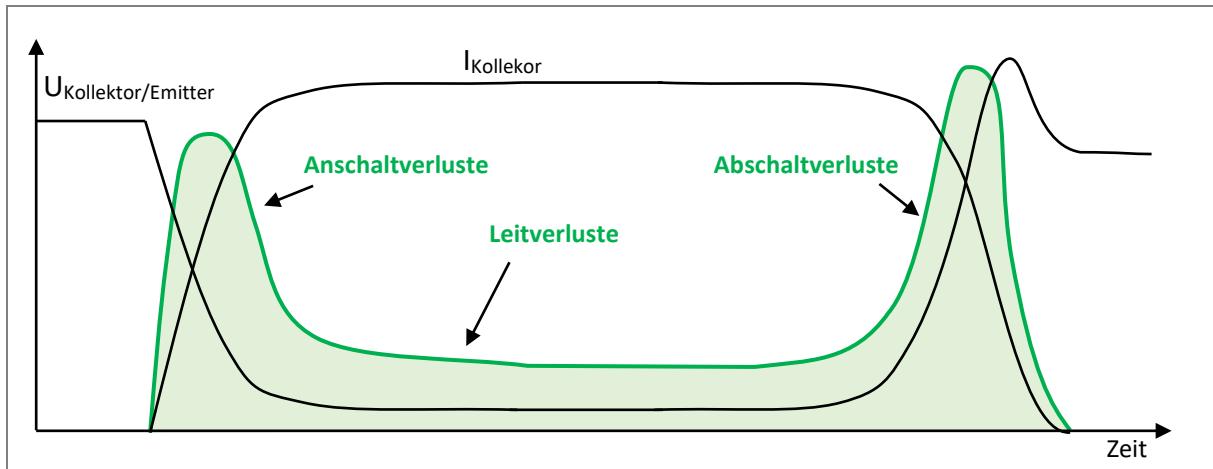


Abbildung 17 Qualitative Veranschaulichung eines An- und Abschaltzykluses in einem Halbleiter (Zeichnung basierend auf der Quelle: Specovius, 2009 und teilweise auf Meyer, 2020)¹⁵

Die An- und Abschaltverluste machen deutlich, dass die Verluste in den Halbleitern sehr stark von der Häufigkeit des An- und Abschaltens abhängen. Und dies wiederum wird von der Frequenz und dem Modulationsverfahren beeinflusst.

Der Stromrichterregler fordert anhand von Messwerten und Sollwerten übergeordneter Regler die momentane Spannungsaussteuerung an, welche zur Funktionserfüllung benötigt wird (beispielsweise zur Erzeugung des Motordrehmoments). Basierend auf dieser, vom Regel geforderten momentanen Spannungsaussteuerung, erzeugt der Modulator Schaltimpulse. Anhand dieser Schaltimpulse werden die Halbleiter im Stromrichter an- und ausgeschalten. Der zeitliche Verlauf des An- und Ausschaltens führt zu einer Pulsweitenmodulation und nähert damit ein sinusförmiges Signal an.

Die Abbildung 18 stellt ein Beispiel einer Pulsweitenmodulation dar. So zeigt die blaue Linie zwei Sinus-Netzperioden und die schwarze Linie zeigt die Spannung, welche diesen Sinus nachbildet. Zur Modulation wurde in diesem Beispiel das Sinus-Dreieck-Modulationsverfahren angewandt. Aus der Abbildung 18 wird deutlich, dass bei jedem Schnittpunkt Dreieck/Sinus ein Schaltvorgang stattfindet. Zur besseren Veranschaulichung wurde eine niedere Takt-Frequenz von 100 Hz gewählt. In der Praxis ist die Frequenz höher und es wird üblicherweise auch eine versetzte Taktung angewandt.

¹⁵ Diese Abbildung zeigt eine Überlagerung der Spannung, des Stromes und der Schaltverluste, sodass die Ordinatenachse mehrfach verwendet wird und jeweils die einzelnen Größen darstellt.

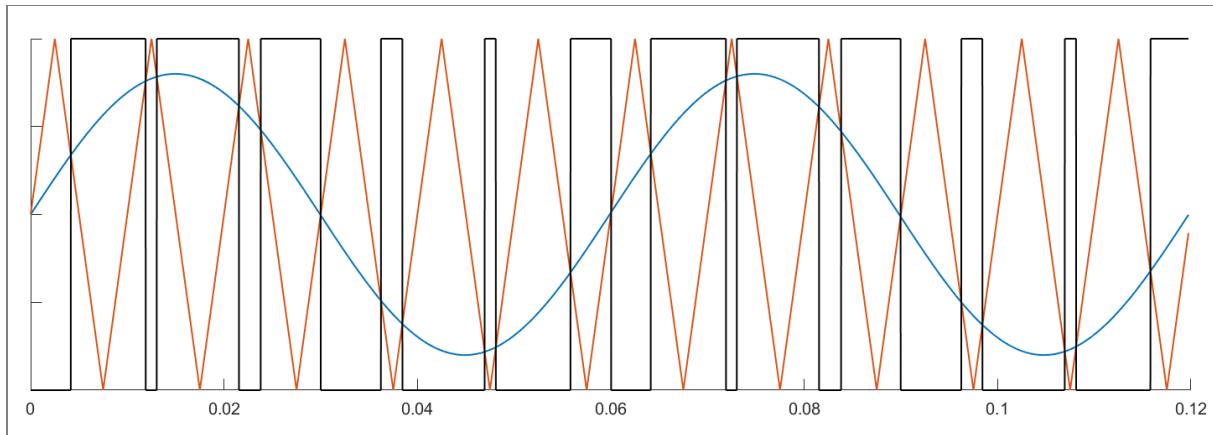


Abbildung 18 Berechneter Fall einer Sinusdreieckmodulation für einen Netzstromrichter ohne Anwendung der versetzten Taktung. Die blaue Linie stellt den Sinus dar. Die orangefarbene Linie das Dreiecksignal der Sinus-Dreieck-Modulation. Die schwarze Linie stellt die Spannung am Ausgang dar. Die Werte wurden mit einer Taktung von 100 Hz berechnet.

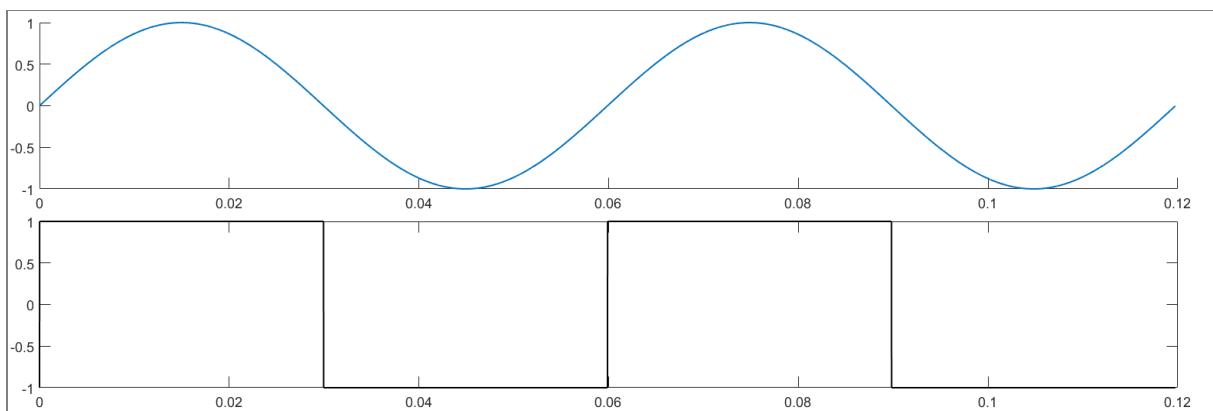


Abbildung 19 Berechneter Fall einer Vollblocktaktung. Die blaue Linie stellt den Sinus dar. Die schwarze Linie stellt die Spannung am Ausgang dar. Es wird deutlich, dass nur eine Taktung pro Sinusperiode stattfindet.

Es gibt eine Vielzahl von Modulationsverfahren. Diese lassen sich in asynchrone Verfahren und in synchrone Verfahren einteilen. Beim Netzstromrichter wird meist nur das Sinus-Dreieck-Modulationsverfahren angewandt. Beim Motorstromrichter ändert sich die Taktung und auch das Modulationsverfahren über den Geschwindigkeitsbereich. So wird bei tiefer Drehzahl gerne das asynchrone Sinus-Dreieck-Modulationsverfahren angewandt, bei mittlerer Drehzahl die synchrone Mehrfachtaktung und bei hoher Drehzahl die synchrone Vollblocktaktung (siehe Abbildung 19). Grundsätzlich ist zu betonen, dass die Wahl neben der Drehzahl auch noch von der Stromrichter-Taktfrequenz und den Hersteller-Präferenzen abhängt (Meyer, 2020).

Die Taktung des Motorstromrichters ist deutlich hörbar. Der Stromrichter selbst erzeugt kaum Geräusche. Deutlich hörbar sind primär die durch Stromrichterharmonische verursachten Geräusche in den elektromagnetischen Bauteilen. Dies sind primär die Motorwicklungen und

sekundär die Trafowicklungen. Mit der magnetischen Sättigung dieser elektromagnetischen Bauteile steigt die Lautstärke des hörbaren Tones (Meyer, 2020).

In der Nähe der Lokomotive ist dieser Ton deutlich hörbar. Der Ton ändert sich mit der Geschwindigkeit teilweise kontinuierlich und teilweise auch schlagartig. Dadurch verdeutlicht dieser Ton, Änderungen in der Taktfrequenz und des Modulationsverfahrens. Durch die Frequenz dieses hörbaren Tons ist es teilweise möglich, Rückschlüsse auf das Fahrzeug zu führen und teilweise auch direkt auf die Stromrichtertaktung und Modulation.

Die Taktfrequenz und das Modulationsverfahren wirkt sich durch die An- und Abschaltverluste in den Phasenbausteinen des Stromrichters direkt auf Stromrichterverluste aus. Da sich diese in Abhängigkeit der Drehzahl bzw. Geschwindigkeit ändert, ändern sich auch die Verluste des Stromrichters in Abhängigkeit mit der Geschwindigkeit und sind somit nicht konstant.

Weiter ist zu betonen, dass sich die Taktfrequenz und das Modulationsverfahren auch auf die Verluste in den damit zusammenhängenden Komponenten auswirkt. So hängt beispielsweise ein Teil der Fahrmotorverluste direkt davon ab.

3.2.2.3.2 Weitere Verluste

Neben den genannten Leit- und Schaltverlusten gibt es noch weitere Verluste im Stromrichter. Dominant ist bei Wechselstromfahrzeugen hierbei der Saugkreis. Aber auch die Entladewiderstände brauchen Energie. Es entstehen Verluste in den Stromschienen.

Zusätzliche Verluste gibt es bei der Speisung der Gate-Steuerung, der Leittechnik und natürlich auch bei der Kühlung.

3.2.2.4 Fahrmotoren

Die Aufgabe der Fahrmotoren besteht darin, das Drehmoment zu erzeugen um das Schienenfahrzeug anzutreiben. Bei den hier betrachteten Frequenzumrichterfahrzeugen werden die Fahrmotoren vom Stromrichter gespeist.

Im Folgenden werden die Drehstromasynchronmotoren beschrieben, da diese in der Schweiz und den Nachbarländern zu den meistverwendeten Motoren bei Neufahrzeugen zählen. Dabei ist anzumerken, dass dies lediglich eine Priorisierung für diesen Bericht darstellt und sich die Fahrprofiloptimierung nicht nur auf Drehstromasynchronmotoren beschränkt, sondern auch für andere Motoren anwendbar sind.

Der Asynchronmotor setzt sich aus einem Stator mit den Statorwicklungen und einem Rotor zusammen. Elektrisch ist ein Asynchronmotor mit einem rotierenden Transformator vergleichbar. So liegt, wie beim Trafo, ein magnetischer Kreis mit einem geschlossenen Fluss

vor. Der Stator des Asynchronmotors ist vergleichbar den Primärwicklungen eines Trafos und der Rotor ist vergleichbar der Sekundärwicklung eines Trafos.

Wird an dem Stator durch den Motorstromrichter eine Spannung angelegt, fliessst ein Strom durch die Statorspulen, welcher wiederum ein Magnetfeld erzeugt. Durch die Stärke, Überlagerung und zeitliche Ansteuerung der Stator-Spannung wird im Stator ein Drehfeld erzeugt. Dieses Drehfeld induziert im Rotor eine Spannung, sofern sich die Drehgeschwindigkeiten des Stator-Drehfelds gegenüber dem Rotor unterscheidet. Im Rotor sind die Windungen kurzgeschlossen und es fliessst im Rotor ein Strom, welcher wiederum ein Magnetfeld erzeugt, sodass letztendlich ein Drehmoment entsteht.

Je nachdem ob sich das Rotorfeld langsamer oder schneller als das Statorfeld dreht, entsteht ein positives oder negatives Drehmoment bzw. eine Zug- oder Bremskraft.

3.2.2.4.1 Motorkennlinie und Motorverluste

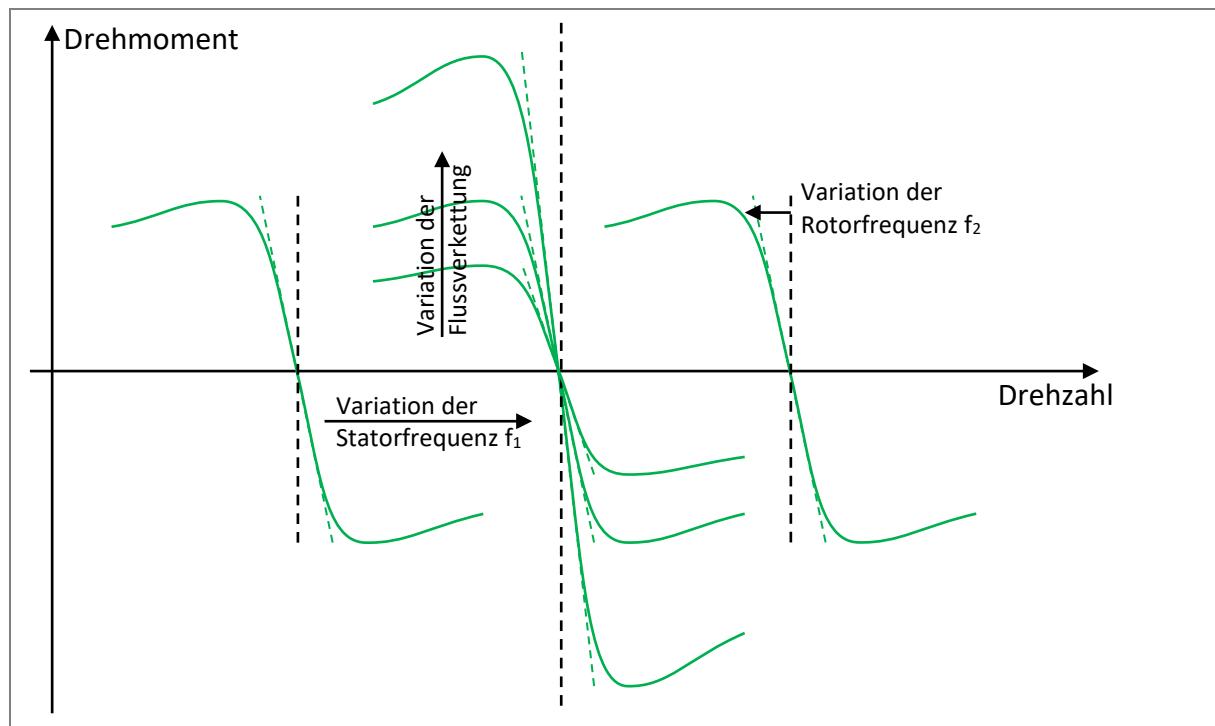


Abbildung 20 Kennlinien des Asynchronfahrmotors nach der Kloßschen Formel (basierend auf Hering et al 1999 und Meyer 2020).

Die Kloßsche Formel stellt verschiedene Drehmoment-Drehzahlkennlinien eines Asynchronmotors, wie in der Abbildung 20 gezeigt, dar (Hering et al, 1999). Dabei wird durch den schon beschriebenen Sachverhalt verdeutlicht, dass das Drehmoment, von der Variation der Rotorfrequenz gegenüber der Statorfrequenz abhängt. Weiter wird deutlich, dass sich die Kennlinie durch eine Variation der Statorfrequenz verschiebt und sich mit der Flussverkettung

skalieren lässt. Dabei ist die Kennlinie teilweise linear weicht von der Linearität mit zunehmender Nähe zum Kippmoment ab.

In diesem Zusammenhang lassen sich die Verluste nach Meyer (2020) wie folgt herleiten. Die elektrische Leistung im Luftspalt $P_{Luftspalt}$ wird in die mechanische Leistung P_{Mech} und in die elektrische Leistung im Rotor bzw. die Verluste im Rotor $P_{v.Rotor}$ umgewandelt.

$$P_{Luftspalt} = P_{Mech} + P_{v.Rotor} \quad \text{Formel 7}$$

Die elektrische Leistung im Luftspalt $P_{Luftspalt}$ ergibt sich aus der indizierten Spannung im Stator U_{i1} und dem Strom I

$$P_{Luftspalt} = U_{i1} \cdot I \quad \text{Formel 8}$$

Die im Stator indizierte Spannung U_{i1} ergibt sich aus der Rotation mit der Statorfrequenz f_1 und Flussverkettung Ψ .

$$U_{i1} = 2\pi \cdot f_1 \cdot \Psi \quad \text{Formel 9}$$

Die mechanische Leistung P_{Mech} ergibt sich aus dem Drehmoment M und der Drehzahl bzw. Winkelgeschwindigkeit Ω .

$$P_{Mech} = M \cdot \Omega \quad \text{Formel 10}$$

Die Drehzahl bzw. Winkelgeschwindigkeit Ω ergibt sich aus den Frequenzunterschieden

$$\Omega = 2\pi \cdot (f_1 - f_2) \quad \text{Formel 11}$$

Das Drehmoment M ergibt sich aus der Flussverkettung Ψ und dem Strom I

$$M = \Psi \cdot I \quad \text{Formel 12}$$

Die elektrische Leistung bzw. die elektrischen Verluste im Rotor $P_{v.Rotor}$ ergeben sich aus der indizierten Spannung im Rotor U_{i2} und dem Strom I .

$$P_{v.Rotor} = U_{i2} \cdot I$$

Formel 13

Die im Rotor indizierte Spannung U_{i2} ergibt sich aus der Rotation mit der Rotorfrequenz f_2 und der Flussverkettung Ψ .

$$U_{i2} = 2\pi \cdot f_2 \cdot \Psi$$

Formel 14

Anhand dieser Formel lässt sich aus den Verlusten der folgende Zusammenhang herleiten:

$$\underbrace{P_{Luftspalt}}_{U_{i1} \cdot I} = \underbrace{P_{Mech}}_{M \cdot \Omega} + \underbrace{P_{v.Rotor}}_{U_{i2} \cdot I}$$

$$\frac{U_{i1}}{2\pi \cdot f_1 \cdot \Psi} \cdot I = \frac{M}{\Psi \cdot I} \cdot \frac{\Omega}{2\pi \cdot (f_1 - f_2)} + \frac{U_{i2}}{2\pi \cdot f_2 \cdot \Psi} \cdot I$$

$$2\pi \cdot f_1 \cdot \Psi \cdot I = \Psi \cdot I \cdot 2\pi \cdot (f_1 - f_2) + 2\pi \cdot f_2 \cdot \Psi \cdot I$$

Und es ergibt sich für die Rotorverluste nach Meyer (2020):

$$P_{v.Rotor} = \frac{f_2}{f_1} \cdot P_{Luftspalt}$$

Formel 16

Hierbei handelt es sich also um Verluste, welche sich aus dem Verhältnis zwischen der Rotorfrequenz f_2 und Statorfrequenz f_1 ergeben.

Die folgenden drei Beispieldfälle verdeutlichen in diesem Zusammenhang die Betriebspunkt-abhängigkeit der Verluste:

- **Fall 1: Niedere Geschwindigkeit und normales Drehmoment**

Bei einer niederen Geschwindigkeit ist die Statorfrequenz f_1 niedrig. Die niedere Statorfrequenz f_1 , führt bei dem Verhältnis f_2/f_1 und der Formel 16 zu einem höheren Zahlenwert und wirkt sich ungünstig auf die Rotorverluste $P_{v.Rotor}$ aus (siehe auch Abbildung 21).

- **Fall 2: Hohe Geschwindigkeit und normales Drehmoment**

Bei einer hohen Geschwindigkeit ist die Statorfrequenz f_1 hoch. Die hohe Statorfrequenz f_1 , führt bei dem Verhältnis f_2/f_1 und der Formel 16 zu einem niederen

Zahlenwert und wirkt sich günstig auf die Rotorverluste $P_{v.Rotor}$ aus (siehe auch Abbildung 21).

- **Fall 3: Betrieb nahe der Kippgrenze**

Nahe dem Kippmoment vergrössert sich die Rotorfrequenz f_2 . Dies wirkt sich durch die Formel 16 nachteilhaft auf die Rotorverluste $P_{v.Rotor}$ aus (siehe auch Abbildung 21).

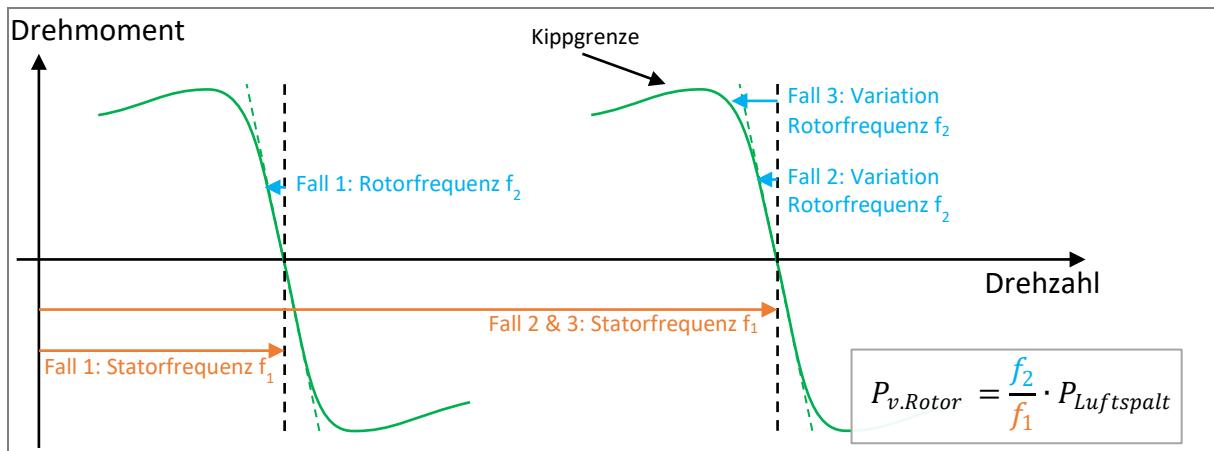


Abbildung 21 Kennlinien des Asynchronfahrmotors nach der Kloßschen Formel (basierend auf Hering et al 1999 und Meyer 2020) mit den Rotorfrequenzen.

Aus der Formel 16 und den Beispielen, wie sie auch in der Abbildung 21 gezeigt werden, wird deutlich, dass der Wirkungsgrad bei einem Asynchronmotor nicht konstant ist und von dem Betriebspunkt abhängt.

Natürlich gibt es Ansätze, den Wirkungsgrad zu verbessern. Wie auch in Abbildung 21 dargestellt, ergibt sich auch ein Einfluss, durch die Kippgrenze. Diese Kippgrenze resultiert wiederum aus der motorspezifischen Streuinduktivität. Mit einer geringeren Streuinduktivität lässt sich das Abknicken der Kennlinie bzw. die Kippgrenze bzw. das kritische Kippmoment erhöhen. Bedingt durch die vom Stromrichter verursachten Oberschwingungen braucht der Motor aber eine gewisse Streuinduktivität. Daher lassen sich die Motorverluste durch einen Stromrichter, welcher weniger Oberschwingungen erzeugt, reduzieren.

Stromrichter mit einer Drei-Punkt-Topologie haben gegenüber Stromrichtern mit Zwei-Punkt-Schaltungen bei gleicher Schaltfrequenz weniger Oberschwingungen (Huggenberger, 2016) und reduzieren daher die Motorverluste.

Um eine vergleichbare Stromqualität (wie sie eine Drei-Punkt-Topologie hat) mit einer Zwei-Punkt-Schaltung zu erzielen, müsste die Schaltfrequenz der Zwei-Punkt-Schaltung erhöht

werden. Dies wirkt sich aber nachteilhaft auf die Lärmentwicklung und Fahrmotorisolation aus (Huggenberger, 2016). Zudem wurde in Kapitel 3.2.2.3 schon beschrieben, dass eine hohe Schaltfrequenz wiederum zu höheren Schaltverlusten im Stromrichter führt.

3.2.2.4.2 Einflussfaktoren für die Verluste

Die Verluste im Motor sind nichtlinear und eine Simulation ist durch die Nichtlinearitäten im Eisen und die Frequenzabhängigkeiten sehr komplex (Meyer, 2020).

Eine detaillierte Beschreibung aller Verluste würde den Rahmen dieses Dokuments sprengen, sodass im Folgenden die Ursachen dargestellt werden:

- **Eisenverluste**

Hierbei ist der Stator gegenüber dem Rotor dominant. Zu diesen Verlusten tragen Ummagnetisierungen, Wirbelströme in den Blechpaketen und Wirbelströme neben den Leitern bei (Meyer, 2020).

→ Eisenverluste sind stark frequenzabhängig.

- **Kupferverluste**

Die Kupferverluste werden bei der Grundfrequenz und durch die Harmonischen durch den Magnetisierungsstrom und den Laststrom erzeugt. Sie teilen sich durch den DC-Widerstand, die Skineffekte und die Proximityeffekte (Meyer, 2020) auf.

→ Kupferverluste sind Strom und frequenzabhängig.

- **Mechanische Verluste**

Hierzu zählen die gesamten Reibungsverluste. Diese unterteilen sich in Luftströmungsverluste und die Lagerreibung.

Luftströmungsverluste sind stark nichtlinear und der Strömungswiderstands-koeffizient kann sich in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit sprunghaft ändern¹⁶.

Die Lagerreibung bei Wälzlagern ist bekanntlich ebenfalls nichtlinear und setzt sich meistens aus dem Rollreibungsmoment, dem Gleitreibungsmoment und dem strömungsverlustabhängigen Reibmoment zusammen. Dadurch ist es nicht unüblich, dass das Gesamtreibmoment eines Lagers, in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit weder linear, noch progressiv oder degressiv ist. Die Kennlinie für das

¹⁶ Ein bekanntes Beispiel für diese Nichtlinearität ist der Golfball, welcher bei einer höheren Fluggeschwindigkeit einen geringeren Strömungswiderstands-koeffizienten aufweist (Kray, 2008).

Gesamtreibmoment fällt und steigt meist mehrfach als Funktion von der Drehzahl. Es gibt Lagertypen mit einem Gesamtreibmoment, welches hin zu hohen Drehzahlen abnimmt, aber es gibt auch Lagertypen mit zunehmendem Gesamtreibmoment (SKF, 2020). Zudem ändern sich die Eigenschaften nach der Anzahl an Umdrehungen (Baly, 2005).

→ Mechanische Verluste sind nichtlinear.

In Anbetracht dieser vielen Einflüsse und der gesamten Nichtlinearitäten sind entweder Messungen erforderlich oder Herstellerkenntnisse um Wirkungsgradkennlinien korrekt zu bestimmen.

3.2.2.4.3 Wirkungsgradkennlinien

Die Wirkungsgradkennlinien, wie sie in der Abbildung 22 qualitativ gezeigt werden, veranschaulichen die Nichtlinearitäten des Wirkungsgrades bei Asynchronmotoren. Wobei anzumerken ist, dass diese Nichtlinearitäten auch bei anderen Motortypen vorhanden sind.

Abbildung 22 verdeutlicht, dass die Asynchronmotoren allgemein bei geringer Last einen schlechten Wirkungsgrad haben (vergleichbar wie andere Motoren). Darauf folgt ein effizientester Punkt und danach ein leichter Abfall. Die verschiedenen Linien der Abbildung 22 verdeutlichen, dass der Wirkungsgrad von der Nennleistung abhängt.

So verdeutlicht ein Vergleich der Forschungsstelle für Energiewirtschaft München, dass sich grundsätzlich der Nennwirkungsgrad mit zunehmender Nennleistung erhöht. Dies liegt daran, dass die Eisen- und Kupferverluste ungefähr mit der 3. Potenz zunehmen, aber das Drehmoment (und somit die Leistung) mit der 4. Potenz zunimmt (Rudolf und Wagner, 2008).

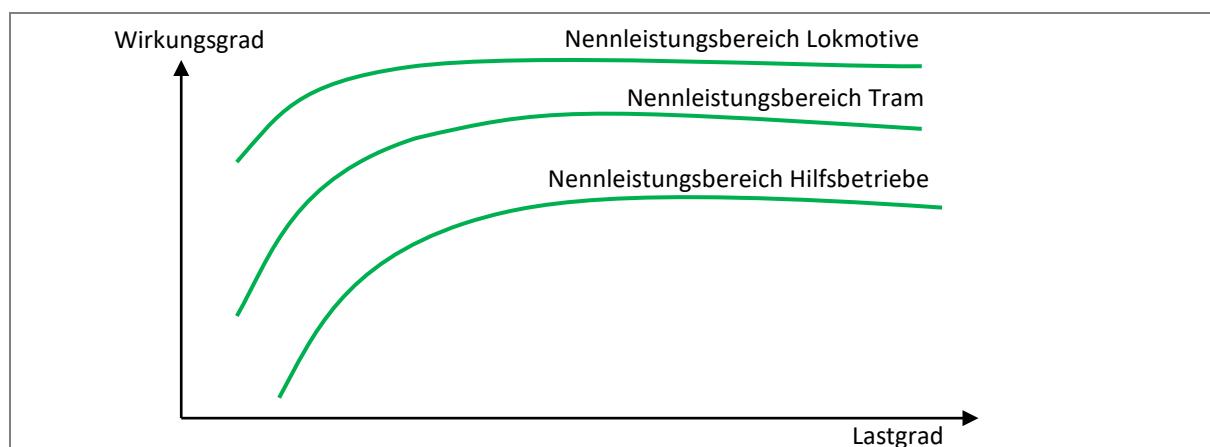


Abbildung 22 Qualitativ skizzierte Darstellung des Asynchronmotor- Wirkungsgrades (Eigene Zeichnung basierend auf der Quelle: (Blesl und Kessler, 2017))

Die logarithmisch dargestellte Abbildung 23 zeigt das leistungsstärkere Asynchronmotoren effizienter sind.

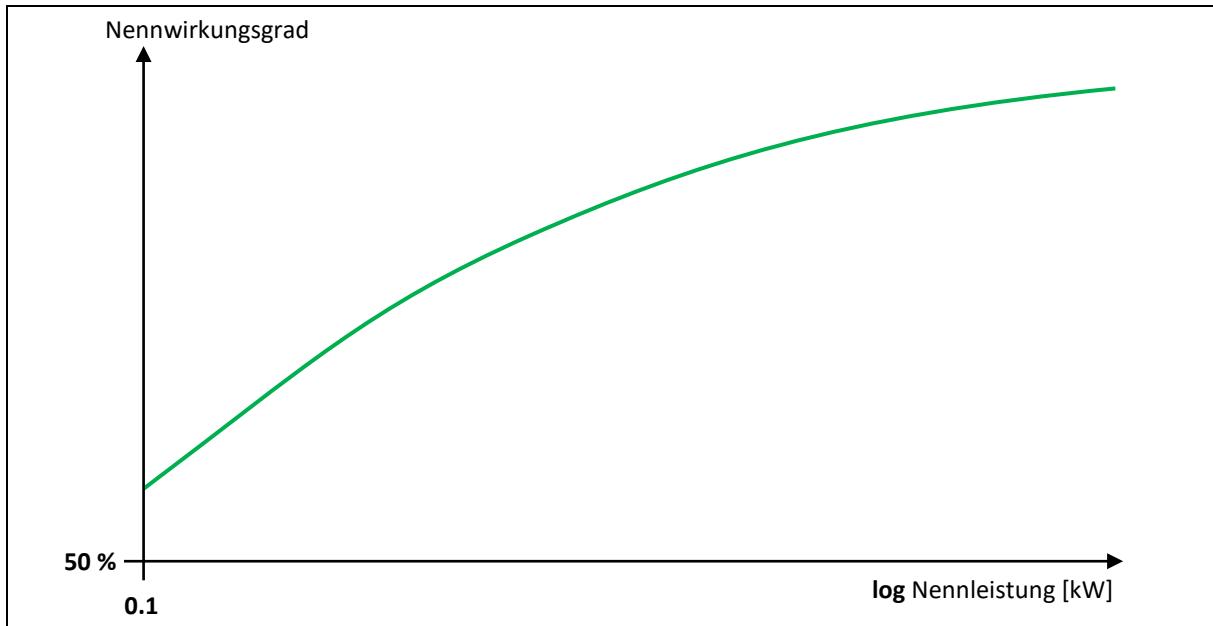


Abbildung 23 Qualitative Darstellung Nennwirkungsgrad in Abhängigkeit der logarithmisch dargestellten Nennleistung von Asynchronmotoren (Eigene Zeichnung nach den Daten der Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München (Rudolph und Wagner, 2008))

Aus dem Sachverhalt der Abbildung 22 und Abbildung 23 entsteht die in Tabelle 1 dargestellte Abwägung:

	Leistung auf viele Einzelmotoren verteilen (meist bei Triebwagen)	Leistung auf wenige Einzelmotoren verteilen (meist bei Lokomotiven)
Vorteile	Bei einer sehr fein abgestuften Einzelmotorenabschaltung kann der effizienteste Wirkungsgrad häufiger gefahren werden. ¹⁷	Der effizienteste Wirkungsgrad ist durch die grossen Motoren tendenziell höher/besser.
Nachteile	Der effizienteste Wirkungsgrad ist durch die kleinen Motoren tendenziell geringer/schlechter.	Durch die grösseren Motoren kann seltener der effizientestes Wirkungsgrad gefahren werden. ¹⁷

Tabelle 1 Vor- und Nachteile von Fahrzeugkonzepten im Zusammenhang mit der Motoraufteilung

Aus Tabelle 1, wird deutlich, dass ein Zug bei gleicher Leistung, Gewicht und Technologie, alleine nur durch eine unterschiedliche Motoranzahl bei unterschiedlichen Betriebspunkten unterschiedlich besser oder schlechter sein kann.

¹⁷ Die meistens angewandte feinste Motorabschaltungsabstufung bei modernen Triebwagen kennt die folgenden fünf Zustände: 100 % der Motoren an, 75 % der Motoren an, 50 % der Motoren an, 25 % der Motoren an, 0 % der Motoren an. Sie ist somit nicht feiner abgestuft wie bei modernen Lokomotiven.

3.2.2.5 Wirkungsgradkennfelder und Verlustkennfelder

Die in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Verluste lassen sich effizient in Wirkungsgradkennfeldern und/oder Verlustkennfeldern darstellen. Dabei wird der Wirkungsgrad oder der Verlustwert in Abhängigkeit des Drehmomentes gegenüber der Drehzahl aufgetragen (oder in Abhängigkeit der Zugkraft gegenüber der Geschwindigkeit).

Durch Wirkungsgradfelder ist bei jeder Geschwindigkeit der jeweilige Wirkungsgrad bekannt, sodass sich Wirkungsgradkennfelder gut für Simulationen eignen. Wobei anzumerken ist, dass es je nach Detaillierung der Simulation mehrere Wirkungsgradkennfelder braucht. So liegt beispielsweise beim Fahren ein anderer Wirkungsgrad wie beim Bremsen vor. Zudem kann es noch weitere Einflüsse geben.

Wirkungsgradkennfelder und Verlustkennfelder lassen sich messtechnisch (Bojoi et al, 2016) oder mit Simulationen erstellen. Die Abbildung 24 stellt qualitativ vereinfacht ein Wirkungsgradkennfeld für einen Wechselstrommotor auf der Datenbasis von Bojoi et al (2016) und Mahmoudi et al (2015) dar.

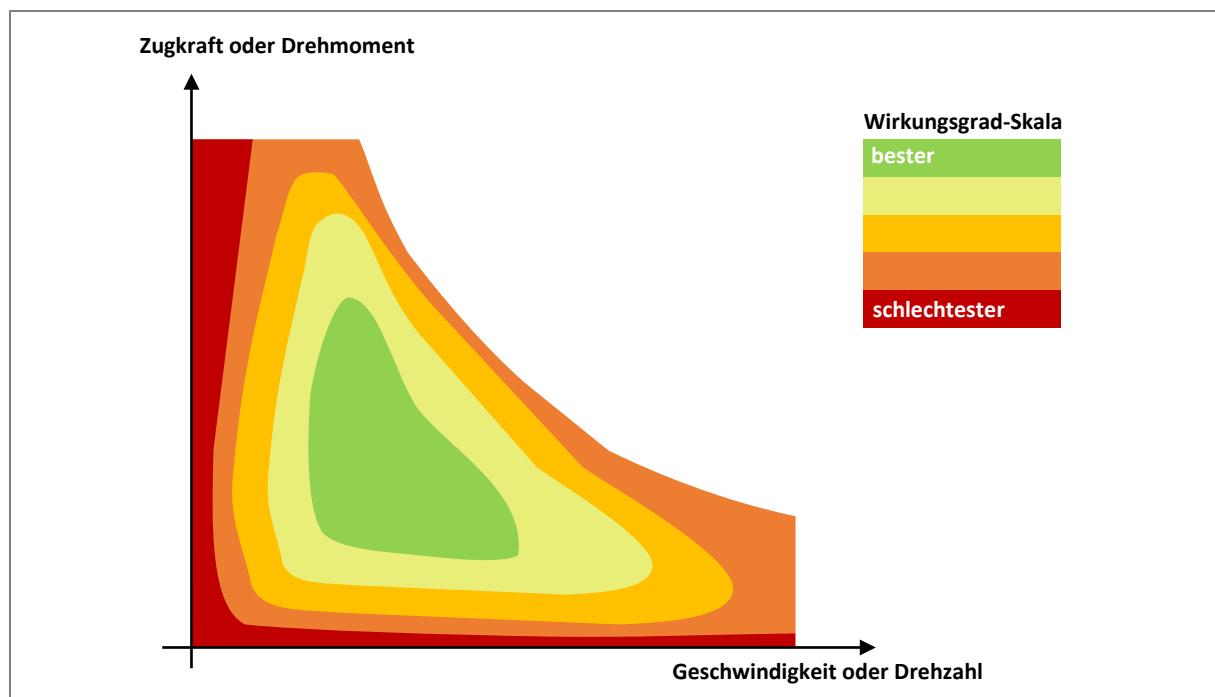


Abbildung 24 Eigene beispielhafte qualitativ vereinfachte Darstellung eines Wirkungsgradkennfeldes eines Motors
(Diese Darstellung orientiert sich an den Quellen (Bojoi et al, 2016; Mahmoudi et al, 2015))

3.2.3 Verluste in den Hilfsbetrieben

In den Hilfsbetrieben entstehen nicht vernachlässigbare konstante Verluste und variable Verluste. Im Folgenden sollen diese kurz am Beispiel der SBB Re 460 dargestellt werden. Die SBB Re 460 hat insgesamt vier Bordnetzumrichter mit je 50 kW Leistung (Geber et al, 1991) und somit zusammen 200 kW Leistung für die Hilfsbetriebe.

Die essenziellen Verbraucher im Hilfsbetriebssystem sind (Geber et al, 1991).:

- Kompressor mit Schöpfleistung 3800 l/min
- Vier 7.5 kW Fahrmotorventilatoren
- Zwei 25 kW Ölkühlerventilatoren
- Zwei mal zwei 5.5 kW Transformator- und Ölumrichterpumpen

Diese Verbraucher haben zusammen einen Bedarf von ungefähr 140 kW als Spitzenleistung.

Zu diesen kommen noch weitere Verbraucher hinzu, wie beispielsweise:

- das Batterieladegerät,
- die Führerraumklimaanlage oder
- die Leittechniksysteme.

Von diesen genannten Verbrauchern sind die Fahrmotorventilatoren und Ölkühlerventilatoren hinsichtlich ihrer Drehzahl und des Energieverbrauches drosselbar, da sie über die frequenzvariablen Bordnetzumrichter 1 und 3 gespeist werden (Geber et al, 1991). Der Bedarf dieser Ventilatoren hängt daher von der Traktionskomponententemperatur ab und letztendlich von der Verlustleistung im Traktionsstrang.

In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass durch Hilfsbetriebe ein signifikanter Energieverbrauch entsteht und das beispielsweise schon eine Optimierung der Ventilationssteuerung zu Energieeinsparungen führen kann (Nold, 2018a).

Weiter ist der Kompressor ebenfalls drosselbar (durch den Bordnetzumrichter 2). Sein Verbrauch hängt von Einflüssen diverser Komponenten ab. Die grossen Luft-Verbraucher sind das Bremssystem und Luftfederungen in den Wagen.

Die Transformator- und Ölumrichterpumpen der Re 460 (1. Generation) werden konstant mit dem Bordnetzumrichter 4 betrieben und somit nicht gedrosselt.

3.2.4 Fahrwiderstandsverluste

Fahrwiderstände stellen einen essenziellen Bestandteil der Fahrverluste dar. Im folgenden Abschnitt wird daher kurz der Aufbau der Fahrwiderstandsformeln beschrieben. Dabei wird zuerst auf die häufig angewandte stark vereinfachte Formel und danach auf die standardisierte Formel eingegangen. Anschliessend werden diese beurteilt, sodass Empfehlungen gegeben werden können.

3.2.4.1 Aufbau der Fahrwiderstandsformeln

3.2.4.1.1 Vereinfachte rein quadratische Formel ohne konstantes und lineares Glied

Der Fahrwiderstand eines Schienenfahrzeugs wird häufig vereinfacht in der folgenden Form (siehe Formel 17) rein quadratisch dargestellt (ohne konstantes Glied und ohne linear geschwindigkeitsabhängiges Glied):

$$F_R = c \cdot m \cdot v^2 \quad \text{Formel 17}$$

Diese Vereinfachung (Formel 17) beschreibt den Fahrwiderstand mit einer fahrzeugspezifischen skalierenden Konstanten c , multipliziert mit der Fahrzeugmasse m , multipliziert mit dem Quadrat der Geschwindigkeit. Diese Vereinfachung (Formel 17) führt jedoch zu signifikanten Fehlern, wie sich mit den folgenden Beispielen erklären lässt:

- Durch den Aspekt, dass diese Formel nur aus einem Teil besteht, welcher quadratisch von der Geschwindigkeit abhängt, suggeriert diese Vereinfachung (Formel 17), dass eine Verdoppelung der Geschwindigkeit eine Vervierfachung der Laufwiderstände zur Folge hat.

Im niederen Geschwindigkeitsbereich führt dies jedoch zu deutlichen Fehlern, da es auch lineare geschwindigkeitsabhängige und nicht geschwindigkeitsabhängige Fahrwiderstände gibt.

Obwohl diese Vereinfachungen (der Formel 17) mit zunehmender Geschwindigkeit akzeptabler werden, werden sie nicht einmal bei Hochgeschwindigkeitszügen angewandt (Peters, 1990). Dabei ist anzumerken, dass Hochgeschwindigkeitszüge nach der Richtlinie über die Interoperabilität des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems für mindestens 250 km/h ausgelegt sind (RDR, 1996).

Dieser Sachverhalt bezüglich des Formelaufbaus wird detailliert in Abschnitt 3.2.4.2 (siehe Seite 51) verglichen.

- Der quadratische Teil dient eigentlich dazu, den aerodynamischen Luftwiderstand darzustellen. Eine Skalierung mit der Masse ist nicht korrekt, da der Luftwiderstand nicht direkt von der Masse beeinflusst wird.

So hat beispielsweise ein Zug (mit verschlossenen Fenstern) ohne Fahrgäste einen genau so grossen Luftwiderstand wie der gleiche Zug vollgefüllt mit Fahrgästen. Denn die Fahrgäste ändern üblicherweise nicht die Form des Zuges und bei gleicher Form des Zuges liegt der gleiche Luftwiderstand vor¹⁸. Die zusätzlichen Fahrgäste erhöhen primär den Widerstand in den Achslagern, welcher jedoch nicht quadratisch mit der Geschwindigkeit zunimmt.

Dieser Sachverhalt bezüglich der Masse wird detailliert in Abschnitt 3.2.4.2.2 (siehe Seite 53) behandelt.

3.2.4.1.2 Quadratische Formel mit konstantem und linearem Glied

In Anbetracht dieser Fehler durch die rein quadratische Vereinfachung ohne konstantes und lineares Glied (Formel 17) eignet sich die folgende Beschreibung besser. Denn grundsätzlich werden Fahrwiderstände F_R in der folgenden Formel 18 dargestellt (Peters, 1990; EN 14067-2, 2003; Steimel, 2003 Rosberg et al, 2020):

$$F_R = c_1 + c_2 \cdot v + c_3 \cdot v^2 \quad \text{Formel 18}$$

Dabei bilden die Konstanten c_1 bis c_3 das Fahrzeug ab und werden korreliert mit der Geschwindigkeit v . In diese Konstante fliessen beispielsweise der Frontwiderstand, der seitliche Widerstand, Lagereigenschaften, Fahrzeugmasse und einige weitere Einflüsse ein.

Bei diesem Formelaufbau (Formel 18) gibt es aber auch zwei Unterschiede, welche zu essenziellen Fehler führen können.

- Es gibt Formeln, welche den Fahrwiderstand F_R als spezifischen Wert mit der Einheit $\frac{kN}{t}$ angeben. In diesem Fall liegt eine masseskalierende Formel vor.
- Es gibt Formeln, welche den Fahrwiderstand direkt und absolut in kN angeben.

Die Angabe mit dem spezifischen Wert führt automatisch dazu, dass auch der quadratische Teil, welcher primär vom Luftwiderstand abhängt mit der Masse skaliert wird. Dies kann zu

¹⁸ Eine Ausnahme sind beispielsweise offene Aussichtswagen, denn bei offenen Aussichtswagen verändern die Fahrgäste durch ihre Anwesenheit den Luftwiderstand. Ein weiterer Fall, bei dem der Fahrgast den Luftwiderstand beeinflusst, wären beispielsweise Züge mit Fenstern, welche durch den Fahrgast geöffnet und geschlossen werden können.

Fehlern führen und wird in Abschnitt 3.2.4.2.2 (siehe 53) nochmals behandelt. Grundsätzlich wird eine Angabe mit einem absoluten Wert in kN empfohlen.

3.2.4.2 Vergleich der Fahrwiderstandsformel-Vereinfachungen

3.2.4.2.1 Vereinfachte und genaue Fahrwiderstandsformel

Es gibt wenige aufwendig durchgeführte, detailliert publizierte und genau aufgeschlüsselte Fahrwiderstandsmessungen. Eine interessante publizierte Fahrwiderstandsmessung wurde im Rahmen der Einführung des InterCityExpress Hochgeschwindigkeitsverkehrs gemacht und im Jahr 1990 publiziert. Die Formel 19 zeigt ein Beispiel für eine Fahrwiderstandsformel dieser Messreihe (Peters, 1990):

$$F_R = \underbrace{11.4 \cdot m}_{c_1} + \underbrace{(0.025 \cdot m + 17.86 \cdot \varrho)}_{c_2} \cdot v + \underbrace{(0.17 + 0.0428 \cdot n)}_{c_3} \cdot \varrho \cdot v^2 \quad \text{Formel 19}$$

Bei der Formel 19 ist v die Geschwindigkeit, m die Gesamtmasse, n die Wagenanzahl und ϱ die Luftdichte. Dabei ist die Luftdichte ϱ wiederum von der Temperatur und dem Luftdruck abhängig.

Aus dem Teil c_3 dieser Formel wird deutlich, dass sich der quadratische Teil aus einem konstanten Wert und einem wagenabhängigen Wert zusammensetzt. Der konstante Wert beschreibt den Front- und Heckwiderstand. Der wagenabhängige Wert beschreibt die zuglängenabhängigen Einflüsse.

Die grüne Linie in Abbildung 25 und die darunterliegende Fläche zeigt einen Fahrwiderstand basierend auf Messergebnissen von Peters (1990). Dabei teilt sich die Fläche in drei Farbbereiche. Die unterste, dunkelste grüne Fläche zeigt den konstanten (geschwindigkeitsunabhängigen) Fahrwiderstand. Die mittlere, etwas hellere grüne Fläche zeigt den linearen geschwindigkeitsabhängigen Fahrwiderstand und die oberste hellgrüne Fläche zeigt den quadratischen geschwindigkeitsabhängigen Fahrwiderstand. Dabei ist die Grafik so normiert, dass bei 100 km/h ein Wert von 100 % vorhanden ist.

Weiter ist in der Abbildung 25 noch eine rote gestrichelte Linie eingezeichnet, welche eine vereinfachte quadratische Fahrwiderstandsformel vom Typ $F_R \sim v^2$ zeigt. Sie ist ebenfalls so normiert, dass sie bei 100 km/h einen Wert von 100 % darstellt.

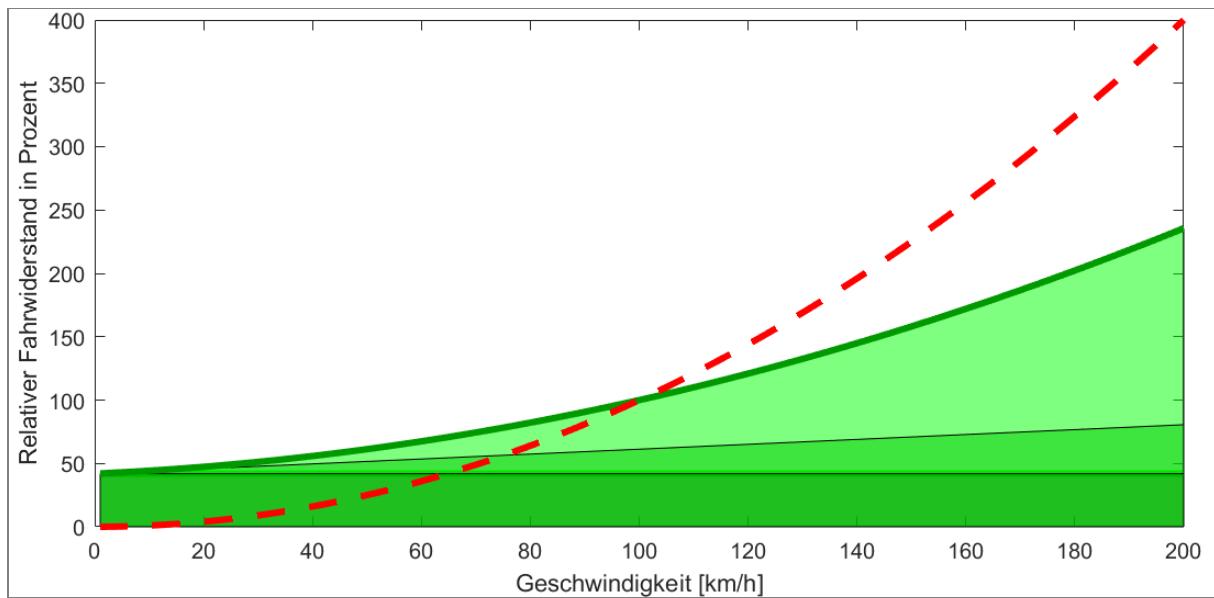


Abbildung 25 Beispielhafter Plot des Fahrwiderstandes (rote Linie: vereinfachte rein quadratische Formel | grüne Linie: genaue Formel, mit dunkelgrün (untere Fläche) konstantem Anteil, mit grün (mittlere Fläche) linearer Anteil und mit hellgrün (obere Fläche) quadratischer Anteil)

Anhand der Abbildung 25 lassen sich im folgenden vier Fälle für Geschwindigkeitsänderungen betrachten (siehe auch Tabelle 2).

- Bei der vereinfachten rein quadratischen Formel würde eine Geschwindigkeitserhöhung von 100 km/h auf 200 km/h zu einer Erhöhung des Fahrwiderstands von 100 % auf 400 % führen.
- Bei der vereinfachten rein quadratischen Formel würde eine Geschwindigkeitsreduktion von 100 km/h auf 50 km/h zu einer Reduktion des Fahrwiderstands von 100 % auf 25 % führen.
- Bei der genauen Formel führt eine Geschwindigkeitserhöhung von 100 km/h auf 200 km/h zu einer Erhöhung des Fahrwiderstands von 100 % auf 235 %.
- Bei der genauen Formel führt eine Geschwindigkeitsreduktion von 100 km/h auf 50 km/h zu einer Reduktion des Fahrwiderstands von 100 % auf 61 %.

Szenario	vereinfachte rein quadratische Formel	genaue Formel
Erhöhung von 100 auf 200 km/h	neu 400 % (+300 %)	neu 235 % (+135 %)
Reduktion von 100 auf 50 km/h	neu 25 % (-75 %)	neu 61 % (-39 %)

Tabelle 2 Zunahme bzw. Abnahme des Fahrwiderstandes ausgehend von 100 %, mit der vereinfachten rein quadratischen Formel und der genauen Formel.

Anhand dieser vier Beispiele werden drei Aspekte deutlich:

1. Die vereinfachte häufig angewandte rein quadratische Formel führt zu starken Abweichungen von der Realität. In diesem Fall errechnet sie +300 % anstatt +135 %.
2. Höhere Geschwindigkeiten führen zwar zu höheren Fahrwiderständen aber nicht in dem Umfang, wie sie in der vereinfachten rein quadratischen Formel dargestellt werden. In diesem Fall führt eine Erhöhung von 100 km/h auf 200 km/h nur zu +135 % mehr Fahrwiderstand anstatt zu +300 %.
3. Niedrigere Geschwindigkeiten führen zwar zu niedrigeren Fahrwiderständen aber nicht in dem Umfang wie sie in der vereinfachten rein quadratischen Formel dargestellt werden. In diesem Fall führt eine Reduktion von 100 km/h auf 50 km/h nur zu -39 % weniger Fahrwiderstand anstatt zu -75 %.

Dieser Sachverhalt begründet sich daraus, dass der konstante geschwindigkeitsunabhängige Teil bei jeder Geschwindigkeit gleichbleibt und dass der lineare Anteil des Fahrwiderstandes nicht so stark ansteigt, wie der quadratische Anteil (vergleiche auch farblich unterschiedlich dargestellte Flächen in der Abbildung 25).

3.2.4.2.2 Problematik Masseskalierung des Luftwiderstandes

Der quadratische Teil des Fahrwiderstandes wird von dem aerodynamischen Luftwiderstand geprägt. In vielen Berechnungen wird der Luftwiderstand mit der Masse des Zuges skaliert. Das kann zu Fehlern führen, was sich an den folgenden beiden Beispielen erläutert.

Beispiel Personenzug

Ein SBB Personenwagen vom Typ A EWIV hat leer eine Masse von 42 Tonnen und 60 Sitzplätze (SBB, 2020). Bei einem mittleren Fahrgastgewicht von 75 kg wiegt dieser Wagen gefüllt somit ca. 46.5 Tonnen und hat somit circa 10.7 % mehr Masse. Diese zusätzliche Masse wirkt sich primär auf die Achslager aus. Sie hat jedoch keinen Einfluss auf den Luftwiderstand, da sich die Form nicht ändert und letztendlich ist die Form für den Luftwiderstand verantwortlich.

Ein quantitatives Beispiel dazu liefert der ICE. Der ICE, welcher auch in der Schweiz verkehrt, hat in voller Länge eine Masse von 896 Tonnen und eine Kapazität von 759 Sitzplätzen (erste Serie, erste Ausstattung) (Kurz, 1991). Bei einem mittleren Fahrgastgewicht von 75 kg wiegt dieser Zug gefüllt somit voll circa 952.9 Tonnen und hat somit voll circa 6 % mehr Masse. Würde die Masse den quadratischen Luftwiderstandsteil mitskalieren hätte der Zug bei 280 km/h somit einen 6 % höheren Fahrwiderstand.

Nach den Messungen und daraus resultierenden Formeln von Peters (1990) hat der Zug aber lediglich durch die zusätzliche Masse einen circa 1 % höheren Fahrwiderstand bei 280 km/h,

was quantitativ deutlich macht, dass eine Skalierung des quadratischen Luftwiderstandsanteils mit der Masse zu Fehlern führen kann.

Beispiel Güterwagen

Für den Fall eines Güterzuges wird die Betrachtung mit den SBB Güterwagen Habilis Typ B und Rs durchgeführt. Der Habilis Typ B ist ein gedeckter Vierachser und der Rs ist ein Flachwagen, welcher unter anderem zum Stahltransport dient. Details zu den Fahrzeugen sind in der Tabelle 3 zusammengefasst.

	SBB Güterwagen Habilis Typ B	SBB Güterwagen Rs
Kurzbeschreibung	Gedeckter Vierachser mit Schiebewänden und Transportschutz (SBB Cargo, 2020a)	Vierachsiger Flachwagen ohne Seitenborde für wetterfeste Güter möglich (SBB Cargo, 2020b).
Bemerkung	Speziell geeignet für empfindliche Güter auf Paletten. Schützt vor Nässe und Transporteinwirkungen. Nicht zugelassen sind Güter in loser Schüttung wie Schrott, Sand, Futtermittel und Zeitungsbunde (SBB Cargo, 2020a).	Speziell geeignet für unempfindliche Güter wie Stahlprofile, Stabstahl, Walzeisen, Stammholz, Schnittholz, Holzbunde, Schienen, Container, Kisten und Fahrzeuge. Schutz durch eine Wagendecke ist möglich (SBB Cargo, 2020b).
Länge über Puffer	20'480 mm	19'900 mm
Höhe Ladefläche (über SOK)	1'195 mm	1'235 mm - 1260
Fahrzeughöhe (über SOK)	4'100 mm	1'705 mm (aufgeklappte Stirnborde) 2'590 mm (+ aufgeklappte Ladeschwellen)
Leergewicht	28 t	24 t
Maximales Ladegewicht	52 t	56 t
Maximales Gesamtgewicht	80 t	80 t

Tabelle 3 Fahrzeugdaten der SBB Güterwagen Habilis Typ B und des SBB Güterwagen Rs, übernommen aus den Quellen: SBB Cargo (2020a) und SBB Cargo (2020b)

Der Werkstoff Eisen und Stahl wird häufig mit der Bahn transportiert. Stahl hat ein Dichte von 7.85 kg/dm³ (Peters et al, 2012). Beim Beladen mit Stahl erreicht der SBB Güterwagen Rs sein Maximalgewicht von 80 Tonnen (Zuladung 56 Tonnen) unterhalb der Stirnborde (Höhe 1'705 mm über SOK). Mit Stahl beladen ist ein 80 Tonnen schwerer SBB Güterwagen Rs somit weniger als halb so hoch wie ein 28 Tonnen leerer Güterwagen Habilis Typ B (Höhe 4'100 mm über SOK). Dadurch, dass der flache Güterwagen Rs nur circa 42 % der Höhe des Güterwagens Habilis Typ B aufweist, ist es allein durch die Höhe bzw. den Querschnitt plausibel, dass der Luftwiderstandsanteil des Güterwagens Rs kleiner sein muss, als der Luftwiderstandsanteil des Güterwagens Habilis Typ B.

Masseskalierte Fahrwiderstandsformeln berücksichtigen dies jedoch nicht. Masseskalierte Formeln betrachten nur die Masse und errechnen für den flachen Güterwagen R_s einen circa 2.85 Mal so hohen Luftwiderstand.

3.2.4.3 Empfehlung hinsichtlich der Fahrwiderstandsformeln

Für sehr viele Fahrzeugtypen existieren keine Fahrwiderstandsformeln und häufig auch gar keine Messungen. Daher ist es erforderlich auf die Literatur und Herleitungen zurückzugreifen.

In Anbetracht der Tatsache, dass Fahrwiderstandsformeln für die Energieberechnung essenziell sind, wird folgendes empfohlen:

- Die Verwendung von vereinfachten rein quadratischen Formeln führt zu Fehlern. Daher wird empfohlen, Formeln zu verwenden, welche wie die folgende Formel 20 aufgebaut ist. Dabei sollten die Parameter c_1 bis c_3 existieren und grösser Null sein.

$$F_R = c_1 + c_2 \cdot v + c_3 \cdot v^2$$

Formel 20

- Den Luftwiderstand mit der Masse zu skalieren kann zu Fehlern führen. Daher wird empfohlen, Formeln zu verwenden, welche den quadratischen Luftwiderstandsteil nicht mit der Masse skalieren. Ein gutes Beispiel ist die Formel 19 von Peters (1990) (siehe Seite 51). So unterteilt die Formel von Peters den Luftwiderstand zusätzlich in einen konstanten Teil (Front- und Heckwiderstand) und in einen wagenskalierten Teil (zuglängenabhängiger Widerstand).

3.2.5 Fazit zu den beschriebenen Verlusten

Es kann festgestellt werden, dass eine Betrachtung der Verluste im Traktionsstrang und der Fahrwiderstandsverluste zu tiefgreifenden Kenntnissen und Hintergründen führt und für die Berechnung notwendig ist.

Die Erkenntnisse können wie folgt zusammengefasst werden.

- Diverse physikalische Gegebenheiten tragen dazu bei, dass der Wirkungsgrad über das Zugkraftdiagramm hinweg inhomogen ist und die Verluste dadurch nicht proportional zur bezogenen Leistung sind.
- Der Wirkungsgrad hängt stark vom Betriebspunkt ab und der Betriebspunkt ändert sich meist während der Fahrt. Daher ist das Rechnen mit Wirkungsgradfeldern oder Verlustfeldern zu empfehlen.
- Vereinfachungen der Fahrwiderstandformel können zu erheblichen Rechenfehlern führen (teilweise mehr als ein Faktor 2).

4 Ergebnisse

Dieses Kapitel beschreibt die Ergebnisse. Im ersten Teil wird hierzu die Algorithmen-Implementierbarkeit beschreiben und im zweiten Teil folgen diverse Beispielberechnungen.

4.1 Algorithmus-Implementierbarkeit

Dieses Kapitel dient dazu, Details über die Erkenntnisse bei der Algorithmen-Entwicklung zu beschreiben. Der erste Abschnitt beschreibt die Ausgangssituation. Der zweite Abschnitt geht auf die verschiedenen hier verwendeten Optimierungsansätze ein. Der dritte Abschnitt beschreibt die Architektur und der vierte fasst ein kurzes Fazit zusammen.

4.1.1 Ausgangssituation

Ein Lokführer oder auch die Automatik einer Geschwindigkeitsregelung eines selbstfahrenden Zuges hat grundsätzlich nur eine Möglichkeit die Fahrgeschwindigkeit und somit das Fahrprofil zu beeinflussen. Diese Möglichkeit ist das Aufbringen eines Zugkraftwertes für eine gewisse Zeit oder Strecke. Dieser Zugkraftwert kann zu einer Beschleunigung oder einer konstanten Geschwindigkeit oder zu einer Verzögerung führen. Daraus ergibt sich als normaler Fahrtablauf die folgende Abfolge:

- Bei einer Zeit t_1 oder einem Streckenpunkt S_1 wird die Zug- oder Bremskraft auf einen Wert F_1 gesetzt.
- Bei einer Zeit $t_2 > t_1$ oder einem Streckenpunkt $S_2 > S_1$ wird die Zug- oder Bremskraft auf einen Wert F_2 gesetzt.
- usw.

Durch diese Abfolge der Zugkraft kombiniert mit den Umgebungsbedingungen ergibt sich für das Schienenfahrzeug letztendlich eine Geschwindigkeit mit dieser die Strecke befahren wird. Diese Fälle lassen sich auch in einer Simulation betrachten, wie im folgenden Beispiel gezeigt werden soll.

Das Beispiel für die Ausgangssituation der Simulation ist ein Zug mit einer Reisegeschwindigkeit von 50 km/h. Dieser Zug bringt, beim Startzeitpunkt (Sekunde 0) gerade keine Zugkraft auf – die Zugkraft liegt also bei 0 kN. Viele Lokomotiven ermöglichen eine Zugkraftänderung von ± 100 kN innerhalb von einer Sekunde. Das heisst eine Sekunde später kann die Lokomotive alle Zugkraftwerte von -100 kN über 0 kN bis hin zu +100 kN haben. Bei einem Raster von 1 Sekunde und 1 kN wären das schon 201 Varianten nach einer Sekunde

Fahrt. Alle Varianten führen zu jeweils anderen Fahrprofilen. Die Anzahl an möglicher Fahrprofile wächst dadurch wie folgt:

- Nach einer Sekunde gibt es schon 201 Varianten bzw. Fahrprofile.
 - Nach zwei Sekunden kommen zu jeder dieser 201 Varianten wiederum jeweils 201 weitere Varianten hinzu, sodass sich schon 4040 Fahrprofile ergeben.
 - Nach drei Sekunden kommen zu diesen 4040 Fahrprofilen wiederum jeweils 201 weitere Varianten hinzu, sodass sich schon 812060 Fahrprofile ergeben.
- Nach der dritten Sekunde liegt die Zugkraft zwischen -300 kN und +300 kN. Wenn die Zug- und Bremskraft der Lok auf ± 300 kN beschränkt ist, reduzieren sich die Varianten dadurch etwas, sodass zu jeder Variante jede Sekunde zwischen 101 und 201 Varianten dazu kommen.
- Bei Sekunde 4 wird schon die Million an Varianten überschritten.
 - Kurze Zeit später ist die Milliarde, Billion usw. erreicht ist.

Obwohl es sich hierbei schon um eine Vereinfachung handelt, da nur diskrete Sekundenschritte und diskrete Zeitschritte betrachtet werden, wird die Menge sehr schnell, sehr gross. Die Abbildung 26 verdeutlicht die Anzahl und die zunehmende Kaskade.

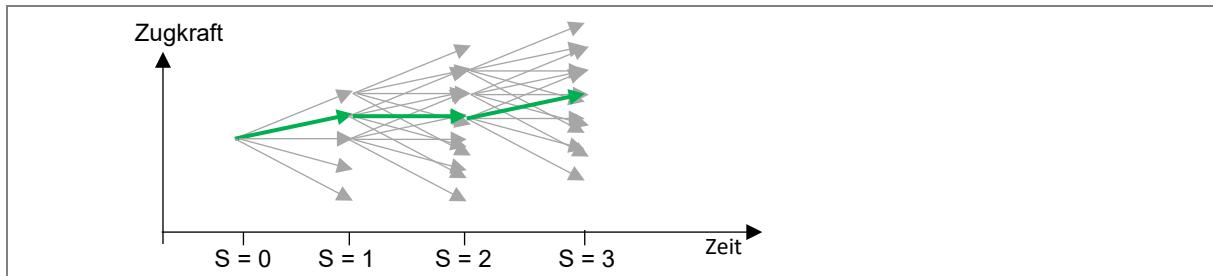


Abbildung 26 Veranschaulichung der theoretischen Möglichkeiten (grau), welche ein Lokführer oder ein automatisches System abfahren kann, sowie eine dieser Möglichkeiten (grün)

Die Anzahl an Varianten wird durch folgenden mathematischen Zusammenhang definiert:

$$\text{Varianten}_{\text{Summe}} = \text{Varianten}_{\text{Schritt1}} \cdot \text{Varianten}_{\text{Schritt2}} \cdots \text{Varianten}_{\text{SchrittN}} \approx \text{Varianten}^N$$

Durch den Aspekt, dass die Anzahl an Varianten pro Rechenschritt unterschiedlich sein kann und sie sich kurz vor dem Ziel durch eine Bündelung reduzieren, wäre ein Gleichheitszeichen nicht exakt. Trotzdem ist die Exponentialfunktion eine gute Annäherung für die Größenordnung, die sich ergibt, wenn alle Varianten berechnet werden würden.

Letztendlich wird deutlich, dass bei einer hinreichend langen Strecke die Rechenkapazität eines jeden Rechners sehr schnell überschritten wird. Durch den Aspekt, dass es nicht möglich ist, eine Menge, die schnell gegen unendlich geht, zu berechnen und am Ende die Beste daraus auszuwählen, bedarf es Optimierungen bei der Berechnungsweise.

4.1.2 Optimierungen für eine effiziente Berechnung

Im Folgenden wird eine Übersicht der hier angewandten Ansätze zur Effizienzsteigerung betrachtet, denn grundsätzlich ist eine effiziente Berechnung nur nach diversen Optimierungen möglich. Im ersten Unterabschnitt wird die Notwendigkeit eines diskreten Geschwindigkeits- Weg-Rasters erläutert. Im zweiten Unterabschnitt wird eine kontinuierliche Optimal-Wertbestimmung beschrieben und im Anschluss folgen Ausführungsformen und weitere Methoden der Datenmengenreduktion.

4.1.2.1 Diskretes Geschwindigkeits- und Weg-Raster

Physikalisch sind unendlich kleine Unterteilungen der Geschwindigkeit und des Weges möglich, was wiederum die Möglichkeit gegen unendlich gehen lässt. Daher besteht der erste Ansatz darin, das Fahrprofil als diskretes Weg- und Geschwindigkeitsraster zu betrachten (siehe Abbildung 27). Ein derartiges Raster ist auch ein Standartverfahren in der Literatur.

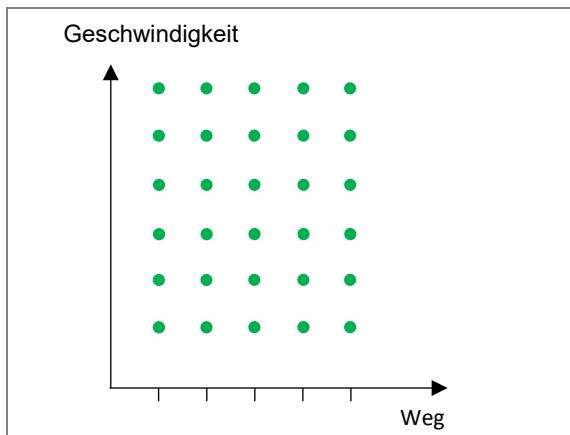


Abbildung 27 Veranschaulichung eines diskreten Geschwindigkeits-Weg-Rasters.

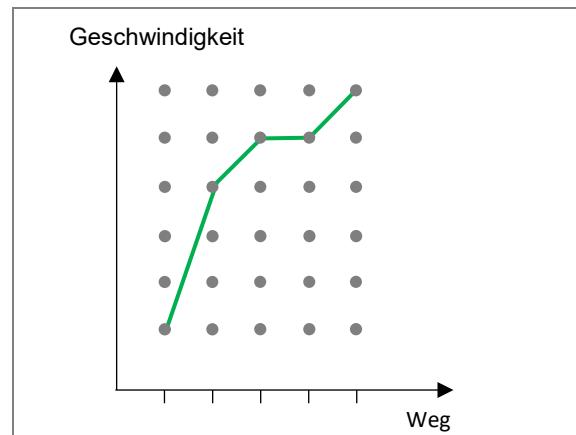


Abbildung 28 Beispielhafte Veranschaulichung eines möglichen diskreten Geschwindigkeits-Wegverlaufes im Geschwindigkeits-Weg-Rasters.

Ein Raster hat zur Folge, dass nur gewisse Weg- und Geschwindigkeitswerte angenommen werden können und beschränkt dadurch die Menge (siehe Abbildung 28). Das ist vergleichbar mit einer Digitalisierung. Dies führt aber nicht automatisch zu einer Ungenauigkeit, da es möglich ist, mit einem sehr feinen Raster zu arbeiten. Wie fein das Raster sein kann, entscheidet letztendlich:

- die Effizienz des Algorithmus
- die Softwareimplementierung des Algorithmus
- die Rechenleistung (insbesondere CPU und RAM)

Mit einfachen Algorithmen ist schon eine Berechnung mit einem 5 km/h Raster kaum beherrschbar. In der Literatur werden häufig 3.6 km/h (=1m/s) oder 1 km/h Raster verwendet.

Bei der Anwendung eines 1 km/h Rasters kann der Zug lediglich ganze Geschwindigkeitswerte fahren, sodass der Zug beispielsweise von 100 km/h auf 101 km/h oder 102 km/h oder 103 km/h ... usw. beschleunigen kann. Er kann aber nicht 100.5 km/h in der Simulation fahren.

Grundsätzlich sind 1 km/h Schritte ausreichend, die Fahrzeugtachometer zeigen dem Lokführer die Geschwindigkeit auch nicht genauer an. Wird zusätzlich aber auch eine Simulation des Ausrollens betrachtet, braucht es weitere Zwischenwerte. Im Rahmen von Analysen dieser Studie hat es sich gezeigt, dass für das Ausrollen eine Unterteilung in ein 0.01 km/h Raster ausreichend ist. Ein 0.1 km/h Raster hingegen wäre jedoch nicht mehr ausreichend.

4.1.2.2 Kontinuierliche Optimal-Wertbestimmung

Zwischen zwei Wegschritten kann der Zug seine Geschwindigkeitswerte ändern oder beibehalten, dadurch ergeben sich pro Wegschritt, wie schon beschrieben, neue Pfade durch das Raster.

Der Trivialansatz wäre es, alle Pfade zu berechnen und am Ende den optimalen Pfad rauszusuchen. Durch die hier entstehende Menge ist das aber nicht möglich. Daher braucht es einen intelligenteren Ansatz, welcher eine kontinuierliche Optimal-Wertbestimmung mit einer kontinuierlicheren Selektion durchführt. Im Rahmen dieser Studie wurde ein Ansatz verwendet, welcher dem Dijkstra-Algorithmus ähnlich ist, jedoch hinsichtlich seiner Komplexität erweitert wurde.

4.1.2.2.1 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise eines einfachen Beispiels soll hierzu im Folgenden beschrieben werden. Grundsätzlich lässt sich dies in drei Schritte einteilen.

Schritt 1

Startend beispielsweise am Wegpunkt A3 werden alle möglichen Geschwindigkeitsänderungspfade zum Wegpunkt B berechnet (siehe Abbildung 29). Hierbei wird jeweils die Fahrzeit berechnet, die Fahrwiderstandsverluste und zusätzlich im Rahmen dieser Studie auch die maschinenbedingten Verluste.

Schritt 2

Fortführend am Wegpunkt B werden von jeder Geschwindigkeit alle möglichen Geschwindigkeitsänderungen beispielsweise zum Wegpunkt C4 berechnet (siehe Abbildung

30). Auch hier wird jeweils die Fahrzeit berechnet, die Fahrwiderstandsverluste und zusätzlich im Rahmen dieser Studie auch die maschinenbedingten Verluste.

Schritt 3

Im Folgenden werden alle Pfade (hier im Beispiel) von A3 nach C4 hinsichtlich der Fahrzeit und Verluste miteinander verglichen. Dabei ist es das Ziel nur Werte auszusortieren, welche auch bei einer finalen Betrachtung aussortiert werden würden.

Folgeschritte

Im Folgenden werden diese Schritte für alle Pfade mit allen Geschwindigkeiten und über den gesamten Wegbereich durchgeführt.

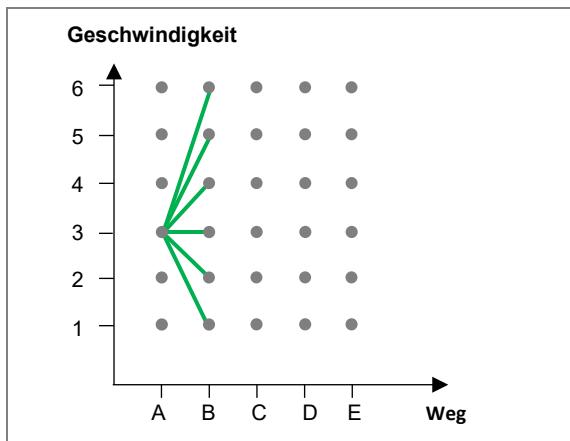


Abbildung 29 Varianten von Wegpunkt A3 zu den verschiedenen Geschwindigkeiten beim Wegpunkt B

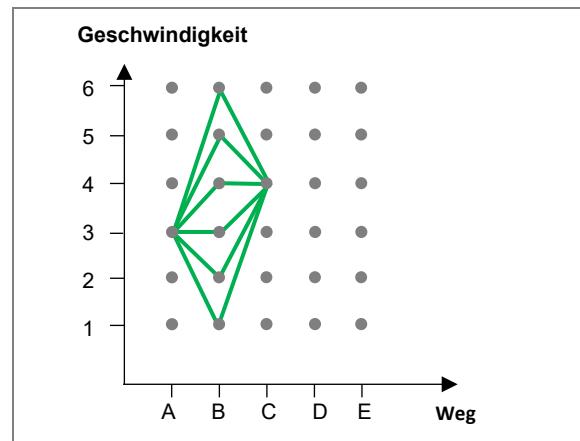


Abbildung 30 Varianten von Wegpunkt A3 zum Wegpunkt C4

4.1.2.3 Ausführungsformen

Grundsätzlich gibt es verschiedene Ausführungsformen. Dabei haben diese einen grossen Einfluss darauf wie realitätsnah die Ergebnisse sind.

Kein Einbezug der Maschinenverluste

Die einfachste Ausführungsform ist es, die Maschinenverluste nicht einzubeziehen. So werden lediglich die Fahrwiderstandsverluste betrachtet.

In diesem Fall ergibt sich bei Schritt 3 eine Vergleichstabelle, wie sie beispielsweise durch die Tabelle 4 dargestellt ist.

Pfadnummer	Startwert	Zwischenwert	Zielwert	Fahrzeit	Fahrwiderstands-Verluste
P1	A3	B1	C4	Längste Fahrzeit	<P2 (Geringste Menge an Verlusten)
P2	A3	B2	C4	<P1	<P3
P3	A3	B3	C4	<P2	<P4
P4	A3	B4	C4	<P3	<P5
P5	A3	B5	C4	<P4	<P6
P6	A3	B6	C4	<P5 (Kürzeste Fahrzeit)	Grösste Menge an Verlusten

Tabelle 4 Beispielhafte vereinfachte Vergleichstabelle der verschiedenen Pfade. Es werden die Pfadnummern genannt und der jeweilige Verlauf des Pfades mit seinem Startwert, Zwischenwert und Zielwert.

Aus der Tabelle 4 wird deutlich, dass nur beim Betrachten der Fahrwiderstandsverluste und der Geschwindigkeit es sich um ein Trade-Off handelt. Eine geringe Fahrzeit führt zu höheren Verlusten und geringere Verluste führen zu einer höheren Fahrzeit.

In diesem Fall machen alle Pfade Sinn, weil die Einen zu geringeren Verlusten führen und die Anderen zu einer geringeren Fahrzeit führen. Daher ist in diesem Fall das Streichen von Werten kaum seriös möglich, da die Berechnung noch nicht abgeschlossen ist und daher noch unbekannt ist, welcher Pfad final zu welcher Fahrzeit bzw. welchen Verlusten führt. Grundsätzlich wäre es in Anbetracht von Abbildung 30 denkbar, den Pfad P3 und P4 zu bevorzugen. In Anbetracht von Tabelle 4 würde es jedoch auch Sinn machen, die kürzere Fahrzeit von P5 und P6 zu bevorzugen oder P1 und P2 wegen den geringeren Energieverlusten.

Dieser Zielkonflikt, welcher sich aus dem Trade-Off bildet, wird üblicherweise mit sogenannten Kostenfunktionen der einzelnen Größen gelöst werden. Diese Kostenfunktionen gibt der Fahrzeit einen Kostenwert und sie gibt auch den Energieverlusten einen Kostenwert. Ein möglicher Aufbau wäre:

$$\text{Kostenäquivalenz} = \text{Fahrzeitverluste} \cdot \text{Faktor 1} + \text{Energieverlust} \cdot \text{Faktor 2} \quad \text{Formel 21}$$

Die Anwendung von Kostenfunktionen wäre ein Lösungsweg und wird auch in verschiedenen Implementierungen angewandt.

Der Vorteil dieser Herangehensweise ist: es wäre mit dieser einfachen Berechnung schon eine Voraussortierung möglich.

Der Nachteil dieser Herangehensweise ist: das Aussortieren findet aufgrund der Faktoren der Kostenfunktion statt. Dadurch wird das Ergebnis direkt von der Kostenfunktion beeinflusst

und es kann sein, dass die Faktoren zu komplett falschen Resultaten bei der Vorselektion führen, was zur Folge haben kann, dass am Ende nicht das Optimum ermittelt wird.

Weiter führt dieser Lösungsansatz dazu, dass nur ein Teil der Energieverluste betrachtet wird. Diese Vernachlässigung führt dazu, dass die falschen idealen Fahrprofile ermittelt werden.

Einbezug der Maschinenverluste

Deutlich rechenaufwendiger wird die Berechnung beim Einbezug der Maschinenverluste im Traktionsstrang. Analog zur einfachen Ausführungsvariante des Schritts 3 werden auch hier die Werte miteinander verglichen. Zusätzlich werden aber folgende Verluste betrachtet:

- Verluste im Trafo
- Verluste im Stromrichter
- Verluste in den Antriebsmotoren

Der Einbezug dieser Verluste ist grundsätzlich sehr aufwendig und bedarf komplexer separater Berechnungen. Zur Betrachtung dieser Verluste wird die beispielhaft gezeigte Tabelle 4 erweitert. Letztendlich führt sie aber dazu, dass sehr viele Werte von der Trade-Off-Datenmenge Fahrzeit/Verluste abweichen. Dadurch ist ein eindeutiges Aussortieren nach dem folgenden Prinzip möglich, bis sich am Schluss eine deutlich kürzere Trade-Off-Datenmenge ergibt:

Es werden nur Pfade, welche längere Fahrzeit aufweisen, übernommen, wenn sie gegenüber den vorangegangenen Werten einen geringeren Gesamtverlustwert aufweisen. Alle anderen Pfade werden aussortiert.

Letztendlich streicht dieses Prinzip fehlerhaft keine Werte. Es lässt sich mathematisch aufwendig beschreiben oder ganz einfach anhand der Abbildung 31, welches ein Beispiel aus der Navigation bzw. Routenplanung zeigt.

Die Abbildung 31 zeigt drei Pfade, einen roten, einen grünen und einen gelben, sowie ein Start und ein Ziel. Es vereinfacht die Situation sich die Abbildung 31 als Strassenkarte vorzustellen mit dem Start- und Zielpunkt als Dorf und die Pfade als Strassen. Die grüne Strasse verbindet die beiden Dörfer direkt auf dem kürzesten Weg. Die gelbe Strasse hat einen längeren Weg, verläuft aber über eine Autobahn, führt zu einer geringeren Fahrzeit als die grüne. Die rote Strasse ist länger und erzeugt eine höhere Fahrzeit als die grüne. Bei dieser Auswahl macht also nur die grüne und die gelbe Strasse Sinn. Die grüne führt zum geringsten Verbrauch und die gelbe zur geringsten Fahrzeit. Der rote Pfad hat keinen Vorteil und wäre zu streichen.

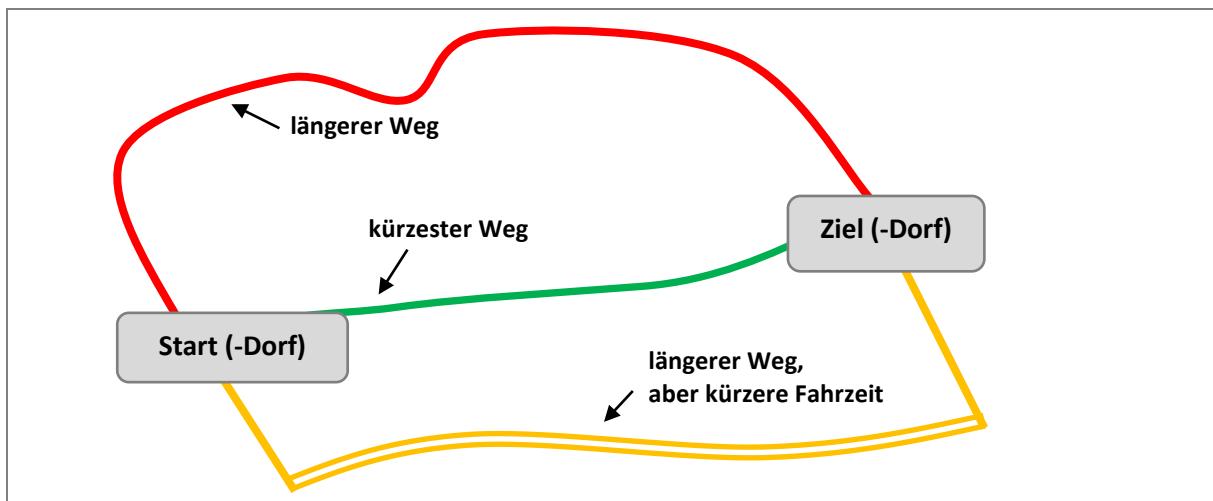


Abbildung 31 Veranschaulichungsskizze zum Beschreiben des Datenaussortierens anhand eines Routen-Beispiels aus der Navigation

Nach diesem Prinzip, welches aus der Navigation/Routenplanung bekannt ist, ist auch ein Aussortieren möglich. Der Unterschied ist lediglich der, dass hier nicht Weg und Fahrzeit betrachtet werden, sondern Energieverluste und Fahrzeit. Weiter sind es nicht nur drei Pfade, sondern tausende Pfade. Es werden auch nicht nur die 2 besten Pfade behalten, sondern hunderte bis tausende und es werden nur die gestrichen, die gar keinen Vorteil haben und vom Trade-Off abweichen.

4.1.2.3.1 Erläuterung zu den Ausführungsformen

Obwohl der Aufwand durch das Betrachten der Fahrzeugverluste deutlich grösser ist, ergibt sich durch diese Methodik, dass die Datenmenge kontinuierlich reduziert wird, was ein eindeutiger Vorteil darstellt. So werden effektiv nur die Werte entfernt, welche wirklich nicht mehr benötigt werden. Zugleich entfernt diese Methodik die Datenmenge hinreichend stark.

Letztendlich führt diese kontinuierliche Datenmengenreduktion dazu, dass die Anzahl an Varianten/Pfade nicht zu gross wird und reduziert trotz des Rechenaufwandes die Berechnungszeit erheblich und ist daher ein Teil des Algorithmus dieser Studie.

4.1.2.4 Weitere Methoden zur Datenmengenreduktion

Es gibt verschiedene weitere Methoden zur Datenmengenreduktion. Wie auch im vorigen Unterabschnitt schon erwähnt, werden hier nur Daten reduziert, die nachweislich nicht notwendig sind, mit dem Ziel, den Rechenaufwand zu reduzieren. Im Folgenden wird beispielhaft hierauf weiter eingegangen.

Eine sinnvolle hier angewandte Methode zur kontinuierlichen Datenmengen-Reduktion ist eine dynamische Plausibilitätsprüfung. Hierbei wird geprüft, ob alle Varianten/Pfade zu einem korrekten Resultat führen. Das wichtigste Kriterium dieser Plausibilitätsprüfung ist eine frühzeitige Verspätungskontrolle. So werden alle Pfade geprüft ob sie nicht jeweils am Ende zu einer Verspätung führen, denn letztendlich ist es das Ziel, eine Fahrzeitreserve zum Energiesparen zu nutzen, aber keine Verspätung zu erzeugen.

Diese Variante ist mathematisch etwas aufwendiger, aber eindeutig besser, als die Verwendung einer Methode mit einem Geschwindigkeitsband. Dies verdeutlicht die Abbildung 32.

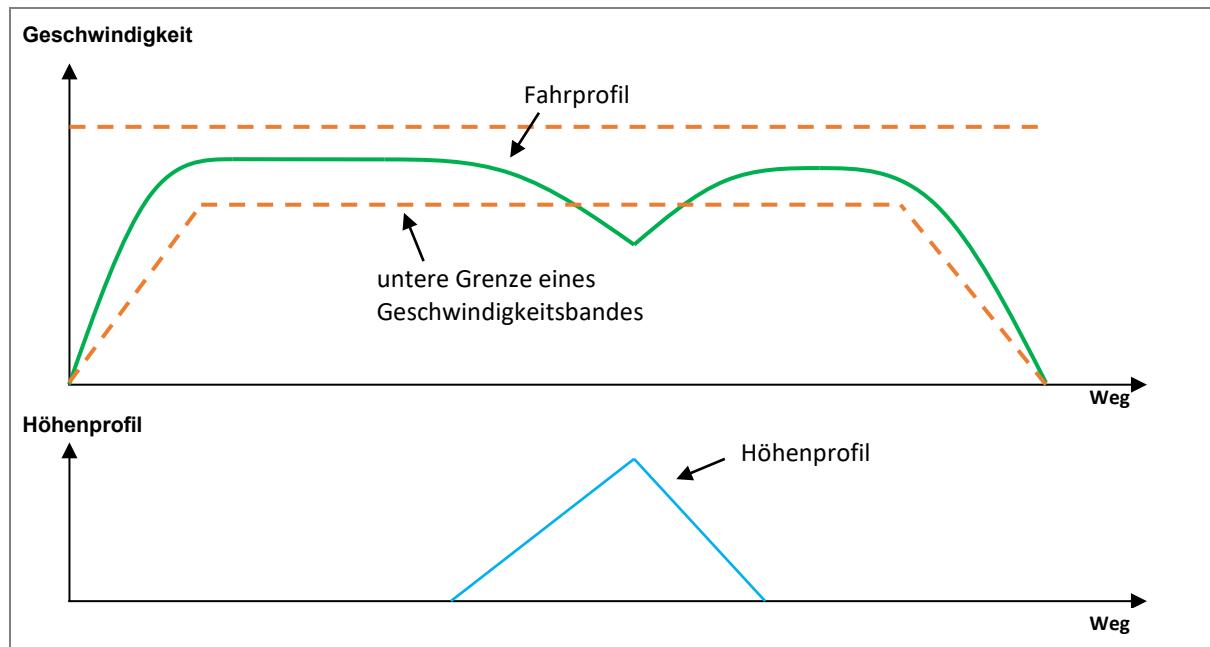


Abbildung 32 Veranschaulichungsskizze eines theoretischen beispielhaften Fahrprofils, welches ein Geschwindigkeitsband überschreitet.

So zeigt die Abbildung 32 oben ein qualitatives theoretisches beispielhaftes Fahrprofil und unten ein Höhenprofil. Grundsätzlich ist es plausibel bei Fahrten die potentielle Höhenenergie zu nutzen um die Verluste zu reduzieren. Daher wird in Abbildung 32 angedeutet, dass der Zug durch einen kurzfristigen Höhenunterschied vorrübergehend langsamer wird und danach wieder schneller. Würde bei einer Simulation ein Geschwindigkeitsband als Einschränkung, verwendet werden, könnte gegebenenfalls durch diese Beschränkung nicht das ideale Fahrprofil ermittelt werden. Daher ist die Verwendung einer Plausibilitätsprüfung gegenüber dem Geschwindigkeitsband vorzuziehen. Weiter können im Rahmen eines Plausibilitätsprüfungsverfahrens weitere Aspekte berücksichtigt werden.

4.1.3 Architektur

Zur Berechnung der Fahrprofiloptimierung wurden verschiedenste Ansätze getestet, um eine sehr effiziente Struktur zu entwickeln. Die Architektur dieser Struktur wird in der Abbildung 33 dargestellt.

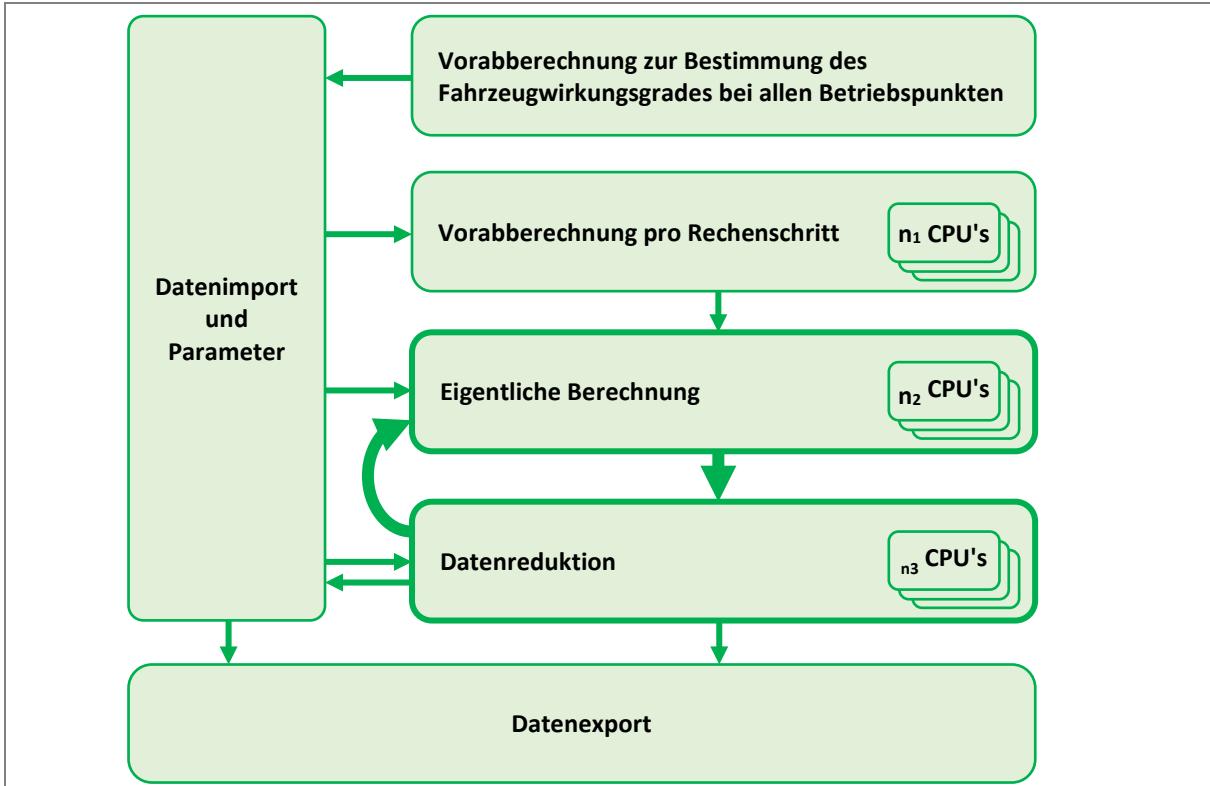


Abbildung 33 Aufbau der Algorithmusarchitektur zur Berechnung der Optimierung

Aus der Abbildung 33 wird eine Blockbildung ersichtlich. Sie verdeutlicht die Berechnung in einzelne Abschnitte. Diese Blockbildung zeigt die Auslagerung in Vorabberechnungen. Mit der Vorabberechnung lässt sich die Rechenzeit deutlich reduzieren. Sie benötigen lediglich Speicher zum Abspeichern der Vorabresultate. Zu diesen Vorabberechnungen zählt primär die Ermittlung des Wirkungsgrads in Abhängigkeit des Betriebspunktes. Weiter ist es auch möglich, einzelne Teile aus der eigentlichen Berechnung auszulagern. Es hat sich gezeigt, dass diese Auslagerung sogar pro Rechenschritt möglich ist. Weiter kann sie auf parallele Rechenprozesse aufgeteilt und deutlich beschleunigt werden. Durch diese Vorrechenarbeit reduziert sich letztendlich der Zeitaufwand für die eigentliche Berechnung.

Der rechenintensivste Teil, die eigentliche Berechnung und die Datenreduktion, arbeiten eng zusammen. Beide sind stark parallelisierbar implementierbar. So wurde eine Strategie entwickelt, die es ermöglicht jeden Geschwindigkeitsrasterschritt in einem separaten Rechenprozess zu implementieren und zu berechnen. Dadurch wäre eine Parallelisierung

möglich bis hin zu dem Grad, dass jeder Geschwindigkeitsrasterschritt mit einem separaten Prozessor eines Servers berechnet werden könnte. Das würde eine extreme Reduktion der Rechenzeit ermöglichen. Weiter bedeutet dies, dass die Genauigkeit durch die Parallelisierung von der Rechenzeit entkuppelt werden kann.

Obwohl im Rahmen der Algorithmenentwicklung deutlich wurde, dass die Fahrprofilberechnung stark parallelisierbar ist, wurde sie nur soweit ausgeschöpft, bis der verwendete Notebook alle Prozessorkerne vollständig genutzt hat. Bei einer Implementierung auf einem Server, welcher eine deutlich höhere Anzahl an Prozessorkernen haben kann, ist die Rechenzeit deutlich reduzierbar.

4.1.4 Fazit und allgemeine Aspekte zur Berechnung

Im Rahmen der Studie konnte festgestellt werden:

- Dass es extreme Unterschiede in der Rechenzeit gibt. Diese Unterschiede hängen vom Algorithmus und der Implementierung ab.
Ein schlechter Ansatz benötigt schon für die ersten 500 Meter¹⁹ Fahrprofiloptimierung mehrere Stunden. Ein gut implementierter Ansatz berechnet dieselbe Strecke, mit exakt der gleichen Ausgangssituation in circa 5 Sekunden.
- Dass es Ansätze gibt, die nicht in der Literatur aufzufinden sind und deutlich zu einer Rechenzeitreduktion beitragen.
- Dass eine erhebliche Parallelisierung realisiert werden kann, was wiederum die Rechenzeit deutlich reduziert.
- Dass ein ungünstiger Algorithmus, der zu wenige Aspekte berücksichtigt, zu falschen Fahrprofilen führen kann.

Letztendlich konnte im Zusammenhang mit der Algorithmenentwicklung festgestellt werden, dass dieser das entscheidende Erfolgskriterium für die Fahrprofiloptimierung ist. Ein schlechter Algorithmus braucht zum einen zu viel Rechenzeit und Arbeitsspeicher, sodass er in der Praxis gar nicht anwendbar wäre. Weiter führt ein schlechter Algorithmus zu einem groben unsauberem Raster und/oder er führt sogar zu falschen Ergebnissen, weil er das Problem zu stark vereinfacht.

Im Rahmen dieser Studie konnte festgestellt werden, dass effiziente, schnelle, hoch präzise Algorithmen implementierbar sind und in einem hohen Grad parallelisierbar sind.

¹⁹ Die ersten Meter Fahrprofiloptimierung benötigen immer am wenigsten Zeit, weil es am Anfang noch weniger Varianten gibt und die Komplexität mit zunehmender Länge ansteigt.

4.2 Berechnungen

Dieses Kapitel beschreibt die Berechnung und die Beispiele zur Verdeutlichung der Einflüsse auf den Wirkungsgrad. Hierzu werden sechs verschiedene Beispiele betrachtet, welche sich hinsichtlich ihrer Komplexität steigern.

Das erste Beispiel widmet sich einer normalen Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit und untersucht den Einfluss des Energiebedarfes auf die Reisegeschwindigkeit. Das zweite Beispiel betrachtet den Energiebedarf und den Einfluss der Komponentenverluste.

Das dritte Beispiel untersucht eine optimierte Geschwindigkeitserhöhung und das vierte Beispiel eine optimierte Geschwindigkeitsreduktion. Das fünfte Beispiel untersucht den Topographieeinfluss und das sechste eine Fahrt zwischen zwei Haltepunkten.

Dabei haben die Beispiele drei bis sechs das Ziel, Fahrzeitverlängerungen möglichst energieeffizient zu nutzen.

4.2.1 Beispiel 1 - Normale Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit

In diesem Beispiel wird der Energieverbrauch für die Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit ohne Beschleunigung/Verzögerung²⁰ untersucht. Dies entspricht einer Betrachtung des grünen Bereiches in der Abbildung 34.

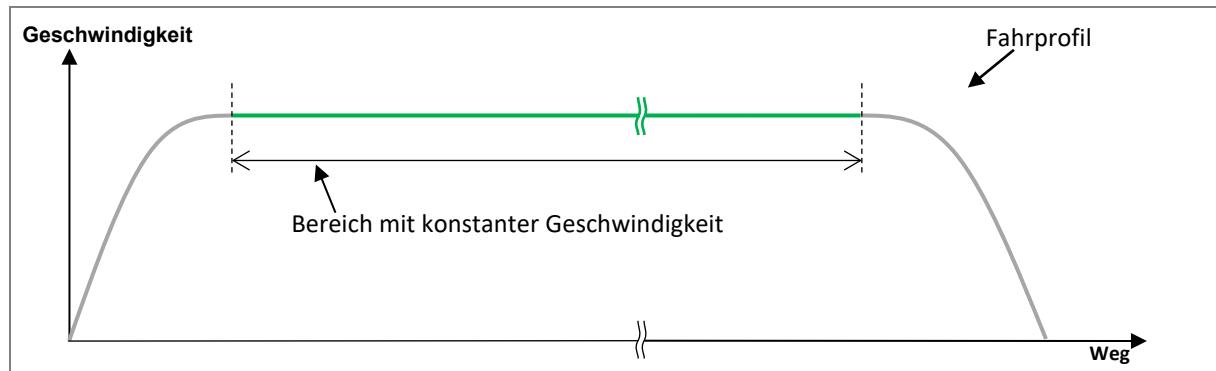


Abbildung 34 Fahrprofil und Bereich mit konstanter Geschwindigkeit

Alternativ entspricht dies dem Grenzwert einer sehr langen Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit, da bei zunehmender Länge der Einfluss der anfänglichen Beschleunigung und Verzögerung kleiner wird.

²⁰ Die Beschleunigung und Verzögerung folgt in den nächsten Abschnitten.

Mathematisch ausgedrückt entspricht dies, der in der Formel 22 dargestellten Grenzwertbildung. Dabei ist w der Weg, v die Verluste und $E_{Verluste}$ die Verlustenergie.

$$\lim_{s \rightarrow \infty} \frac{E_{Verluste}(w, v)}{w} \quad \text{Formel 22}$$

Mit dieser Betrachtung ist es möglich zu berechnen, welche Geschwindigkeit bei einer Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit am geringsten Verluste verursacht. Im Folgenden werden hierzu drei Fälle betrachtet:

- Fall 1 berücksichtigt lediglich die Fahrwiderstände.
- Fall 2 ergänzt Fall 1 um die Verluste im Traktionsstrang und der Hilfsbetriebe
- Fall 3 entspricht Fall 2, verwendet jedoch einen neuen 3-Punkt-Stromrichter und eine Motorabschaltung

Diese Fälle werden mit einem Standartzug untersucht, welcher sich wie folgt zusammensetzt:

- Eine Universallokomotive (ca. 84 t | 300 kN | 6.1 MW)
- Sieben einstöckige Reisezugwagen

Züge, welche rund 200 Meter lang sind²¹ und sich aus dieser Konstellation zusammenstellen, sind in der Schweiz, aber auch in diversen europäischen Ländern standardmäßig im IC/EC-Verkehr im Einsatz. Lokomotiven und Reisezugwagen dieser Spezifikation gibt es von verschiedenen Herstellern. Die folgende Berechnung basiert auf einem speziellen Zug dieser Konstellation (SBB Re 460), da für diese Lokomotiven sehr genaue Verlustdaten zur Verfügung stehen.

4.2.1.1 Fall 1 - Nur Fahrwiderstände

Die Fahrwiderstände für diesen Zug lassen sich mit einer quadratischen Formel, mit linearem und konstanten Teil beschreiben (vergleiche Abschnitt 3.2.4 ab Seite 49) und führen zu der Abbildung 35 Teil a).

Durch den Fahrwiderstand wirkt eine bremsende Kraft auf den Zug, welche in der Einheit Kilonewton angegeben werden kann. Wenn diese bremsende Kraft nicht durch eine Traktionskraft kompensiert wird, führt der Fahrwiderstand zu einer

²¹ Fernverkehrsbahnsteige haben üblicherweise Mindestlängen von 200 m und häufig eine Länge von 400 m. Daher wird häufig eine Zuglänge von 200 m oder 400 m eingesetzt.

Die SBB hat beispielsweise den Giruno mit einer Länge von fast genau 200 m beschaffen (Stadler, 2018), damit dieser entweder in Einfachtraktion der Mindestbahnsteilänge von 200 m genügt und in Doppeltraktion einen 400 m Bahnsteig voll ausnutzt.

Auch die ÖBB und DB erwerben Fernverkehrszüge mit rund 200 m Länge (ÖBB, 2008; DB, 2020; Siemens, 2016).

Geschwindigkeitsreduktion. Zur Erzeugung dieser kompensierenden Traktionskraft, ist in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ein Traktionsleistungsbezug notwendig, welcher in der Einheit Kilowatt angegeben werden kann. Passend zu dem Fahrwiderstand aus Abbildung 35 Teil a) zeigt Abbildung 35 Teil b) den Traktionsleistungsbezug in Kilowatt zur Kompensation des Fahrwiderstandes, in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit.

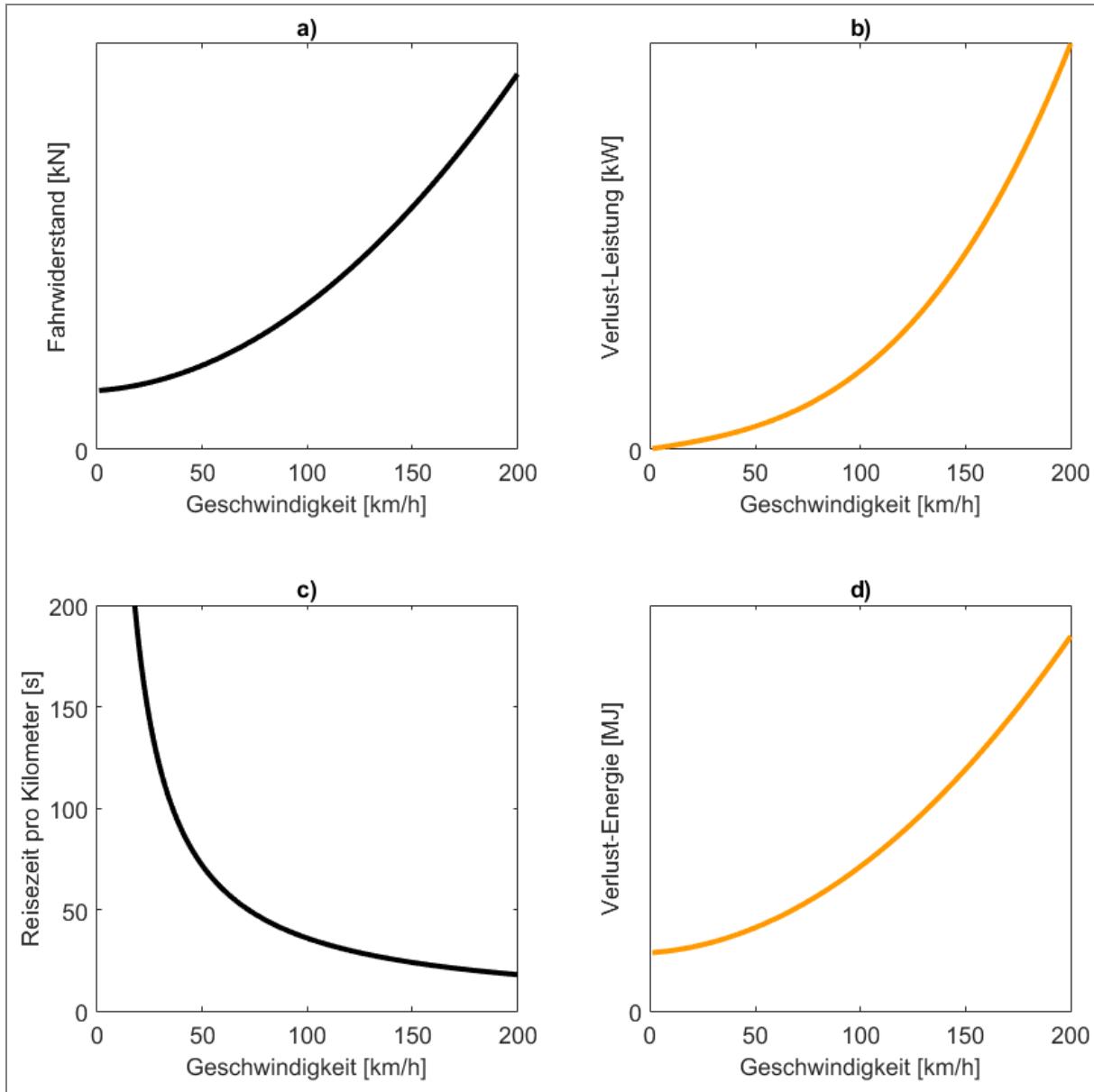


Abbildung 35 Beispiel 1 - Fall 1

- a) Fahrwiderstand in Abhängigkeit der Geschwindigkeit
- b) Verlustleistung zur Kompensation der Fahrwiderstände in Abhängigkeit der Geschwindigkeit
- c) Reisezeit für die Fahrt von einem Kilometer in Abhängigkeit der Geschwindigkeit
- d) Verlustenergie zur Kompensation der Fahrwiderstände in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Aus dem Leistungsbezug (beispielsweise Watt oder Kilowatt) multipliziert mit der Zeit (beispielsweise Sekunden) lässt sich die Energie (beispielsweise in Wattsekunde oder Joule oder kWh) ausrechnen. Daher stellt Abbildung 35 Teil c) die Fahrzeit in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit dar, die benötigt wird um eine bestimmte Distanz zu befahren. In diesem Fall ist die Distanz ein Kilometer für eine Fahrzeit pro Kilometer und eine spätere Angabe Energie pro Kilometer.

Aus dem Produkt Fahrzeit pro Kilometer und Leistungsbezug lässt sich der Energieverbrauch zur Kompensation des Fahrwiderstandes pro Kilometer berechnen (Abbildung 35 Teil d)).

Die Abbildung 35 berücksichtigt nur den Fahrwiderstand. Dabei wird durch die Abbildung 35 Teil d) deutlich, dass es, wenn nur der Fahrwiderstand betrachtet wird, eine geringere Geschwindigkeit zu einem geringeren Energieverbrauch führt. Anders ausgedrückt, eine längere Fahrzeit führt zu geringeren Verlusten (siehe Abbildung 36).

Grundsätzlich ist bei der Aussage aber grosse Vorsicht angebracht, da hier nur die Verluste, welche durch den Fahrwiderstand entstehen, berücksichtigt wurden. Der Fall 2, welcher im folgenden Abschnitt beschrieben wird, berücksichtigt zusätzlich die Verluste im Traktionsstrang.

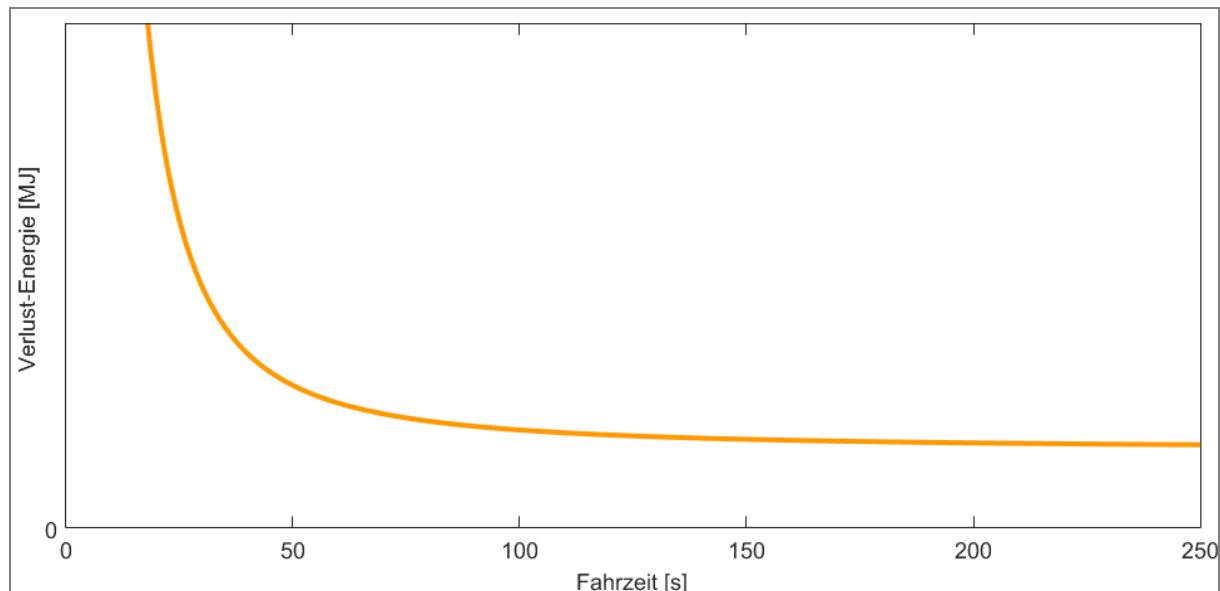


Abbildung 36 Verlustenergie durch die Fahrwiderstandsverluste in Abhängigkeit der Fahrzeit

4.2.1.2 Fall 2 - Mit Komponentenverlusten des Fahrzeugs 1

Bei der Betrachtung der Verluste im Traktionsstrang ändern sich die Verlustleistung und die Verlustenergie. Die Fahrwiderstände und die Reisezeit bleiben natürlich gleich, sodass die Teile a) und c) der Abbildung 37 gleich der Abbildung 35 sind.

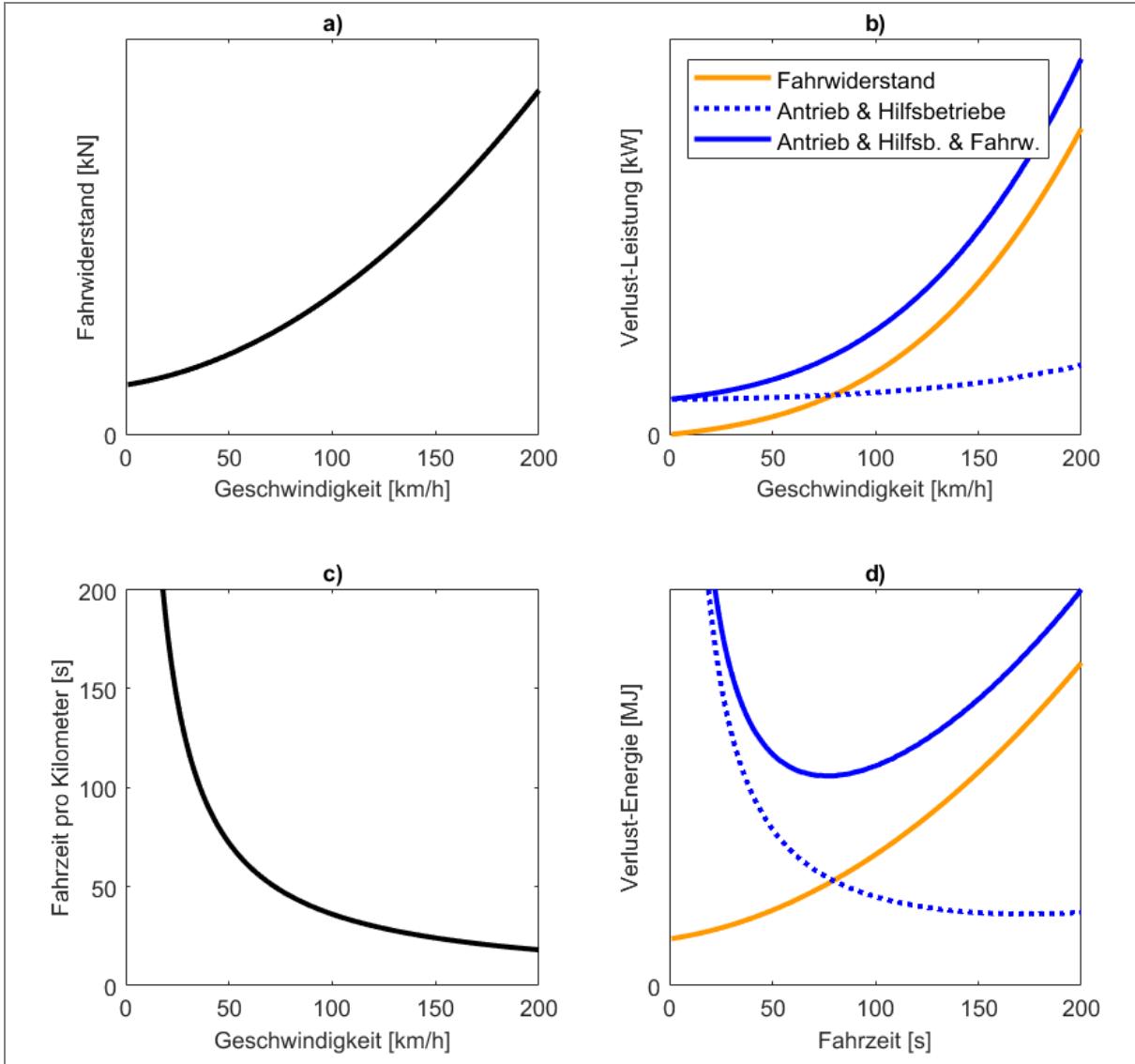


Abbildung 37 Beispiel 1 - Fall 2

- a) Fahrwiderstand in Abhängigkeit der Geschwindigkeit
- b) Verlustleistung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit:
 - orange: Verlustleistung zur Kompensation der Fahrwiderstände
 - blau gepunktet: Verlustleistung im Traktionsstrang
 - blau durchgezogen: Summe beider Verlustleistungen
- c) Reisezeit für die Fahrt von einem Kilometer in Abhängigkeit der Geschwindigkeit
- d) Verlustenergie in Abhängigkeit der Geschwindigkeit:
 - orange: Verlustenergie zur Kompensation der Fahrwiderstände
 - blau gepunktet: Verlustenergie im Traktionsstrang
 - blau durchgezogen: Summe der Verlustenergie

Änderungen ergeben sich bei Fall 2 den Teilen c) und d) der Abbildung 37. Hierzu wird zuerst der Teil c), welcher die Verlustleistung darstellt, betrachtet. Die orangene Linie stellt analog zu Fall 1 die Verlustleistung zur Kompensation des Fahrwiderstandes dar. Zusätzlich zu der orangenen Linie kommen die blau dargestellten Verluste im Traktionsstrang hinzu, die zusätzlich entstehen. Die grüne Linie addiert die beiden Verluste und stellt den Leistungsbezugswert dar, welcher effektiv aus dem Fahrdrift bezogen werden muss, damit das Fahrzeug konstant die jeweilige Geschwindigkeit fährt.

Das Produkt aus diesem Leistungsbedarf mit der Fahrzeit pro Kilometer ergibt die Energie, welche benötigt wird um einen Kilometer lang mit der jeweiligen Geschwindigkeit zu fahren. Dargestellt ist dies in der Abbildung 37 Teil d). Hierbei ist die orangene Linie die Energie, zur Kompensation der Fahrwiderstände; die gepunktete blaue Linie stellt die Traktionsverluste dar und die durchgezogene blaue Linie die Summe aus beiden. Bei der Betrachtung der durchgezogenen blauen Linie (also der gesamten Energieverluste) wird es deutlich, dass die Verlust-Energie mit abnehmender Geschwindigkeit nicht mehr kontinuierlich fällt, sondern nach einem Tiefpunkt wieder ansteigt. Dies begründet sich aus zwei gegenläufigen Effekten:

- Fahrwiderstand: Mit einer geringeren Geschwindigkeit reduziert sich der Fahrwiderstand und die damit entstehenden Verluste zur Kompensation des Fahrwiderstandes
- Traktionsverluste und Hilfsbetriebe (abgekürzt "Aux." für "Auxiliaries"): Mit einer geringeren Geschwindigkeit vergrößert sich die Fahrzeit um einen Kilometer zu fahren. Die Verluste im Traktionsstrang, den Hilfsbetrieben etc. pro Sekunde bleiben aber bestehen, sodass durch die zunehmende Fahrzeit die Verluste pro Kilometer ansteigen.

Die Formel 23 beschreibt diesen Zusammenhang, sodass in den folgenden Formeln Beispielrechnungen für 40 km/h (Formel 24), 100 km/h (Formel 25) und 12 km/h (Formel 26) gezeigt werden. Zusätzlich visualisiert die Abbildung 38 die Leistungswerte, wie sie in den Formeln berechnet wurden und die Abbildung 39 visualisiert den Energieverbrauch pro Kilometer, wie er in den Formeln berechnet wurde.

$$\frac{(Traktion + Aux. + Fahrwiderstand)}{Verluste} \cdot \frac{Fahrzeit}{pro Kilometer} = \frac{Energieverluste}{pro Kilometer} \quad \text{Formel 23}$$

Konstante Reisegeschwindigkeit 40 km/h:

$$\left(\underbrace{145 \text{ kW}}_{\text{Traktion}} + \underbrace{86 \text{ kW}}_{\text{Aux.}} + \underbrace{81 \text{ kW}}_{\text{Fahrwiderstand}} \right) \cdot \underbrace{90 \frac{\text{s}}{\text{km}}}_{\substack{\text{Fahrzeit} \\ \text{pro Kilometer} \\ \text{bei } 40 \frac{\text{km}}{\text{h}}}} = \underbrace{28'080 \frac{\text{kW s}}{\text{km}}}_{\substack{\text{Energie} \\ \text{pro Kilometer}}} = 7.8 \frac{\text{kWh}}{\text{km}} \Rightarrow 17.7 \frac{\text{Wh}}{\text{tkm}} \quad \text{Formel 24}$$

Konstante Reisegeschwindigkeit 100 km/h:

$$\left(\underbrace{175 \text{ kW}}_{\text{Traktion}} + \underbrace{86 \text{ kW}}_{\text{Aux.}} + \underbrace{391 \text{ kW}}_{\text{Fahrwiderstand}} \right) \cdot \underbrace{36 \frac{\text{s}}{\text{km}}}_{\substack{\text{Fahrzeit} \\ \text{pro Kilometer} \\ \text{bei } 100 \frac{\text{km}}{\text{h}}}} = \underbrace{23'472 \frac{\text{kW s}}{\text{km}}}_{\substack{\text{Energie} \\ \text{pro Kilometer}}} = 6.52 \frac{\text{kWh}}{\text{km}} \Rightarrow 14.8 \frac{\text{Wh}}{\text{tkm}} \quad \text{Formel 25}$$

Konstante Reisegeschwindigkeit 120 km/h:

$$\left(\underbrace{195 \text{ kW}}_{\text{Traktion}} + \underbrace{86 \text{ kW}}_{\text{Aux.}} + \underbrace{577 \text{ kW}}_{\text{Fahrwiderstand}} \right) \cdot \underbrace{30 \frac{\text{s}}{\text{km}}}_{\substack{\text{Fahrzeit} \\ \text{pro Kilometer} \\ \text{bei } 120 \frac{\text{km}}{\text{h}}}} = \underbrace{25'740 \frac{\text{kW s}}{\text{km}}}_{\substack{\text{Energie} \\ \text{pro Kilometer}}} = 7.15 \frac{\text{kWh}}{\text{km}} \Rightarrow 16.3 \frac{\text{Wh}}{\text{tkm}} \quad \text{Formel 26}$$

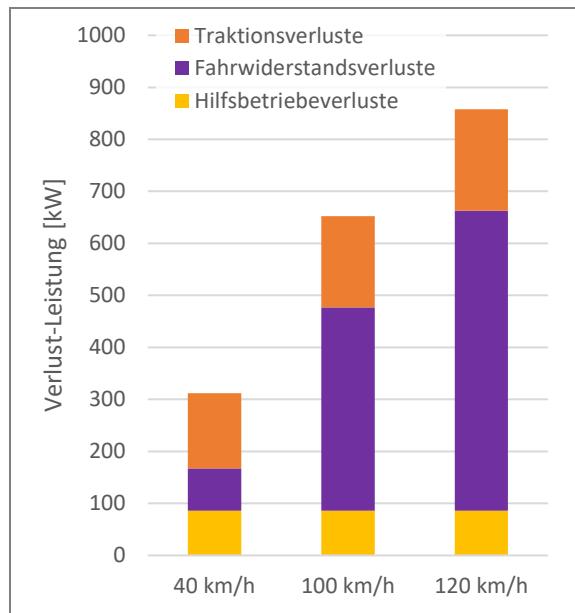


Abbildung 38 Visualisierung der Verlustleistung aus Formel 24, Formel 25 und Formel 26

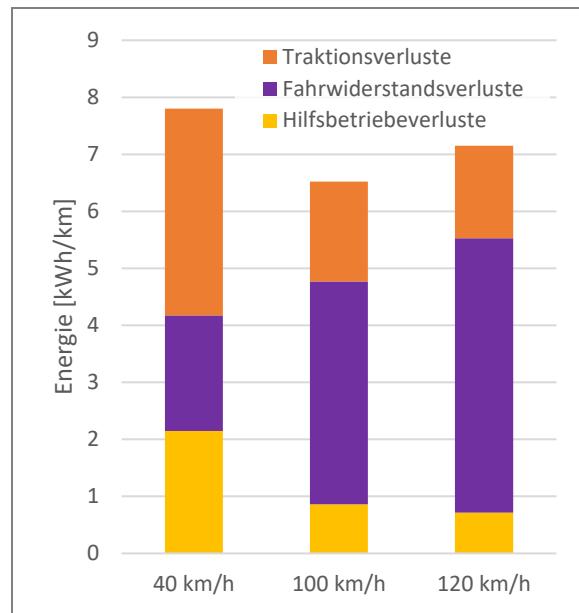


Abbildung 39 Visualisierung des Energiebedarfs pro Kilometer aus Formel 24, Formel 25 und Formel 26

Aus den Berechnungen wird deutlich, dass es nicht grundsätzlich vorteilhaft ist, langsamer zu fahren. Eine langsame Fahrt kann auch den Verbrauch pro Kilometer erhöhen, was sich durch die zusätzlichen Verbraucher und Verluste ergibt. Ein Ignorieren dieser Verbraucher/Verluste ist falsch, da diese sich auch auf die Klimabilanz auswirken und letztendlich auch die Energielieferanten bezahlt werden müssen.

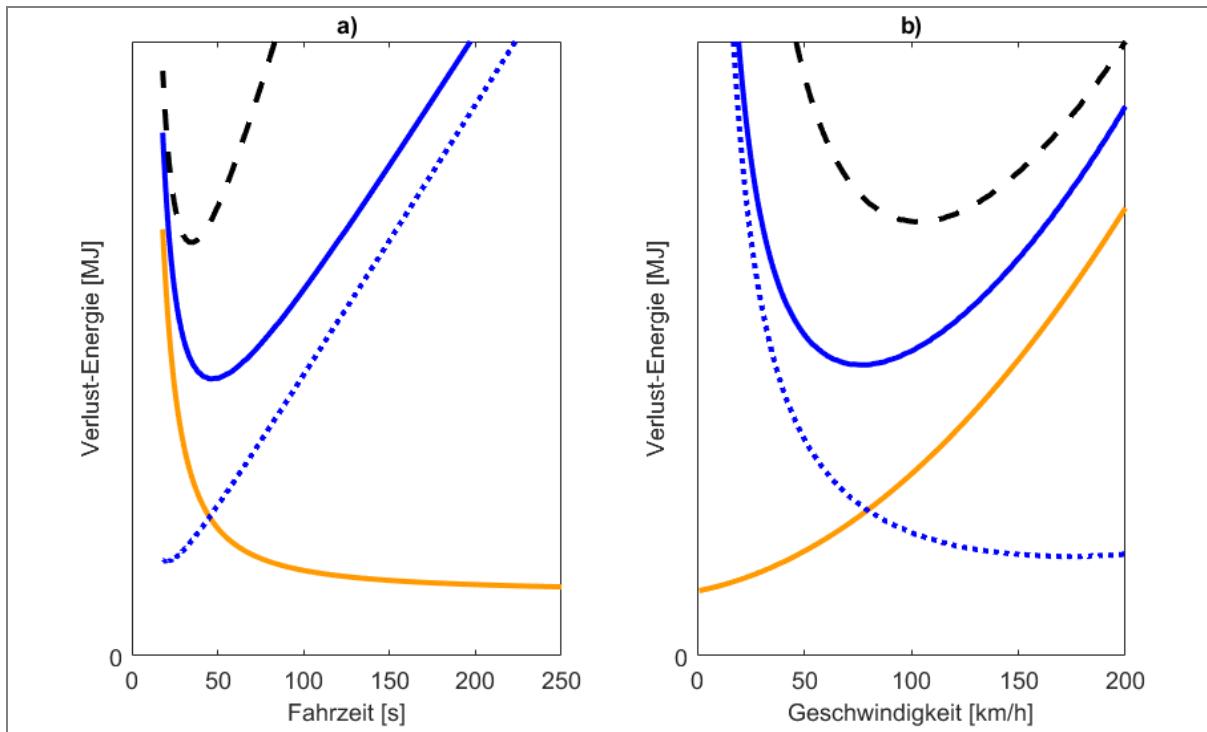


Abbildung 40 Beispiel 1 - Fall 2

- a) Verlustenergie in Abhängigkeit der Fahrzeit.
- b) Verlustenergie in Abhängigkeit der Geschwindigkeit,
- Orangene Linie: Verlustenergie zur Kompensation des Fahrwiderstandes
- blaue gepunktete Linie: Verlustenergie im Traktionsstrang und durch die Hilfsbetriebe
- blaue durchgezogene Linie: Summe Traktionsstrang + Hilfsbetriebe + Fahrwiderstand
- Schwarz gestrichelte Linie: Summe Traktionsstrang + Hilfsbetriebe + Fahrwiderstand + ZSS Verbraucher

Daher ergänzt die Abbildung 40 Teil a) die Abbildung 36 und zeigt, dass nicht automatisch eine geringere Reisezeit zu geringen Verlusten führt. Abbildung 40 Teil b) zeigt, dass bei diesem speziellen Zug das Verbrauchsminimum (ohne Berücksichtigung der Verbraucher im Fahrgastrum) pro Kilometer bei ungefähr 80 km/h liegt.

Zusätzlich zu diesen Verlusten ist auch noch die Leistung, welche an der Zugsammelschiene (ZSS) oder über das Fahrzeugbordnetz bezogen wird um das Fahrzeug zu beleuchten, zu Heizen/Kühlen etc. einzurechnen. So ist es realistisch, dass pro Wagen bis zu 40 kW/h Heizleistung benötigt wird (im Jahresmittel sind es circa 18 kW/h) (Meyer et al, 2007). Ein

Beispiel für die bezogene Heizleistung wurde ebenfalls in der Abbildung 40 Teil a) und b) dargestellt.

Diese Heizleistung ist nur in speziellen Fällen im Zusammenhang mit der Geschwindigkeit zu berücksichtigen²². Führt eine Geschwindigkeitserhöhung nicht zu einer Einsparung eines Umlaufes wird der Zug trotzdem (auch am Bahnhof) üblicherweise den ganzen Tag beheizt und verbraucht diese Energie. Führt eine Geschwindigkeitserhöhung zu einer Einsparung eines Umlaufes ist der Zusammenhang mit der Geschwindigkeitserhöhung zu berücksichtigen.

4.2.1.3 Fall 3 - Mit Komponentenverlusten des Fahrzeugs 2

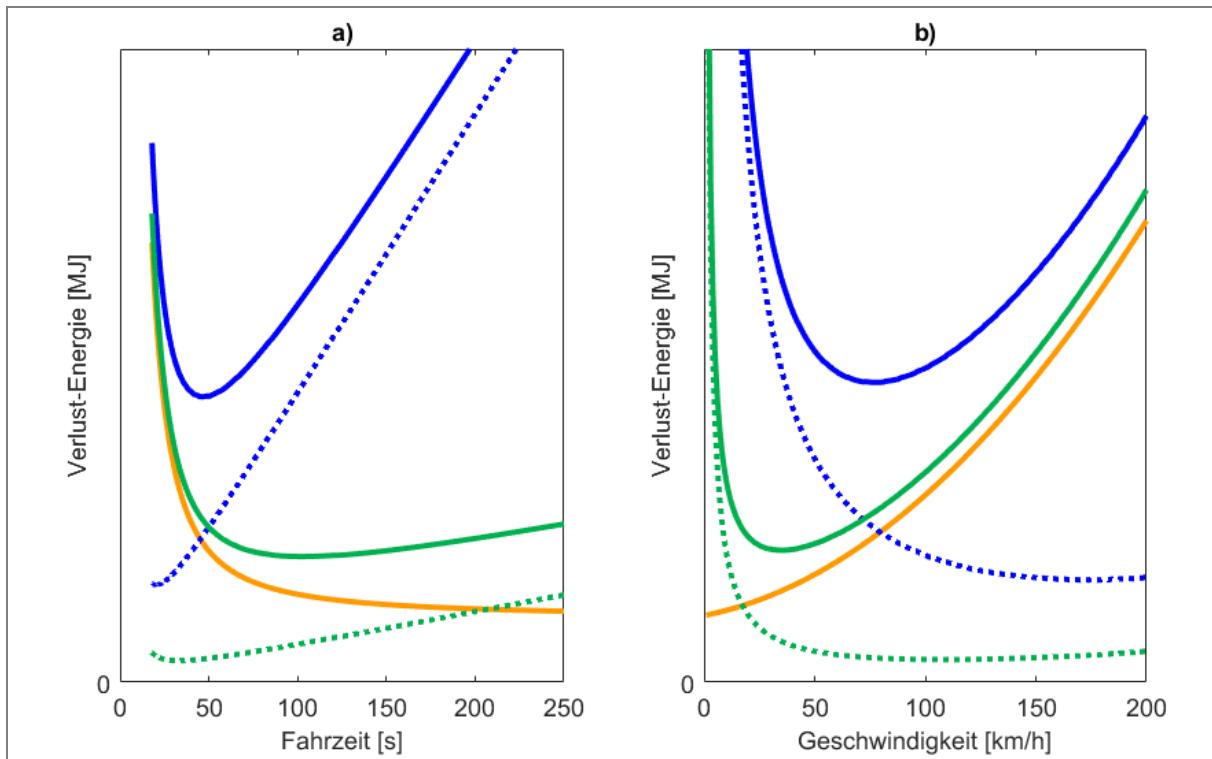


Abbildung 41 Beispiel 1 - Fall 3

- a) Verlustenergie in Abhängigkeit der Fahrzeit.
- b) Verlustenergie in Abhängigkeit der Geschwindigkeit,
- Orangene Linie: Verlustenergie zur Kompensation des Fahrwiderstandes
- Blau gepunktete Linie: Verlustenergie Traktionsstrang (alter Stromrichter) + Hilfsbetrieb
- Blau durchgezogene Linie: Summe Traktionsstrang + Hilfsbetrieb + Fahrwiderstand
- Grüne gepunktete Linie: Verlustenergie Traktionsstrang (neuer 3-Punkt-Stromrichter) + Hilfsbetrieb
- Grüne durchgezogene Linie: Summe Traktionsstrang (3-Punkt-Str.) + Hilfsbetrieb + Fahrwiderstand

²² Den Aspekt, dass die Wärmeübertragung und somit die Heizleistung auch vom momentanen Ort und der momentanen Geschwindigkeit abhängt, wird hier nicht betrachtet, da Wärmesimulationen über den Umfang dieser Studie hinausgehen.

Die SBB Re 460 hatte ursprünglich einen 3-Punkt-GTO²³-Stromrichter²⁴ und wird im Rahmen eines Refits auf energiesparende 3-Punkt-IGBT²⁵-Stromrichter mit neuesten Energiespartechnologien umgestellt (Huggenberger, 2016; Huggenberger 2017). Dadurch existiert diese Lok derzeit in zwei Varianten, sodass der Vergleich der Mindestgeschwindigkeit mit zwei quasi gleichen Fahrzeugen, aber zwei verschiedenen Technologien gemacht werden kann.

Die Abbildung 41 zeigt, dass ein anderer Stromrichter (alt: 3-Punkt GTO / neu: 3-Punkt IGBT) bei der gleichen Lokomotivbaureihe zu deutlich unterschiedlichen Resultaten führt. Grundsätzlich lässt sich aber auch hier eine Mindestgeschwindigkeit nicht vermeiden, da diverse Komponenten immer Strom benötigen und dieser bei einer langsamen Geschwindigkeit mehr ins Gewicht fällt, wie bei einer hohen Geschwindigkeit.

Der neue 3-Punkt-IGBT-Stromrichter ist zwar deutlich effizienter, als der alte 3-Punkt-GTO-Stromrichter. Grundsätzlich ist aber zu betonen, dass auch schon der alte 3-Punkt-GTO-Stromrichter im allgemeinen Vergleich zu anderen Stromrichtern schon sehr energieeffizient ist. Das heisst dieser hier beschriebene Aspekt mit der Mindestgeschwindigkeit ist bei anderen Fahrzeugen viel gravierender und ein ernstzunehmendes Thema.

4.2.1.4 Fazit zu Berechnungs-Beispiel 1

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass langsamere Geschwindigkeiten nicht grundsätzlich zu einem geringeren Verbrauch pro Kilometer führen. Bedingt durch Grundverbraucher gibt es immer eine Grenzgeschwindigkeit. Beim Unterschreiten dieser Grenzgeschwindigkeit steigt der Verbrauch pro Kilometer wieder an.

Weiter kann festgestellt werden, dass diese Grenzgeschwindigkeit sehr stark von den Komponenten und der Technologie abhängt. So ist beispielsweise der betrachtete GTO-Stromrichter deutlich schlechter als der betrachtete 3-Punkt-IGBT-Stromrichter. Grundsätzlich wird dies aber auch schon von der Beschreibung deutlich, da Stromrichterschaltungen mit IGBT Halbleiter die Verluste reduzieren und da die 3-Punkt Stromrichterschaltungen ebenfalls die Verluste reduzieren.

²³ GTO wird als Abkürzung für GTO-Thyristoren (gate-turn-off-Thyristor) verwendet.

²⁴ Stromrichter mit einer 3-Punkt-Bauart sind nicht häufig und insbesondere 3-Punkt GTO Stromrichter sind sehr selten, obwohl die 3-Punkt-Bauart im Vergleich zur 2-Punkt Bauart energieeffizienter ist.

²⁵ IGBT wird als Abkürzung für den "Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode" verwendet.

4.2.2 Beispiel 2 – Verluste bei der normalen Fahrt (ohne Optimierung)

In diesem Abschnitt wird der Energieverbrauch einer Fahrtsimulation untersucht, mit dem Ziel den Einfluss der Komponentenverluste im Vergleich zu den Fahrwiderstandsverlusten zu verdeutlichen. Hierzu wird derselbe Zug mit zwei verschiedenen Betriebsszenarien eingesetzt:

- als haltender Zug (entspricht einer S-Bahn) und
- als durchfahrender Zug (entspricht einem InterRegio).

Dazu werden im ersten Fall zuerst nur die Energieverluste durch den Fahrwiderstand betrachtet und im zweiten Fall werden auch die Komponentenverluste betrachtet.

Für eine bessere Vergleichbarkeit ist hierzu eine gerade Strecke mit 0 % Längsneigung ideal, da in diesem Fall dann nur noch die Fahrwiderstandsverluste mit den Traktionskomponentenverlusten verglichen werden. In der Schweiz ist es aber nicht einfach eine solche längere Strecke zu finden. Daher wird die Strecke von Zürich nach Baden in minimal angepasster Form betrachtet. Die Abbildung 42 stellt diese schematisch dar.

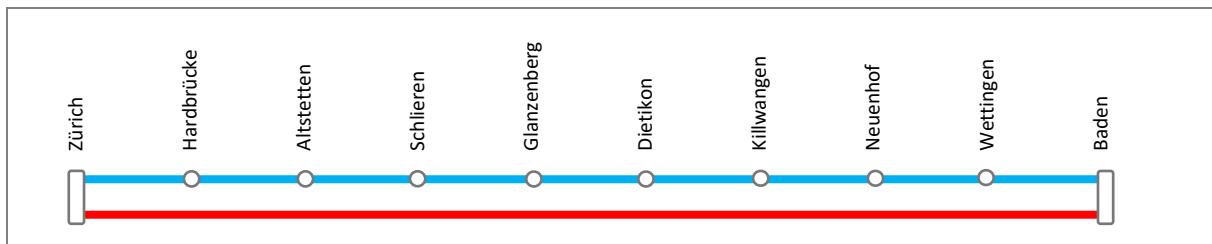


Abbildung 42 Linienstruktur des Beispiels 2. Die blaue Linie entspricht dem haltenden Zug (S-Bahn) und die rote Linie dem durchfahrenden Zug (InterRegio)

So werden für eine saubere Vergleichbarkeit der Fahrwiderstandsverluste bezogen auf Traktionskomponentenverluste die folgenden Harmonisierungen an der Strecke angewandt:

- Die 22.5 Kilometer lange Strecke von Zürich nach Baden hat eine Höhendifferenz von 22.6 Meter (Wägli, 2010; Schweers et al, 2012; SBB 2015) und somit im Gesamtdurchschnitt ein Gefälle von circa 1 %²⁶. Grundsätzlich ist der Gefälleeinfluss dadurch schon vergleichsweise klein. Damit es aber gar keine verfälschenden Einflüsse durch das Gefälle gibt, wird die Strecke als eben betrachtet.

²⁶ Abschnittsweise beträgt die Längsneigung auf dieser Linie mehr als 1 % (Wägli, 2010). Für eine Betrachtung der potentiellen Energie ist die Differenz zwischen dem Anfangs- und Endbahnhof primär relevant. Wobei natürlich angemerkt werden muss, dass eigentlich das Gesamtlängsneigungsprofil für den Energieverbrauch relevant ist. Da aber hier das Ziel der Vergleich der beiden Fahrweisen ist und durch die ebene Strecke die Vergleichbarkeit dadurch für den Leser einfacher ist, wird diese angewandt.

- Die Strecke hat lange gerade Abschnitte und einen relativ geringen Kurvenanteil. Damit es aber gar keine verfälschenden Einflüsse durch die Bögen gibt, wird die Strecke als gerade betrachtet.

Hinsichtlich der Fahrzeugseite werden die folgenden Aspekte betrachtet:

- Es wird eine Fahrt mit einem haltenden Zug (S-Bahn oder Nahverkehrszug) und die Fahrt mit einem durchfahrenden Zug (InterRegio oder Fernverkehrszug) verglichen.
- Es wird immer der gleiche Zugtyp verwendet. Daher wird eine Zugzusammensetzung gewählt, welche in der Praxis sowohl im Fernverkehr aber auch im Nahverkehr eingesetzt werden kann. Dieser Zug setzt sich wie folgt zusammen:
 - Eine Universallokomotive (3-Punkt-Stromrichter – SBB Re 460 vor dem Refit: ca. 84 t | 300 kN | 6.1 MW)
 - Sechs einstöckige Reisezugwagen mit 50 % Belegung

Die Abbildung 43 und Abbildung 44 verdeutlichen, dass die hier beschriebene Zugzusammenstellung (Einsatz von sechs Reisezugwagen) bei der SBB angewandt wird.



Abbildung 43 SBB Zug zusammengesetzt aus einer Lokomotive und sechs Reisezugwagen (vier 2. Klasse-Wagen und zwei 1. Klasse-Wagen) auf der Gotthardstrecke bei Wassen (Foto: M. Nold im Jahr 2016)



Abbildung 44 Zuganzeigetafel eines IC der SBB mit sechs Wagen im Zürcher Hauptbahnhof (Foto: M. Nold im Jahr 2019)

4.2.2.1 Fall 1 – Nur Fahrwiderstände

Der Fall 1 betrachtet nur die Bewegung des Zuges und die Fahrwiderstände. Die Komponentenverluste werden in diesem Fall noch ignoriert.

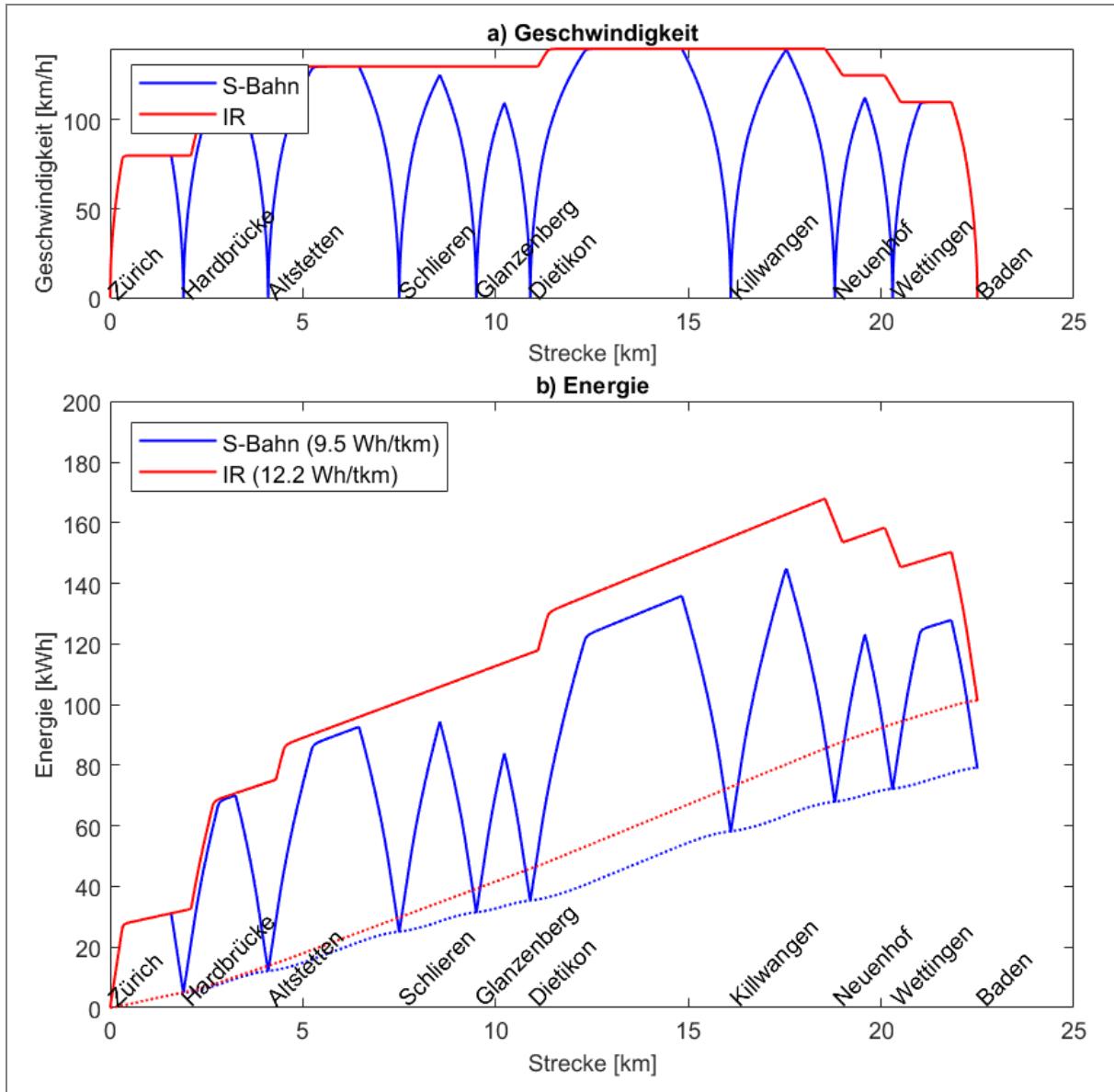


Abbildung 45 a) Fahrprofil für zwei Fahrten von Zürich HB nach Baden

b) Zu dem Fahrprofil gehörender Energiebedarf ohne Fahrzeugkomponentenverluste. Die jeweils durchgezogenen Linien zeigen die Energie, welche aus der Fahrleitung beginnend vom Startbahnhof bis zu dem jeweiligen Streckenpunkt für die Beschleunigung/Verzögerung des Zuges und zur Kompensation der Fahrwiderstände bezogen wurde. Die jeweils gepunkteten Linien summieren die Energieverluste zur Kompensation des Fahrwiderstands beginnend vom Startbahnhof bis zu dem jeweiligen Streckenpunkt auf.

Die Abbildung 45 a) zeigt das Fahrprofil für die Vergleichsfahrten von Zürich HB nach Baden. Die orangene Linie stellt einen durchgängigen InterRegio-Zug dar und die blaue Linie einen S-Bahn-Zug, welcher an Halteunkten anhält. Die Namen der Halte sind ebenfalls eingezeichnet.

Die Abbildung 45 b) stellt zu diesen beiden Fahrten den Energieverbrauch dar. Dabei wird zwischen den gepunkteten Linien und den durchgezogenen Linien unterschieden.

- Die jeweils **gepunkteten Linien** summieren die Energieverluste zur Kompensation des Fahrwiderstands beginnend vom Startbahnhof bis zu dem jeweiligen Streckenpunkt auf.
- Die jeweils **durchgezogenen Linien** zeigen die Energie, welche aus der Fahrleitung beginnend vom Startbahnhof bis zu dem jeweiligen Streckenpunkt für die Beschleunigung/Verzögerung des Zuges und zur Kompensation der Fahrwiderstände bezogen wurde.

Diese durchgezogenen Linien steigen stark mit der Beschleunigung, da bei der Beschleunigung viel Energie aus der Fahrleitung bezogen wird um den Zug in Bewegung zu setzen. Beim Bremsen fallen diese Linien wieder, da die Bewegungsenergie des Zuges wieder zurückgespeist wird. Es wird also die momentane kinetische Energie gemeinsam mit den Energieverlusten zur Kompensation des Fahrwiderstandes dargestellt.

Das Energiediagramm verdeutlicht beim Streckenpunkt Baden einen Energieverbrauch standardisiert in Wattstunde pro Bruttotonnenkilometer von

- 9.5 Wh/tkm für die S-Bahn und
- 12.2 Wh/tkm für den InterRegio.

Im Folgenden werden zwei Aspekte deutlich, welche diese Berechnung und das Ignorieren der Komponentenverluste in Frage stellen.

Aspekt 1

Beide Züge bremsen zu 100 % elektrisch und rekuperieren die Bremsenergie zurück in ein voll rückspeisefähiges Wechselspannungsbahnnetz. Beide Züge haben die gleiche Höchstgeschwindigkeit. Daher müsste der nicht haltende InterRegio einen geringeren Energieverbrauch als der S-Bahn-Zug aufweisen, was sich auch messtechnisch beweisen lässt und aus Energiekennzahlen bekannt ist.

Aus Abbildung 45 b), welche nur die Fahrwiderstände betrachtet, wird deutlich, dass der S-Bahn-Zug weniger Energieverluste als der InterRegio hat.

Mit der Abbildung 45 a) lässt sich dies erklären. An diesem Geschwindigkeitsprofil wird deutlich, dass der S-Bahn-Zug, durch das Halten zwangsläufig und mehrfach mit einer geringeren Geschwindigkeit unterwegs ist, als der InterRegio. Diese geringere Geschwindigkeit führt zu geringeren Fahrwiderstandsverlusten.

Wenn also nur die Fahrwiderstandsverluste betrachtet werden, würde es den Anschein machen, dass der haltende Zug weniger Energieverluste verursacht.

Aspekt 2

Energiekennzahlen, welche ein 100 % elektrisches Bremsen und rekuperieren in ein voll rückspeisefähiges Wechselstrombahnnetz²⁷ betrachten, erwarten einen durchschnittlichen Energieverbrauch von

- 18 bis 25 Wh/tkm für einen InterRegio-Zug und (Meyer, 2020)
- 35 bis 45 Wh/tkm für einen haltenden S-Bahn-Zug (Meyer, 2020).

Dies bestätigt, was bei dem zuvor beschriebenen Aspekt 1 erwartet wurde - und zwar, dass der durchfahrende Zug einen geringeren Verbrauch haben müsste. Weiter wird deutlich, dass die Energiekennzahlen weit von den Resultaten aus Abbildung 45 b) abweichen. Bei dem S-Bahn-Zug ist die Abweichung ungefähr ein Faktor 3 bis 4.

Erklären lässt sich dies, da die Energiekennzahlen den Energieverbrauch am Stromabnehmer (ohne Komfortanlagen) betrachten. Die Energiekennzahlen berücksichtigen also das, was der Bahnbetreiber letztendlich an Energie bezahlen muss, wenn er elektrisch in ein voll rückspeisefähiges Wechselstrombahnnetz bremst (Komfortanlagen werden nicht berücksichtigt, weil diese jahreszeitenbedingt sind). Bei dieser Berechnung hingegen wurden nur die Energieverluste, welche durch die Fahrwiderstände entstehen, betrachtet (der Rest wurde ignoriert und folgt erst im nächsten Fall).

Fazit

Die Abbildung 46 verdeutlicht nochmals die Unterschiede zu den Energiekennzahlen. Letztendlich wird aus diesen beiden Aspekten und den Zahlen deutlich, dass eine Auswertung, welche nur die Fahrwiderstände berücksichtigt:

- zu einer komplett falschen Größenordnung führen kann und
- die falsche Fahrweise empfehlen kann²⁸.

²⁷ Das Bahnstromnetz der SBB ist üblicherweise ein voll rückspeisefähiges Wechselstrombahnnetz.

²⁸ So macht es durch das Weglassen der Komponentenverluste den Anschein, dass der haltende Zug weniger Energie benötigt, als derselbe Zugtyp beim Durchfahren.

Dabei ist zu betonen und selbsterklärend, dass die Abweichung der Größenordnung nicht an den Fahrwiderständen liegt. Denn stärkere Fahrwiderstände würden zwar den Energieverbrauch erhöhen. Aber letztendlich wäre bei diesen höheren Fahrwiderständen der durchfahrende Zug immer noch energieintensiver als der haltende Zug. Daher werden im nächsten Fall die Komponentenverluste berücksichtigt.

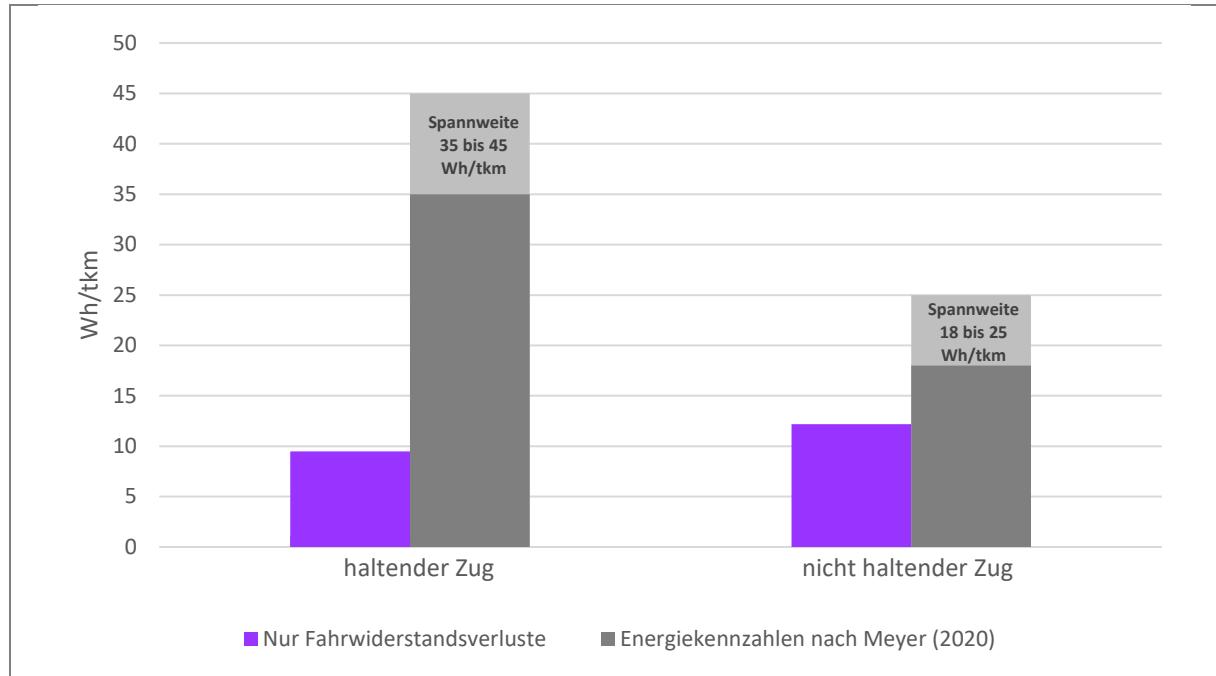


Abbildung 46 Vergleich des Fahrwiderstandenergieverbrauches mit den Energiekennzahlen nach Meyer (2020)

4.2.2.2 Fall 2 – Mit Komponentenverlusten

Der Fall 2 berechnet die gleiche Fahrt, wie der Fall 1, jedoch wird hierbei die gesamte Energiebilanz des Zuges berücksichtigt. Es wird lediglich der Verbrauch der Komfortanlagen ausgenommen, da der Verbrauch der Heizung und der Klimaanlage sehr stark durch die Jahreszeiten beeinflusst wird.

Die Abbildung 47 zeigt eine Gesamtübersicht dieser Berechnung mit 8 Grafiken. Alle Grafiken tragen ihre jeweilige Information über die Strecke auf. Die Grafiken in der linken Spalte (mit Index 1) beschreiben die Fahrt des haltenden Zuges und die Grafiken in der rechten Spalte (mit Index 2) beschreiben die Fahrt des nicht haltenden Zuges. Die Grafiken der Zeile a) stellen das jeweilige Geschwindigkeitswegprofil dar, die Grafiken der Zeile b) stellen die Leistung dar, die Grafiken in der Zeile c) stellen die Energie dar und die Grafiken in der Zeile d) den Wirkungsgrad.

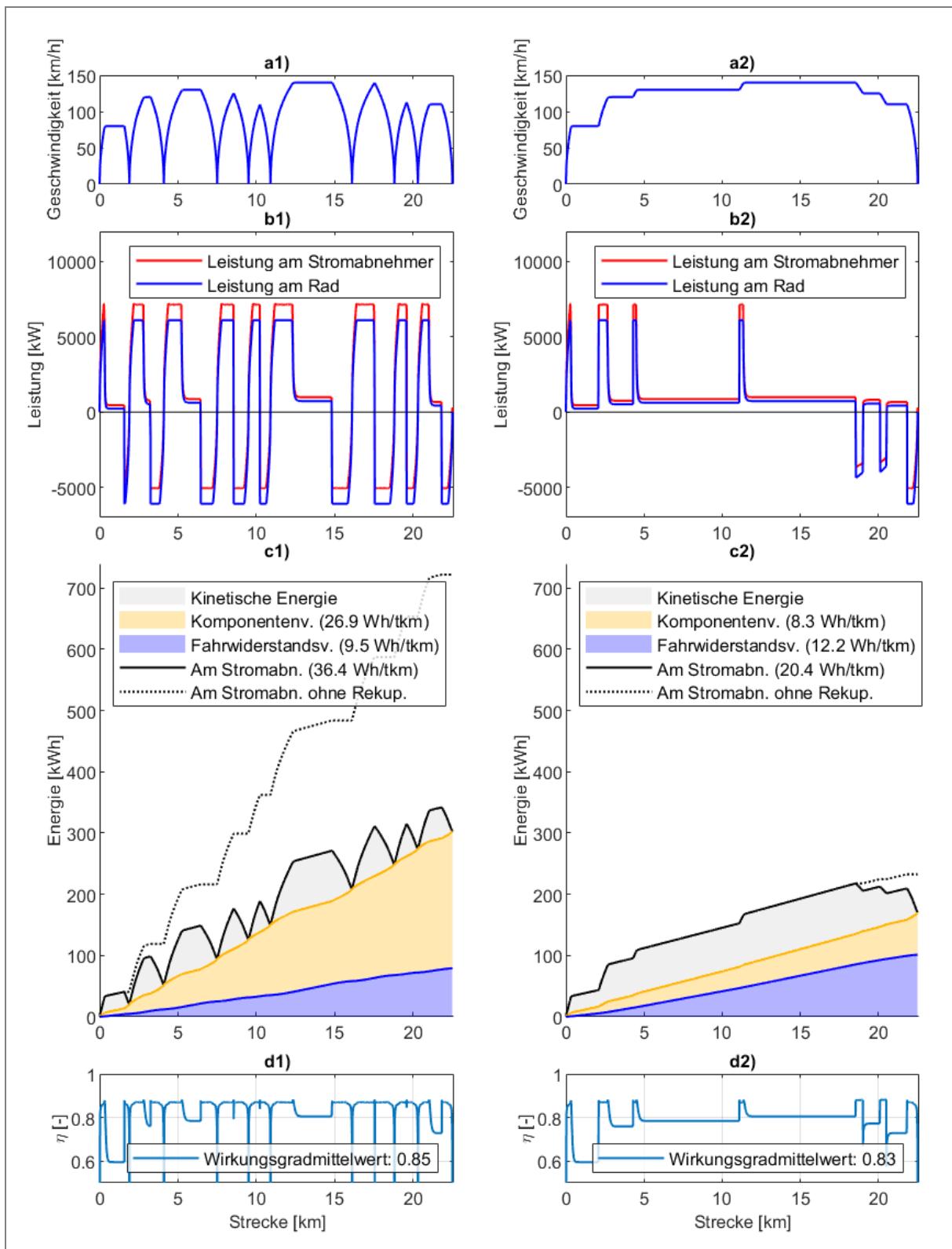


Abbildung 47 Berechnungsgesamtübersicht für die Vergleichsberechnung mit einem haltenden Zug und einem durchfahrenden Zug

Aus der Abbildung 47 b1) wird deutlich, dass bei jeder positiven Leistung am Rad (zum Aufbringen von Zugkraft) zugleich am Stromabnehmer ein höherer Leistungsbezug auftritt. Dieser höhere Leistungsbezug ergibt sich aus dem Aspekt, dass die Energieumwandlung aus elektrischer Energie in mechanische Energie, mit Verlusten verbunden ist. Diese Verlustenergie wird daher primär in Wärmeenergie umgewandelt. Zudem existieren noch diese Hilfsbetriebe und weitere Verbraucher im Schienenfahrzeug. Diese dienen beispielsweise dazu, die Wärmeenergie durch eine Ventilation abzuführen.

Aus der Abbildung 47 b1) wird auch deutlich, dass bei jeder negativen Leistung am Rad (zum Aufbringen von Bremskraft) zugleich am Stromabnehmer ebenfalls ein negativer Leistungsaustausch stattfindet. Das heisst es wird Energie rekuperiert (in das Bahnstromnetz zurückgespeist). In diesem Fall findet eine Energieumwandlung in die entgegengesetzte Richtung statt, es wird also die mechanische Energie in elektrische gewandelt. Auch hierbei entstehen Verluste die grösstenteils in Wärme umgewandelt werden. Durch diese Verluste wird weniger elektrische Leistung zurückgespeist als mechanisch am Rad abgegriffen wird, was begründet, dass die rote Linie (Leistung am Stromabnehmer) oberhalb der blauen Linie liegt (Leistung am Rad).

Dieser Aspekt wird in vereinfachter Form von der Abbildung 48 und Abbildung 49 dargestellt. So wird gezeigt, dass bei jeder Umwandlung Verluste entstehen.

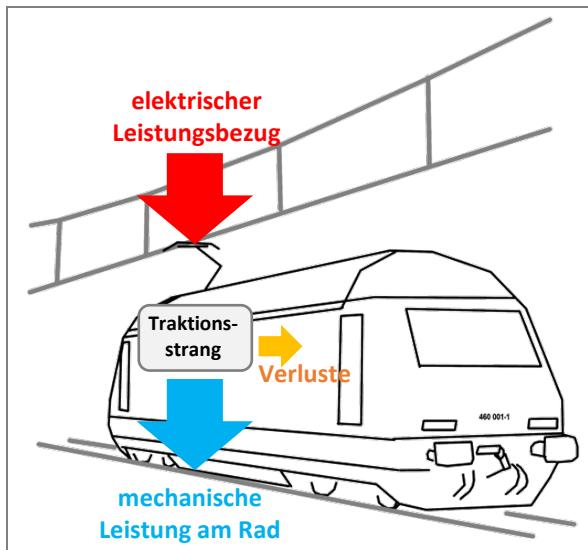


Abbildung 48 Vereinfachte schematische Darstellung der Verluste beim Leistungsaustausch von der Fahrleitung zum Rad

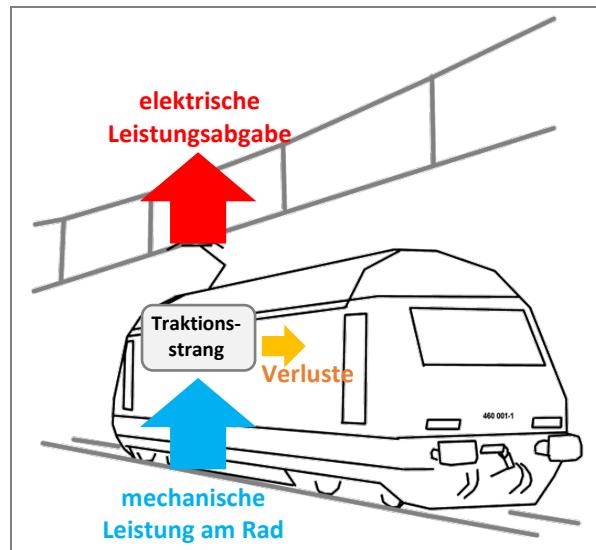


Abbildung 49 Vereinfachte schematische Darstellung der Verluste beim Leistungsaustausch vom Rad zur Fahrleitung

Die Abbildung 47 c1) und Abbildung 47 c2) zeigen die Energie der jeweiligen Bereiche beginnend vom Start (Fahrtkilometer 0) bis zu dem jeweiligen Kilometerpunkt. Der unterste

violett dargestellte Bereich zeigt die Energieverluste zur Kompensation des Fahrwiderstandes. Der mittlere orangen dargestellte Bereich addiert die Energieverluste, durch die Fahrzeugkomponenten (Traktionsstrang und Hilfsbetriebe) dazu. Der obere graue Bereich stellt die kinetische Energie im Zug dar. Daher wächst dieser Bereich mit der Beschleunigung und wird beim Stillstand zu Null.

Die Abbildung 47 d1) und Abbildung 47 d2) zeigen den momentanen Wirkungsgrad und den Mittelwert. Wobei der Mittelwert aus der Energiebilanz gebildet wurde.

Ein Vergleich der Abbildung 47 b1) und der Abbildung 47 b2) zeigt, dass der haltende Zug durch das Halten im Vergleich zu dem durchfahrenden Zug viel häufiger die Energie umwandelt, da er zum Beschleunigen Energie bezieht und zum Bremsen diese wieder zurückgibt. Dies wirkt sich auf die Abbildung 47 c1) aus.

So wird in der Abbildung 47 c1) im Vergleich zur Abbildung 47 c2) ersichtlich, dass in der Abbildung 47 c2), der orangene Bereich bei c1) grösser ist, als bei c2). Dieser Größenunterschied ergibt sich primär aus dem Anhalten und Beschleunigen des haltenden Zuges. Denn auch wenn beide Züge zu 100 % elektrisch bremsen und die Energie zurückspeisen, entstehen wie schon beschrieben, Verluste.

Final zeigt die Abbildung 47 c) mit der jeweils schwarzen durchgezogenen Linie quasi die Energiezählerbilanz am Stromabnehmer. Diese Linie steigt und fällt durch den Energiebezug und das Energierückspeisen.

Ergänzend zeigt die schwarze gepunktete Linie die Energiezählerbilanz, wenn die Energie in einer Widerstandsbremse verheizt worden wäre. So verdeutlicht die schwarz gepunktete Linie, dass das elektrische Bremsen und Rekuperieren in ein voll aufnahmefähiges Wechselstrom-Bahnstromnetz trotz der Umwandlungsverluste einen erheblichen Vorteil hat.

Plausibilität

Die Fahrt des haltenden Zugs führt zu einem Energiebedarf von 36.4 Wh/tkm und die Fahrt des durchfahrenden Zuges zu einem Energiebedarf von 20.4 Wh/tkm. Dies bestätigt die Erwartung, dass der haltende Zug einen höheren Energiebedarf hat und somit die Ergebnisse plausibel macht.

Ein Vergleich zu den Energiekennzahlen, wie er in Abbildung 50 dargestellt wird veranschaulicht, dass die berechnete Energie sehr gut innerhalb der Energiespannweite der Energiekennzahlen liegt und daher plausibel sind.

Auch der mittlere Wirkungsgrad liegt im erwarteten Bereich. Die Abbildung 47 d1) und die Abbildung 47 d2) machen deutlich, dass der Wirkungsgrad, wie erwartet, deutlich schwankt. Der mittlere Wirkungsgrad von 0.85 für den haltenden Zug passt sehr gut zu den Angaben für den Wirkungsgrad nach Meyer (2020) und ist damit ebenfalls plausibel. Der Wirkungsgrad des durchfahrenden Zuges ist mit 0.83 etwas geringer, was sich dadurch ergibt, dass der Zug mit geringer Last fährt und bekanntlich ist der Wirkungsgrad im geringen Lastbereich schlechter.

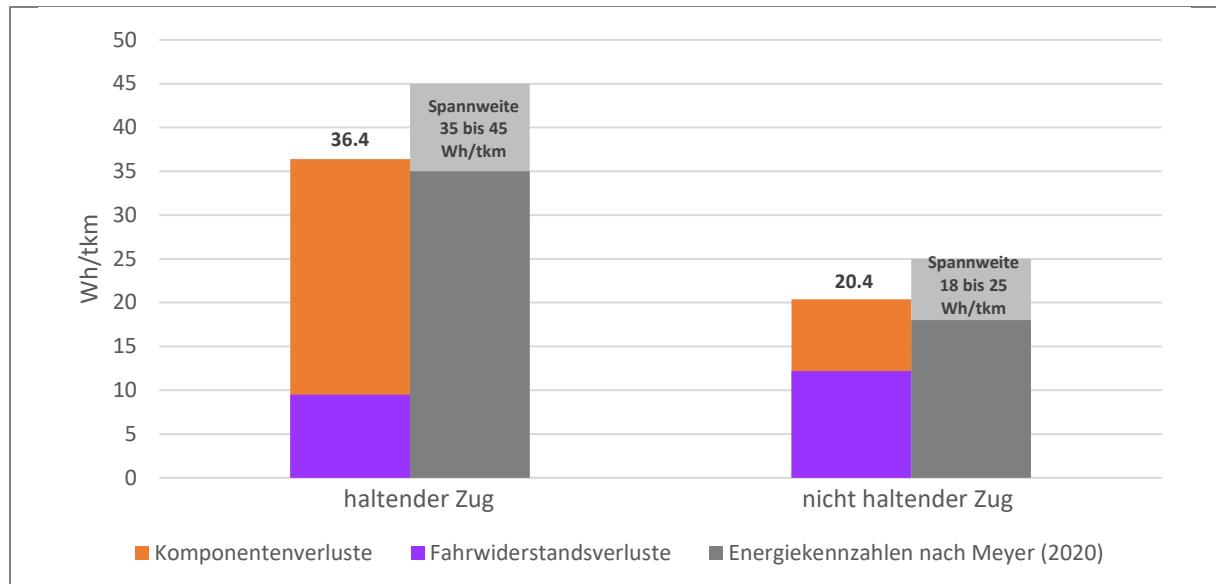


Abbildung 50 Vergleich des Energieverbrauches mit den Energiekennzahlen nach Meyer (2020)²⁹

4.2.2.3 Fazit zu Berechnungs-Beispiel 2

Beim Vergleich dieser beiden Fälle und beim Betrachten der Abbildung 50 wird deutlich, dass es schon für einfache Fahrtberechnungen notwendig ist, eine komplette Berechnung durchzuführen, da bei jeder Energieumwandlung Verluste entstehen³⁰.

²⁹ Hier wurden bewusst Absolutwerte und keine prozentuellen Werte dargestellt, da die Anteile auf anderen Strecken und mit anderen Fahrzeugen anders sind. Für einen prozentuellen Vergleich zur Abschätzung der Größenordnung braucht es den Mittelwert aus vielen Fahrten auf vielen Strecken.

³⁰ Im übertragenen Sinne sei angemerkt, dass diese Verluste auch mit einer Transaktionssteuer verglichen werden können. Genauso wie bei einer Transaktionssteuer, wird bei jedem Austausch (Umbuchung) zwischen der Fahrleitung und dem Rad (elektrisch zu mechanisch und umgekehrt) ein Teil der Energie in Form von Verlusten abgegeben (Energieverluste/Geldverluste)

4.2.3 Beispiel 3 – Effiziente Geschwindigkeitserhöhung

Aus dem Berechnungsbeispiel 2 wurde deutlich, dass beim Beschleunigen und Bremsen signifikante Verluste entstehen. Daher soll im Folgenden untersucht werden, ob es einen Ansatz gibt, möglichst effizient zu beschleunigen.

Hierzu wird eine Fahrt vom Streckenpunkt A mit Geschwindigkeit 1 zum Streckenpunkt B mit Geschwindigkeit 2 betrachtet (siehe Abbildung 51).

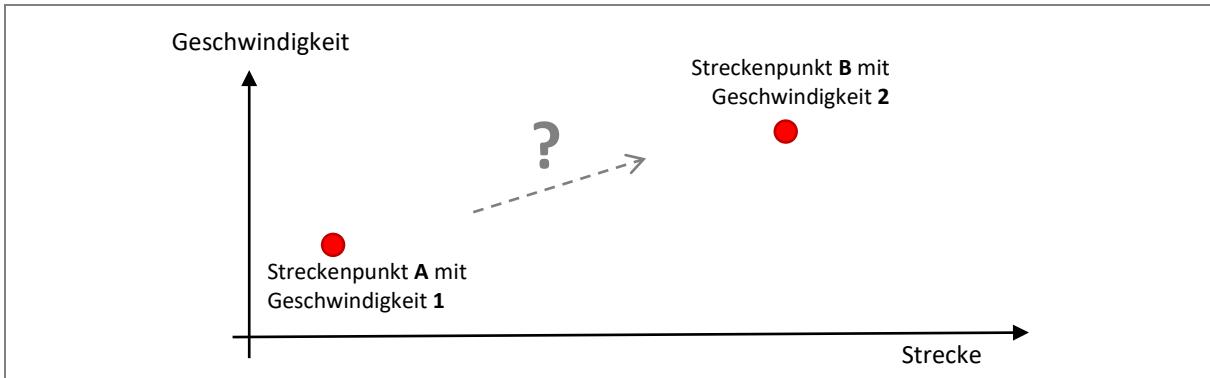


Abbildung 51 Schematische Darstellung der Ausgangssituation der folgenden Fälle.

Auch hier werden mehrere Fälle untersucht und auch hier wird zuerst mit einem Fall begonnen, welcher nur die Fahrwiderstände berücksichtigt.

Grundsätzlich soll ein einfaches Szenario betrachtet werden, bei diesem eine Beschleunigung eines Zuges von 0 auf 100 km/h in der Ebene untersucht wird.

4.2.3.1 Fall 1 – Reduktion der Fahrwiderstandsverluste

Der Fall 1 betrachtet nur die Beschleunigung des Zuges und berücksichtigt nur die Fahrwiderstandsverluste als Optimierungskriterium. Die Komponentenverluste werden in diesem Fall noch ignoriert.

Die Abbildung 52 zeigt hierzu die Varianten dieser Beschleunigung. Dabei stellt die x-Achse (hier nach rechts ausgerichtet) die Strecke in Metern da. Die z-Achse (hier nach oben ausgerichtet) stellt die Geschwindigkeit dar. Die Menge an Varianten wird durch die y-Achse (hier nach links hinten ausgerichtet) dargestellt.

Durch diese dreidimensionale Darstellung zeigt die Abbildung 52 rund 700 Varianten um innerhalb eines Kilometers von 0 auf 100 km/h zu beschleunigen. Die hohe Anzahl an Varianten ergibt sich aus der Tatsache, dass dieser hier betrachtete Zug bei maximaler Beschleunigung schon nach 600 m die Geschwindigkeit von 100 km/h erreicht haben kann, sodass er auch die Möglichkeit hat, weniger stark und/oder versetzt auf 100 km/h zu

beschleunigen. Die Variante mit der maximalen Beschleunigung wird ganz hinten dargestellt und die zeitintensivste Variante ganz vorne.

Die Variante mit der maximalen Beschleunigung führt zu den höchsten Fahrwiderstandsverlusten, da sich bei dieser Variante der Zug am längsten mit einer hohen Geschwindigkeit bewegt. Die weiteren Varianten sind mit einer geringeren Geschwindigkeit unterwegs bis hin zu der hier angewandten untersten Grenzgeschwindigkeit von 10 km/h.

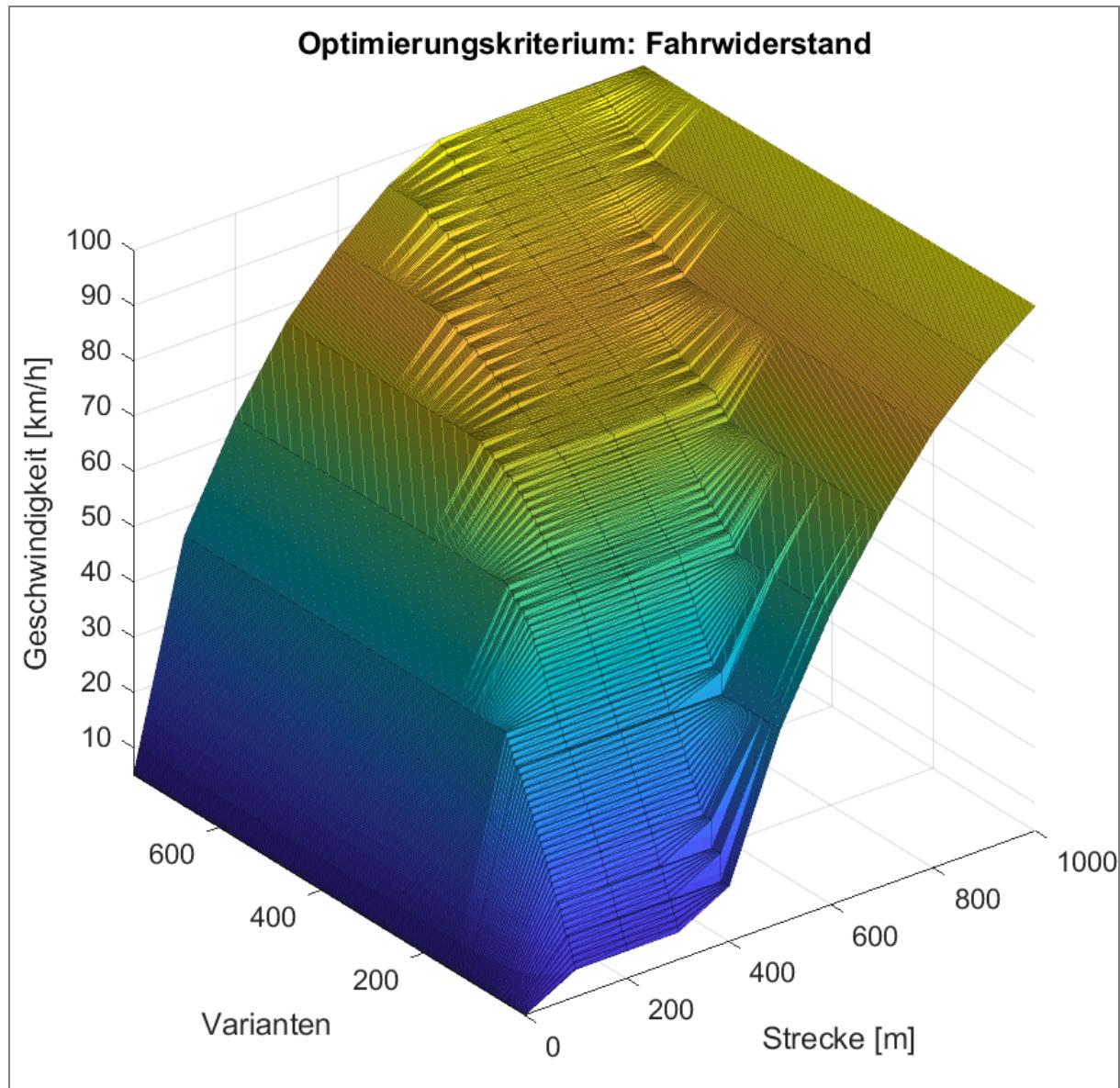


Abbildung 52 Verschiedene Varianten für eine Beschleunigung von 0 auf 100 km/h bei einer Energieverlustoptimierung, welche nur das Kriterium Fahrwiderstandsverluste berücksichtigt

Durch den Aspekt, dass nur bezüglich der Fahrwiderstandsverluste optimiert wurde, ergeben sich für diese Beschleunigung die deutlich in Abbildung 52 zu erkennenden horizontalen

Verläufe mit konstanter Geschwindigkeit. Dies liegt daran, dass bei einer Fahrwiderstandsverlustoptimierung die Geschwindigkeit das ausschlaggebende Kriterium darstellt. Es geht also nur darum, wie schnell fährt der Zug momentan und nicht darum, wie stark die momentanen Kräfte sind oder wie effizient der Traktionsstrang betrieben wird.

Die Verluste und die daraus resultierende Fahrzeitverlängerung dieser Varianten stellt die Abbildung 53 dar. Dabei entspricht ein Verlustwert von 100 % der Summe aus den Fahrwiderstandsverlusten und Traktionskomponentenverlusten, die sich bei der kürzesten Fahrzeit ergeben³¹.

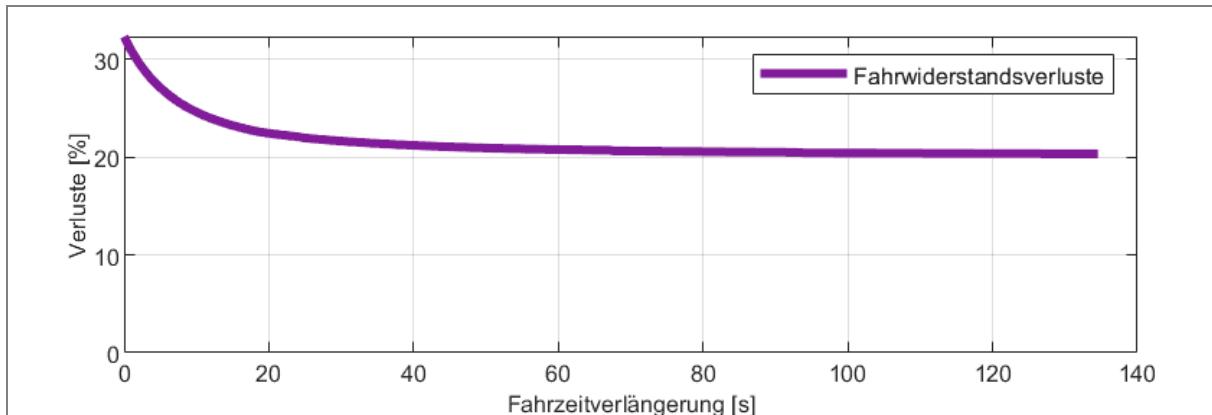


Abbildung 53 Darstellung der Verlustenergie durch die Fahrwiderstandsverluste. Hierbei entspricht 100 % der Summe aus den Fahrwiderstandsverlusten + Traktionskomponentenverlusten bei der kürzesten Fahrzeit für diesen Abschnitt

Aus Abbildung 53 wird deutlich, dass eine Variante mit einer längeren Fahrzeit die Fahrwiderstandsverluste reduzieren, wobei zu betonen ist, dass diese Grafik mit den Fahrwiderstandsverlusten nur einen Teil der Verluste darstellt.

4.2.3.2 Fall 2 – Reduktion der Fahrwiderstands- und Traktionsverluste

Der Fall 2 betrachtet die gleiche Beschleunigung mit dem gleichen Zug. Zusätzlich werden jedoch hier neben den Fahrwiderstandsverlusten auch die Komponentenverluste betrachtet.

Die Abbildung 54 a) zeigt analog zur Abbildung 52 die Varianten für die Beschleunigung in diesem Fall. Dabei stellt die x-Achse die Strecke in Metern da, die z-Achse die Geschwindigkeit und die y-Achse die Varianten.

Im Vergleich zur Abbildung 52 wird deutlich, dass bei diesem in Abbildung 54 a) dargestellten Fall keine Linien mit konstanter Geschwindigkeit horizontal entstehen. Bei dieser Gesamtoptimierung findet eine stetig sich ändernde abgemilderte Beschleunigung statt.

³¹ Die kürzeste Fahrzeit entspricht einer Fahrzeitverlängerung gleich Null.

Dabei wird das Zugkraftdiagramm nicht bis zum Limit ausgenutzt, sondern es werden Linien innerhalb des Zugkraftdiagramms durchfahren und variierende Zugkräfte angewandt.

Abbildung 54 b) stellt die Energieverluste für diese Fahrt dar. Dabei sind analog zur Abbildung 53 auch hier die Verluste so normiert, dass ein Wert von 100% der Summe aus den Verlusten der Fahrwiderstände und Traktionskomponenten bei der kürzesten Fahrzeit entspricht.

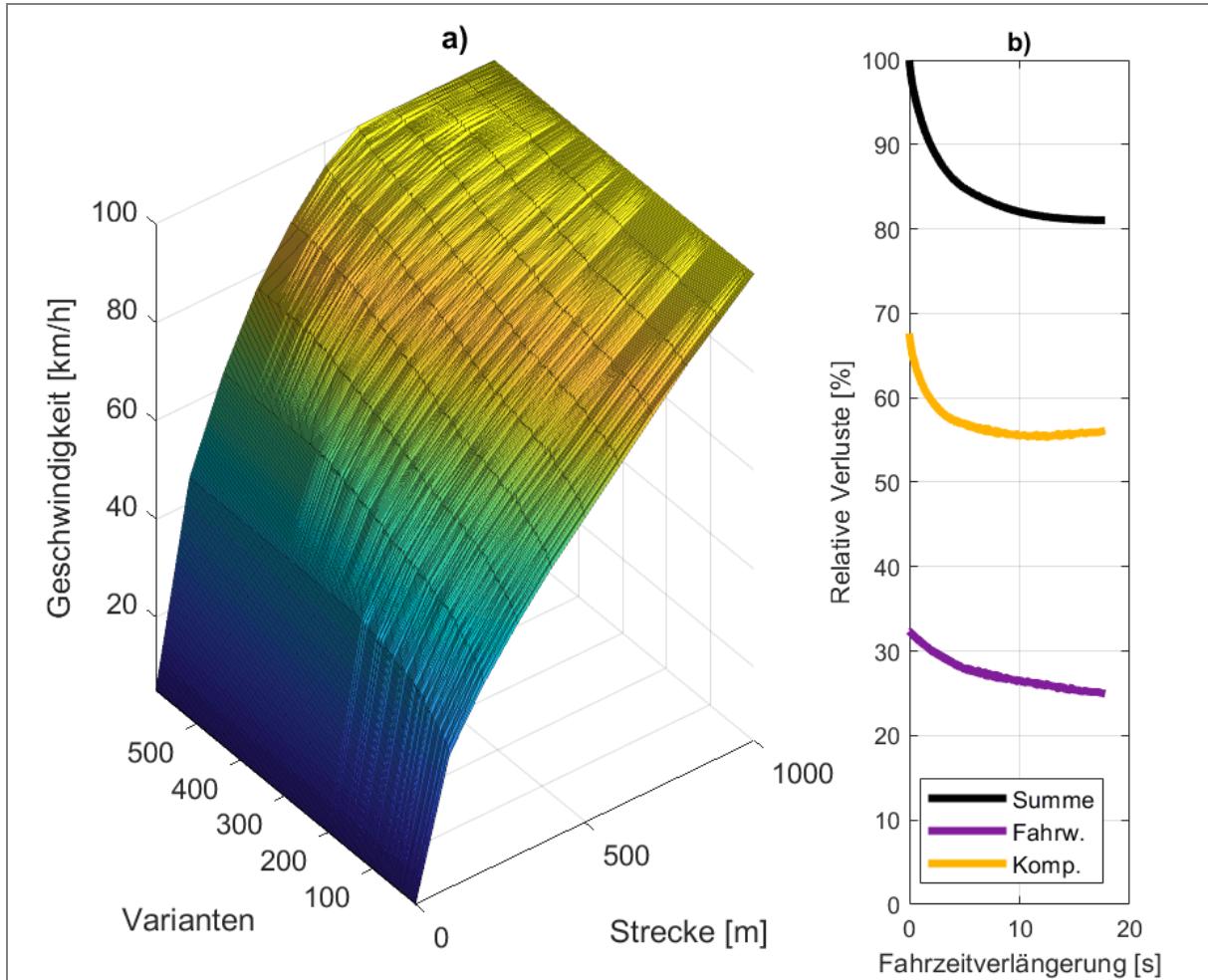


Abbildung 54 Beschleunigung von 0 auf 100 km/h bei einer Energieverlustoptimierung mit Berücksichtigung der Fahrwiderstandsverluste und Traktionskomponentenverluste als Optimierungskriterium

a) Verschiedene Varianten für die Beschleunigung

b) Darstellung der Verlustenergie, der Energieverlustoptimierung des hier betrachteten Falles. Hierbei entspricht 100 % der Summe aus den Fahrwiderstandsverlusten + Traktionskomponentenverlusten bei der kürzesten Fahrzeit für diesen Abschnitt (Fahrzeitverlängerung gleich Null). Die violette Linie beschreibt die Komponentenverluste und die orangene Linie die Fahrwiderstandsverluste und die schwarze Linie zeigt die Summe dieser beiden Verluste.

Aus der Abbildung 54 b) wird deutlich, dass Traktionskomponentenverluste (orangene Linie) sehr schnell und deutlich fallen. Dann erreichen sie einen breiten Tiefpunkt und anschliessend steigen sie jedoch wieder an. Die Fahrwiderstandsverluste hingegen sinken kontinuierlich ab.

Die Summe aus beiden Verlusten fällt zuerst stark ab, weil beide Verluste gemeinsam fallen. Später mit zunehmender Fahrzeitverlängerung fällt die Summe nicht mehr so stark ab, weil die Komponentenverluste wieder zunehmen. Bei dem Punkt, bei dem die Komponentenverluste stärker wachsen, als die Fahrwiderstandsverluste fallen, endet die Linie und Anzahl an Varianten. Dies liegt daran, da noch langsamere Beschleunigungen ungünstig sind, weil sie wieder mehr Energie benötigen und diese Varianten, welche wieder mehr Energie benötigen wieder in dem hier verwendeten Algorithmus verworfen sind, weil es nicht zielführend ist, mehr Fahrzeit und zugleich mehr Energie zu benötigen.

4.2.3.3 Vergleich Berechnungsbeispiel 3 – Fall 1 und 2

Im Folgenden sollen die beiden Fälle miteinander verglichen werden. Hierzu stellt die Abbildung 55 einen Vergleich der Verluste der beiden Fälle dar. Die durchgezogenen Linien der Abbildung 55 betrachten jeweils den Fall 2 und die gestrichelten Linien jeweils den Fall 1. Die Farbe Orange steht für die Traktionsverluste und die Farbe Violett für die Fahrwiderstandsverluste und die Farbe Schwarz steht für die Summe.

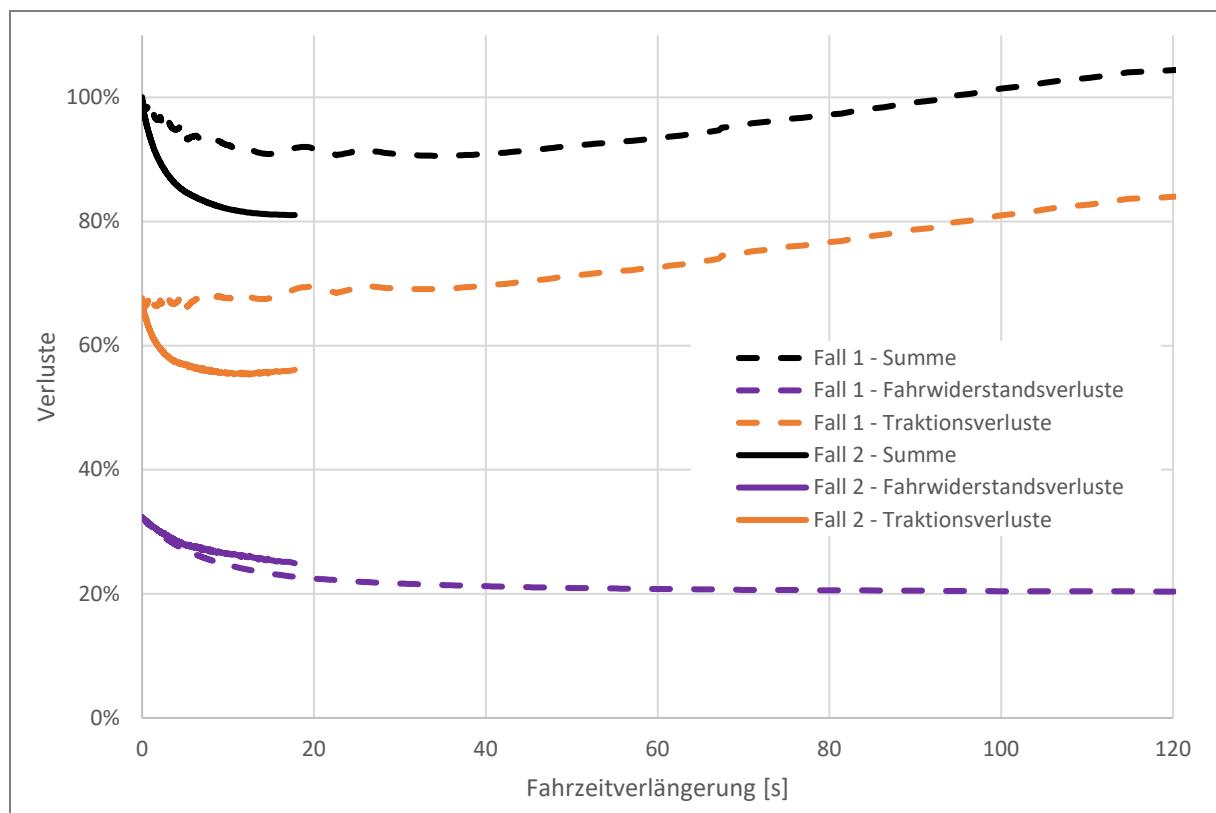


Abbildung 55 Darstellung der Verlustenergie der Optimierungen beider Fälle im Vergleich

Fall 1: Optimierungskriterium nur Fahrwiderstandsverluste

Fall 2: Optimierungskriterium Summe aus den Fahrwiderstandsverlusten und Traktionskomponentenverlusten

Es wird deutlich, dass beide Fälle zu einer Reduktion der Verluste führen. Der Fall 2, welcher beide Verluste (Traktionskomponenten und Fahrwiderstände) berücksichtigt, reduziert die Verluste jedoch stärker als Fall 1, welcher nur die Fahrwiderstände optimiert. So wird aus der Abbildung 55 deutlich, dass bei Fall 1 die Traktionskomponentenverluste (orange) schwanken und dann sogar ansteigen. Dies liegt daran, dass diese in der Optimierung von Fall 1 gar nicht berücksichtigt wurden. Letztendlich führt dies im Extremfall dazu, dass die Fahrzeitverlängerung zu zusätzlichen Energieverlusten führen kann.

Bei Fall 2, welcher das gleiche Fahrzeug betrachtet, steigen zwar auch die Traktionsverluste nach dem Überschreiten des Tiefpunktes mit zunehmender Fahrzeitverlängerung wieder an, da diese aber durch die Gesamtoptimierung berücksichtigt werden, werden solche Fahrvarianten aber vermieden und gar nicht gefahren.

Die Abbildung 56 stellt eine Ausschnittsvergrösserung der Abbildung 55 dar und verdeutlicht, dass die Verlustreduktion, bei der Komplettbetrachtung (Fall 2) deutlich stärker ausfällt. Grundsätzlich ist aber zu betonen, dass die Optimierungen von dem jeweiligen Fahrzeug abhängig sind und dadurch bei Fahrzeugänderungen und Streckenänderungen jeweils neu berechnet werden müssen.

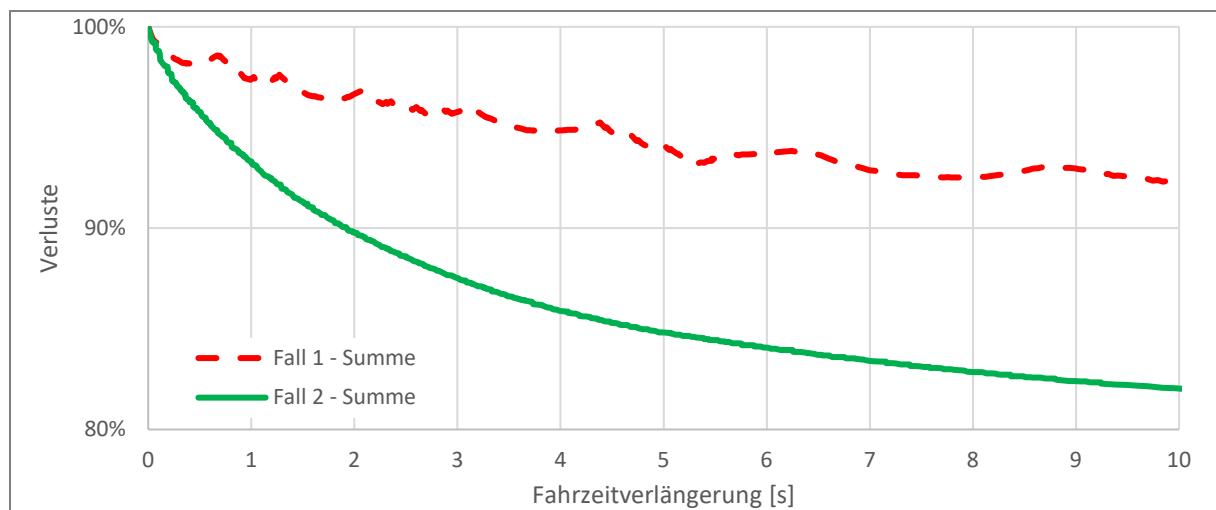


Abbildung 56 Darstellung der Summe der Verluste beider Optimierungsfälle im Vergleich.

Erklären lässt sich der Unterschied anhand der Abbildung 57, welche ein Zugkraftdiagramm darstellt. Individuell und fahrzeugspezifisch gibt es innerhalb des Zugkraftdiagrammbereiches einen besseren und schlechteren Wirkungsgrad. Der Fall 1 berücksichtigt dies nicht und geht den üblichen Weg durch das Zugkraftdiagramm (rote Pfeile in Abbildung 57). Der Fall 2 berücksichtigt den Komponentenwirkungsgrad und geht einen fahrzeugindividuellen speziellen Weg (grüne Pfeile in Abbildung 57). Dieser spezielle Weg durch die effizienten

Bereiche des Zugkraftdiagramms führt zu der hier beschriebenen zusätzlichen Einsparung des Fall 2 in den Traktionskomponenten.

Weiter erklärt die Abbildung 57, auch noch die Schwankungen bei der Summe in Fall 1 (siehe Abbildung 56). Diese Schwankungen entstehen dadurch, dass bei den unterschiedlichen Geschwindigkeiten der unterschiedlichen Varianten unterschiedliche Wirkungsgrade vorliegen.

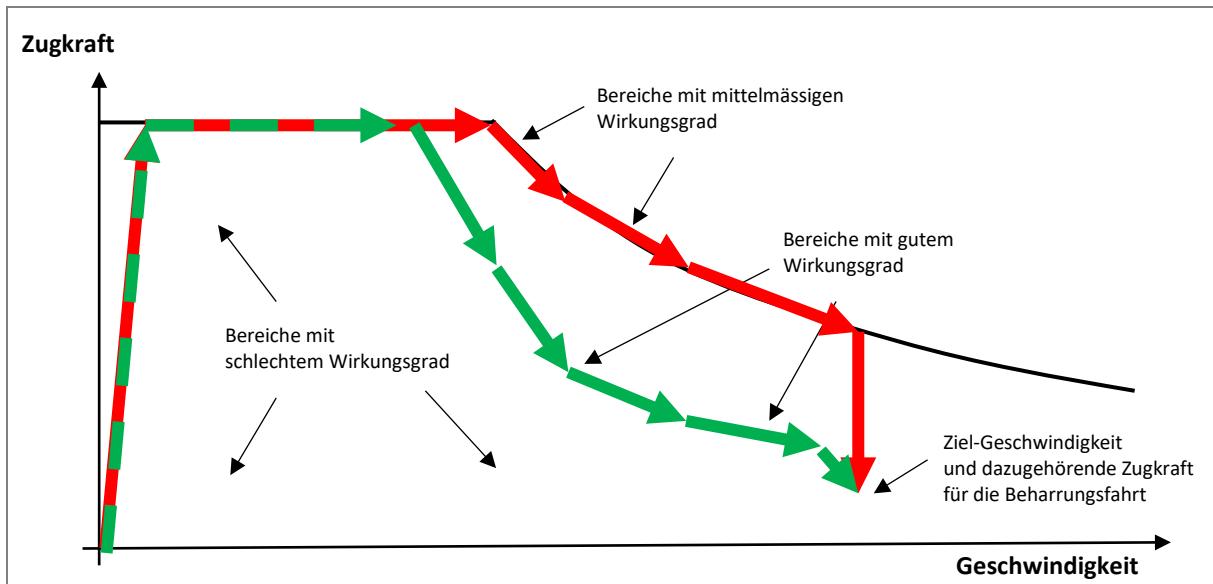


Abbildung 57 Schematische Darstellung der Ausgangssituation der folgenden Fälle.

4.2.3.4 Fazit zu Berechnungsbeispiel 3

Beim Vergleichen der beiden Fälle wird deutlich, dass eine Optimierung zur Minimierung der Fahrwiderstandsverluste zwar Energie einsparen kann. Jedoch eine Gesamtoptimierung deutlich mehr Energie einspart.

Bei diesem hier betrachteten Fahrzeug führt eine Fahrzeitverlängerung von 5 Sekunden zu:

- circa 6 % bei Fall 1 (nur Fahrwiderstände) und zu
- circa 15 % bei Fall 2 (Fahrwiderstände und Traktion).

Zudem kann es sein, dass eine reine Fahrwiderstandsverlustoptimierung im ungünstigsten Fall trotz Fahrzeitverlängerung zu einem höheren Energiebedarf führen (siehe Abbildung 55).

4.2.4 Beispiel 4 – Effiziente Geschwindigkeitsreduktion

Aus dem Berechnungsbeispiel 2 wurde deutlich, dass beim Beschleunigen und Bremsen signifikante Verluste entstehen. Aus dem Berechnungsbeispiel 3 wurde deutlich, dass es Möglichkeiten zum effizienten Beschleunigen gibt. Daher soll im Folgenden untersucht werden, ob dies auch auf den Geschwindigkeitsreduktionen übertragbar ist.

Hierzu wird eine Fahrt vom Streckenpunkt A mit Geschwindigkeit 1 zum Streckenpunkt B mit Geschwindigkeit 2 betrachtet (siehe Abbildung 58). Grundsätzlich soll ein einfaches und realistisches Szenario betrachtet werden, welches betrieblich häufig vorkommt und in einer Echtzeitfahrplanoptimierung angewandt werden kann. So wird ein Zug in der Ebene betrachtet, welcher seine Geschwindigkeit von 100 km/h auf 40 km/h reduzieren muss und Fahrzeitreserven hat.

Geschwindigkeitsreduktionen auf eine Geschwindigkeit von 40 km/h sind beispielsweise bei Fahrbegriff 2 erforderlich (BAV, 2015)³². Wenn der Lokführer im Anschluss noch einen Halt aufgrund einer temporären Gleisbelegung zu erwarten hat, ist es sinnvoll, bewusst eine Fahrzeitverlängerung zu erzielen um abzuwarten bis das Gleis frei ist, damit der Halt vermieden werden kann.

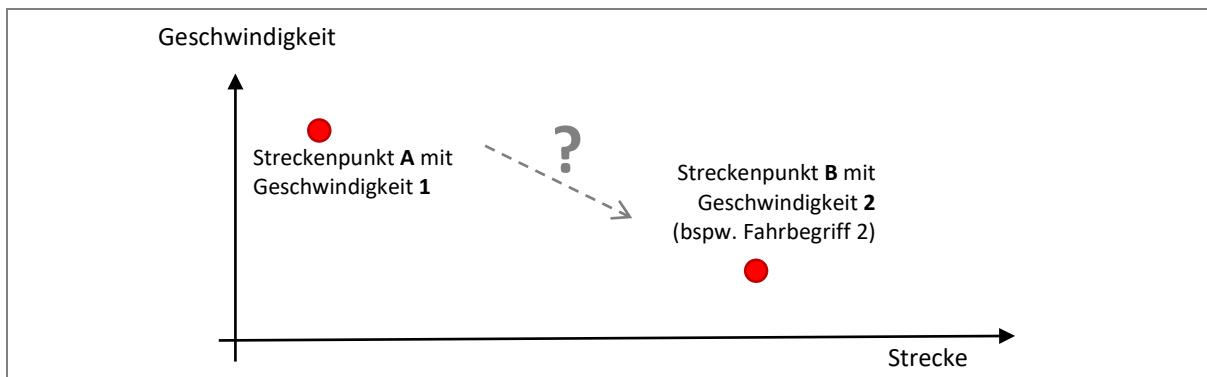


Abbildung 58 Schematische Darstellung der Ausgangssituation der folgenden Fälle.

Auch hier werden mehrere Fälle untersucht und auch hier wird zuerst mit einem Fall begonnen, welcher nur die Fahrtwiderstände berücksichtigt.

In diesem Zusammenhang ist zu betonen, dass hier grundsätzlich ein 100 % elektrisches Bremsen in ein voll rückspeisefähiges Wechselstrombahnstromnetz betrachtet wird.

³² Neben der Geschwindigkeitsankündigung Fahrbegriff 2 (40 km/h) gibt es auch noch weitere Geschwindigkeitsankündigungen, wie beispielsweise der Fahrbegriff 3 (60 km/h) oder der Fahrbegriff 5 (90 km/h) (BAV, 2015). Das hier beschriebene Szenario ist auch auf diese und diverse andere Geschwindigkeitsreduktionen übertragbar.

4.2.4.1 Fall 1 – Reduktion der Fahrwiderstandsverluste

Der Fall 1 betrachtet nur die Geschwindigkeitsreduktion des Zuges und berücksichtigt nur die Fahrwiderstandsverluste als Optimierungskriterium. Die Komponentenverluste werden in diesem Fall noch ignoriert.

Die Abbildung 59 zeigt hierzu die Varianten dieser Geschwindigkeitsreduktion. Dabei stellt die x-Achse (hier von links hinten nach rechts vorne) die Strecke in Metern da. Die z-Achse (hier nach oben ausgerichtet) stellt die Geschwindigkeit dar. Die Menge an Varianten wird durch y-Achse (hier von links nach rechts hinten ausgerichtet) dargestellt.

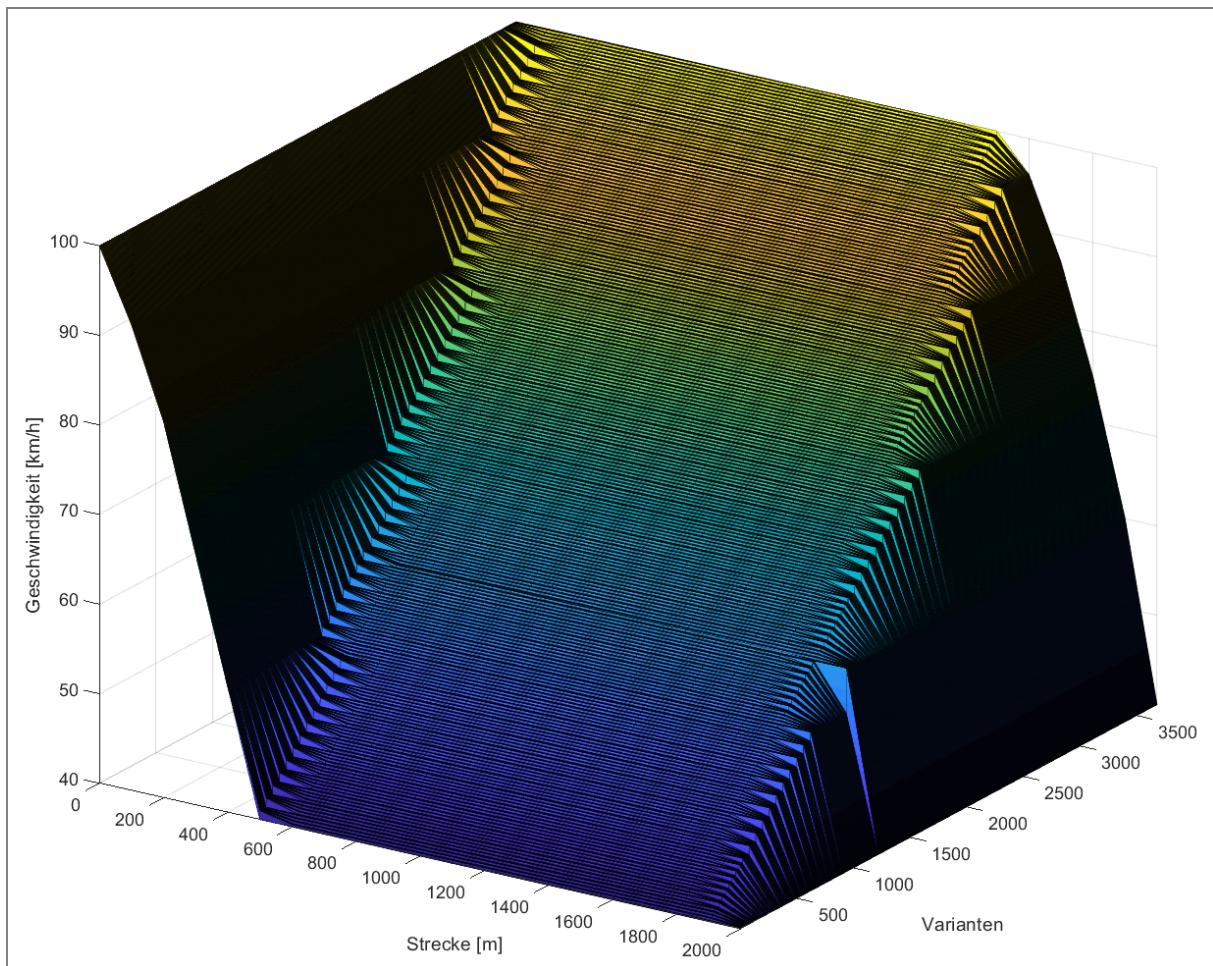


Abbildung 59 Verschiedene Varianten für eine Geschwindigkeitsreduktion von 100 km/h auf 40 km/h bei einer Energieverlustoptimierung, welche nur die Fahrwiderstandsverluste als Kriterium berücksichtigt.

Analog zu dem vorangegangen Beispiel 3 wird auch hier deutlich, dass auch hier horizontalen Varianten mit einer konstanten Geschwindigkeit entstehen, was daran liegt, dass hier nur die Fahrwiderstandsverluste bei der Optimierung berücksichtigt wurden.

Um die Fahrzeit zu verlängern und die Fahrwiderstandsverluste zu reduzieren, wird also auf eine niedere Geschwindigkeit gebremst und mit dieser weitergefahren. Sofern die niedere Geschwindigkeit noch nicht der Zielgeschwindigkeit entspricht, wird anschliessend nochmals auf die Zielgeschwindigkeit gebremst.

Eine genaue Darstellung des Energieverbrauchs des Falls 1 wird in Abschnitt 4.2.4.3 (siehe Seite 97) dargestellt, wenn dieser Fall 1 mit dem Fall 2 verglichen wird.

4.2.4.2 Fall 2 – Reduktion der Fahrwiderstands- und Traktionsverluste

Der Fall 2 betrachtet die gleiche Geschwindigkeitsreduktion mit dem gleichen Zug. Zusätzlich werden jedoch hier neben den Fahrwiderstandsverlusten auch die Komponentenverluste betrachtet. Die Abbildung 60 zeigt hierzu analog zur Abbildung 59 die Varianten für die Geschwindigkeitsreduktion.

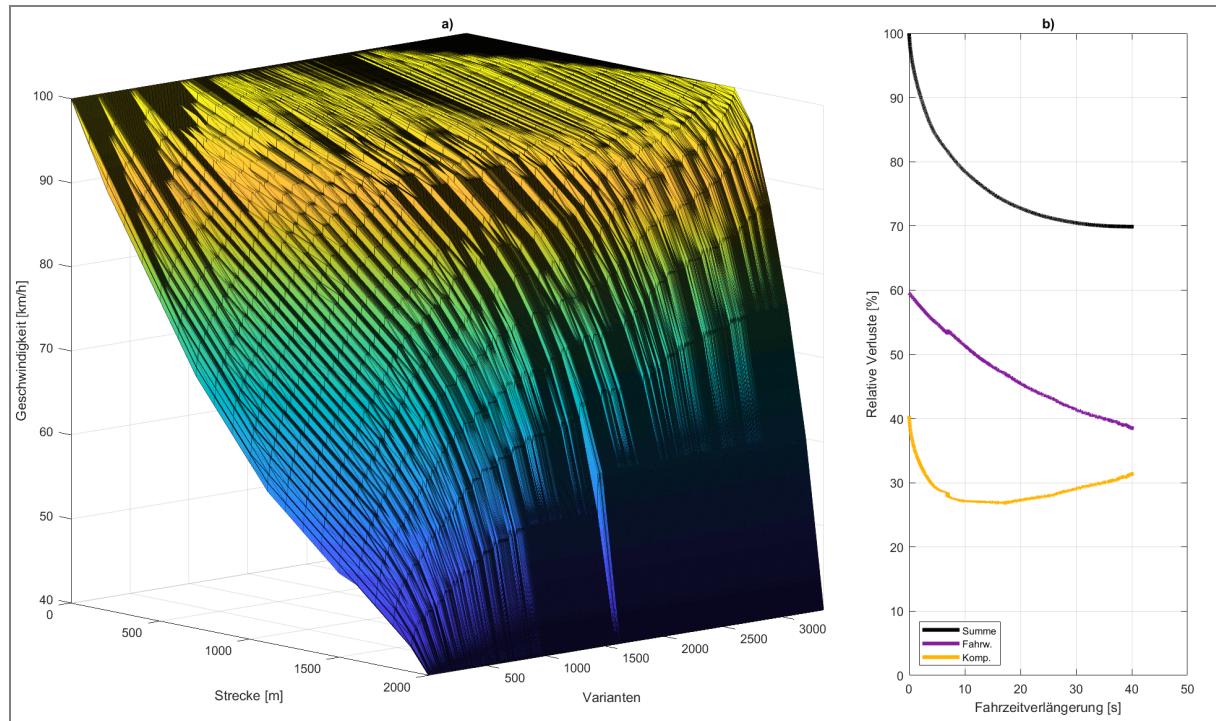


Abbildung 60 Verschiedene Varianten für eine Geschwindigkeitsreduktion von 100 km/h auf 40 km/h bei einer Energieverlustoptimierung, welche die Fahrwiderstandsverluste und Traktionskomponentenverluste berücksichtigt

a) Verschiedene Varianten für die Geschwindigkeitsreduktion

b) Darstellung der Verlustenergie, der Energieverlustoptimierung des hier betrachteten Falles. Hierbei entspricht 100 % der Summe aus den Fahrwiderstandsverlusten + Traktionskomponentenverlusten bei der kürzesten Fahrzeit für diesen Abschnitt. Die violette Linie beschreibt die Komponentenverluste, die orangene Linie die Fahrwiderstandsverluste und die schwarze Linie zeigt die Summe dieser beiden Verluste.

Aus der Abbildung 60 a) wird deutlich, dass fast keine konstanten Geschwindigkeiten zu erkennen sind. Die Varianten stellen eine Kombination aus Ausrollen (Coasting) und elektrischem Bremsen mit dynamisch variierender reduzierter Bremskraft dar, um möglichst effizient das Bremskraftdiagramm zu durchfahren.

Dabei ist es interessant, dass der verwendete Algorithmus von alleine und dynamisch zwischen dem Motorabschalten (Coasting), der Bremskraft und der Bremskraftreduktion wählt und dadurch zur jeweiligen Fahrzeitverlängerung das Energieoptimum ermittelt und letztendlich die in Abbildung 60 dargestellten Varianten vorschlägt.

Aus der Abbildung 60 b) wird deutlich, dass sich die Traktionskomponentenverluste (orangene Linie) schon bei sehr geringen Fahrzeitverlängerungen signifikant reduzieren, aber auch wieder ansteigen. Die Fahrwiderstandsverluste hingegen reduzieren sich erst bei höheren Fahrzeitverlängerungen.

4.2.4.3 Vergleich Berechnungsbeispiel 4 – Fall 1 und 2

Im Folgenden sollen die Verluste beider Fälle dieses Beispiels für zwei verschiedene Fahrzeuge betrachtet werden. Hierzu stellt die Abbildung 61 die Verluste dar.

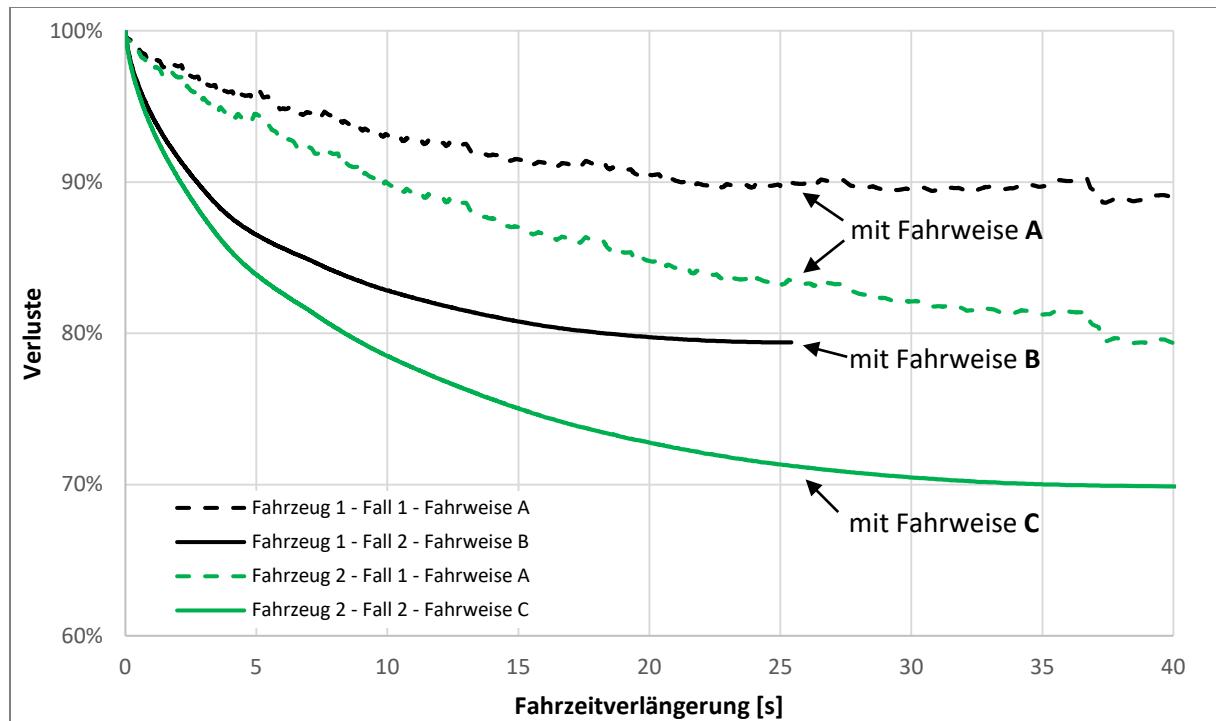


Abbildung 61 Darstellung der Verlustenergie der Optimierungen zweier Fahrzeuge und beider Fälle im Vergleich.

Fall 1: Optimierungskriterium: nur Fahrwiderstandsverluste

Fall 2: Optimierungskriterium: Summe aus den Fahrwiderstandsverlusten und Traktionskomponentenverlusten.

Aus Abbildung 61 werden folgende Aspekte deutlich:

- Bei beiden Fahrzeugen ist die Verlustreduktion bei Fall 2 (mit Traktionsverlusten) grösser als bei Fall 1.
- Die Reduktion der Verluste wird signifikant von dem jeweiligen Fahrzeug bzw. den Traktionskomponenten beeinflusst.
- Bei einer Optimierung, welche die Traktionskomponenten und die Fahrwiderstände berücksichtigt, ergibt sich für jedes andere Fahrzeug eine andere Fahrweise (deswegen hat Fahrzeug 1 Fall 2 die Fahrweise B und Fahrzeug 2 Fall 2 die Fahrweise C).
- Bei einer Optimierung, welche nur die Fahrwiderstände berücksichtigt, lässt sich die Fahrweise auf andere Fahrzeuge übertragen (deswegen hat Fahrzeug 1 Fall 1 die Fahrweise A und Fahrzeug 2 Fall 1 ebenfalls die Fahrweise A).

4.2.4.4 Fazit zu Berechnungsbeispiel 4

Auch bei diesem Beispiel wird deutlich, dass eine Optimierung zur Minimierung der Fahrwiderstandsverluste zwar Energie einsparen kann. Jedoch eine Gesamtoptimierung deutlich mehr Energie einspart.

Auch hier kann es sein, dass eine reine Fahrwiderstandsverlustoptimierung im ungünstigsten Fall trotz Fahrzeitverlängerung zu einem höheren Energiebedarf führt.

Durch den Vergleich beider Fahrzeuge wird deutlich, dass eine Betrachtung der Traktionskomponenten jeweils zu einer anderen Fahrweise führt.

4.2.5 Beispiel 5 – Befahren von Längsneigungen

Nachdem die Beispiele 3 und 4 es deutlich gemacht haben, dass es möglich ist Geschwindigkeitsänderungen möglichst energieeffizient zu befahren, wird im Folgenden der Einfluss von Längsneigungen betrachtet.

Mit dem Einsatz von Geschwindigkeitsreglern wird heute kontinuierlich eine konstante Geschwindigkeit gefahren, welche ziemlich genau der momentanen Sollgeschwindigkeit entspricht (Nold, 2018b).

Im folgenden Beispiel lässt sich schon theoretisch erklären, dass eine konstante Geschwindigkeit (wie sie das Resultat einer Optimierung ist, welche nur die Fahrwiderstände berücksichtigt) zu höheren Verlusten führen kann.

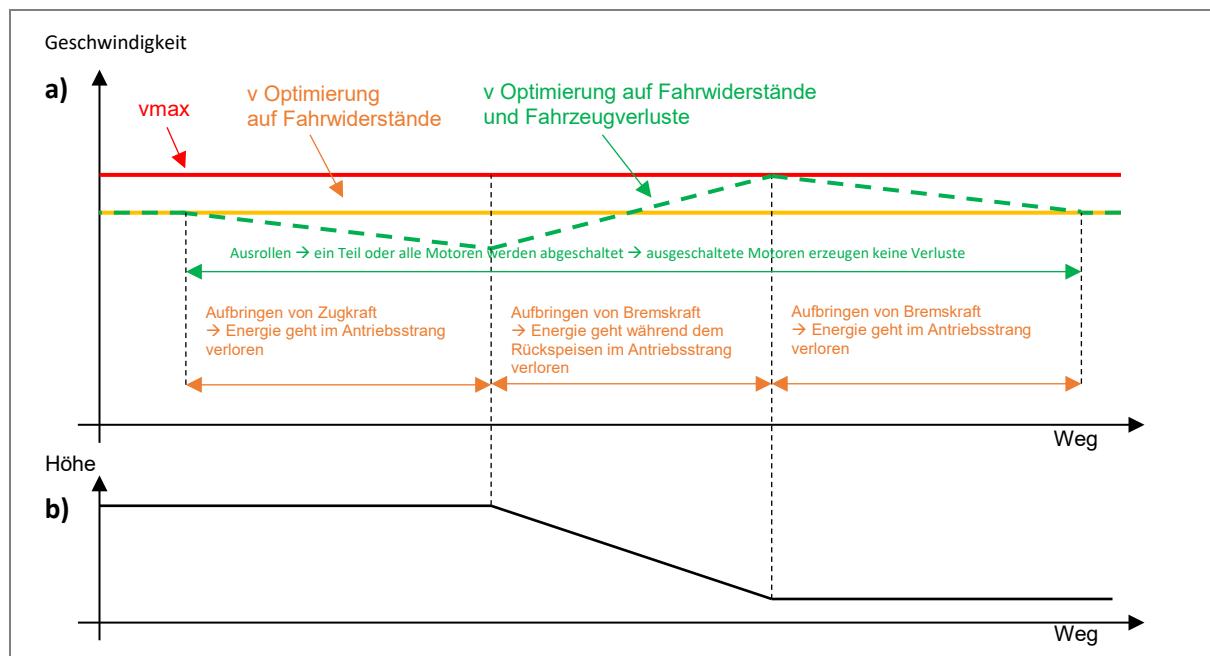


Abbildung 62 Darstellung eines Geschwindigkeits-Weg-Diagrammes (Teil a)) und des dazugehörigen Höhenprofils (Teil b)). Dabei verdeutlicht das Geschwindigkeits-Weg-Diagramm verschiedene Fahrprofile.

Die Abbildung 62 zeigt im oberen Teil a) ein Geschwindigkeits-Weg-Diagramm und im unteren Teil b) ein Höhenprofil. Es wird deutlich, dass der Zug auf ein Gefälle zufährt. Ein vorausschauender Velofahrer, aber auch ein vorausschauender Lokführer, würde kurz vor dem Gefälle keine Zugkraft aufbringen, sich ausrollen lassen und die potentielle Energie aus dem Gefälle nutzen um damit wieder zu beschleunigen. Dies würde der grün gestrichelten Linie in Abbildung 62 a) entsprechen. Dadurch kann der Zug eine Zeit lang ausrollen und durch eine komplett oder eine teilweise Motorabschaltung die Verlustenergie im Traktionsstrang reduzieren.

Die gelbe Linie in Abbildung 62 a) zeigt hingegen ein Fahrprofil mit einer konstanten Geschwindigkeit, wie sie durch einen Geschwindigkeitsregel erzeugt wird. Dabei ist hier diese konstante Geschwindigkeit etwas kleiner als die Höchstgeschwindigkeit und würde dem Resultat einer Optimierung auf die Fahrwiderstände entsprechen. Bei einer Fahrt mit dieser konstanten Geschwindigkeit wird bis kurz vor dem Gefälle Zugkraft aufgebracht (und es entstehen bis kurz vor dem Gefälle Verluste im Traktionsstrang). Im Gefälle wird dann Bremskraft aufgebracht (und es entstehen ebenfalls Verluste im Traktionsstrang). Nach dem Gefälle wird wieder Zugkraft aufgebracht (und es entstehen ebenfalls Verluste im Traktionsstrang).

So wird schon alleine durch die Beschreibung dieses Beispiels plausibel, dass eine konstante Geschwindigkeit im Gefälle zu mehr Verlusten führt, als eine dynamische Geschwindigkeitsanpassung an die Topographie. Zur Quantifizierung werden im folgenden zwei Fälle betrachtet.

4.2.5.1 Fall 1 - Verlustreduktion durch Anpassung an die Topographie

Der Fall 1 dieses Beispiels beschreibt ein Szenario, welches der Abbildung 62 entspricht. Hierbei gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Ein Zug fährt durch eine Fahrzeitreserve mit einer Geschwindigkeitsreduktion, welche seine Geschwindigkeit auf konstant mit 100km/h herabsetzt.
2. Der Zug fährt geländeangepasst und nicht konstant 100 km/h.

Die Abbildung 63 zeigt die Fahrvarianten für den Zug, welcher seine Fahrweise an das Gelände anpasst.

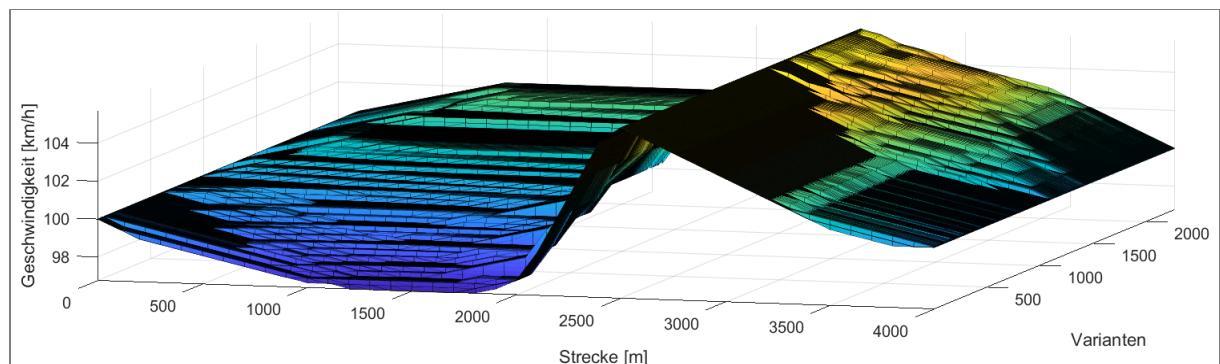


Abbildung 63 Optimierte Fahrprofile, welche sich an das Geländer anpassen und entweder einen geringeren Energieverbrauch und/oder eine geringere Fahrzeit aufweisen, als eine Fahrt mit einer konstanten Geschwindigkeit.

Hierbei schlägt der Algorithmus für diese Fahrzeit verschiedene Varianten vor, welche hinsichtlich der Fahrzeit und/oder dem Energieverbrauch besser als die Fahrt mit einer

konstanten Geschwindigkeit sind. Diese Varianten betrachten dabei den Gesamtenergieverbrauch der unterschiedlichen Ansätze (Motor ganz oder teilweise abschalten und gezielte Verwendung energieeffizienter Betriebspunkte).

Zu diesem Fall verdeutlicht die Abbildung 64 die verschiedenen Varianten, welche besser als die Variante mit konstanter Geschwindigkeit sind.

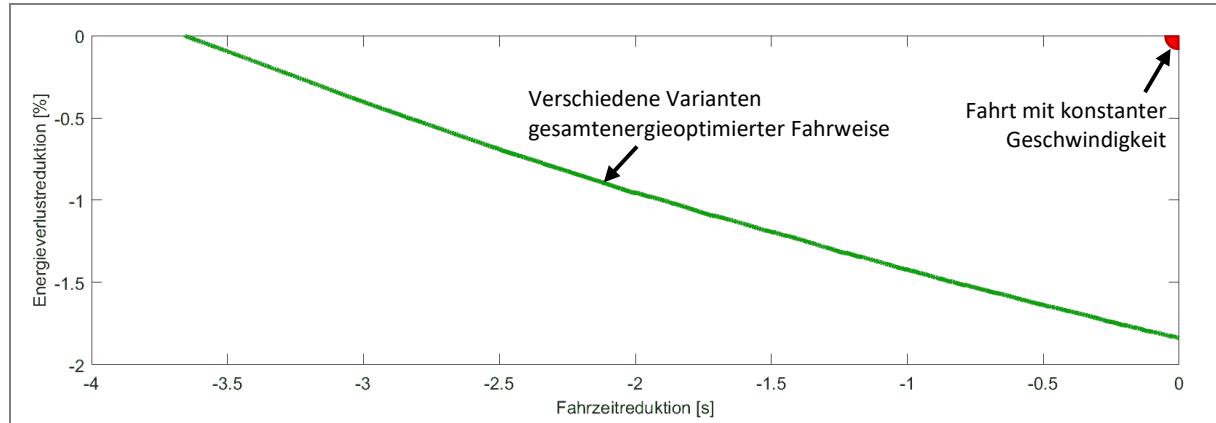


Abbildung 64 Energieverlustreduktion und Fahrzeitreduktion der verschiedenen Varianten mit Gesamtenergieoptimierter Fahrweise im Vergleich zu der Fahrweise mit konstanter Geschwindigkeit.

So zeigt die Abbildung 64, dass sich in diesem Fall entweder 1.8 % Energie sparen lässt oder alternativ beim gleichen Energieverbrauch die Fahrzeit um mehr als 3 Sekunden reduzieren lässt. Zusätzlich gibt es auch diverse Zwischenvarianten, welche gleichzeitig die Energieverluste reduzieren und Fahrzeit sparen.

4.2.5.2 Fall 2 – Geschwindigkeitsreduktionsvarianten

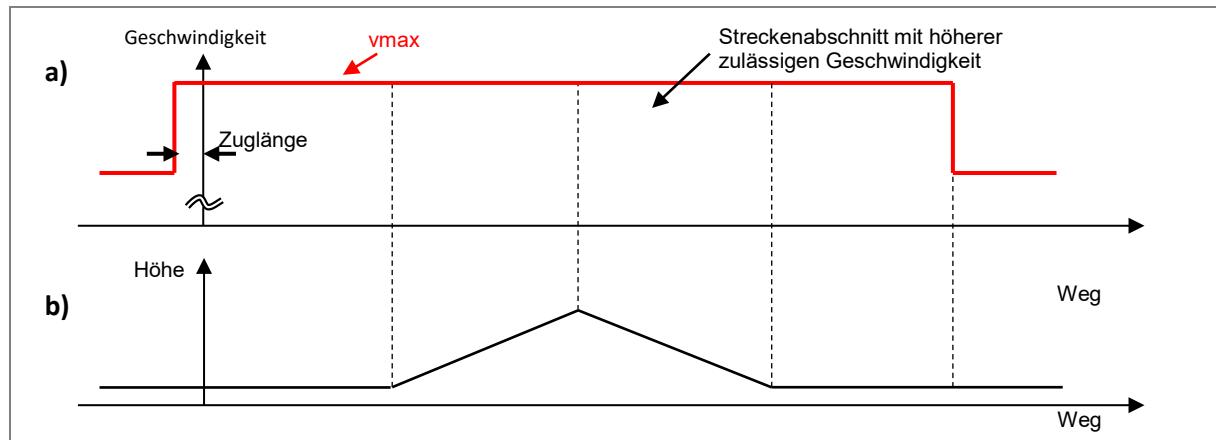


Abbildung 65 Darstellung eines Geschwindigkeits-Weg-Diagrammes (Teil a)) und des dazugehörigen Höhenprofils (Teil b)) für diesen hier betrachteten Fall.

Der Fall zwei betrachtet abschnittweise Geschwindigkeitserhöhungen mit Längsneigungen. Hierzu beschreibt die Abbildung 65 qualitativ ein typisches Szenario. Abbildung 65 a) zeigt die zulässige Höchstgeschwindigkeit einer Strecke. Abbildung 65 b) zeigt das dazugehörige Höhuprofil.

Eine Fahrt ohne Fahrzeitverlängerung fährt die Höchstgeschwindigkeit komplett aus. Sofern eine Echtzeitfahrplanoptimierung feststellt, dass Fahrzeitreserven vorhanden sind, besteht die Möglichkeit die Höchstgeschwindigkeit nicht komplett auszufahren.

Eine Optimierung, welche nur die Fahrwiderstände berücksichtigt, empfiehlt bspw. eine Geschwindigkeitsreduktion um einen Wert von x km/h. Diese verschiedenen Varianten werden in der Abbildung 66 veranschaulicht.

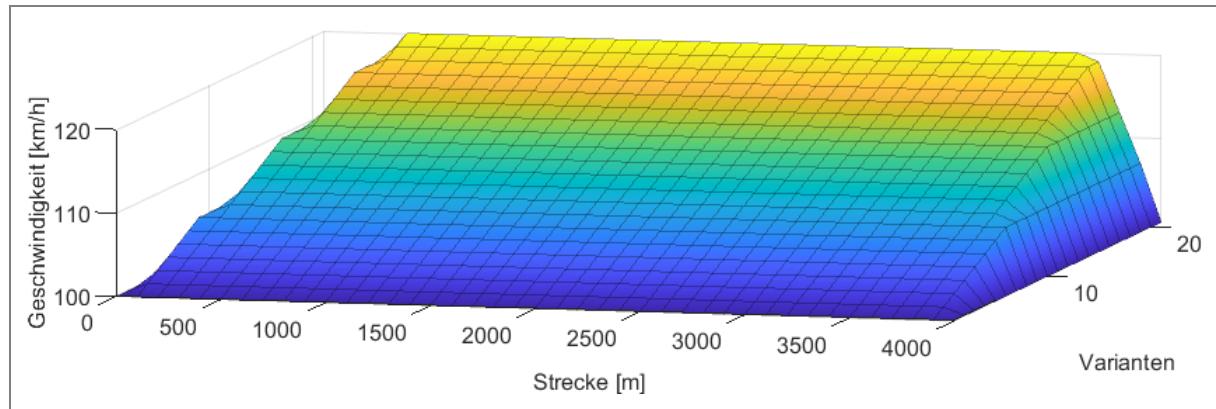


Abbildung 66 Varianten für diesen Fall bei einer Optimierung, welche nur die Fahrwiderstände berücksichtigt.

Eine Optimierung, welche das Gesamtsystem betrachtet, passt sich an das Profil an und berechnet die in der Abbildung 67 dargestellten Varianten.

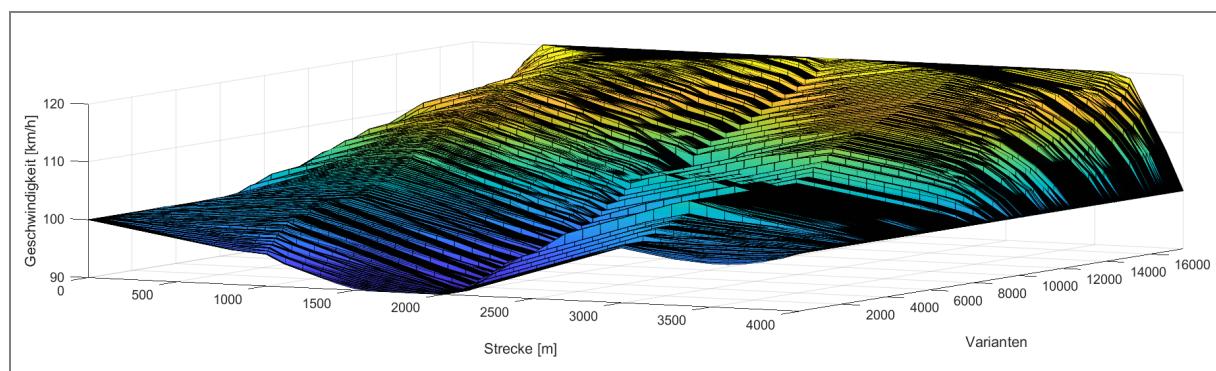


Abbildung 67 Varianten für diesen Fall bei einer Optimierung, welche nur die Fahrwiderstände berücksichtigt.

Dabei wird deutlich, dass die in diesem hier betrachteten Fall entstandenen Varianten auch nicht die volle Geschwindigkeit ausfahren. Sie tendieren aber dazu, in der Steigung die

Geschwindigkeit zu reduzieren, damit sie im Anschluss mit der potentiellen Höhenenergie zum Beschleunigen verwendet werden kann. So muss also nicht im Gefälle gebremst und nicht in die Fahrleitung zurückgespeist werden. Denn auch, wenn hier ein 100 % elektrisches Bremsen in ein voll rückspeisefähiges Bahnstromnetz betrachtet wird, entstehen trotzdem beim Rekuperieren Verluste im Traktionsstrang.

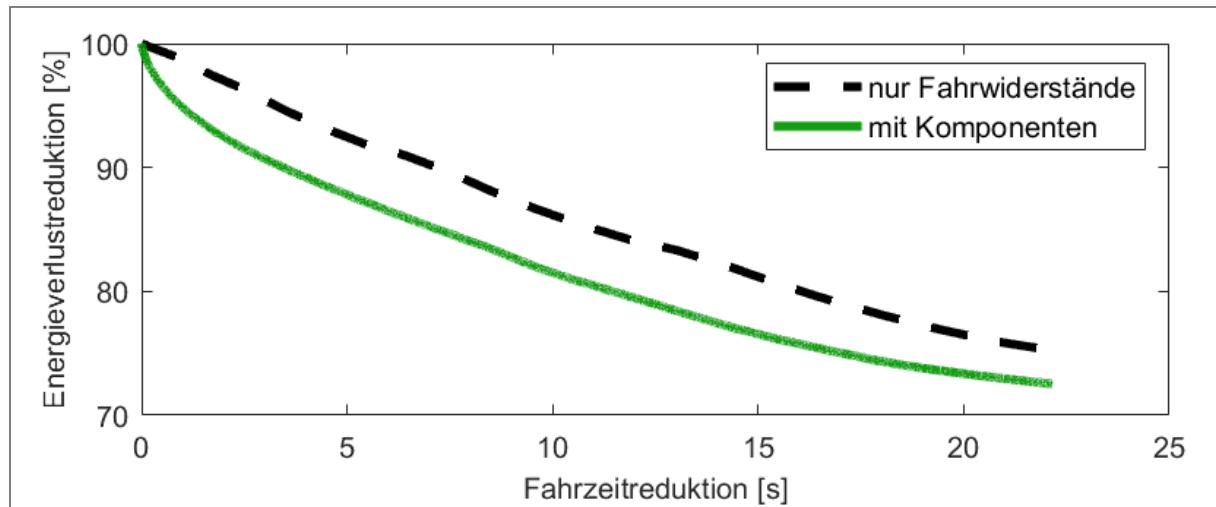


Abbildung 68 Varianten für diesen Fall bei einer Optimierung, welche nur die Fahrwiderstände berücksichtigt.

Die Abbildung 68 veranschaulicht hierzu die Energieverlustreduktion in Abhängigkeit der Fahrzeitreduktion. Dabei wird deutlich, dass eine Optimierung welche nur die Fahrwiderstände berücksichtigt, zwar Energie spart aber durch die Berücksichtigung der Komponenten und Energie noch mehr Energie gespart wird.

4.2.5.3 Fazit zu Berechnungsbeispiel 5

Auch hier wird gezeigt, dass es für eine Fahrt von A nach B sinnvoll ist auch die Traktionskomponentenverluste zu betrachten. Denn Optimierungen, welche nur die Fahrwiderstände reduzieren, ignorieren Steigungen und Gefälle. Durch die Berücksichtigung von Komponenten werden Steigungen und Gefälle berücksichtigt, sodass energieeffizienter gefahren werden kann.

4.2.6 Beispiel 6 – Fahrt zwischen zwei Bahnhöfen

Nachdem die vorangegangenen Beispiele verdeutlicht haben, dass es in diversen Fahrsituationen vorteilhafter ist, die Fahrprofiloptimierung nicht nur auf die Fahrwiderstände durchzuführen, sondern auch die Traktionskomponentenverluste zu berücksichtigen, soll im Folgenden die gesamte Fahrt zwischen zwei Bahnhöfen betrachtet werden.

4.2.6.1 Fall 1 – Fahrt zwischen zwei Bahnhöfen

Der Fall 1 betrachtet eine Fahrt eines Zuges zwischen zwei Bahnhöfen. Hierzu zeigt die Abbildung 70 die Varianten bei der Optimierung, welche nur die Fahrwiderstände berücksichtigt und die Abbildung 69 zeigt für den gleichen Zug eine Optimierung, welche zusätzlich auch die Komponenten berücksichtigt. Die Abbildung 71 stellt hierzu den Vergleich der Gesamtenergieverlustreduktion dar.

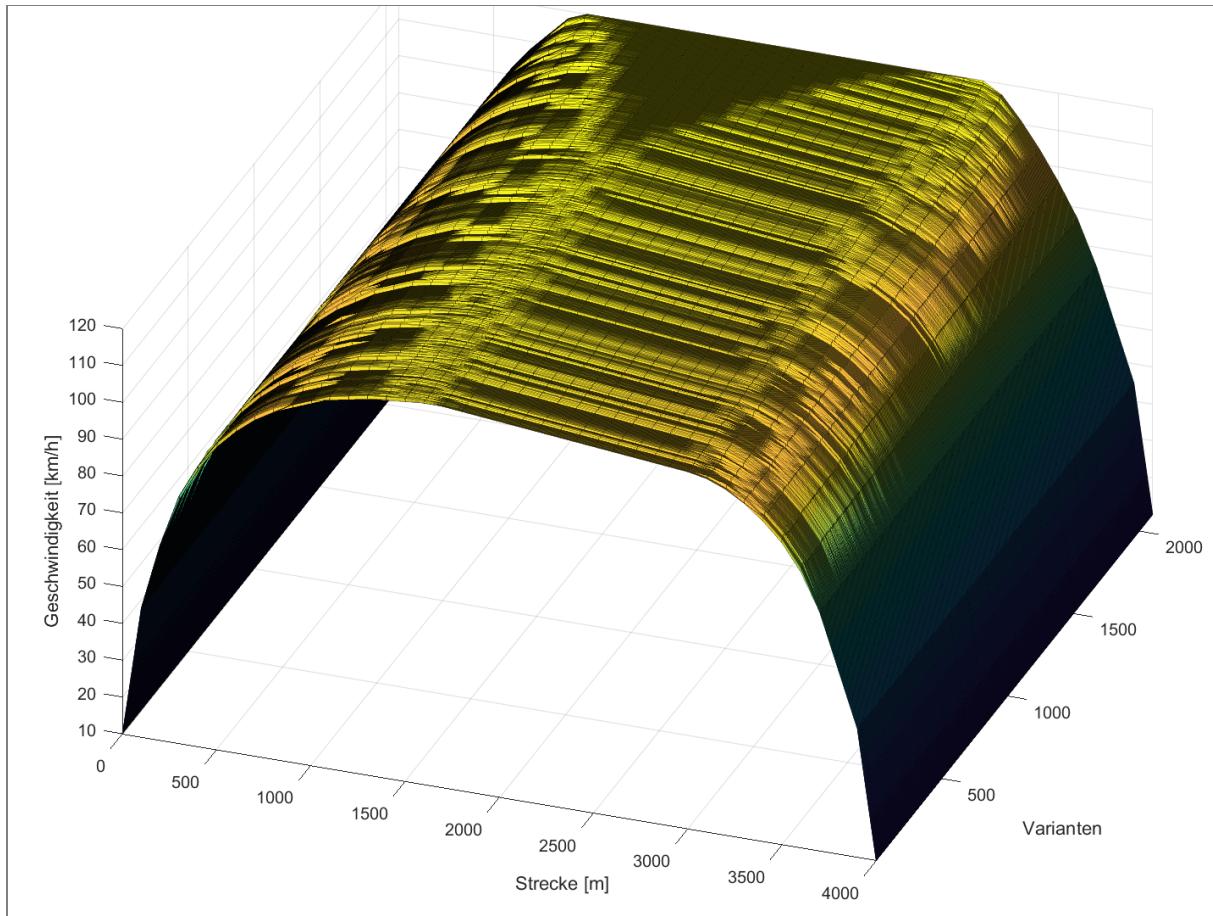


Abbildung 69 Verschiedene Varianten für eine Fahrt zwischen zwei Bahnhöfen, bei einer Energieverlustoptimierung, welche die Fahrwiderstandsverluste und Traktionskomponentenverluste berücksichtigt

Analog zu den anderen vorigen Beispielen wird auch hier deutlich, dass bei der Optimierung, welche nur die Fahrwiderstände berücksichtigt, maximal beschleunigt und möglichst konstant schnell gefahren wird. Die Optimierung, welche auch die Komponenten betrachtet, vermeidet

eine zu starke Beschleunigung und wendet in diesem Fall das Ausrollen an. Wobei zu betonen ist, dass die jeweilige Fahrstrategie fahrzeugabhängig ist, so kann bei der Optimierung, welche die Komponenten berücksichtigt, bei einem anderen Fahrzeug eine ganz andere Strategie empfohlen werden.

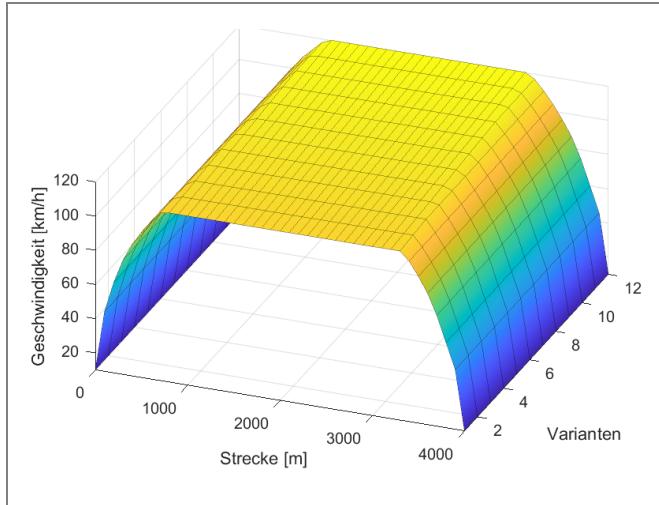


Abbildung 70 Verschiedene Varianten für eine Fahrt zwischen zwei Bahnhöfen, bei einer Energieverlust-optimierung, welche nur die Fahrwiderstandsverluste als Kriterium berücksichtigt.

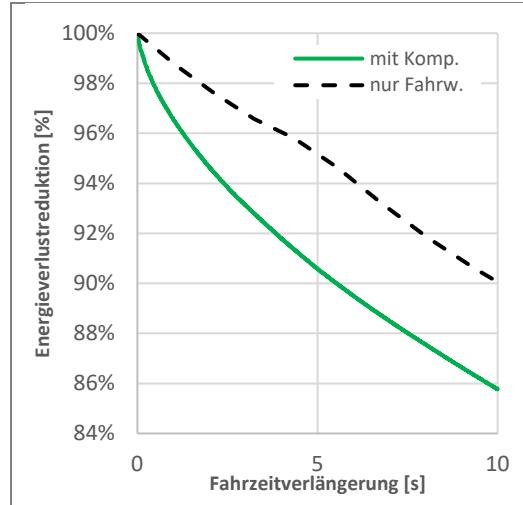


Abbildung 71 Vergleich der Energieverlustreduktion in Abhängigkeit der Fahrzeitverlängerung bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch ohne Fahrzeitverlängerung

Aus der Abbildung 71 wird deutlich, dass auch bei dieser Fahrt Energieverluste stärker reduziert werden, wenn auch die Komponenten berücksichtigt werden.

Grundsätzlich ist aber zu betonen, dass die Reduktion der Verluste von vielen Parametern abhängt. Einer dieser Parameter ist die Höchstgeschwindigkeit, welche im folgenden Fall betrachtet wird.

4.2.6.2 Fall 2 – Variationen bei der Fahrt zwischen zwei Bahnhöfen

Der Fall 2 betrachtet verschiedene Randbedingungen bei der Fahrt eines Zuges zwischen zwei Bahnhöfen und demselben Triebfahrzeug. Hierzu listet die Tabelle 5 verschiedene Fälle auf.

Es wird deutlich, dass in allen Fällen mehr Energie gespart wird, wenn die Traktionskomponenten berücksichtigt werden.

Letztendlich wird deutlich, dass die jeweilige Energieeinsparung sehr stark von den Randbedingungen abhängt und es sich bei diesen Fällen in der Größenordnung 0.6 Wh/tkm bis 1.5 Wh/tkm bewegt.

Fall	Randbedingungen	Gesamtenergieverlustreduktion bei einer Fahrzeitverlängerung von 5 Sekunden bei der hier betrachteten Simulation mit einer Optimierung , welche nur die Fahrwiderstände berücksichtigt	mit einer Optimierung , welche die Fahrwiderstände und Verluste in den Traktionskomponenten berücksichtigt	Differenz 33
a	Strecken-Vmax 120 km/h ebene Strecke	1.7	2.3	0.6
b	Strecken-Vmax 100 km/h ebene Strecke	0.75	1.55	0.8
c	Strecken-Vmax 140 km/h ebene Strecke	3.3	4.0	0.7
d	Strecken-Vmax 120 km/h Strecke mit Längsneigung 1 ³⁴	1.7	3.2	1.5
e	Strecken-Vmax 120 km/h, Strecke mit Längsneigung 2 ³⁴	1.7	2.6	0.9
f	Strecken-Vmax 120 km/h, ebene Strecke anderer Haltestellenabstand	1.4	2.3	0.9

Tabelle 5 Vergleichstabelle Energieverlustreduktion in Bruttotonnenkilometer (Wh/tkm) der Gesamtenergieverlustreduktion bei verschiedenen Randbedingungen für eine Fahrt von einem Startbahnhof zu einem Zielbahnhof³⁵

4.2.6.3 Fazit zum Berechnungsbeispiel 6

Auch hier wird gezeigt, dass es für eine Fahrt von A nach B zwischen einem Startbahnhof und einem Zielbahnhof sinnvoll ist, die Traktionskomponentenverluste zu betrachten, da dies die Energieeinsparungen vergrössert.

Im Zusammenhang mit der Größenordnung der Energieeinsparungen ist zu betonen, dass diese sehr stark von den Randbedingungen (Fahrzeug, Strecke, Geschwindigkeit, ...) abhängt und idealerweise individuell berechnet werden sollte.

³³ Differenz, welche sich ergibt, wenn die Energieverlustreduktion aus dem Fall der Fahrwiderstände und Traktionskomponenten auf den Fall bezogen wird, welcher nur die Fahrwiderstände berücksichtigt.

³⁴ Startpunkt und Endpunkt haben die gleiche Höhe

³⁵ Achtung diese Tabelle ist fallspezifisch. Bei anderen Fahrzeugen/Strecken/Geschwindigkeiten etc., ergeben sich Werte welche höher oder niedriger liegen.

5 Diskussion

Dieses Kapitel dient dazu, die Resultate dieser Studie kritisch zu beleuchten, zu diskutieren und zu interpretieren. Dazu werden im ersten Teil die Antworten auf die Forschungsfragen formuliert und im zweiten Teil die Resultate kurz erörtert.

5.1 Antworten auf die Forschungsfragen

5.1.1 Frage 1

Fragestellung: Können die Verluste für eine Fahrt von einem Ausgangspunkt A zu einem Zielpunkt B bei gegebener Fahrzeitreserve durch das zusätzliche Berücksichtigen der Fahrzeugkomponentenverluste zusätzlich reduziert werden?

Antwort: Basierend auf den Simulationen in den Beispiele 3 bis 6 (siehe Abschnitt 4.2.3 bis 4.2.6 ab Seite 87) kann diese Frage eindeutig mit ja beantwortet werden.

So wurde deutlich, dass bei gleicher Fahrzeitverlängerung bei einer Optimierung, welche nur die Fahrwiderstände berücksichtigt stets weniger Gesamtenergie gespart wird, wie bei einer Optimierung, welche die Fahrzeugkomponentenverluste berücksichtigt. Dadurch konnte bei allen berechneten Fällen eine zusätzliche Energieeinsparung, bei gleicher gegebener Fahrzeit, festgestellt werden.

5.1.2 Frage 2

Fragestellung: Wie setzen sich die Verluste im Traktionsstrang zusammen?

Antwort: Die Verluste im Traktionsstrang setzen sich aus konstanten, linearen und nichtlinearen Anteilen und Einflüssen zusammen und resultieren aus den Komponenten (insbesondere: Trafo, Stromrichter, Motor), den Interaktionen der Komponenten, diversen Randbedingungen und äusseren Einflüssen.

Die Verluste im Traktionsstrang konnten im Rahmen dieser Studie mit diversen Details beschrieben werden (siehe Abschnitt 3.2.2 ab Seite 29), obwohl der Aufbau sehr komplex ist.

5.1.3 Frage 3

Fragestellung: Kann der Traktionskomponentenwirkungsgrad als konstant betrachtet werden oder nicht?

Antwort: Es ist immer möglich einen Wirkungsgrad als konstant zu betrachten. Bei Schienenfahrzeugen variiert der reale Wirkungsgrad und ist betriebspunktabhängig (da die Verluste im Traktionsstrang konstante, lineare und nichtlineare Einflüsse haben). Daher führt eine Vereinfachung mit einem konstanten Wirkungsgrad nur zu realistischen Ergebnissen, wenn der Grossteil der Fahrt bei einem Betriebspunkt stattfindet, welcher diesem konstanten Wirkungsgrad entspricht.

Findet die Fahrt hingegen bei unterschiedlichen Betriebspunkten mit unterschiedlichen Wirkungsgraden statt, was in der Praxis normal ist, sollte mit mehreren Wirkungsgraden oder idealerweise mit einem Wirkungsgradkennfeld (siehe Abschnitt 3.2.2.5 Seite 47) oder einem Verlustkennfeld gearbeitet werden.

Wird eine Optimierung durchgeführt, welche das Ziel hat, eine Fahrt möglichst am optimalen Wirkungsgrad zu realisieren, muss bekannt sein, wo bessere und schlechtere Wirkungsgrade liegen, sodass Wirkungsgradkennfelder für solche Optimierungen erforderlich werden. Daher wurde im Rahmen dieser Studie mit Wirkungsgradkennfeldern gerechnet.

5.1.4 Frage 4

Fragestellung: Wie sind die fahrwiderstandsbedingten Verluste aufgebaut?

Antwort: Diese Frage wurde ausführlich in Abschnitt 3.2.4 (ab Seite 49) beantwortet. Grundsätzlich kann zusammengefasst werden, dass eine rein quadratische Formel ($F_R = c \cdot v^2$) zu signifikanten Fehlern führt (siehe auch Tabelle 2 auf Seite 52). Eine Fahrwiderstandsformel sollte alle Parameter der Formel 27 berücksichtigen, wobei die Parameter sich wiederum idealerweise aus einzelnen Einflüssen zusammensetzen sollten.

$$F_R = c_1 + c_2 \cdot v + c_3 \cdot v^2$$

Formel 27

Weiter sollte die Fahrzeugmasse nicht in den direkten Zusammenhang mit dem Luftwiderstand gebracht werden, da der Luftwiderstand von der Fahrzeuggeometrie und Zuglänge abhängt.

5.1.5 Frage 5

Fragestellung: Lässt sich überhaupt ein Algorithmus implementieren, welcher effizient und schnell alle Verluste (auch die Traktionsverluste) für eine Fahrt von A nach B berechnet?

Antwort: Wie in Abschnitt 4.1 (ab Seite 56) beschrieben, ist es möglich einen solchen Algorithmus zu implementieren.

Es ist jedoch anzumerken, dass der Aufwand einen solchen Algorithmus zu entwickeln sehr gross ist und sehr viele Monate Entwicklungsarbeit benötigt. Im Vergleich dazu hat die Entwicklung und Implementierung eines Algorithmus, welcher nur die Fahrwiderstände berücksichtigt, lediglich einen Tag Arbeit benötigt.

5.1.6 Frage 6

Fragestellung: Reduzieren sich die Verluste mit zunehmender Geschwindigkeitsreduktion?

Antwort: Die Verallgemeinerung, dass Geschwindigkeitsreduktionen die Gesamtverluste für die Fahrt pro Kilometer verringern, ist falsch.

Wie im Beispiel des Abschnitts 4.2.1 (ab Seite 67) beschrieben wird deutlich, dass es durch konstante Verbraucher (Hilfsbetriebe und Komfortanlagen) und Nichtlinearitäten in den Traktionskomponenten unterhalb einer fahrzeugspezifischen Geschwindigkeit, die Gesamtverluste pro gefahrenen Kilometer (Bruttotonnenkilometer) wieder ansteigen, sodass eine Geschwindigkeitsreduktion nicht immer zu einer Verbrauchsreduktion (pro gefahrenen Kilometer) führt.

Daher kann eine Geschwindigkeitsreduktion auch den Energieverbrauch pro gefahrenen Kilometer erhöhen.

5.1.7 Frage 7

Fragestellung: Sind energieeffiziente Geschwindigkeitsänderungen möglich?

Antwort: Energieeffiziente Geschwindigkeitserhöhungen und Reduktionen sind möglich.

Wie im Beispiel 3 und 4 beschrieben (siehe Abschnitte 4.2.3 und 4.2.4 ab Seite 87) ist es möglich eine Geschwindigkeitsänderung so durchzuführen, dass die Verluste im Traktionsstrang möglichst gering gehalten werden und die Gesamtverluste pro Bruttotonnenkilometer reduziert werden.

Dabei gibt es zum einen die Strategie, Betriebspunkte mit einem guten Wirkungsgrad zu bevorzugen und zum anderen gibt es bei Geschwindigkeitsreduktionen den Ansatz einen Teil oder den kompletten Traktionsstrang abzuschalten. Dabei ist die jeweils angewandte Strategie und das Fahrprofil sehr stark vom jeweiligen Fahrzeug und den Randbedingungen abhängig.

5.1.8 Frage 8

Fragestellung: Ist eine Berücksichtigung der Längsneigung für eine Optimierung vorteilhaft?

Antwort: Logische Überlegungen und der Nachweis im Rahmen des Beispiels 5 (siehe Abschnitt 4.2.5 ab Seite 99) zeigen, dass es eindeutig vorteilhaft ist, Längsneigungen (Steigungen und Gefälle) zu berücksichtigen.

So konnten gerade bei Strecken mit Längsneigungen die grössten zusätzlichen Energieverlustreduktionen erzielt werden. Optimierungen, welche als Optimierungskriterium nur die Fahrwiderstände berücksichtigen, haben nicht die Möglichkeit, Längsneigungen zu berücksichtigen. Daher benötigt es Optimierungen, welche die gesamten Verluste inklusive der Traktionskomponentenverluste berücksichtigen und im Rahmen dieser Studie angewandt wurden.

5.2 Diskussion der Resultate

Echtzeitfahrplanoptimierungen mit dem Ziel den Energieverbrauch zu reduzieren indem Fahrzeitverlängerungen effizient genutzt werden, sind mittlerweile Stand der Technik. In der Schweiz wurde dies beispielsweise im Rahmen des Projektes eco2.0 umgesetzt (Tuchschenid, 2019; Graffagnino et al, 2019).

Das heisst es werden heute schon Ansätze verfolgt um nicht benötigte Fahrzeitreserven zu nutzen um Energieverluste zu reduzieren.

Zum Erreichen der Klimaziele muss aber noch mehr Energie gespart werden.

Daher stellt sich die Frage, wie wird heute Energie gespart und lässt sich dies steigern. Heute wird durch Geschwindigkeitsreduktionen und Erhöhung der elektrischen Bremskraft Energie gespart. Die Verluste in den Fahrzeugkomponenten werden gemäss Aussagen der Projektbeteiligten im Rahmen des eco2.0 noch nicht berücksichtigt. Daher ist das eco4.0 Projekt quasi eine Erweiterung. Denn letztendlich tragen die Energieverluste in den Fahrzeugkomponenten auch zum Energieverbrauch bei. Sie belasten somit die Umwelt und müssen letztendlich auch (beispielsweise über die Stromrechnung) bezahlt werden.

Mit dieser Studie konnte festgestellt werden,

- **dass sich durch eine zusätzliche Berücksichtigung der Traktionskomponentenverluste zusätzlich Energie sparen lässt und**
- **dass durch eine Fahroptimierung, welche die Verluste in den Traktionskomponenten nicht berücksichtigt (bisherige Situation) im ungünstigsten Fall der Energieverbrauch sogar erhöht werden kann.³⁶**

Dadurch ist es sinnvoll, die Traktionskomponentenverluste zu berücksichtigen um die Gesamtenergieverluste zu reduzieren, sodass im Folgenden kurz die Vor- und Nachteile diskutiert werden.

³⁶ So zeigt schon das Beispiel 1 (siehe 4.2.1 Seite 58), dass der Energieverbrauch pro Kilometer unterhalb einer Grenzgeschwindigkeit wieder ansteigt. Wenn eine Fahrempfehlung nur die Fahrwiderstandsverluste berücksichtigt, kann es sein, dass eine Geschwindigkeit empfohlen wird, welche langsamer als diese fahrzeug- und streckenspezifische Grenzgeschwindigkeit ist und zu einem höheren Verbrauch pro Kilometer führt.

5.2.1 Nachteile

Der grosse **Nachteil** an dieser eco4.0 Optimierung ist, dass eine Betrachtung der Traktionskomponentenverluste die Optimierung deutlich komplexer macht. So braucht es:

- einen viel aufwendigeren Algorithmus und grössere Rechenleistung,
- eine aufwendigere Umsetzung als lediglich eine Angabe einer neuen Sollgeschwindigkeit,
- und fahrzeugspezifische Kenntnisse, die von jedem Fahrzeug erforderlich sind.

So ist insbesondere der aufwendige Algorithmus eine Hürde. Die Entwicklung eines Algorithmus, welcher zeiteffizient die Simulationen erstellt, hat viele Monate benötigt. Im Vergleich dazu hat die Entwicklung und Implementierung eines Algorithmus, welcher nur die Fahrwiderstände berücksichtigt, lediglich einen Tag Arbeit benötigt. Letztendlich ist aber eine Algorithmenentwicklung ein einmaliger Aufwand, welcher über Jahrzehnte einen Nutzen verursacht. Dabei ist anzumerken, dass der Algorithmus durch Schnittstellen so ausgelegt ist, dass bei herkömmlichen Triebfahrzeugen keine Anpassungen erforderlich sind.

Der Aspekt mit der zusätzlichen Rechenleistung ist zwar vorhanden, aber im Vergleich zu diversen anderen alltäglichen Anwendungen und in Anbetracht der IT-Weiterentwicklung verschwindend gering. Letztendlich sind durch die hohe Parallelisierbarkeit Echtzeitfahrplan-optimierungen möglich³⁷.

Der Aspekt hinsichtlich der aufwendigeren Umsetzung bezieht sich primär auf Altfahrzeuge und wird im Kapitel 6 (ab Seite 116) noch erörtert.

Der Aspekt, der fahrzeugspezifischen Kenntnisse bedeutet, dass ein einmaliger fahrzeugspezifischer Aufwand vorhanden ist, da der Algorithmus die Leistungsdaten benötigt und wissen muss, wo das jeweilige Fahrzeug seine effizientesten Betriebspunkte hat³⁸.

Bedingt durch diese Aspekte ist eco4.0, welcher höhere Energieeinsparungen als eco2.0 ermöglicht, im Vergleich zu eco2.0 hinsichtlich seiner Umsetzung aufwendiger. Genauso ist aber auch eco2.0, welches höhere Energieeinsparungen als gar keine Optimierung ermöglicht, im Vergleich zu gar keiner Energiesparmassnahme ebenfalls aufwendiger.

Jede Energieoptimierung ist also mit Aufwänden verbunden, hat aber auch einen Nutzen und Vorteile. Diese Vorteile von eco4.0 sollen im Folgenden kurz diskutiert werden.

³⁷ Für die Berechnungen wurde lediglich ein handelsübliches Notebook verwendet, dabei wurden mit dieser geringen Rechenleistung und minimaller Parallelisierung, die meisten Optimierungen in Sekunden erledigt.

³⁸ Diese Daten werden heute üblicherweise im Rahmen von Ausschreibungen zu Ermittlung der Energieverbrauchswerte verwendet.

5.2.2 Vorteile

Der grundsätzliche Vorteil von eco4.0 ist, dass zusätzlich Energie gespart wird indem Energieverluste reduziert werden, sodass sich der Gesamtenergieverbrauch reduziert.

Im Vergleich zu eco2.0 besteht ein deutlicher Vorteil, da bei eco4.0 durch die Berücksichtigung der Traktionskomponentenverluste schon mit kurzen Fahrzeit-verlängerungen viel Energie gespart werden kann. So zeigt das simulierte Beispiel 6³⁹, welches einer vier Kilometer langen S-Bahn-Fahrt entsprechen würde, dass mit einer Berücksichtigung der Traktionskomponenten durch eine Fahrzeitverlängerung um nur einer Sekunde, die Gesamtverluste um 3 % reduziert werden können. Eine Optimierung, welche nur die Fahrwiderstandsverluste berücksichtigt, erreicht solche Werte erste bei grösseren Fahrzeitverlängerungen.

Dies liegt daran, dass eine Optimierung, welche die Traktionskomponenten berücksichtigt, Vorteile bei Geschwindigkeitsänderungen (beschleunigen/bremsen) hat (siehe auch Beispiel 3 und 4).

Ein weiterer deutlicher Vorteil besteht auf Strecken mit Längsneigungen (Gefälle/Steigungen). Auch hier entstehen signifikante Einsparungen, wie sie auch in dem Beispiel 5 und 6 gezeigt werden. So kann die Topographie möglichst effizient ausgenutzt werden.

Ebenfalls ist ein wichtiger Aspekt, dass Optimierungen, welche nur die Fahrwiderstände berücksichtigen, in ungünstigen Fällen den Gesamtenergieverbrauch pro Kilometer erhöhen können (siehe auch Beispiel 1). So gibt es fahrzeugspezifische Szenarien, welche zwar die Fahrwiderstände pro Kilometer reduzieren, aber zugleich Komponentenverluste pro Kilometer so gravierend erhöhen, dass der Energieverbrauch pro Kilometer ansteigt. Bei eco4.0 werden solche Fahrweisen gar nicht erst empfohlen, da die Optimierung die gesamten Verluste berücksichtigt, berechnet und kennt. Dadurch sind keine Fälle zulässig, welche den Gesamtenergieverbrauch erhöhen. Es werden also nur Fälle empfohlen, welche den Gesamtenergieverbrauch reduzieren.

Da die Reduktion des Energieverbrauches den Hauptnutzen darstellt, soll dieser im Folgenden diskutiert werden.

³⁹ Beispiel 6 – siehe Abschnitt 4.2.6.1 ab Seite 95.

5.2.3 Zusätzliche Einsparungen

Grundsätzlich sind zusätzliche Einsparungen stets vorhanden. Sie fallen aber sehr unterschiedlich und fallspezifisch aus.

Es gibt Fälle, bei denen sich die Energieverlustreduktion bei der Fahrt zwischen zwei Bahnhöfen im Vergleich zur bisherigen Situation mehr als verdoppelt. Auf der anderen Seite gibt es Fälle, bei denen die Energieersparnis im Vergleich zur heutigen Situation nur um wenige Prozente erhöht wird.

So zeigt das Beispiel 6, dass die zusätzliche Energieverlustreduktion für Fahrten zwischen zwei Bahnhöfen bei den hier betrachteten Fällen zwischen 0.6 Wh/tkm bis 1.5 Wh/tkm⁴⁰ liegen. Dabei ist zu betonen, dass mit zusätzlicher Energieverlustreduktion der Wert betrachtet wird, welcher zusätzlich zu einer heutigen Ersparnis hinzukommt. Die Gesamtersparnis liegt bei diesen Fällen dann zwischen 2.3 und 4 Wh/tkm.

Letztendlich ist aber zu betonen, dass bei einer Optimierung, welche die Traktionskomponenten berücksichtigt, Hochrechnungen ungeeignet sind. So wurden verschiedene Hochrechnungsansätze betrachtet, mit dem Resultat, dass die Spannweiten extrem gross sind. Es ist zwar stets eine Ersparnis vorhanden, es sind aber extrem viele Einflussfaktoren und fallspezifische Ergebnisse, da jeder Fahrzugtyp, sowie jede Strecke anders ist und zu anderen Verlusten führt.

Eine Berechnungsreihe zur Ermittlung der Größenordnung der zusätzlichen Energieverlustreduktion in Bruttotonnenkilometern führt bei Fahrten im Nahverkehr zu zusätzlichen Ersparnissen im Bereich von 1 bis 8 %⁴¹.

Die Interpretation dieser Größenordnung wird in der folgenden Formel 28 veranschaulicht.

⁴⁰ Nach Meyer (2020) haben Personenzüge Energiekennzahlen in der Größenordnung 18 und 45 Wh/tkm.

⁴¹ Achtung die zusätzliche Energieverlustreduktion durch Fahrzeitverlängerungen mit der Berücksichtigung der Verluste in den Traktionskomponenten hängt sehr stark von diversen Einflussgrössen ab.

$$E_{neu} = \underbrace{E_{ohneFahrzeitverlängerung}}_{100 \%} - E_{bisherigeOptimierung} - \underbrace{E_{zusätzlicheEnergieverlustr.}}_{Größenordnung 1 bis 8 \%}, \text{ Formel 28}$$

- E_{neu} entspricht dem neuen Gesamtenergiebedarf für die gesamte Fahrt nach der Optimierung.
- $E_{ohneFahrzeitverlängerung}$ entspricht dem Energiebedarf ohne Fahrzeitverlängerung.
- $E_{bisherigeOptimierung}$ entspricht der Reduktion des Energiebedarfs, welcher durch eine Nutzung der Fahrzeitreserve die Fahrzeit verlängert und als Optimierungskriterium nur Fahrwiderstände berücksichtigt (und natürlich das Bremsen vermeidet und wenn nur elektrisch rekuperierend gebremst wird)⁴².
- $E_{zusätzlicheEnergieverlustr.}$ entspricht der Reduktion des Energiebedarfs durch die Methoden dieser Studie (Größenordnung 1 bis 8 %).

Ähnlich wie bei den Resultaten von eco2.0 sind auch hier die Einsparungen sehr unterschiedlich, aber bei weitem nicht vernachlässigbar.

Basierend auf diesen Resultaten und dem Energiesparpotential kann festgestellt werden, dass es Sinn macht, eine traktionsbasierte energieorientierte Echtzeitfahrplanoptimierung weiterzuverfolgen.

⁴² Im Rahmen des SBB Projektes eco2.0 wurde dieser Wert mit 1.4 % bis 13.3 % publiziert (Graffagnino et al, 2019). Die Berechnungen im Rahmen dieser Studie bestätigen diese publizierte Größenordnung.

6 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Im Rahmen dieser Studie konnte eindeutig gezeigt werden, dass durch eine Berücksichtigung der Traktionskomponenten Energie gespart werden, kann indem Fahrzeitreserven effizienter und mit geringeren Verlusten genutzt werden.

Daher wird empfohlen, bei zukünftigen Anwendungen die Verluste in den Traktionskomponenten zu berücksichtigen.

Grundsätzlich ist eine Anwendung im

- Lokführerbetrieb und im
- automatischen Betrieb möglich.

Mögliche Anwendungen werden in Abschnitt 6.1 (ab Seite 117) kurz beschrieben. Auf Aspekte zu dem idealen Fahrprofil wird in Abschnitt 6.2 (ab Seite 118) eingegangen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt dieser Studie besteht darin, das Verständnis zu verbessern, indem gezeigt wurde,

- dass bedingt durch physikalische Aspekte die Verluste im Traktionsstrang nicht zu vermeiden sind und
- dass die Komponentenverluste einen signifikanten Anteil am Gesamtenergieverbrauch haben und
- dass die Komponentenverluste extrem stark von der jeweils im Schienenfahrzeug verwendeten Technologie abhängen und
- dass ein Ignorieren dieser Verluste zu einem höheren Energiemehrverbrauch führen kann.

Daher wird den Bahnbetrieben empfohlen, dieses Wissen auch über eine Fahrprofiloptimierung hinaus anzuwenden. Wie das Beispiel 1 (siehe Abschnitt 4.2.1 ab Seite 67) beschreibt, gibt es beispielsweise auch schon solche einfachen Optimierungen, wie das Beachten der fahrzeugspezifischen Mindestgeschwindigkeit⁴³.

⁴³ Abhängig von den jeweiligen Traktionskomponenten des jeweiligen Schienenfahrzeuges gibt es eine fahrzeugspezifische Mindestgeschwindigkeit. Wenn ein Schienenfahrzeug langsamer als die Mindestgeschwindigkeit fährt, reduziert sich der Energieverbrauch nicht mehr, der Energieverbrauch pro Kilometer erhöht sich hingegen.

6.1 Mögliche Anwendung

6.1.1 Lokführerbetrieb

Bei der Anwendung im Lokführerbetrieb gibt es grundsätzlich unterschiedliche Anwendungsstufen, welche sich hinsichtlich der Komplexität steigern.

Anwendung im Lokführerbetrieb ohne eine Fahrzeuganpassung

Sofern keine Fahrzeuganpassungen erfolgen sollen oder können, ist es möglich, dem Lokführer über einem mobilen Tablet-PC Angaben zu übersenden, welche über die Angaben des eco2.0 Projektes hinausgehen.

Auf diesem Tablet können dem Lokführer Anhaltspunkte für die Fahrt übersendet werden, wie beispielsweise die folgenden:

- Die Streckenpunkte, bei denen der Lokführer seine Zugkraft komplett zurücknehmen soll, um sich ausrollen zu lassen.
- Dem Lokführer einen Zugkraftwert mitteilen, welcher energieeffizienter ist und dazu führt, dass nicht die volle Geschwindigkeit ausgefahren wird, aber zugleich Pünktlich das Ziel erreicht wird. Beispielsweise kann dies ein Zugkraftwert sein, bei diesem ein Teil des Antriebsstranges ausgeschaltet wird.
- Weiter ist es denkbar, dem Lokführer Streckenpunkte mitzuteilen, bei diesen er die Zugkraft reduzieren soll, damit er beispielsweise eine hügelige Alpenvorlandstrecke ohne elektrisches Bremsen (und die damit verbundenen Rekuperationsverluste) befahren kann.

Ansatz mit minimaler Fahrzeuganpassung

Grundsätzlich ist eine Darstellung des momentanen Wirkungsgrades auf dem Display sehr einfach umsetzbar. Üblicherweise verfügt die Fahrzeugleittechnik eines neuen Schienenfahrzeugs über alle notwendigen Daten, um den Wirkungsgrad zu berechnen, sodass es sich nur um eine Softwareanpassung handelt.

Dadurch weiss der Lokführer, ob er gerade bei einem effizienten oder weniger effizienten Betriebspunkt fährt. Ein qualifizierter und vorausschauendfahrender Lokführer hat mit dieser Information die Möglichkeit, seinen Energieverbrauch zu reduzieren.

Die Darstellung des momentanen Wirkungsgrades ist auch unabhängig von eco4.0 möglich.

6.1.2 Teilautomatischer Betrieb bis zum vollautomatischen Betrieb

Im Rahmen eines teilautomatischen Betriebs, bei welchem das Fahrzeug ohne Lokführerhandlung sein Fahrprofil automatisch steuert, ist unter Berücksichtigung der Komponentenverluste sehr einfach umsetzbar und wird dafür auch stark empfohlen.

Es ist lediglich eine aufwendigere Implementierung der Software erforderlich, sowie das Einbeziehen der fahrzeugspezifischen Daten, da die Optimierung fahrzeugspezifisch ist.

6.2 Das ideale Fahrprofil

In der Bahnbranche wird immer wieder über die ideale Fahrweise und das ideale Fahrprofil diskutiert. Dabei gibt es unterschiedlichste Empfehlungen, basierend auf verschiedenen Untersuchungen und Studien.

Dabei unterscheiden sich die Empfehlungen der Experten teilweise signifikant und widersprechen einander teilweise erheblich.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden diverse Fahrprofile ermittelt und Vergleichsbetrachtungen zur Literatur durchgeführt⁴⁴. So haben unterschiedliche Berechnungen, durch unterschiedliche Fahrzeuge, Strecken, etc. zu unterschiedlichen Fahrprofilen geführt. Dadurch wird quasi einmal die Empfehlung A bestätigt und der Empfehlung B widersprochen und bei anderen Berechnungswerten ist es gerade umgekehrt. Dadurch wurde deutlich, dass das ideale Fahrprofil vom Fahrzeug und diversen fallspezifischen Randbedingungen abhängt. Dies erklärt auch die unterschiedlichen, teilweise widersprüchlichen, Empfehlungen. Letztendlich verdeutlicht dies, dass viele Empfehlungen nicht falsch liegen, es ist viel mehr der Aspekt, dass die Resultate teilweise nicht komplett verallgemeinerbar und übertragbar sind.

Trotzdem gibt es Aspekte, welche immer noch verallgemeinerbar sind. Zu diesen zählt:

- unnötiges Bremsen vermeiden (→ Energieverbrauch vermeiden)
- wenn das Bremsen erforderlich ist, wird eine Fahrweise empfohlen, welche so viel Bremsenergie, wie möglich zurückspeist (→ Möglichst wenig Energie vernichten)

⁴⁴ Bedingt durch den Umfang ist es nicht möglich, all diese Resultate zu beschreiben, sodass in diesem Bericht Prioritäten gesetzt wurden.

Im Zusammenhang mit häufig genannten Empfehlungen, wie beispielsweise

- Züge ausrollen lassen oder
- Geschwindigkeitsreduktionen

gibt es Beispiele, welche dafürsprechen, aber auch Gegenbeispiele. Das heisst, obwohl diese Empfehlungen eindeutig zum Energiesparen beitragen können, existieren auch Fälle, bei denen diese Empfehlungen einen nachteilhaften Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch pro Kilometer haben.

Letztendlich ist daher eine individuelle fallspezifische Betrachtung erforderlich, bei dieser der Gesamtenergieverbrauch berücksichtigt wird und somit auch die Verluste in den Komponenten. Denn am Ende wirkt sich der Gesamtenergieverbrauch auf die Klimabilanz aus und am Ende bezahlt der Bahnbetreiber die Kosten für den Gesamtenergieverbrauch und nicht nur die Kosten für einen Teil des Energieverbrauchs.

Das ideale energieeffizienteste Fahrprofil ist fahrzeug- und fallspezifisch und hängt von diversen Randbedingungen und Einflüssen ab, sodass diese Studie eine Methode beschrieben hat, ideale Fahrprofile für verschiedenste Fahrzeuge zu bestimmen und verdeutlicht hat, dass die Betrachtung des Gesamtenergieverbrauches die Gesamtenergieverluste stärker reduziert, als nur eine Teilbetrachtung.

6.3 Energiesparen durch Geschwindigkeitserhöhungen

Dieser Abschnitt beschreibt weitere Empfehlungen, basierend auf dem Wissen und den Erkenntnissen der Studie.

Die Aussage, durch Geschwindigkeitserhöhungen Energie zu sparen, wirkt auf den ersten Blick widersprüchlich, da mit einer Geschwindigkeitszunahme die Fahrwiderstände zunehmen. Diese Studie hat jedoch verdeutlicht, dass es auch andere Ursachen für Energieverluste gibt, so existieren Fälle, bei diesen durch eine höhere Geschwindigkeit zum einen die Verluste durch die Fahrwiderstände zunehmen, aber letztendlich die Gesamtverluste abnehmen. Im Rahmen dieser Studie wurden zwei Fälle anhand von Beispielen beschrieben, welche zu den folgenden Empfehlungen führen.

Mindestgeschwindigkeit

Die Mindestgeschwindigkeit, wie sie in Beispiel 1⁴⁵ beschrieben wurde, ist ein Fall, bei dem durch eine Geschwindigkeitserhöhung Energie gespart wird. Denn wenn ein Fahrzeug langsamer als die fahrzeugspezifische Mindestgeschwindigkeit fährt, erhöhen sich die Verluste pro gefahrenen Kilometer Strecke.

Diese fahrzeugspezifische Mindestgeschwindigkeit ist grundsätzlich vorhanden, da es Komponenten gibt, welche Verluste verursachen, die kaum oder nur gering geschwindigkeitsabhängig sind⁴⁶.

Daher wird empfohlen, die fahrzeugspezifische Mindestgeschwindigkeit, sowie deren Ursachen und Auswirkungen zu berücksichtigen⁴⁷.

Geschwindigkeitserhöhungen im Gefälle

Das Ausrollenlassen und Vermeiden von Bremsen in Gefällen ist ein weiterer Fall, bei dem eine höhere Geschwindigkeit zur Energieeinsparung führen kann.

Diese Energieeinsparungen sind absolut offensichtlich bei Fahrzeugen, welche die Bremsenergie nicht oder nur teilweise zurückspeisen können. Dazu zählen insbesondere lange Güterzüge oder beispielsweise Dieselfahrzeuge. Es zählen aber auch elektrische Fahrzeuge dazu, welche durch elektrisches Bremsen ihre Bremsenergie in das Bahnnetz zurückspeisen, da letztendlich auch beim Rückspeisen durch die Energiewandlung (mechanisch → elektrisch) Verluste entstehen.

So zeigt das Beispiel 5 dieser Studie für ein elektrisches energierückspeisendes Fahrzeug, dass Energie gespart werden kann, wenn das Fahrzeug geländeangepasst etwas schneller fahren darf⁴⁸, da dann Rückspeiseverluste vermieden werden.

Daher wird empfohlen, diesen Aspekt bei Streckenhöchstgeschwindigkeiten zu berücksichtigen, da sein kann, dass ein Zug durch eine geringe höhere zulässige Geschwindigkeit im Gefälle ausrollen⁴⁹ kann und dadurch Energie spart.

⁴⁵ Siehe Abschnitt 4.2.1 ab Seite 67

⁴⁶ Durch Stromrichter, bei diesen der Gesamteffizienz, also auch die Effizienz bei geringen Geschwindigkeiten und geringen Leistungen berücksichtigt wird, liegt die fahrzeugspezifische Mindestgeschwindigkeit üblicherweise deutlich tiefer.

⁴⁷ Natürlich kann eine Mindestgeschwindigkeit nicht immer berücksichtigt werden, wenn beispielsweise sicherheitsrelevante Langsamfahrstellen vorliegen.

⁴⁸ Siehe Abschnitt 4.2.5 ab Seite 99

⁴⁹ Natürlich muss berücksichtigt werden, dass das Ausrollen nicht unkontrolliert stattfindet und sich in einem technisch sicheren Rahmen bewegt.

7 Verzeichnisse

7.1 Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

7.1.1 Abkürzungen

BUR	Bordnetzumrichter
DC	direct current (Gleichstrom)
ECO 2.0	Abgeschlossenes Projekt der SBB mit dem Titel "Entwicklung und Betriebstest von Fahrempfehlungen (Projekt „eco2.0“)"
ECO 4.0	Kurzbezeichnung für dieses Projekt
ETH	Eidgenössische Technische Hochschule
EWIV	Einheitswagen 4
GTO	<i>Englisch:</i> gate-turn-off GTO wird als Abkürzung für "GTO-Thyristor" (gate-turn-off-Thyristor) verwendet
Habils Typ B	Eigenname für einen gedeckten vierachsigen Schiebewandwagen
Habils Typ Rs	Eigenname für einen vierachsigen Flachwagen
IGBT	<i>Englisch:</i> insulated-gate bipolar transistor IGBT wird als Abkürzung für den "Bipolartransistor mit isolierter Gate-Elektrode" verwendet
ICE	Inter City Express
IR	InterRegio
RhB	Rhätische Bahn
MGB	Matterhorn Gotthard Bahn
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
SOK	Schienenoberkante

7.1.2 Formelsymbole

B	Flussdichte
c, c_1, c_2, c_3	Konstante
E_{neu}	Gesamtenergiebedarf für die gesamte Fahrt nach der Optimierung
$E_{ohneFahrzeitverlängerung}$	Energiebedarf ohne Fahrzeitverlängerung
$E_{bisherigeOptimierung}$	Bisherige Reduktion des Energiebedarfs ⁵⁰
$E_{zusätzlicheEnergieverlustr.}$	Reduktion des Energiebedarfs durch die Methoden dieser Studie ⁵¹
f	Frequenz
f_1	Statorfrequenz
f_2	Rotorfrequenz
F_R	Fahrwiderstandskraft
H	Feldstärke
I	Strom
$I_{Kollektor}$	Kollektorstrom
$I_{Lastanteil}$	Strom Lastanteil
$I_{Leerlaufanteil}$	Strom Leerlaufanteil
P	Leistung
$P_{Luftspalt}$	elektrische Leistung im Luftspalt
P_{Mech}	mechanische Leistung
$P_{v.Rotor}$	Verluste im Rotor
$P_{Verlust}$	Verlustleistung
$P_{Verlust.Widerstandsabh.}$	Widerstandsabhängige Verlustleistung
$P_{Verlust.Wirbelstrom}$	Wirbelstromverlustleistung
$P_{Verlust.Hysterese}$	Hysteresenverlustleistung

⁵⁰ Optimierung durch eine Nutzung der Fahrzeitreserve zur Verlängerung der Fahrzeit mit den Optimierungskriterien: Fahrwiderstandsverlustreduktion, Vermeidung unnötigen Bremsens und Anwendung einer energierückspeisenden Bremse.

⁵¹ Gesamtenergieoptimierung, welche auch die Traktionskomponentenverluste berücksichtigt.

m	Masse
M	Drehmoment
n	Wagenanzahl
R	Elektrischer Widerstand
U	Spannung
$U_{Kollektor/Emitter}$	Kollektor-Emitter-Spannung
U_{i1}	Spannung im Stator
U_{i2}	Spannung im Rotor
U_{ind}	induzierte Spannung
t	Zeit
v	Geschwindigkeit
Φ	magnetischer Fluss
Ψ	Flussverkettung
Ω	Winkelgeschwindigkeit
ϱ	Luftdichte

7.1.3 Spezielle Formelzeichen

Wh/tkm Wattstunde pro Bruttotonnenkilometer

7.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	<i>Umfang des Detailierungsgrades des Projektes eco 4.0 im Vergleich zum Projekt eco 2.0</i>	9
Abbildung 2	<i>Antriebsstranges eines Frequenzumrichter-fahrzeuges</i>	11
Abbildung 3	<i>Mögliche Wege durch ein Zugkraft-diagramm beim Beschleunigen</i>	12
Abbildung 4	<i>Energieverlustreduktion in Abhängigkeit der Fahrzeit-verlängerung.</i>	12
Abbildung 5	<i>Zusammenhang zwischen den Ansätzen/Arbeitspaketen und der Beantwortung der Forschungsfragen</i>	23
Abbildung 6	<i>Das Ziel der Simulation ist es, dass das Optimierungsverfahren, mit einer einheitlichen Schnittstelle auf die Fahrzeugdaten zugreift, sodass die Optimierung mit verschiedenen Fahrzeugtypen gemacht werden kann.</i>	24
Abbildung 7	<i>Umfang des Detailierungsgrades des Projektes eco 4.0 im Vergleich zum Projekt eco 2.0</i>	25
Abbildung 8	<i>Vereinfachtes Prinzip der Darstellung des Antriebsstranges eines Frequenzumrichterfahrzeuges (Eigene Zeichnung in Anlehnung an die Quellen: (Geber et al, 1991; Filipovic, 2005; Janicki und Reinhard, 2008; Nold et al, 2018; Meyer, 2020))</i>	29
Abbildung 9	<i>Ersatzschaltbild eines Transformators. (Eigene Zeichnung in Anlehnung an die Quelle: (Meyer, 2020))</i>	30
Abbildung 10	<i>Qualitative skizzierte Darstellung des Transformator-Wirkungsgrades (Eigene Zeichnung in Anlehnung an die Quelle: (Blesl und Kessler, 2017))</i>	31
Abbildung 11	<i>Qualitative Darstellung einer Magnetisierungshysterese. (Eigene Zeichnung in Anlehnung an die Quelle: (Kallenbach et al, 2008))</i>	32
Abbildung 12	<i>Vereinfachte Darstellung des Aufbaus eines 2-Punkt-Traktionsstromrichters mit einem Modulationsgrad von 4 zu 3 und insgesamt 8 Phasenbausteinen. (Eigene Zeichnung in Anlehnung an die Quellen: (Geber et al, 1991; Steimel, 2006; Meyer, 2020))</i>	34
Abbildung 13	<i>Vereinfachte Veranschaulichung und Analogie des Umschaltschaltkontakte bei einem Phasenbaustein. (Zeichnung basierend auf der Quelle: Meyer, 2020 und Meyer 1990)</i>	35
Abbildung 14	<i>Vereinfachte Veranschaulichung des Aufbaus eines Phasenbausteins (Zeichnung basierend auf der Quelle: Meyer, 2020)</i>	35
Abbildung 15	<i>Qualitative Veranschaulichung der Anschaltverluste in einem Halbleiter (Zeichnung basierend auf der Quelle: Specovius, 2009)</i>	36
Abbildung 16	<i>Qualitative Veranschaulichung der Ausschaltverluste in einem Halbleiter (Zeichnung basierend auf der Quelle: Specovius, 2009)¹⁴</i>	36
Abbildung 17	<i>Qualitative Veranschaulichung eines An- und Abschaltzykluses in einem Halbleiter (Zeichnung basierend auf der Quelle: Specovius, 2009 und teilweise auf Meyer, 2020)</i>	37
Abbildung 18	<i>Berechneter Fall einer Sinusdreieckmodulation für einen Netzstromrichter ohne Anwendung der versetzten Taktung. Die blaue Linie stellt den Sinus dar. Die orangene Linie das Dreiecksignal der Sinus-Dreieck-Modulation. Die schwarze Linie stellt die Spannung am Ausgang dar. Die Werte wurden mit einer Taktung von 100 Hz berechnet.</i>	38
Abbildung 19	<i>Berechneter Fall einer Vollblocktaktung. Die blaue Linie stellt den Sinus dar. Die schwarze Linie stellt die Spannung am Ausgang dar. Es wird deutlich, dass nur eine Taktung pro Sinusperiode stattfindet.</i>	38

Abbildung 20	<i>Kennlinien des Asynchronfahrmotors nach der Kloßschen Formel (basierend auf Hering et al 1999 und Meyer 2020)</i>	40
Abbildung 21	<i>Kennlinien des Asynchronfahrmotors nach der Kloßschen Formel (basierend auf Hering et al 1999 und Meyer 2020) mit den Rotorfrequenzen</i>	43
Abbildung 22	<i>Qualitativ skizzierte Darstellung des Asynchronmotor- Wirkungsgrades (Eigene Zeichnung basierend auf der Quelle: (Blesl und Kessler, 2017))</i>	45
Abbildung 23	<i>Qualitative Darstellung Nennwirkungsgrad in Abhängigkeit der logarithmisch dargestellten Nennleistung von Asynchronmotoren (Eigene Zeichnung nach den Daten der Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München (Rudolph und Wagner, 2008))</i>	46
Abbildung 24	<i>Eigene beispielhafte qualitativ vereinfachte Darstellung eines Wirkungsgradkennfeldes eines Motors (Diese Darstellung orientiert sich an den Quellen (Bojoi et al, 2016; Mahmoudi et al, 2015))</i>	47
Abbildung 25	<i>Beispielhafter Plot des Fahrwiderstandes (rote Linie: vereinfachte rein quadratische Formel grüne Linie: genaue Formel, mit dunkelgrün (untere Fläche) konstantem Anteil, mit grün (mittlere Fläche) linearer Anteil und mit hellgrün (obere Fläche) quadratischer Anteil)</i>	52
Abbildung 26	<i>Veranschaulichung der theoretischen Möglichkeiten (grau), welche ein Lokführer oder ein automatisches System abfahren kann, sowie eine dieser Möglichkeiten (grün)</i>	57
Abbildung 27	<i>Veranschaulichung eines diskreten Geschwindigkeits-Weg-Rasters.</i>	58
Abbildung 28	<i>Beispielhafte Veranschaulichung eines möglichen diskreten Geschwindigkeits-Wegverlaufes im Geschwindigkeits-Weg-Rasters.....</i>	58
Abbildung 29	<i>Varianten von Wegpunkt A3 zu den verschiedenen Geschwindigkeiten beim Wegpunkt B.....</i>	60
Abbildung 30	<i>Varianten von Wegpunkt A3 zum Wegpunkt C4.....</i>	60
Abbildung 31	<i>Veranschaulichungsskizze zum Beschreiben des Datenaussortierens anhand eines Routen-Beispiels aus der Navigation</i>	63
Abbildung 32	<i>Veranschaulichungsskizze eines theoretischen beispielhaften Fahrprofils, welches ein Geschwindigkeitsband überschreitet.</i>	64
Abbildung 33	<i>Aufbau der Algorithmusarchitektur zur Berechnung der Optimierung.....</i>	65
Abbildung 34	<i>Fahrprofil und Bereich mit konstanter Geschwindigkeit.....</i>	67
Abbildung 35	<i>Beispiel 1 - Fall 1 a) Fahrwiderstand in Abhängigkeit der Geschwindigkeit b) Verlustleistung zur Kompensation der Fahrwiderstände in Abhängigkeit der Geschwindigkeit c) Reisezeit für die Fahrt von einem Kilometer in Abhängigkeit der Geschwindigkeit d) Verlustenergie zur Kompensation der Fahrwiderstände in Abhängigkeit der Geschwindigkeit</i>	69
Abbildung 36	<i>Verlustenergie durch die Fahrwiderstandsverluste in Abhängigkeit der Fahrzeit</i>	70
Abbildung 37	<i>Beispiel 1 - Fall 2 a) Fahrwiderstand in Abhängigkeit der Geschwindigkeit b) Verlustleistung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit: orange: Verlustleistung zur Kompensation der Fahrwiderstände blau gepunktet: Verlustleistung im Traktionsstrang blau durchgezogen: Summe beider Verlustleistungen c) Reisezeit für die Fahrt von einem Kilometer in Abhängigkeit der Geschwindigkeit d) Verlustenergie in Abhängigkeit der Geschwindigkeit: orange: Verlustenergie zur Kompensation der Fahrwiderstände blau gepunktet: Verlustenergie im Traktionsstrang blau durchgezogen: Summe der Verlustenergie</i>	71
Abbildung 38	<i>Visualisierung der Verlustleistung aus Formel 24, Formel 25 und Formel 26</i>	73
Abbildung 39	<i>Visualisierung des Energiebedarfs pro Kilometer aus Formel 24, Formel 25 und Formel 26</i>	73

Abbildung 40	<i>Beispiel 1 - Fall 2 a) Verlustenergie in Abhängigkeit der Fahrzeit. b) Verlustenergie in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, Orangene Linie: Verlustenergie zur Kompensation des Fahrwiderstandes Blaue gepunktete Linie: Verlustenergie im Traktionsstrang und durch die Hilfsbetriebe Blaue durchgezogene Linie: Summe Traktionsstrang + Hilfsbetriebe + Fahrwiderstand Schwarz gestrichelte Linie: Summe Traktionsstrang + Hilfsbetriebe + Fahrwiderstand + ZSS Verbraucher.....</i>	74
Abbildung 41	<i>Beispiel 1 - Fall 3 a) Verlustenergie in Abhängigkeit der Fahrzeit. b) Verlustenergie in Abhängigkeit der Geschwindigkeit, Orangene Linie: Verlustenergie zur Kompensation des Fahrwiderstandes Blaue gepunktete Linie: Verlustenergie Traktionsstrang (alter Stromrichter) + Hilfsbetriebe Blaue durchgezogene Linie: Summe Traktionsstrang + Hilfsbetriebe + Fahrwiderstand Grüne gepunktete Linie: Verlustenergie Traktionsstrang (neuer 3-Punkt-Stromrichter) + Hilfsbetriebe Grüne durchgezogene Linie: Summe Traktionsstrang (3-Punkt-Str.) + Hilfsbetriebe + Fahrwiderstand</i>	75
Abbildung 42	<i>Linienstruktur des Beispiels 2. Die blaue Linie entspricht dem haltenden Zug (S-Bahn) und die rote Linie dem durchfahrenden Zug (InterRegio).....</i>	77
Abbildung 43	<i>SBB Zug zusammengesetzt aus einer Lokomotive und sechs Reisezugwagen (vier 2. Klasse-Wagen und zwei 1. Klasse-Wagen) auf der Gotthardstrecke bei Wassen (Foto: M. Nold im Jahr 2016).....</i>	78
Abbildung 44	<i>Zuganzeigetafel eines IC der SBB mit sechs Wagen im Zürcher Hauptbahnhof (Foto: M. Nold im Jahr 2019)</i>	78
Abbildung 45	<i>a) Fahrprofil für zwei Fahrten von Zürich HB nach Baden b) Zu dem Fahrprofil gehörender Energiebedarf ohne Fahrzeugkomponentenverluste. Die jeweils durchgezogenen Linien zeigen die Energie, welche aus der Fahrleitung beginnend vom Startbahnhof bis zu dem jeweiligen Streckenpunkt für die Beschleunigung/Verzögerung des Zuges und zur Kompensation der Fahrwiderstände bezogen wurde. Die jeweils gepunkteten Linien summieren die Energieverluste zur Kompensation des Fahrwiderstands beginnend vom Startbahnhof bis zu dem jeweiligen Streckenpunkt auf.....</i>	79
Abbildung 46	<i>Vergleich des Fahrwiderstandenergieverbrauches mit den Energiekennzahlen nach Meyer (2020).....</i>	82
Abbildung 47	<i>Berechnungsgesamtübersicht für die Vergleichsberechnung mit einem haltenden Zug und einem durchfahrenden Zug.....</i>	83
Abbildung 48	<i>Vereinfachte schematische Darstellung der Verluste beim Leistungsaustausch von der Fahrleitung zum Rad</i>	84
Abbildung 49	<i>Vereinfachte schematische Darstellung der Verluste beim Leistungsaustausch vom Rad zur Fahrleitung.....</i>	84
Abbildung 50	<i>Vergleich des Energieverbrauches mit den Energiekennzahlen nach Meyer (2020).....</i>	86
Abbildung 51	<i>Schematische Darstellung der Ausgangssituation der folgenden Fälle.</i>	87
Abbildung 52	<i>Verschiedene Varianten für eine Beschleunigung von 0 auf 100 km/h bei einer Energieverlustoptimierung, welche nur das Kriterium Fahrwiderstandsverluste berücksichtigt</i>	88
Abbildung 53	<i>Darstellung der Verlustenergie durch die Fahrwiderstandsverluste. Hierbei entspricht 100 % der Summe aus den Fahrwiderstandsverlusten + Traktionskomponentenverlusten bei der kürzesten Fahrzeit für diesen Abschnitt</i>	89
Abbildung 54	<i>Beschleunigung von 0 auf 100 km/h bei einer Energieverlustoptimierung mit Berücksichtigung der Fahrwiderstandsverluste und Traktionskomponentenverluste als Optimierungskriterium a)</i>	

Verschiedene Varianten für die Beschleunigung b) Darstellung der Verlustenergie, der Energieverlustoptimierung des hier betrachteten Falles. Hierbei entspricht 100 % der Summe aus den Fahrwiderstandsverlusten + Traktionskomponentenverlusten bei der kürzesten Fahrzeit für diesen Abschnitt (Fahrzeitverlängerung gleich Null). Die violette Linie beschreibt die Komponentenverluste und die orangene Linie die Fahrwiderstandsverluste und die schwarze Linie zeigt die Summe dieser beiden Verluste.	90
Abbildung 55 Darstellung der Verlustenergie der Optimierungen beider Fälle im Vergleich Fall 1: Optimierungskriterium nur Fahrwiderstandsverluste Fall 2: Optimierungskriterium Summe aus den Fahrwiderstandsverlusten und Traktionskomponentenverlusten.....	91
Abbildung 56 Darstellung der Summe der Verluste beider Optimierungsfälle im Vergleich.....	92
Abbildung 57 Schematische Darstellung der Ausgangssituation der folgenden Fälle.	93
Abbildung 58 Schematische Darstellung der Ausgangssituation der folgenden Fälle.	94
Abbildung 59 Verschiedene Varianten für eine Geschwindigkeitsreduktion von 100 km/h auf 40 km/h bei einer Energieverlustoptimierung, welche nur die Fahrwiderstandsverluste als Kriterium berücksichtigt.....	95
Abbildung 60 Verschiedene Varianten für eine Geschwindigkeitsreduktion von 100 km/h auf 40 km/h bei einer Energieverlustoptimierung, welche die Fahrwiderstandsverluste und Traktionskomponentenverluste berücksichtigt a) Verschiedene Varianten für die Geschwindigkeitsreduktion b) Darstellung der Verlustenergie, der Energieverlustoptimierung des hier betrachteten Falles. Hierbei entspricht 100 % der Summe aus den Fahrwiderstandsverlusten + Traktionskomponentenverlusten bei der kürzesten Fahrzeit für diesen Abschnitt. Die violette Linie beschreibt die Komponentenverluste, die orangene Linie die Fahrwiderstandsverluste und die schwarze Linie zeigt die Summe dieser beiden Verluste.	96
Abbildung 61 Darstellung der Verlustenergie der Optimierungen zweier Fahrzeuge und beider Fälle im Vergleich. Fall 1: Optimierungskriterium: nur Fahrwiderstandsverluste Fall 2: Optimierungskriterium: Summe aus den Fahrwiderstandsverlusten und Traktionskomponentenverlusten.	97
Abbildung 62 Darstellung eines Geschwindigkeits-Weg-Diagrammes (Teil a)) und des dazugehörigen Höhenprofils (Teil b)). Dabei verdeutlicht das Geschwindigkeits-Weg-Diagramm verschiedene Fahrprofile.....	99
Abbildung 63 Optimierte Fahrprofile, welche sich an das Gelände anpassen und entweder einen geringeren Energieverbrauch und/oder eine geringere Fahrzeit aufweisen, als eine Fahrt mit einer konstanten Geschwindigkeit.	100
Abbildung 64 Energieverlustreduktion und Fahrzeitreduktion der verschiedenen Varianten mit Gesamtenergie-optimierter Fahrweise im Vergleich zu der Fahrweise mit konstanter Geschwindigkeit.	101
Abbildung 65 Darstellung eines Geschwindigkeits-Weg-Diagrammes (Teil a)) und des dazugehörigen Höhenprofils (Teil b)) für diesen hier betrachteten Fall.....	101
Abbildung 66 Varianten für diesen Fall bei einer Optimierung, welche nur die Fahrwiderstände berücksichtigt.....	102
Abbildung 67 Varianten für diesen Fall bei einer Optimierung, welche nur die Fahrwiderstände berücksichtigt.....	102
Abbildung 68 Varianten für diesen Fall bei einer Optimierung, welche nur die Fahrwiderstände berücksichtigt.....	103

Abbildung 69	<i>Verschiedene Varianten für eine Fahrt zwischen zwei Bahnhöfen, bei einer Energieverlustoptimierung, welche die Fahrwiderstandsverluste und Traktionskomponentenverluste berücksichtigt.....</i>	104
Abbildung 70	<i>Verschiedene Varianten für eine Fahrt zwischen zwei Bahnhöfen, bei einer Energieverlust-optimierung, welche nur die Fahrwiderstands-verluste als Kriterium berücksichtigt.....</i>	105
Abbildung 71	<i>Vergleich der Energieverlust-reduktion in Abhängigkeit der Fahrzeitverlängerung bezogen auf den Gesamtenergieverbrauch ohne Fahrzeitverlängerung</i>	105

7.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	<i>Vor- und Nachteile von Fahrzeugkonzepten im Zusammenhang mit der Motoraufteilung.....</i>	46
Tabelle 2	<i>Zunahme bzw. Abnahme des Fahrwiderstandes ausgehend von 100 %, mit der vereinfachten rein quadratischen Formel und der genauen Formel</i>	52
Tabelle 3	<i>Fahrzeugdaten der SBB Güterwagen Habilis Typ B und des SBB Güterwagen Rs, übernommen aus den Quellen: SBB Cargo (2020a) und SBB Cargo (2020b).....</i>	54
Tabelle 4	<i>Beispielhafte vereinfachte Vergleichstabelle der verschiedenen Pfade. Es werden die Pfadnummern genannt und der jeweilige Verlauf des Pfades mit seinem Startwert, Zwischenwert und Zielwert.</i>	61
Tabelle 5	<i>Vergleichstabelle Energieverlustreduktion in Bruttotonnenkilometer (Wh/tkm) der Gesamtenergie-verlustreduktion bei verschiedenen Randbedingungen für eine Fahrt von einem Startbahnhof zu einem Zielbahnhof</i>	106

7.4 Formelverzeichnis

Formel 1	31	Formel 11	41	Formel 21	61
Formel 2	32	Formel 12	41	Formel 22	68
Formel 3	33	Formel 13	42	Formel 23	72
Formel 4	33	Formel 14	42	Formel 24	73
Formel 5	33	Formel 15	42	Formel 25	73
Formel 6	35	Formel 16	42	Formel 26	73
Formel 7	41	Formel 17	49	Formel 27	108
Formel 8	41	Formel 18	50	Formel 28	115
Formel 9	41	Formel 19	51		
Formel 10	41	Formel 20	55		

7.5 Literaturverzeichnis

- Baly (2005) *Reibung fettgeschmierter Wälzlager*. Universität Hannover
- BAV (2015) *Schweizerische Fahrdienstvorschriften FDV - Neuausgabe des Bundesamts für Verkehr vom 01.07.2015*. Bern: Bundesamt für Verkehr
- BAV (2020) *Umsetzung der Energiestrategie 2050 im öffentlichen Verkehr, Programm ESÖV2050, Aktivitäten 2019*. Bern: Bundesamt für Verkehr
- Blesl, M; Kessler, A (2017) *Energieeffizienz in der Industrie*. Springer Vieweg
- Bojoi, R; Armando, E; Pastorelli, M, Lang, K (2016) *Efficiency and Loss Mapping of AC Motors using Advanced Testing Tools*. IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers. ISBN: 978-1-5090-2538-1
- DB (2020) *DB investiert eine Milliarde in neuen ICE*. Berlin: Deutsche Bahn AG
- Filipovic, Z (2005) *Elektische Bahnen*. Berlin - Heidelberg: Springer-Verlag
- Graffagnino, T; Schäfer, R; Tuchschen, M; Weibel, M (2019) *Energy Savings with Enhanced Static Timetable Information for Train Drivers*. Bern: Swiss Federal Railways / Bern: Bundesamt für Verkehr
- Geber, M; Drabek, E, Müller, R (1991) *Die Lokomotiven 2000 - Serie 460 - der Schweizerischen Bundesbahnen*. Schweizerische Eisenbahn-Revue Heft 10/1991
- González-Gil, A; Palacin, R; Batty, P; Powell, J.P. (2014) *A systems approach to reduce urban rail energy consumption*. Energy Conversion and Management
- Hering E, Vogt A, Bressler K (1999) *Handbuch der elektrischen Anlagen und Maschinen*. Berlin Heidelberg. Springer
- Huggenberger, T (2016) *Modernisierung der Lokomotiven Re460 mit IGBT-Stromrichtern*. Elektrische Bahnen 114, Ausgabe 8–9 (2016), S. 485–48
- Huggenberger, T (2017) *IGBT-Stromrichter verlängern die Lebensdauer der Lokomotiven Re460*. Baden-Dättwil Schweiz: ABB Review
- Ichikawa, Kunihiko (1968) *Application of Optimization Theory for Bounded State Variable Problems to the Operation of Train*. Bulletin of JSME
- Janicki, J., Reinhard, H., (2008) *Schienenfahrzeugtechnik*. Heidelberg Mainz: Bahn Fachverlag
- Kallenbach, E; Eick, R; Quendt, P; Ströhla, T; Feindt, K; Kallenbach, M (2008) *Elektromagnete*. Wiesbaden: Vieweg Teubner
- Kray, T (2008) *Untersuchungen über die Strömungsvorgänge bei rotierenden glatten Kugeln und Fussbällen*. Universität Siegen

Kurz, H R (1991) *Der Hochgeschwindigkeitszug Intercity-Express und künftige Weiterentwicklungen der Deutschen Bundesbahn*. Schweizer Eisenbahn-Revue 6/1991

Leitzmann (1897) *Berechnung der Verbundlokomotiven und ihres Dampfverbrauches*

Lok (1923) *Über den Mehrverbrauch an Kohle und die Mehrkosten für das Anhalten in Stationen gegenüber dem Durchfahren derselben*. Lok 1923. S. 82

Lüders (1882) *Die neuere Theorie der Dampfmaschine und des Dampfverbrauchs*

Mahmoudi, A; Soong, W L; Pellegrino, G; Admando, E (2015) *Efficiency Maps of Electrical Machines*. IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Meyer, M (1990) *Über das Netzverhalten von Umrichterlokomotiven Teil 1 & 2*. Schweizer Eisenbahnrevue. Heft 1990/8 & Heft 1990/10

Meyer, M; Menth, S; Lerjen, M (2007) *Potentialermittlung Energieeffizienz Traktion bei den SBB*. Ittingen: Schlussbericht im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Elektrizität

Meyer, M (2020) Vorlesung Eisenbahn

Nold, M (2018a) Energieeinsparung durch Optimierung der Ventilationssteuerung. Bern: Bundesamt für Verkehr

Nold, M (2018b) Geschwindigkeitsregler für Züge mit Längsschwingungen. Eisenbahn Revue 12/2018

Nold, M; Jung, M; Klar, O (2018) Traktionsoptimierungen bei der Gmf 4/4 II. ZEVrail 2018 (Jahrgang 142) Ausgabe 11/12

ÖBB (2008) *Railjet Technische Kurzbeschreibung*. ÖBB-CI & M Werbeagentur GmbH im Auftrag der ÖBB-Personenverkehr AG

Peters, J-L (1990) *Bestimmung des aerodynamischen Widerstandes des ICE/V im Tunnel und auf freier Strecke durch Auslaufversuche*. Eisenbahntechnische Rundschau

Peters, S; Kalweit, A; Paul, C; Wallbaum, R (2012) *Handbuch für technisches Produktdesign*. Springer Heidelberg Dordrecht London New York

Railway Magazine (1934) *Water pick-up troughs*. The Railway Magazine

RDR (1996) *Richtlinie 96/48/EG des Rates vom 23. Juli 1996 über die Interoperabilität des transeuropäischen Hochgeschwindigkeitsbahnsystems*. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft Nr. L 235/6

Rosberg, T; Thorslund, B; Lindström, A (2020) *Analysis and comparison of simulated and real train driving in an Automatic Train Protection (ATP) system environment*. Proceedings of 8th Transport Research Arena TRA 2020, April 27-30, 2020, Helsinki, Finland

SBB (2015) *Regelwert SBB R I-30131*. SBB AG, BLS Netz AG und SOB AG

SBB (2020) *Ausrüstung Reisezugwagen (Rollmaterial)*. SBB. Abgerufen am 12.08.2020 von <https://data.sbb.ch/explore/dataset/rollmaterial/export/>

SBB Cargo (2020a) *Datenblatt Habilis Typ B*. SBB Cargo. Abgerufen am 12.08.2020 von <https://www.sbccargo.com/de/kundencenter/tools/wagentypen-suche/habils-b.html>

SBB Cargo (2020b) *Datenblatt Rs*. SBB Cargo. Abgerufen am 12.08.2020 von <https://www.sbccargo.com/de/kundencenter/tools/wagentypen-suche/rs.html>

Schweers, H; Wall, H; Wessels, M; Würdig, T (2012) *Eisenbahnatlas Schweiz*. Aachen: Verlag Schweers + Wall GmbH. ISBN: 978-3-89494-130-7

Siemens (2016) *Velaro Top-Performance für den Hochgeschwindigkeitsverkehr*. München: Siemens AG

SKF (2020) Laufwiderstände in Wälzlagern. SKF Evolution 2020. Abgerufen am 16.09.2020 von <https://evolution.skf.com/de/laufwiderstand-in-walzlagern-ein-weiterentwickeltes-berechnungsverfahren/>

Specovius J (2009) *Grundkurs Leistungselektronik*. Vieweg Tübner Verlag

Stadler (2018) *Elektrischer Hochgeschwindigkeitstriebzug Smile*. Bussnang: Stadler Bussnang AG

Steimel, A (2006) *Elektrische Triebfahrzeuge und ihre Energieversorgung*. München: Oldenburg Industrieverlag

Stoker, Gilbert J. (1901) *Locomotive Water Supply: Ramsbottom's Pick-Up Apparatus* The Railway Magazine

Tuchschmid (2019) Entwicklung und Betriebstest von Fahrempfehlungen. Bern: Bundesamt für Verkehr

Veigel M (2018) *Ein neues Modell zur Berechnung der fertigungsabhängigen Ummagnetisierungsverluste in Synchronmaschinen*. Karlsruher Instituts für Technologie

Wägli, H G (2010) *Schienennetz der Schweiz*. AS Verlag. ISBN: 978-3-909111-74-9

--- Ende des Dokuments ---