

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN Vienna University of Technology

Diplomarbeit

Erstellung eines Berechnungstools für die Bremsperformance von Straßenbahnen – "Bremssim"

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Manfred Grafinger

(E307 Institut für Konstruktionswissenschaften und Technische Logistik, Bereich: Maschinenbauinformatik und Virtuelle Produktentwicklung)

Dipl. Ing Herbert Giefing

(Siemens AG Österreich, Mobility)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von





Wien, im Juli 2018

Roman Schwarz



TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN Vienna University of Technology

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

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

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

Wien, im Juli 2018

Roman Schwarz

Danksagung

Besonders Danken möchte ich meiner Partnerin Corinna für die Unterstützung in lernreichen Zeiten und den mentalen Support während des Schreibens dieser Arbeit. Auch aufgrund des Bewusstseins für ein gutes Layout und eine sinnvolle Anordnung von Texten, dass sie mir lehrte. Ein besonderer Dank gebührt meiner Familie für die laufende Unterstützung während meines Studiums und meiner Abschlussarbeit, ohne sie wäre es mir nicht möglich gewesen, es in dieser kurzen Zeit und mit diesem Fokus zu absolvieren.

Aufgrund des guten Teamgeists innerhalb der Siemens Bremse Abteilung war es mir möglich viele Hintergrundinformationen zu bekommen und ein angenehmes Arbeitsklima vorzufinden. Besonders danken möchte ich dabei Herrn Dipl.-Ing. Giefing und Herrn Hörmann für die laufende Betreuung während des Projektes und, dass sie sich trotz hoher Auslastung immer Zeit für meine Probleme und Fragen genommen haben.

Auf universitärer Seite gilt meine Würdigung dem Einsatz von Herrn Dr. Stribersky, der mich in den Schienenfahrzeugtechnik-Vorlesungen für das Thema begeistern konnte und mich auch während des Verfassens meiner Masterarbeit unterstützte. Herrn Dr. Grafinger möchte ich als meinen Diplomarbeitsbetreuer besonders hervorheben und ihm für die guten Vorgaben und die ausführliche Betreuung danken.

Abschließend möchte ich noch meiner Hündin Mali für die Ablenkung und das "Kopf freibekommen" danken. Ohne regelmäßige Spaziergänge hätte ich keine so klaren Gedanken fassen können.

Kurzfassung

Die Diplomarbeit hat die Erstellung eines Berechnungstools ("Bremssim") für Straßenbahnen zur Bremsauslegung und den theoretischen Nachweis der Bremsperformance sowie deren Präsentation in Form einer Microsoft-Excelausleitung zum Inhalt.

Die Simulation ist konzipiert für die Siemens Avenio Straßenbahnplattform. Diese verfügt über verschiedene Bremssysteme. Das Tool ist in der Lage die unterschiedlichen Konfigurationen dieser Bremssysteme zu steuern und die entsprechenden Bremsanforderungen im Simulationsprogramm umzusetzen. Dabei sollen verschiedene Bremsungsarten und Ausfallszenarien möglich sein und es soll eine vereinfachte Bremssteuerung implementiert werden. Dabei ist das Gesamtsystem Straßenbahn mit seinen Komponenten einfach zu modellieren und zu konfigurieren. Die zugehörige Benutzeroberfläche ist bezüglich der Eingabe übersichtlich gestaltet. Ebenfalls bedient sich die Simulation sämtlicher normativer Anforderungen und liefert somit eine gute Näherung an den tatsächlichen Bremsvorgang.

"Bremssim" ist in Microsoft Visual Studio entstanden und in der Programmiersprache C# ausgeführt. Die Anforderungen, Use-Cases und Klassen sind mit ihren Funktionen in dieser Arbeit dokumentiert. Sequenzdiagramme beschreiben die Abläufe eines Use-Cases im Code. Der Quellcode selbst ist in der Arbeit nicht angeführt, jedoch sind viele Abbildungen der fertigen Software enthalten.

Die Ergebnisse der Berechnung bieten einen guten Überblick über sämtliche Bremsfälle bei der Fahrzeugzulassung und ermöglichen die Bestimmung bzw. Auswahl der Bremskomponenten. Das Tool kann auch per Klick eine Microsoft Excel Ausleitung erstellen, die als Vorlage direkt für Behördendokumente gilt.

Zielsetzung dieser Arbeit ist somit eine produktive, angepasste Software, die Eingaben verarbeitet und daraus einerseits eine Vorlage für das behördentaugliche Dokument ausgibt und andererseits Aufschluss über die Ergebnisse der einzelnen Bremsfälle liefert.

Abstract

This thesis aims to create a brake calculation tool ("Bremssim") for trams to assess the brake performance and present it in a Microsoft Excel document.

The simulation is drafted for the Siemens Avenio tram platform. This tram type consists of multiple brake systems. The tool can configure those in different combinations and is able to imitate a simple brake control in the simulation program. Different brake and failure scenarios can be created and controlled. The total system tram can be modeled and configured with the simulation software. The calculation has a clearly arranged input scheme and it follows all normative rules for train brakes in trams. The output is a good approximation to real life brake applications.

"Bremssim" was created in Microsoft Visual Studio in the programming language C#. The requirements, use-cases and classes with their methods and properties are documented in the thesis. Sequence diagrams describe the sequence of the use-cases in the code. The source code itself is not pictured in this work. However, there are many reproductions of the completed software included.

The output of "Bremssim" is an overview of all brake scenarios and especially those which are needed for the tramway admission. It also determines useful brake components. The tool can create oneclick Microsoft Excel documents, that can be used for authority documents.

The thesis aims to create a productive and perfectly suitable software that processes the inputs and delivers the template for authority documentation and on the other side shows and describes the results of each brake case.

1. Inhaltsverzeichnis

2.	Einleitung			
2	.1	The	ma	9
2	.2	Stan	d der Technik und Motivation	9
2	.3	Met	hodenteil	. 10
3.	Besc	chreil	oung des Systems und der verwendeten Komponenten	. 11
3	.1	Stra	ßenbahntyp	. 11
3	.2	Fahr	werkstypen	. 11
	3.2.2	1	Triebfahrwerk	. 12
	3.2.2	2	Lauffahrwerk	. 12
	3.2.3	3	Sonderfahrwerk	. 13
3	.3	Brer	nssysteme	. 13
	3.3.2	1	Elektrohydraulische Scheibenbremse (EH Bremse)	. 13
	3.3.2	2	Elektrodynamische Bremse (ED Bremse)	. 15
	3.3.3	3	Magnetschienenbremse (MG Bremse)	. 15
	3.3.4	4	Überlagerung - Blending	. 16
3	.4	Brer	nsbedingungen	. 16
	3.4.2	1	Bremsaufbau	. 16
	3.4.2	2	Neigung (i)	. 17
	3.4.3	3	Kraftschlusswert (τ)	. 17
	3.4.4	4	Lastannahmen	. 18
3	.5	Brer	nssteuerung	. 19
3	.6	Brer	nsungsarten	. 20
	3.6.2	1	Betriebsbremsung	. 20
	3.6.2	2	Ersatzbremsung (Betriebsbremsung mit Ausfall einer ED-Bremse)	. 21
	3.6.3	3	Maximale Betriebsbremsung	. 22
	3.6.4	4	Notbremsung	. 22
	3.6.5	5	Sicherheitsbremsung	. 23
	3.6.0	6	Schienenbremsung	. 24
	3.6.7	7	Ausfallszenario	. 24
	3.6.8	8	Bremsmatrix	. 25
	3.6.9	9	Bremsfall	. 26
4.	Berechnu		ing	. 27
4	.1	Auft	oau der Bremskräfte	. 27
4	.2	Bere	echnung der Bremskraft	. 27
	4.2.2	1	Bremskraft der elektrodynamischen Bremse	. 27

	4.2.2	2 Bremskraft der aktiven Scheibenbremse	. 29
	4.2.3	Bremskraft der passiven Scheibenbremse	. 29
	4.2.4	Bremskraft der Magnetschienenbremse	. 29
	4.2.5	Tatsächliche Bremskraft nach Bremssteuerung	. 30
4	.3	Aufteilung der Bremskräfte bei der Radkombination aus zwei Rädern	. 31
4	.4	Externe Kräfte	. 31
	4.4.1	Rollwiderstand/ Laufwiderstand	. 31
	4.4.2	2 Windkraft	. 34
4	.5	Hangabtriebskraft (Fg)	. 35
4	.6	Beschreibung der Parameter	. 35
	4.6.1	Massen (EN14531-1, 2015)	. 35
	4.6.2	2 Verzögerungen	. 35
	4.6.3	3 Rucke	. 38
	4.6.4	Anhalte- Verzögerungsbremsweg (s)	. 38
	4.6.5	5 Anhaltezeit (t)	. 39
	4.6.6	5 Erforderlicher Kraftschlusswert $ au_{req,ax}$. 39
	4.6.7	7 Übertragbare Bremskraft F _{Büb,ax}	. 40
	4.6.8	3 Werte pro Zeitschritt	. 40
5.	Ums	etzung in der Programmierung	. 41
5	.1	Requirements Model (Anforderungsmodell)	. 41
	5.1.1	Anforderungen an die Berechnung	. 42
	5.1.2	2 Anforderungen an das User-Interface	. 42
	5.1.3	3 Anforderungen an die Eingabe	. 44
	5.1.4	Anforderungen an die Ausgabe	. 45
5	.2	Class Model (Klassenmodell)	. 51
	5.2.1	Bremssystem	. 51
	5.2.2	2 Grafische Oberfläche	. 51
5	.3	Use-Case Model (Durchführungsmodell)	. 52
	5.3.1	Startmaske	. 52
	5.3.2	2 Einstellungen	. 59
	5.3.3	8 Projektdefinition	. 63
	5.3.4	Bremsungsarten und Ausfallszenarios	. 75
	5.3.5	Komponentenmanagement	. 84
	5.3.6	Einstiegsmaske	. 90
	5.3.7	Zugkonfiguration	. 91
	5.3.8	Bremseinheiten	. 99

	5.3.9	9	Beladungszustand	100	
	5.3.	10	Projektbremsparameter		
	5.3.3	11	Bremsfallmaske		
	5.3.3	12	Bremsberechnung	117	
	5.3.3	13	Bremsergebnisse	117	
6.	Test	– Ve	ergleichsrechnung	123	
	6.1	Abla	auf	123	
	6.2	Defi	inition der zu testenden Bremsfälle	123	
	6.3	Zu v	ergleichende Parameter	123	
	6.4	Dok	umentation der Abweichungen	124	
	6.5	Spez	zielle Vergleiche	127	
	6.5.3	1	Betriebsbremsung 70km/h leer	127	
	6.5.2	2	Notbremsung 3 70km/h VDV 2/3	129	
	6.5.3	3	Schienenbremsung 70km/h leer	131	
7.	Zusa	amme	enfassung		
8.	Ausl	olick.		135	
9.	Liter	Literaturverzeichnis			
1(). Abbildungsverzeichnis				
11	L. Fo	orme	lverzeichnis		

2. Einleitung

2.1 Thema

"Bremssim" ist eine für die Siemens Straßenbahnplattform Avenio spezifizierte Simulationssoftware, die auf Grundlage der EN 14531-2:2015 (EN14531-2:2015, 2015) basiert und für die Zulassung von Straßenbahnen nach BOStrab TR Br (BOStrab_TR_Br, 2008) und EN 13452-1:2003 (EN13452-1:2003, 2003) gelten soll. Die Software basiert auf einer in C# objektorientiert programmierten grafischen Oberfläche mit Berechnungskern. Die Berechnung erfolgt dabei schrittweise mittels Zeitintegration wie es die Norm beschreibt. Aufgrund der (laut Norm) ausreichenden Genauigkeit muss kein komplexeres Integrationsverfahren eingesetzt werden.

Die Forschungsfrage lautet daher: "Wie erstellt man eine Software zur Bremssimulation des Straßenbahntyps Siemens Avenio und was muss sie beinhalten?".

2.2 Stand der Technik und Motivation

Da die Schienenfahrzeugbranche aus wenigen Big Playern besteht, die sehr viel Know-How angesammelt haben, existieren verschiedene firmeninterne Simulationssoftwaren. Das Unternehmen Siemens AG Österreich besitzt bereits ein Simulationsprogamm, welches ursprünglich für einen anderen Straßenbahntyp konzipiert wurde und sich in der Usability als sehr mühsam herausstellt. Die Programmierung ist nicht objektorientiert, somit sind sämtliche Änderungen mit großem Aufwand verbunden. Weiters gibt es keine Dokumentation des Softwareerstellungsprozesses. Um nicht beeinflusst zu werden, entstand "Bremssim" völlig unabhängig von der vorhandenen Software und wurde erst später für die Vergleichsrechnungen herangezogen. Mit "Bremssim" soll es möglich sein sämtliche relevanten Bremsfälle in einem Bruchteil der Zeit gegenüber dem alten Simulationsprogramm zu berechnen, eine Bremssteuerung, die Funktionen wie einen Verzögerungsregler beherbergt, zu implementieren und eine normativ korrekte Berechnung zu erhalten. Meine Motivation mich mit dem Thema zu beschäftigen besteht darin, dass ich sehr interessiert am System Schienenfahrzeugbau und vor allem der dabei verwendeten Bremsen bin. Weiters habe ich mich im Zuge eines Praktikums bereits mit einer Bremsberechnung, die nicht schrittweise erfolgte und nur überschlagsmäßige Ergebnisse in Excel brachte, beschäftigt. Meine Programmierkenntnisse in C# waren davor eher durchschnittlich und das wollte ich im Zuge dieser Arbeit deutlich verändern. Um eine solche Software zu konzipieren bedarf es jedoch eines systematischen Verständnisses des Bremssystems einer Straßenbahn. Darin lag für mich die größte Motivation.

2.3 Methodenteil

Die Vorgehensweise zur Entwicklung der Software passierte angelehnt an das Wasserfallmodell. Die Phase des Betriebes und der Wartung erfolgte nur zum Teil im Rahmen dieser Diplomarbeit.



Abbildung 1: Wasserfallmodell (Fritzsche & Keil, 2007)

Am Beginn der Arbeit wurde viel Zeit in das Literaturstudium der Schienenfahrzeugbau Fachliteratur, der objektorientieren Programmierung und in das Videostudium von "Enterprise Architect" investiert. Bei "Enterprise Architect" (EA) handelt es sich um ein Softwaremodellierungswerkzeug der Firma SparxSystems Ltd. Weiters wurde mit dem Beispiel einer Schulungsliste für die Kursverwaltung versucht den Funktionsumfang und die Vorgehensweise mit der Dokumentationssoftware zu verstehen. Fortgesetzt wurde mit dem Aufbau des Anforderungsmodells, dem Nachvollziehen von Use-Cases und daraus wurde ein funktionales Klassenmodell in EA generiert. Mit den darin festgelegten Klassen, Attributen und Methoden sollte der Funktionsumfang der Software gegeben sein. Dieses Klassenmodell ist im Prinzip eine Abbildung der Systemkomponenten der Straßenbahn inklusive zusätzlich benötigter Elemente, beispielsweise für die Speicherung von Daten. Im Anschluss wurde die Programmierung ohne grafische Oberfläche gestartet und der Berechnungskern mit lediglich einem Ausgabeenster zur Kontrolle der Ergebnisse erstellt. Nachdem sich die Berechnung mit dem damaligen Umfang als korrekt darstellte, wurde mit dem Aufbau der grafischen Oberfläche (GUI) begonnen. Dabei gab es jedoch etliche Rückkopplungseffekte und der Berechnungskern musste noch einige Male überarbeitet werden. Davor war es nur möglich die Eingabedaten direkt im Quellcode zu verarbeiten. Nun wurde besonderes Augenmerk auf die einfache Konfiguration des Zuges und die praktische Eingabe der Daten gelegt. Es wurden laufend Vergleichsrechnungen gemacht um die Korrektheit zu prüfen. Am Ende wurde ein vollständiges, bereits durchgerechnetes und im Betrieb befindliches Projekt zum endgültigen Vergleich herangezogen und mehrere aktuelle Projekte mit "Bremssim" parallel zu einer anderen Simulation berechnet. Der Vergleich erfolgte einerseits mit der alten Rechnung wohlwissend ihrer Probleme und mit Typtests.

3. Beschreibung des Systems und der verwendeten Komponenten

3.1 Straßenbahntyp

Wie bereits in der Einleitung beschrieben soll die Bremssimulationssoftware dazu in der Lage sein, die verschiedenen Bremssysteme bei Straßenbahnen des Standardtyps Siemens Avenio abzubilden. Grundsätzlich sind drei Bremssysteme typisch für Straßenbahnen – die elektrohydraulische Scheibenbremse (in zwei verschiedenen Ausführungen), die elektrodynamische Bremse und die Magnetschienenbremse. Das vorgestellte Fahrzeug ist in zwei Ausführungen verfügbar, dabei besitzt entweder jeder Zugteil ein Fahrwerk oder es gibt Mittelwägen ohne Fahrwerk. Diese sind sozusagen zwischen zwei Zugteilen mit Fahrwerk "aufgehängt". Zusätzlich dazu gibt es verschiedene Kombinationen, die die Anzahl der Zugteile (Wägen) beschreiben. All diese Variationen kann die entwickelte Software abbilden. Die darunterliegenden Grafiken zeigen den Unterschied zwischen der Variante ohne und mit Mittelmodul.

Bei der Siemens Avenio Straßenbahn gibt es folgende Zugtypen zur Auswahl (Spörl, et al., 2010):

- 2-Teiler
- 3-Teiler
- 4-Teiler
- 5-Teiler
- 5-Teiler M
- 7-Teiler M
- 9-Teiler M
- 11-Teiler M



Abbildung 2: Siemens Avenio 3-Teiler (Siemens, 2017)



Abbildung 3: Siemens Avenio M 5-Teiler (Siemens, 2017)

3.2 Fahrwerkstypen

Bei Straßenbahnen kommen verschiedene Typen von Fahrwerken (Drehgestelle) mit unterschiedlichen Anforderungen zum Einsatz. Die Software ist in der Lage, sämtliche Typen und ihre verknüpften Parameter abzubilden. Es wird zwischen:

- Triebfahrwerken
- Lauffahrwerken
- Sonderfahrwerken

unterschieden. In der darunterliegenden Abbildung ist ein Avenio 4-Teiler abgebildet. Die Abbildung des Triebfahrwerks (er besitzt drei) und des Lauffahrwerks (er besitzt eines) befindet sich darüber.



Abbildung 4: Triebfahrwerk und Lauffahrwerk Avenio München (Ihme, 2016, p. 193)

Im Folgenden möchte ich näher auf die oben vorgestellten Fahrwerkstypen eingehen.

3.2.1 Triebfahrwerk

Die Triebfahrwerke besitzen zwei im Drehgestellrahmen komplett federnd aufgehängte Antriebseinheiten. Dabei besitzt jede Antriebseinheit zwei Getriebe, zwei Kupplungen und einen Motor. Jedes Getriebe treibt ein Losrad an. In der darüberliegenden Abbildung kann man gut erkennen, dass die beiden Getriebe außen am Rad befestigt sind. Die beiden Antriebseinheiten eines Drehgestelles sind durch einen Stromrichter versorgt, deshalb werden pro Drehgestell immer dieselben Antriebe verbaut. Zwei Magnetschienenbremsen befinden sich üblicherweise auf einem Fahrwerk. Ebenfalls am Triebfahrwerk verbaut sind zwei Federspeicherbremsen (passive Scheibenbremsen), die direkt auf die Motorwelle wirken. Ein Hydrogerät versorgt die beiden passiven Scheibenbremsen mit dem entsprechenden Bremsdruck. (Spörl, et al., 2010) "Die Federspeicherbremse wirkt nicht als Betriebsbremse, sondern nur als Ersatzbremse und Parkbremse. Deshalb ist die Bremsscheibe nahezu verschleißfrei und als Vollscheibe auch besonders geräuscharm." (Spörl, et al., 2010, p. 107)

Typisch für den hier behandelten Straßenbahntyp sind zwei Radsatzpaare, die in Längsrichtung durch die Motorwelle gekoppelt sind und die eine Radkombination ergeben. Somit ist das linke hintere Rad mit dem linken vorderen Rad verbunden und genauso das rechts Hintere mit dem rechts Vorderen.

3.2.2 Lauffahrwerk

Das Lauffahrwerk besitzt keine angetriebenen Räder und deshalb auch keine elektrodynamische Bremse. Die Laudrehgestelle basieren auf demselben Drehgestellrahmen wie die Triebdrehgestelle. Die Lauffahrwerke bestehen ebenfalls aus Losrädern wobei diese nicht gekoppelt sind. An jedem Rad befindet sich eine aktive Scheibenbremse. (Spörl, et al., 2010)

3.2.3 Sonderfahrwerk

Sonderfahrwerke bieten eine Mischform aus Triebfahrwerk und Lauffahrwerk. Es gibt sowohl angetriebene als auch nicht angetriebene Räder. Falls Radpaare angetrieben werden, können diese sowohl in Längsrichtung als auch in Querrichtung gekoppelt sein. Das Sonderfahrwerk wird zusätzlich zu den Standardfahrwerken geschaffen, um spezielle Bauformen, die in der Praxis selten aber doch vorkommen, nachbilden zu können.

3.3 Bremssysteme

In der darunterliegenden Übersicht kann man die verschiedenen Bremsen, die bei Schienenfahrzeugen eingesetzt werden können, erkennen. Wichtig für die Berechnung ist dabei die Unterscheidung zwischen Kraftschlussabhängigkeit und -unabhängigkeit.



Abbildung 5: Übersicht über Schienenbremssysteme (Janicki, 2018)

Im Folgenden möchte ich auf die in der Berechnung verwendeten Bremssysteme eingehen und diese genauer beschreiben. Klotzbremsen, hydrodynamische Bremsen und lineare Wirbelstrombremsen werden im Weiteren nicht mehr beachtet, da sie im Siemens Avenio Fahrzeug keine Anwendung finden.

3.3.1 Elektrohydraulische Scheibenbremse (EH Bremse)

Bei Straßenbahnen in Niederflurtechnik werden gerne hydraulische Bremssysteme anstatt pneumatischer Bremssysteme eingesetzt, besonders aufgrund der engen Platzverhältnisse im Drehgestell. (Janicki, et al., 2013). Die hydraulischen Komponenten sind wesentlich kleiner als die sperrigen Luftbeschaffungs- und Aufbewahrungselemente (Druckluftbehälter).

Die Bremskraft wird dabei mit Bremsbacken auf eine Bremsscheibe übertragen. Scheibenbremsen könne sowohl auf der Radwelle (Wellenbremsscheiben) als auch direkt am Rad (Radbremsscheiben) angebracht werden. (Janicki, et al., 2013)

Die hydraulisch betriebene Scheibenbremse kann auf zwei Arten betrieben werden. Einerseits als aktive Bremse, dabei wird direkt mit dem hydraulischen Druck die Bremskraft aufgebaut. Andererseits als passive Bremse, hierbei wird der hydraulisch aufgebaute Druck zum Lösen der Feder verwendet. (Gfatter, et al., 2007)

Die darunterliegende Abbildung zeigt ein Niederflur Triebdrehgestell, jedoch nicht von einem Siemens Avenio Fahrezug. Allerdings erkennt man dabei die geringen Platzverhältnisse und man versteht die Notwendigkeit von Hydraulik anstatt Pneumatik.



Abbildung 6: Niederflur Triebdrehgestell mit hydraulischer Federspeicherbremse (Janicki, et al., 2013)

Im Folgenden möchte ich beide Systeme noch besser beschreiben.

3.3.1.1 Aktive Scheibenbremsen (Aktivsattelbremse)

Die aktiven Scheibenbremsen eines Lauffahrwerks werden von einem Hydrogerät versorgt, d.h. es muss auf jeder Bremseinheit derselbe Bremsdruck anliegen. Die Regelung der Bremskraft erfolgt über ein Proportional-Druckbegrezungsventil. Der hydraulische Druck ist stufenlos mittels eines elektrischen Sollwerts regelbar. (Spörl, et al., 2010) Anders als bei der passiven Bremse wirkt bei der aktiven Scheibenbremse der Druck des Hydrogerätes direkt auf die Bremsscheiben. In der darunterliegeden Abbildung erkennt man gut, dass ein Hydrogerät die vier aktiven Bremssättel versorgt.



Abbildung 7: Laudfahrwerk Avenio Bremsen (Spörl, et al., 2010, p. 203)

Die Aktivsattelbremse wird bei den Bremsungsarten "Notbremsung 3" und "Ersatzbremsung" eingesetzt. (Spörl, et al., 2010) Die Bremsungsarten sind in Kapitel 3.6 erläutert.

Roman Schwarz

3.3.1.2 Passive Scheibenbremsen (Federspeicherbremse)

Die passive Scheibenbremse ist auf der Motorwelle angebracht. Ein Hydrogerät erzeugt dabei den Bremslösedruck für beide Bremseinheiten an einem Fahrwerk. Der Vorteil und große Nutzen dieses passiven Bremssystems ist, dass im Störfall kein Bremslösedruck erzeugt wird und mit voller Federkraft gebremst wird. (Spörl, et al., 2010)

In der darunterliegenden Abbildung kann man gut die Wirkungsweise auf die Motorwelle erkennen und dass ein Hydrogerät die beiden Federspeichersättel eines Fahrwerks versorgt. Wichtig dabei ist noch festzuhalten, dass die Übersetzung des Getriebes hier berücksichtigt werden muss.



Abbildung 8: Triebfahrwerk Avenio Bremsen (Spörl, et al., 2010, p. 203)

Bei der passiven Scheibenbremse wird der Bremsdruck dafür eingesetzt, die Feder zu lösen. Es handelt sich dabei also um einen Lösedruck.

Dieses Bremssystem wird bei den Bremsungsarten "Ersatzbremsung" anstelle von ausgefallenen ED-Bremsen und bei "Sicherheitsbremsung" eingesetzt. (Spörl, et al., 2010)

3.3.2 Elektrodynamische Bremse (ED-Bremse)

Beim elektrodynamischen Bremsen werden die Antriebsmotoren in den Generatorbetrieb umgeschaltet, sie ermöglichen somit verschleißfreies Bremsen und wandeln die Bewegungsenergie in elektrische Energie um. Die elektrodynamische Bremse ist, wie die aktive und passive Scheibenbremse, vom Kraftschluss zwischen Rad und Schiene abhängig. (Gfatter, et al., 2007)

Die elektrodynamische Bremse wird beim Avenio als Betriebsbremse bis zur maximalen Beladung eingesetzt. Sie ist dabei so geregelt, dass die maximale Verzögerung konstant (Verzögerungsbegrenzung – B Regler) bleibt, wobei bei höherer Beladung die Verzögerung etwas abfällt. "Ein gleichzeitiges Zusammenwirken zwischen elektrodynamischer Bremse und mechanischer Bremse auf die gleichen Räder wird beim Avenio nicht durchgeführt (d.h. kein "Blending")." (Spörl, et al., 2010, p. 204) Wichtig ist hier, dass es nur am selben Rad nicht zum Einsatz mehrerer Bremssysteme kommt. Auf das ganze Fahrzeug betrachtet kommt es selbstverständlich zu einer Überlagerung von Bremssystemen.

Dieses Bremssystem wird für die Bremsungsart "Betriebsbremse", "Notbremse 1", "Notbremse 2", "Notbremse 3", "Notbremse 5" und "Ersatzbremsung" genutzt.

3.3.3 Magnetschienenbremse (MG Bremse)

Schienenbremsen übertragen die Bremskraft direkt zwischen sich selbst und der Schiene. Sie sind also nicht dem Kraftschluss zwischen Rad und Schiene untergeordnet. Magnetschienenbremsen

werden dabei magnetisch an die Schiene angezogen. Es tritt starker Verschleiß auf, weshalb die Magnetschienenbremse nur in Notfällen eingesetzt wird. Es ist keine Regulierung ihrer Bremskraft möglich, weshalb die Magnetschienenbremse nur 0% oder 100% ihrer Leistung abgeben kann. Die Leistung der Magnetschienenbremse ist geschwindigkeitsabhängig, bei niedrigen Geschwindigkeiten steigt die Bremskraft deutlich an. (Gfatter, et al., 2007)

Die Magnetschienenbremse wird bei der Bremsungsart "Notbremsung 3" und bei der "Schienenbremsung" aktiviert. (Spörl, et al., 2010)

3.3.4 Überlagerung - Blending

Als Überlagerung bezeichnet man das Zusammenspiel und die Abstimmung der Bremswirkung verschiedener Bremssysteme an einem Fahrzeug. Man will dabei erreichen, dass die geforderte Bremskraft über den gesamten Geschwindigkeitsbereich gegeben ist. Ebenfalls sind verschleißfreie Bremsen zu bevorzugen. Weiters sollen auch alle Radsätze gleichmäßig gebremst werden und es soll zu keinem Überschreiten des Kraftschlusswertes an einem Rad kommen. (Gfatter, et al., 2007)



Abbildung 9: Kraft - Wegdiagramm - zeigt die Überlagerung von elektrodynamischer und Reibungsbremse (EN14531-1, 2015)

Eine Überlagerung tritt in "Bremssim" bei der Regelung auf konstante Verzögerung auf und wird mit dem B-Regelwert in der Bremssteuerung realisiert. Wie bereits in 3.3.2 beschrieben, kommt es zu keiner radweisen Überlagerung, die auch als "Blending" bezeichnet wird.

3.4 Bremsbedingungen

3.4.1 Bremsaufbau

Hier kann man den Aufbau der Bremskraft eines beispielhaften Bremssystems erkennen. Bei Überlagerung mehrerer Bremssysteme sieht die Grafik dementsprechend anders aus. Für die Beschreibung und Berechnung des Bremsaufbaus wurde die EN 13452-1:2003 (EN13452-1:2003, 2003) hergenommen. Die EN 14531-2:2015 (EN14531-1, 2015) beschreibt zwar ebenfalls diesen Vorgang, aber verwendet andere Bezeichnungen für die jeweiligen Phasen. Der Fokus liegt hier jedoch eher auf der Vollbahn, während die EN 13452-1:2003 sich mit Straßenbahnen beschäftigt.



Abbildung 10: Bremsaufbau (EN13452-1:2003, 2003)

Neigung (i) 3.4.2

2

t10 tan

Normalerweise erfolgt die Berechnung der Bremsung für einen ebenen Streckenabschnitt, manchmal kann es jedoch gefordert sein, Bremsungen im Gefälle zu simulieren. (EN14531-1, 2015) Deshalb ist die Software auch dazu in der Lage, Bremsungen mit konstantem Gefälle nachzuweisen. Für gewöhnlich wird die maximale Streckenneigung der Betriebsstrecke getestet.

Kraftschlusswert (τ) 3.4.3

Unter dem Kraftschlusswert versteht man das Verhältnis zwischen Tangential- und Normalkraft an der Berührstelle zwischen Rad und Schiene. (EN13452-1:2003, 2003)

"Beim rechnerischen Nachweis der Gefahrbremsung ist von einem Kraftschlussbeiwert zwischen Rad und Schiene von höchstens 0,33 auszugehen. Unbeschadet hiervon ist der praktische Nachweis zu führen." (BOStrab_TR_Br, 2008, p. 10)

Da es normative Vorgaben an den Kraftschlusswert gibt, wie die darüber liegende aus der BOStrab TR Br (BOStrab_TR_Br, 2008), ist es notwendig, dass der Kraftschlusswert beschränkt werden kann. Dieses Limit ist mit unterschiedlichen Werten für Trieb- und Laufdrehgestelle möglich.

3.4.4 Lastannahmen

Es gibt mehrere Lastannahmen die normativ geregelt sind. Folgende drei gängigen Straßenbahnlastannahmen werden häufig verwendet:

• EL Laststufen nach EN 13452:2003-1

Laststufe	Erläuterung				
EL E	Betriebsbereiter Zug ohne Fahrgäste				
EL S	EL E + alle festen Sitzplätze besetzt				
ELT	EL E + alle Sitzplätze besetzt (einschl. Klappsitze)				
EL X	EL S + stehende Fahrgäste bei einer Anzahl von X/m ²				
	z. B.				
	EL 6 - 6 stehende Fahrgäste je m ²				
	EL 6.67 - entsprechend einer Nutzmasse von 500 kg/m ²				
	ANMERKUNG 1 Die Anzahl der stehenden Fahrgäste ist üblicherweise sehr viel größer als bei Fernzügen und kann auch zwischen verschiedenen Verkehrssystemen sehr unterschiedlich sein. Daher sind alle Lastannahmen dieser Norm empfohlene Mindestwerte für die Berechnung.				
	ANMERKUNG 2 EL = European Load E = Empty = leer S = Seats (fixed) = Sitze (fest) T = Tilting seats = Klappsitze X = Anzahl der stehenden Fahrgäste mit einer Dichte von X/m ²				
	ANMERKUNG 3 EL E schließt volle (Vorrats-) Behälter und den Fahrer ein.				

Abbildung 11: EL Laststufen (EN13452-1:2003, 2003)

- Die BOStrab (BOStrab_TR_Br, 2008) gibt folgende Beladungsstufen vor
 - Laststufe I / Betriebslast (leeres Fahrzeug) entspricht der "Eigenmasse des Fahrzeuges zuzüglich Betriebsstoffvorräte und die Personalmasse (80kg/Pers.)" (BOStrab_TR_Br, 2008, p. 14)
 - Laststufe II (Zweidrittellast) entspricht "der Betriebslast und 2/3 Nutzlast" (BOStrab_TR_Br, 2008, p. 14)
 - Laststufe II (Höchstlast) ergibt sich aus "der Betriebslast und der Nutzlast" (BOStrab_TR_Br, 2008, p. 14)
- Die VDV (VDV152, 10/2016)
 - Masse des Gesamtfahrzeuges entspricht "Leermasse des Gesamtfahrzeugs ohne Verbrauchsmaterialien und ohne Personen" (VDV152, 10/2016, p. 20)
 - Masse des betriebsbereiten Wagenkastens entspricht "Masse des betriebsbereiten Wagenkastens - Leermasse ohne Fahrwerkmassen zuzüglich Verbrauchsmaterial zuzüglich Zugpersonal (80 kg)" (VDV152, 10/2016, p. 20)
 - Masse der Fahrgäste bei normalen Besetzungsgrad entspricht "Gesamtmasse der Anzahl an Fahrgästen in einem Wagenkasten als Teillast (2/3) der maximal möglichen Masse" (VDV152, 10/2016, p. 20)
 - Masse der Fahrgäste bei außergewöhnlichem Besetzungsgrad entspricht "Maximal mögliche Gesamtmasse der Anzahl an Fahrgästen in einem Wagenkasten, stehend und sitzend" (VDV152, 10/2016, p. 20)

In der Praxis werden diese Lastfälle auch oft kombiniert. Gängige Bezeichnungen dafür sind beispielsweise "VDV 2/3", dies entspricht der zweidrittel Beladung aus der (BOStrab_TR_Br, 2008) wobei das Personengewicht und die Personen pro Fläche aus der (VDV152, 10/2016) stammen. Diese Werte sind aber in beiden Normen identisch.

Um genügend Flexibilität zu bieten ist die Software dazu in der Lage beliebige Bezeichnungen zu vergeben und eine unbegrenzte Anzahl an Beladungsfällen abzubilden und zu berechnen. Dies ermöglicht ein agieren auf sämtlichen internationalen Märkten und die Möglichkeit zukünftige Normänderungen miteinzubeziehen.

Roman Schwarz

3.5 Bremssteuerung

Die Bremssteuerung am Fahrzeug erfolgt zentral durch das Zugsteuerungsgerät (ZSG), welches einmal im Fahrzeug verbaut ist. Dieses gibt genau die Bremsanforderungen an die jeweiligen Komponenten weiter. Die Antriebsrechner (AR) sind jeweils pro Triebfahrwerk vorhanden. Der AR überwacht die Antriebe und steuert diese entsprechend den Bremssollwerten. Die einzelnen Antriebsrechner an den Triebfahrwerken werden über das ZSG gesteuert. Die Funktion des "B-Reglers" und der Ruckbegrenzung erfolgt über den Antriebsrechner. Die Ansteuerung des Hydrogerätes von Lauffahrwerksbremsen erfolgt zentral über das ZSG. Es ist somit in der Lage die aktiven Scheibenbremsen genau zu steuern und regeln. (Spörl, et al., 2010)

Beim "B-Regler" handelt es sich um einen Verzögerungssollwert, der eine Vorgabe für die maximale Verzögerung darstellt und die Bremssysteme so regelt, dass ihre Gesamtbremskraft genau diese Verzögerung erzeugt.

Moderne Straßenbahnen verfügen über ein rechnergestütztes Bussystem. "Der Bremssollwert wird rein elektrisch in das zentrale Steuergerät eingelesen, das die Bremssollwerte an Antriebs- und Bremssteuergerät weitergibt." (Janicki, et al., 2013, p. 554)

Die am Siemens Avenio Fahrzeug verbaute Bremssteuerung wirkt immer fahrwerksweise und liefert somit die gleiche Bremsanforderung an alle Bremseinheiten eines Typs und eines Fahrwerks. Es ist schon allein aufgrund des Hydrogerätes unmöglich die hydraulischen Bremseinheiten eines Fahrwerkes unterschiedlich anzusteuern.

Unterhalb befindet sich eine Abbildung, welche die Bremssteuerung schematisch darstellt. Die Magnetschienenbremse wird mit einer Mechanik abgesenkt und ist nicht Teil dieser Steuerung und kann nur mit linearem Bremskraftaufbau erfolgen, während die Bremskraft der drei anderen Bremssysteme ruckgesteuert aufgebaut wird. Bei den Triebfahrwerken erkennt man gut, dass der Antriebsrechner das Signal gibt, ob das Hydrogerät Druck abbauen soll. Dies geschieht nur wenn der Antriebsrechner eine Fehlermeldung sendet. Die grün dargestellten Elemente sind die beiden Magnetschienenbremsen eines Fahrwerks.



Abbildung 12: Prinzip der Steuerung eines Siemens Avenio 4-Teilers (Spörl, et al., 2010)

Die Bremssteuerung ist aus der von mir dazu erstellten Projektarbeit entnommen (Schwarz, 2018). Diese erfüllt die Anforderungen des übergeordneten Ansprechens der einzelnen Bremseinheiten und einer Wertvorgabe bezogen auf die maximale Bremskraft der jeweiligen Einheit. Die Steuerung ist sowohl dazu in der Lage die Bremskraft der elektrodynamischen und elektrohydraulischen Bremsen ruckgesteuert aufzubauen, als auch die Bremskraft der Magnetschienenbremse linear aufzubauen. Die Steuerung bietet auch die Funktion die Bremskraft am Ende des Bremsvorganges abzubauen, diese Funktion kann aktiviert und deaktiviert werden.

3.6 Bremsungsarten

Die BOStrab TR Br (BOStrab_TR_Br, 2008) gibt genaue Regeln für die jeweils zu testenden Bremsungsarten vor. Die im Weiteren konzipierte Software muss in der Lage sein gängige Bremsungsarten abzubilden.

Die Bremsungsart soll in der Simulation mit folgenden Eigenschaften abgebildet werden:

- Bezeichnung
- B-Regler (Regler f
 ür die Momentanverz
 ögerung)
- Unterscheidung Betriebsbremse oder Gefahrenbremse
- ED-Bremsen eingeschaltet
- Aktive Scheibenbremsen eingeschaltet
- Passive Scheibenbremsen eingeschaltet
- Schienenbremsen eingeschaltet

In der Bremsungsart ist somit definiert welche Bremssysteme zum Einsatz kommen, auf welche Dauerverzögerung geregelt wird und ob es sich um eine Betriebs- oder Gefahrenbremse handelt. Dieser Unterschied ist für die Ruckregelung und die verwendeten Kraftschlusswerte relevant. Ob eine Bremsungsart Betriebsbremse oder Gefahrenbremse ist, gibt vor welche Aufbauzeiten und Maximalwerte für Sattelkräfte/Motormoment vorliegen. Falls kein Verzögerungsregler vorhanden ist muss dies ebenfalls zu realisieren sein.

3.6.1 Betriebsbremsung

"Bremsung, durch den Fahrzeugführer oder die automatische Fahrsteuerung bewirkt, um die Geschwindigkeit des Zuges zu beeinflussen." (EN13452-1:2003, 2003, p. 7)

Im verwendeten System wird die "Betriebsbremsung" ausschließlich mittels elektrodynamischer Bremse durchgeführt und muss für die Simulation mit dieser getestet werden. (Spörl, et al., 2010)

Wie man in der Abbildung darunter erkennt fordert der Antriebsrechner die ED-Bremsen an und das Hydrogerät erhält vom AR kein Signal zum Absenken des Lösedruckes für die passiven Scheibenbremsen.



Abbildung 13: Bremsungsart Betriebsbremsung

3.6.2 Ersatzbremsung (Betriebsbremsung mit Ausfall einer ED-Bremse)

Bei der "Ersatzbremsung" wird statt der ausgefallenen elektrodynamischen Bremse, an der betroffenen Radkombination, die passive Scheibenbremse mit Bremslösedruck Stufe 1 eingesetzt. (Spörl, et al., 2010)

Die Abbildung darunter stellt den Vorgang der "Ersatzbremsung" schematisch dar.



Abbildung 14: Bremsungsart Betriebsersatzbremsung

3.6.3 Maximale Betriebsbremsung

"Höchstmöglicher Wert der Betriebsbremsung" (EN13452-1:2003, 2003, p. 7)

Diese Bremsungsart wird mit der maximal möglichen ED-Bremskraft durchgeführt.

3.6.4 Notbremsung

"Bremsung mit dem Hauptzweck, die größtmögliche Sicherheit der Fahrgäste, des Personals und Dritter zu bewirken." (EN13452-1:2003, 2003, p. 7)

Es werden vier verschiedene Typen der Notbremsung unterschieden:

	Prinzip der Einleitung		
Notbremsung 1:	Fahrer, Sifa, oder ATO		
Notbremsung 2:	Fahrgast-Notbremsung		
Notbremsung 3:	Fahrer, über spezielle Stellung des Fahr- Bremsschalters oder ATP — System		
Notbremsung 4:	Autorisiertes Personal über Bedienelement, unabhängig vom Fahr- Bremsschalter		

Abbildung 15: Einteilung Notbremsung (EN13452-1:2003, 2003, p. 7)

Die darin enthaltenen Notbremsungen können auch die selben Bremssysteme verwenden und somit die gleichen Ergebnisparameter liefern. Wichtig für die Simulation ist jedoch, dass sich sämtliche Fälle konfigurieren lassen.

Notbremsung 1

Die Bremsungsart "Notbremsung 1" wird mithilfe der elektrodynamischen Bremsen und der aktiven Scheibenbremsen am Lauffahrwerk gebildet.



Abbildung 16: Bremsungsart Notbremsung 1

Notbremsung 2

Die "Notbremsung 2" unterscheidet sich nur in ihrer Auslösung von der "Betriebsbremsung" und wird somit in "Bremssim" genau gleich umgesetzt.

Notbremsung 3

Diese Bremsungsart resultiert mit der maximal im Betrieb eingesetzten Bremswirkung. Dabei wird die maximale elektrodynamische Bremskraft, die maximale aktive Scheibenbremskraft und die Magnetschienenbremskraft angefordert. Die Ansteuerung und der Einsatz der Bremssysteme ist in der nachfolgenden Abbildung noch einmal verdeutlicht.



Abbildung 17: Bremsungsart Notbremsung 3

3.6.5 Sicherheitsbremsung

"diese hat das Ziel, einen höheren Grad an Funktionsfähigkeit als die Betriebsbremsung und die Notbremsung zu erreichen (um einen weiteren Bremsvorgang zu ermöglichen); das Bremsvermögen kann auf einem niedrigeren Niveau als bei Not- oder Betriebsbremsungen liegen" (EN13452-1:2003, 2003, p. 7)

Bei der "Sicherheitsbremsung" wird die Energiezufuhr unterbrochen und es kommen somit ausschließlich die passiven Scheibenbremsen mit Bremslösedruck "Stufe2" zum Einsatz. (Spörl, et al., 2010)

Zur Funktionalität der "Sicherheitsbremsung" ist kein Signal vom ZSG notwendig, da kein Lösedruck an den passiven Scheibenbremsen aufliegt und diese mit der Federkraft bremsen. Ersichtlich ist das Schema dazu in der darunterliegenden Abbildung.



Abbildung 18: Bremsungsart Sicherheitsbremsung

3.6.6 Schienenbremsung

In diesem Fall kommen ausschließlich die verbauten Schienenbremsen zum Einsatz. Im Beispiel der Siemens Avenio Plattform entspricht das den Magnetschienenbremsen. In der nachfolgenden Abbildung ist das gut erkenntlich. Logischerweise müssen auch die Hydrogeräte an den Triebfahrwerken den Lösedruck für die Federspeicher liefern.



Abbildung 19: Bremsungsart Schienenbremsung

3.6.7 Ausfallszenario

"Wenn eine dynamische Bremse vorgesehen ist (z.B. bei Verwendung der Antriebsausrüstung), muss bei deren Ausfall eine andere Bremseinrichtung verfügbar sein, die zumindest eine einzelne "Notbremsung" sicherstellt. Diese muss automatisch wirksam werden." (EN13452-1:2003, 2003, p. 20) Aufgrund von Kundenwünschen, der Möglichkeit von Normänderungen und der Testung von Fehlerbäumen soll es möglich sein, flexibel Ausfälle einzelner Bremssysteme zu simulieren. Ausfälle erfolgen pro Bremssystemtyp und pro Fahrwerk. D.h. es fallen beispielsweise alle aktiven Scheibenbremsen am Lauffahrwerk aus. Dies ist konstruktiv gegeben, da es immer nur ein Hydrogerät und einen Antriebsrechner pro Fahrwerk gibt und somit alle hydraulischen Bremseinheiten nur pro Fahrwerk geschalten werden können.

Ausfälle werden als Ausfallszenarien gekoppelt und können ebenfalls nicht aktivierte Bremssysteme als Ersatz einschalten.

Das häufigste Ausfallszenario ist die "Ersatzbremsung der Notbremsung 3", bei der an einem Fahrwerk der Antriebsrechner ausfällt und die ED-Bremsen dort durch die passiven Scheibenbremsen ersetzt werden.



Abbildung 20: Bremsungsart Ersatzbremsung der Notbremsung 3

3.6.8 Bremsmatrix

In der Bremsmatrix kann man die jeweils eingesetzten Bremssysteme pro Bremsungsart und die geforderte normative Anforderung an die mittlere Verzögerung entnehmen. Reale Bremsmatrizen aus Projekten umfassen wesentlich mehr Bremsfälle, für diese gibt es keine normativen Verzögerungsvorgaben, jedoch fordert der Straßenbahnbetreiber oft spezielle Werte ein.

Bremsungsar t	Ausgelöst durch	Mittlere Verzöger ung (m/s²)	Elektro- dynami sche Bremse	Feder- speicher- bremse TDG	Aktive Bremse LDG	Schienen- bremse
Betriebs- bremsung	Fahrer	ca. 1.1	Ja			
Notbremsung 3	Fahrer	> 2.73	Ja		Ja	Ja
Notbremsung 1	Sicher- heitsaus- rüstung (z.B. Zugbe- einflus- sung)	ca. 1.2	Ja		Ja	
Notbremsung 2	Fahrgäste (Fahrgast- Neintbrems- hebel	ca. 1.1	Ja			
Notbremsung 5	Fahr- zeug- steuerung	ca. 1.1	Ja			
Sicherheits- bremsung Zur Bewertung werden nur die Federspeicher- bremsen herangezogen.	Fahrer Not-Aus-Kopf	ca. 1.0	Ja, wenn möglich	Ja, Stufe 2	Ja, wenn möglich	Ja, wenn möglich
Ersatz- bremsung	Eine ED- Bremse ausgefal- len	ca. 1.0	Ja: in TDG wo ED- Bremse OK	Ja Stufe 1 in TDG wo ED Bremse nicht OK	Ja	
Schienen- bremsung	Fahrer (Knopf)	ca. 0.7				Ja

Abbildung 21: Bremsmatrix Avenio (Spörl, et al., 2010, p. 2012)

3.6.9 Bremsfall

Eine Bremsungsart und ein Ausfallszenario kombiniert mit:

- Beladungsstufe
- Bremsausgangsgeschwindigkeit
- Bremsendgeschwindigkeit
- Raddurchmesser
- Neigung
- Kraftschlusswert
- Bremskraftstufe der passiven Scheibenbremsen
- Bremskraftwert der aktiven Scheibenbremsen

ergeben zusammen einen Bremsfall.

Die zu einem Projekt gehörigen Bremsfälle liegen in einer Liste und um sie besser sortieren zu können wurde ein Ordnungssystem eingeführt.

Dieses legt fest, dass alle Bremsfälle die angelegt wurden und sämtliche Parameter, bis auf die Beladungsstufe, gleich haben mit einer Ordnungszahl versehen sind.

4. Berechnung

Die Berechnung erfolgt anhand der Norm EN14531-2:2015 (EN14531-2:2015, 2015) und ist in den folgenden Kapiteln genau erläutert. Die Umsetzung in der Programmierung ist in 5.3.12 erläutert.

4.1 Aufbau der Bremskräfte

Bei den verschiedenen Bremseinheiten sind unterschiedliche Tot- und Schwellzeiten technisch möglich und vorgegeben. Diese sollen beim Erzeugen einer Instanz (z.B.: aktive Scheibenbremse) eingegeben werden.

Die theoretisch mögliche Bremskraft einer Bremseinheit sieht idealisiert folgendermaßen aus (EN14531-2:2015, 2015):

- 1. Totzeit Es wird keine Bremskraft aufgebracht
- 2. Schwellzeit linearer Anstieg, dabei wird die Bremskraft linear aufgebaut
- 3. Volle Bremsung bis zur Abschaltung

Die oben erwähnten Angabewerte für Totzeit und Schwellzeit sind Werte für t_{10} und t_{90} . Um eine für die Berechnung zulässige Aufbaukennlinie zu erhalten, muss mittels der Geradengleichung (McCaffrey, 2012) t_0 und t_{100} bestimmt werden. In der darunterliegenden Grafik kann man den idealisierten Aufbau erkennen. Die Funktion der Bremskraft f(t) ist dabei normiert aufgetragen.





Bei der Kombination mehrerer Bremssysteme können stark abweichende Kurven für die Bremskraft herauskommen, wie in Kapitel 6 entnommen werden kann.

4.2 Berechnung der Bremskraft

Die Bremssteuerung gibt die relative bzw. normierte Kurve für die Bremskraft vor. Die tatsächlich auftretende Bremskraft ergibt sich dann durch die Multiplikation mit der maximal-möglichen Bremskraft der jeweiligen Bremseinheit. Im Folgenden sind die Berechnungsformeln für die Bremskräfte der jeweiligen Bremssysteme beschrieben.

4.2.1 Bremskraft der elektrodynamischen Bremse

Die Bremskraft der elektrodynamischen Bremse kann in vier Abschnitte gegliedert werden. Die Abschnitte kann man in der darunterliegenden Abbildung gut erkennen. Diese ergeben sich aufgrund der Charakteristik der Motorkennlinie. Die Bremskraft ist somit drehzahl- bzw. geschwindigkeitsabhängig.



Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015)

1) Linearer Abschnitt von v_4 bis v_3

$$F_{BED} = F_{BED,max} * \frac{v - v_4}{v_3 - v_4}$$

Formel 1: 1. Abschnitt ED-Bremse (EN14531-1, 2015, p. 27)

2) Konstanter Abschnitt von v₃ bis v₂

$$F_{BED} = F_{BED,max}$$

Formel 2: 2. Abschnitt ED-Bremskraft (EN14531-1, 2015, p. 28)

3) Hyperbolischer Abschnitt mit konstanter Leistung von v₂ bis v₁

$$F_{BED} = F_{BED,max} * \frac{v_2}{v}$$

Formel 3: 3. Abschnitt ED-Bremskraft (EN14531-1, 2015, p. 28)

4) Abschnitt abhängig von 1/v₂ über v₁

$$F_{BED} = F_{BED,max} * \frac{v_2 - v_1}{v^2}$$

Formel 4: 4. Abschnitt ED-Bremskraft (EN14531-1, 2015, p. 28)

Die maximale Bremskraft ergibt sich folgendermaßen:

$$F_{BED,max} = \frac{M_W * i}{\eta * r_{Rad}}$$

Formel 5: Maximalkraft der ED-Bremse (Schlitter, 2010, p. 13)

 F_{BED} ... momentane Bremskraft der elektrodynamischen Bremse [N] $F_{BED,max}$... maximale Bremskraft der elektrodynamischen Bremse [N] v ... momentane Geschwindigkeit [m/s] v_1 bis v_4 ... bestimmte Geschwindigkeiten [m/s] M_W ... maximales Motormoment [Nm] i ... Getriebeübersetzung [-] η ... Getriebewirkungsgrad [-]

r_{Rad} ... Raddurchmesser [m]

Abbildung 23 stellt die allgemeine Kennlinie für elektrodynamische Bremsen dar. Bei den im Avenio verwendeten elektrodynamischen Bremsen liegt v₃ gewöhnlich bei 0 m/s. Somit wird der Abfall von

Roman Schwarz

 v_3 zu v_4 nicht durchlaufen und es herrscht bis zum Stillstand die volle Bremskraft. Sollten in Zukunft andere Motoren verwendet werden, die auch den Abschnitt von v_3 zu v_4 durchlaufen, kann die Software solche Bremsungen ohne Änderungen bewältigen.

4.2.2 Bremskraft der aktiven Scheibenbremse

Die Bremskraft der passiven Scheibenbremse errechnet sich folgendermaßen:

$$F_{AS} = \frac{n * F_A * i_Z * \mu_{BS} * r_Z * \eta_Z}{r_{Rad}}$$

Formel 6: Bremskraft aktive Scheibenbremse (Schlitter, 2010, p. 10)

 F_A ... Bremszylinderkraft [N]

 i_Z ... Bremsgestängeübersetzung [-] μ_{BS} ... Belagsreibwert [-] r_Z ... Bremsradius des Bremsbelags auf der Reibfläche [m] r_{Rad} ... Raddurchmesser [m] η_Z ... Gestängewirkungsgrad [-] n ... Anzahl der Kraftangriffspunkte je Bremsscheibe [-]

4.2.3 Bremskraft der passiven Scheibenbremse

Die Bremskraft der passiven Scheibenbremse errechnet sich folgendermaßen:

$$F_{PS} = \frac{F_F * i * \mu_{BS} * r_Z * \eta_Z}{r_{Rad} * \eta}$$

Formel 7: Bremskraft passive Scheibenbremse (Schlitter, 2010, p. 10)

 $\begin{array}{l} F_F \hdots \mbox{Getriebewirkungsgrad} \ [-] \\ i \hdots \mbox{Getriebewirkungsgrad} \ [-] \\ \mu_{BS} \hdots \mbox{Getriebewirkungsfrad} \ [-] \\ \mu_{BS} \hdots \mbox{Belagsreibwert} \ [-] \\ r_Z \hdots \mbox{Bremsbelags} \ \mbox{auf der Reibfläche} \ [m] \\ r_{Rad} \hdots \mbox{Radurchmesser} \ [m] \\ \eta_Z \hdots \mbox{Gestängewirkungsgrad} \ [-] \end{array}$

Man erkennt, dass hier noch durch den Getriebewirkungsgrad dividiert wird. Dies ist jedoch beim Siemens Avenio immer in die Formel der Getriebeübersetzung eingerechnet und η wird somit in "Bremssim" nicht verwendet.

4.2.4 Bremskraft der Magnetschienenbremse

Die Kraft der Magnetschienenbremse nimmt bei niedrigeren Geschwindigkeiten immer stärker zu. In der nachfolgenden Abbildung kann man den charakteristischen Verlauf der Bremskraft gut erkennen.



Abbildung 24: Kraft- Geschwindigkeitsdiagramm der Magnetschienenbremse (EN14531-1, 2015)

Die Bremskraft der Magnetschienenbremse lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$F_{BMG} = F_{AMG} * \mu_{MG} = F_{AMG} * (\frac{1}{k_1 * \nu} + k_0)$$

Formel 8: Bremskraft der Magnetschienenbremse (EN14531-1, 2015, p. 31)

 F_{BMG} ... momentane Bremskraft der Magnetschienenbremse [N]

 F_{AMG} ... magnetische Gesamtanzugskraft [N]

 $\mu_{\rm MG}$... der momentane Reibwert zwischen Magnet und Schiene [-]

 k_0 ... konstanter Koeffizient [-]

 k_1 ... konstanter Koeffizient [s/m]

 $v \dots$ momentane Geschwindigkeit [m/s]

4.2.5 Tatsächliche Bremskraft nach Bremssteuerung

Das nachfolgende Schaubild zeigt welche Bremskraft tatsächlich von einer Bremseinheit ausgeht. Prinzipiell wird die von der Bremssteuerung angeordnete Bremskraft übertragen, ist diese jedoch höher als die in diesem Moment von der Bremseinheit erzeugbare Kraft, wird die maximal erzeugbare Bremskraft aufgebracht.



Abbildung 25: Bremskraft der jeweiligen Bremseinheit

4.3 Aufteilung der Bremskräfte bei der Radkombination aus zwei Rädern

Elektrodynamische Bremse und passive Scheibenbremse übertragen über die Motorwelle die Kraft auf zwei Räder, dabei kann es vorkommen, dass diese Kraft ungleichmäßig aufzuteilen ist. Dies tritt dann auf, wenn die verfügbare Bremskraft an einem Rad nicht übertragen werden kann (kleiner Reibwert, niedrigere Masse). Das andere Rad kann jedoch umso mehr Bremskraft übertragen. Die Modellierung dieses Falles erfolgt somit über die Klasse Radkombinationen, an der die Bremseinheit ansetzt. Dabei sind sowohl Einzelräder als auch Radsatzpaare darstellbar und ermöglichen die Modellierung eines Fahrwerkes aus vier Einzelrädern (Lauffahrwerk) oder zwei Radsatzpaaren (Triebfahrwerk). Mithilfe dieses Logikmodells erfolgt die Aufteilung der Bremskraft auf die beiden Räder.



Abbildung 26: Aufteilung der Bremskraft bei Radsatzpaar

 $F_{Br1\mu}$... maximal übertragbare Kraft am Rad 1

 $F_{Br2\mu}$... maximal übertragbare Kraft am Rad 2

 F_{Br1} ... Bremskraft am Rad 1

 F_{Br2} ... Bremskraft am Rad 1

F_{BRBS}... Bremskraft aller Bremseinheiten die auf Radkombination aufgebracht wird

X... Gleitschutzeffizienz

F_{BRBSGL}... um Gleitschutzeffizienz korrigierte Bremskraft aller Bremseinheiten die auf Radkombination aufgebracht wird

4.4 Externe Kräfte

4.4.1 Rollwiderstand/ Laufwiderstand

Die EN 14531-2:2015 (EN14531-2:2015, 2015), die als Grundlage für die Berechnung gilt, gibt den Rollwiderstand mit:

$$F_{Ra} = A + B * v + C * v^2$$

Formel 9: Rollwiderstand (EN14531-2:2015, 2015)

- F_{Ra} ... Momentanwert des Rollwiderstands des Zugs [N]
- $A\ldots$ geschwindigkeitsunabhängiger Beiwert des Zugs $[{\rm N}]$
- B ... Beiwert des Zugs proportional zur Geschwindigkeit [N/(m/s)]
- *C* ... Beiwert des Luftwiderstands [N/(m/s²)]

v... Momentangeschwindigkeit des Zuges [N]

Dabei wird für die Konstanten A, B und C auf die Norm EN 14067-4: 2013 verwiesen. Dazu kann man anmerken, dass diese lediglich die Verfahren zur manuellen Bestimmung der Konstanten für den jeweiligen Zug angibt. Die Norm liefert somit keine Zahlen für die Berechnung, sondern Testvorgaben die mit dem bereits fertigen Zug absolviert werden sollen.

Im Buch von Joachim Ihme – "Schienenfahrzeugtechnik" (Ihme, 2016) wird die Berechnung des Laufwiderstandes (entspricht Rollwiderstand nach "EN 14531-2:2015") genauer erklärt:

$$W_{Lauf} = W_R + W_{Stoß} + W_{Luft}$$

Formel 10: Laufwiderstand (Ihme, 2016, p. 37)

 W_{Lauf} ... Laufwiderstand [N] W_R ... Rollwiderstand [N] $W_{Sto\beta}$... Stoßwiderstand [N] W_{Luft} ... Luftwiderstand [N]

Lagerreibungs- und Rollwiderstand

$$W_R = f_R * m * g$$

Formel 11: Rollwiderstand (Ihme, 2016, p. 36)

 W_R ... Rollwiderstand [N] f_R ... Rollwiderstandsbeiwert [-] m ... Zugmasse [kg] g ... Erdbeschleunigung ~ 9,81 m/s²

Festhalten kann man dabei, dass W_R unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit, aber proportional zur Fahrzeugmasse ist. Der Rollwiderstandbeiwert f_R liegt bei Schienenfahrzeugen etwa zwischen 0,001 und 0,002. (Ihme, 2016)

Somit muss der Beiwert A der Formel (1) in Relation zur jeweiligen Fahrzeugmasse gebracht werden.

$$A = f_R * m * g$$

Formel 12: Konstante A

A ... Konstante A [N]

Stoßwiderstand

Aufgrund der Querführung durch das Gleis und der daraus resultierenden Querfederung entstehen Schwingungen quer zur Bewegungsachse. Diesen Effekt und den daraus resultierenden Widerstand bezeichnet man als Stoßwiderstand. (Ihme, 2016)

 $W_{Stoß} = c_d * m * v$

Formel 13: Stoßwiderstand (Ihme, 2016, p. 37)

 W_{StoB} ... Stoßwiderstand [N] m ... Zugmasse [kg] c_d ... Beiwert v ... Fahrgeschwindigkeit [m/s]

 $W_{\text{Stoß}}$ ist ebenfalls proportional zur Fahrzeugmasse und linear abhängig von der Geschwindigkeit. Als Erfahrungswert kann für Schienenfahrzeuge ein Wert von $c_d \sim 0,00009$ [N/(kg * m/s)] angenommen werden. (Ihme, 2016)

Somit kann daraus die B Komponente der Laufwiderstandsformel berechnet werden.

$$B = c_d * m$$

Formel 14: Konstante B

B ... Konstante B [N/(m/s)]

Luftwiderstand

Der Luftwiderstand setzt sich aus zwei Anteilen zusammen (dem Luftwiderstand von Bug und Heck und der Zugoberfläche).

$$W_a = (c_1 + c_2) * A_1 * q$$

Formel 15: Luftwiderstand W_a von Bug und Heck (Ihme, 2016, p. 33)

 W_a ... Luftwiderstand Bug und Heck [N]

 c_1 ... Beiwert für Luftwiderstand Bug [–],

 c_2 ... Beiwert für Luftwiderstand Heck [–],

 $\overline{A_1}$... Fahrzeugquerschnittsfläche einschließlich Stromabnehmer [m²]

q ... Staudruck [N/m²]

$$q = \frac{\rho}{2} * (v)^2$$

Formel 16: Staudruck q (Ihme, 2016, p. 33)

q ... Staudruck [N/m²] ρ ... Luftdichte, $\rho \simeq 1,25$ [Ns²/m⁴] v ... Fahrgeschwindigkeit in [m/s]

Unterhalb befindet sich eine Abbildung, die die Druck- und Reibungsverhältnisse am Wagen darstellt.



Abbildung 27: Luftwiderstand (Ihme, 2016, p. 33)

Die Luftreibung ergibt sich folgendermaßen:

$$W_b = (c_3 + c_4 + c_5 + c_6 + c_7) * A_2 * q$$

Formel 17: Luftreibung W_b (Ihme, 2016, p. 34)

$$c_3 = \frac{0,455}{(\log Re)^{2,58}}$$

Formel 18: Beiwert für den Luftwiderstand der Zugoberfläche als zylindrischer Körper

 W_b ... Luftwiderstand Zugoberfläche [N] A_2 ... Zugoberfläche [m²]

c₃ ... Beiwert für den Luftwiderstand der Zugoberfläche als zylindrischer Körper [-]

Re ... REYNOLD'sche Zahl; Re = $1,9*10^{4*}L^*v_m$ [-]

c₄ = 0,0004 Beiwert für kantigen Zugquerschnitt [-]

c₅ = 0,0002 Beiwert für technische Rauigkeit der Zugoberfläche [-]

 c_6 = 0,0020 Beiwert für Bodeneffekt zwischen Zug und Fahrweg [-]

c7 = 0,0005 Beiwert für Trennfugen zwischen den Zuggliedern sowie für Laufwerk und hervorstehende Teile [-]

Somit kann daraus die C Komponente der Laufwiderstandsformel berechnet werden. Diese berücksichtigt jedoch keinen Gegenwind von 15km/h wie er im Buch von Ihme angenommen wird.

$$C = \frac{\left[(c_1 + c_2) * A_1 + (c_3 + c_4 + c_5 + c_6 + c_7) * A_2\right] * \rho}{2}$$

Formel 19: Konstante C

C ... Konstante C [N/(m/s)²]

Der Luftwiderstand kann auch nach Hannoverscher Formel berechnet werden (Ihme, 2016). Dies könnte für Anwender/innen von "Bremssim" eine gute Berechnungsgrundlage liefern.

Fazit

Der Staudruck wird für gewöhnlich mit einem Gegenwindzuschlag von $u_w = 4,16$ m/s (15km/h) berechnet. (Ihme, 2016, p. 33) Der Laufwiderstand sollte jedoch aufgrund des Sicherheitsdenkens eher kleiner als größer angenommen werden, deshalb wird der Gegenwindzuschlag hier vernachlässigt. Für die Konstanten ergeben sich somit folgende Werte, wenn man die Richtwerte nach (Ihme, 2016) annimmt:

$$f_R = 0,002$$

 $A = 0,002 * 9,81 \frac{m}{s^2} * m = 0,01962 \frac{N}{kg} * m$
Formel 20: Konstante A real

 $c_d = 0,00009$ $B = 0,00009 \frac{1}{s} * m$ Formel 21: Konstante B real

Die Konstante C ist fahrzeugspezifisch und muss daher für jedes Fahrzeug eigens bestimmt werden. Somit ergibt sich folgende Formel für den Roll-/Laufwiderstand:

$$F_{Ra} = m * \left(0,01962 \frac{N}{kg} + 0,00009 \frac{1}{s} * v\right) + C * v^{2}$$

Formel 22: Laufwiderstand am Fahrzeug

4.4.2 Windkraft

Die Windkraft wird üblicherweise nicht benötigt bei Straßenbahnen. Sie ist jedoch mit ihren Faktoren ebenfalls in "Bremssim" implementiert um spezielle Bremsbedingungen rechnen zu können.

$$F_{wind} = D * C * v_{wind}^2$$

Formel 23: Windkraft (EN14531-1, 2015)

F_{wind} ... Windkraft [N]

D ... charakteristischer Beiwert der Zugaerodynamik aufgrund der Windrichtung

 ${\cal C}$... charakteristischer Beiwert des Luftwiderstands $[{\rm N}/({\rm m/s})^2]$

 v_{wind} ... Windgeschwindigkeit [m/s]

4.5 Hangabtriebskraft (F_g)

Die Hangabtriebskraft entsteht durch die Neigung der Schiene und ist in jedem Moment durch die nachfolgende Formel zu bestimmen.

$$F_g = m_{st} * g_n * \sin(\alpha)$$

Formel 24: Hangabtriebskraft F_g (EN14531-1, 2015)

 F_g ... Hangabtriebskraft [N]

 m_{st} ... statische Rad-/Zugmasse [kg]

 g_n ... Normfallbeschleunigung [m/s²]

 α ... Neigung [rad]

4.6 Beschreibung der Parameter

Um ein Fahrzeug vollständig rechnen zu können und die gewünschten Ergebniswerte zu erhalten benötigt man noch folgende Berechnungsparameter.

4.6.1 Massen (EN14531-1, 2015) Statische Masse (m_{st})

Die statische Masse muss für die Berechnung pro betrachteter Einheit (Rad, Achse) angegeben werden.

Dynamische Masse (m_{dyn})

Die dynamische Masse ergibt sich als Summe der statischen Masse und der äquivalenten rotierenden Masse (m_{rot}) pro betrachteter Einheit.

$$m_{dyn} = \sum (m_{st} + m_{rot})$$

Formel 25: Dynamische Masse (EN14531-1, 2015, p. 13)

 m_{dyn} ... dynamische Masse [kg] m_{st} ... statische Masse [kg] m_{rot} ... äuqivalente rotierende Masse [kg]

Die äquivalente rotierende Masse wird entweder mithilfe der Massenträgheit oder anhand eines Prozentwertes der statischen Masse ermittelt. Die Berechnung mittels Massenträgheit sieht folgendermaßen aus:

$$m_{rot} = \frac{4 * J}{D^2}$$

Formel 26: äquivalente rotierende Masse (EN14531-1, 2015)

J... Massenträgheit $[N^*m^2]$ D... Raddurchmesser [m] m_{rot} ... äuqivalente rotierende Masse [kg]

4.6.2 Verzögerungen Maximale Verzögerung (a_{max})

Die maximale Verzögerung a_{max} entspricht dem Maximum der Momentanverzögerung über den gesamten Bremsvorgang. Dafür kann der Maximalwert von a für alle Zeitschritte herangezogen werden.

Mittlere Verzögerung (a_m)

Die mittlere (Brems-)Verzögerung a_m "ist die Verzögerung a in m/s², die sich aus dem zurückgelegten Weg s in m des Fahrzeuges vom Einleiten der Bremsung bis zum Halt aus der Geschwindigkeit v" (BOStrab_TR_Br, 2008, p. 15) in m/s ergibt. Da Bremsungen auch bis zu einer entsprechenden Bremsendgeschwindigkeit und nicht nur zum kompletten Halt erfolgen können, habe ich mir erlaubt die Formel auszubauen und die Endgeschwindigkeit ebenfalls mit einzubeziehen. Die entsprechende Berechnungsformel erhält man dabei:

$$a_m = \frac{{v_0}^2 - {v_{fin}}^2}{2 * s}$$

Formel 27: Mittlere Verzögerung (BOStrab_TR_Br, 2008, p. 15)

 a_m ... mittlere Verzögerung [m/s²] v_0 ... Bremsausgangsgeschwindigkeit [m/s] v_{fin} ... Bremsendgeschwindigkeit [m/s] s ... Anhalteweg [m]

Mittlere Verzögerung 3 (a_{m3})

Unter der mittleren Verzögerung 3 versteht man die mittlere Verzögerung exklusive Totzeit des zuerst einsetzenden Bremssystems. In der VDV 150 wird die a_{m3} dabei in folgender Abbildung, die einen Beschleunigungs- und Verzögerungszyklus zeigt, beschrieben. (VDV150, 1995)



Abbildung 28: Beschleunigungs- und Verzögerungszyklus im v(t) Diagramm (VDV150, 1995)

$$a_{m3} = \frac{(v_{m3} - v_{Fin})^2}{2 * s_{m3}}$$

Formel 28: Mittlere Verzögerung 3

a_{m3} ... mittlere Verzögerung 3

 v_{m3} ... Geschwindigkeit sobald die Zugbremskraft > 0N ist in [m/s]

 v_{fin} ... Bremsendgeschwindigkeit in [m/s]

 s_{m3} ... Weg von Zugbremskraft > 0N bis v_{Fin} in [m]

Roman Schwarz
Äquivalente Verzögerung (a_e)

Um die Äquivalente Verzögerung zu ermitteln, muss in erster Linie die äquivalente Ansprechzeit t_e ermittelt werden.

Die Berechnung der äquivalenten Ansprechzeit te ergibt sich durch die Addition der Totzeit (t10) mit dem arithmetischen Mittelwert der Differenz zwischen Schwellzeit (t₉₀) und Totzeit(t₁₀). (EN13452-1:2003, 2003)

Sollten mehrere Bremssysteme im Einsatz sein wird für t_{10} das Minimum und für t_{90} das Maximum aller Bremssysteme genommen werden.

$$t_e = \frac{Min(t_{10}) + (Max(t_{90}) - Min(t_{10}))}{2}$$

Formel 29: Äquivalente Ansprechzeit (EN13452-1:2003, 2003)

t_e ... äquivalente Ansprechzeit [s] t_{10} ...minimale Totzeit [s] t₉₀ ...minimale Totzeit plus maximale Schwellzeit [s]

Mithilfe von t_e kann die Äquivalente Verzögerung a_e ermittelt werden.

$$a_e = \frac{{v_0}^2 - {v_{fin}}^2}{2 * (s_3 - v_0 * t_e)}$$

Formel 30: Äquivalente Verzögerung (EN13452-1:2003, 2003)

- a_e ... äquivalente Verzögerung [m/s²]
- s₃ ... Anhalteweg [m]
- v_0 ... Bremsausgangsgeschwindigkeit [m/s]
- t_{ρ} ... äquivalente Ansprechzeit [s]
- v_{fin} ... Bremsendgeschwindigkeit [m/s]

Im darunterliegenden Schaubild ist die Berechnung noch einmal verdeutlicht.



Abbildung 29: äquivalente Ansprechzeit und äquivalente Verzögerung (EN13452-1:2003, 2003, p. 12)

2

Dauerverzögerung ad – (B-Regelwert)

Die Dauerbremsverzögerung "ist die Verzögerung, die während des Wirkens einer weitgehend konstanten Bremskraft über einen Betrachtungszeitraum auftritt." (BOStrab_TR_Br, 2008, p. 15)

Sie lässt sich also leicht nur für über die Zeit oder den Weg konstante Bremskräfte bestimmen, jedoch gibt es keine genaue Definition wie bei variablen Bremskräften damit umzugehen ist. Für Bremsfälle, wo ein B-Regelwert eingestellt ist und man diesen auch erreicht, kann man diesen als Dauerverzögerung annehmen.

4.6.3 Rucke Maximaler Ruck (r_{max})

Als Ruck wird die Ableitung der Beschleunigung nach der Zeit bezeichnet.

 $r = \dot{a} = \ddot{v} = \ddot{s}$

Formel 31: Ruck (Assmann & Selke, 2004, p. 30)

r ... Ruck [m/s³]
a ... Beschleunigung [m/s²]
v ... Geschwindigkeit [m/s]
s ... Weg [m]

Umgelegt auf die schrittweise Berechnung ergibt sich folgende Formel für die Berechnung des Rucks in jedem Zeitschritt:

$$r_i = \frac{a_i - a_{i-1}}{\Lambda t}$$

Formel 32: Ruck in der schrittweisen Berechnung

 r_i ... Ruck im jeweiligen Zeitpunkt [m/s³] a_i ... Beschleunigung im jeweiligen Zeitpunkt [m/s²] a_{i-1} ... Beschleunigung im vorherigen Zeitpunkt [m/s²] Δt ... Zeitschritt [s]

Mittlerer Ruck (r_m)

Zur Berechnung des mittleren Rucks ist es wichtig das Zeitintervall zu kennen über das gemittelt wird. In diesem Fall wird t_0 der zuerst einsetzenden Bremse und t_{100} der zuletzt fertig aufgebauten Bremseinheit gewählt. Der mittlere Ruck setzt sich dann wie folgt zusammen:

$$r_m = \frac{\sum_{t_0}^{t_{100}} a_i}{t_{100} - t_0} = \frac{\sum_{t_0}^{t_{100}} r_i * \Delta t}{t_{100} - t_0}$$

Formel 33: Mittlerer Ruck

 r_m ... mittlerer Ruck [m/s³] t_0 ...minimale Totzeit [s] t_{100} ...minimale Totzeit plus maximale Schwellzeit [s] a_i ... Beschleunigung im jeweiligen Zeitpunkt [m/s²] r_i ... Ruck im jeweiligen Zeitpunkt [m/s³] Δt ... Zeitschritt [s]

4.6.4 Anhalte- Verzögerungsbremsweg (s)

Bei der Berechnung des Weges wird immer der Anhalte- Verzögerungsbremsweg s und nicht der Bremsweg berechnet. Der Anhalte- Verzögerungsbremsweg s beginnt mit dem Einleiten der

Bremsung, währenddessen der Bremsweg erst mit dem Erreichen der äquivalenten Ansprechzeit te beginnt. (EN13452-1:2003, 2003)

 $s = s_n$

Formel 34: Anhalte- Verzögerungsbremsweg s

s ... Anhalte- Verzögerungsbremsweg [m]

 s_n ... Anhalte- Verzögerungsbremsweg im letzten Zeitschritt n [m]

Die nachfolgende Abbildung beschreibt den Unterschied zwischen Anhalte- Verzögerungsbremsweg und Bremsweg.



Abbildung 30: Anhalteweg (EN13452-1:2003, 2003, p. 12)

4.6.5 Anhaltezeit (t)

Hier kann man ebenfalls wieder zwischen Brems- und Anhaltzeit unterscheiden. Die Anhaltzeit ist dabei die Zeit, die man vom Einleiten bis zum Stillstand oder zum Erreichen der gewünschten Bremsendgeschwindigkeit benötigt. Die Bremszeit beginnt dabei erst ab der äquivalenten Ansprechzeit t_e (EN13452-1:2003, 2003).

$$t = t_n$$

Formel 35: Anhaltezeit t

t ... Anhalte- Verzögerungsbremszeit [s] t_n ... Anhalte- Verzögerungsbremszeit im letzten Zeitschritt n [s]

4.6.6 Erforderlicher Kraftschlusswert ($\tau_{req,ax}$)

Hierbei handelt es sich um den Kraftschlusswert, der erforderlich ist, um die gegebenen Bremskräfte zu übertragen. Laut Norm ist dieser Wert achsbezogen, in der ""Bremssim""- Simulation wird der Wert jedoch pro Rad berechnet.

$$\tau_{req,rd} = \frac{(\sum_{rd} F_{B,i} - m_{rot,rd} * a)}{m_{st,rd} * g_n} * \sqrt{1 + i^2}$$

Formel 36: erforderlicher Kraftschlusswert (EN14531-2:2015, 2015, p. 16)

$$\begin{split} & \tau_{req,rd} \dots \text{erforderlicher Kraftschluss je Rad} \\ & \sum_{rd} \dots \text{Summe aller beteiligten kraftschlussabhängigen Bremseinrichtungen je Rad} \\ & F_{B,i} \dots \text{momentane Bremskraft der Bremseinrichtung [N]} \\ & a \dots \text{momentane Verzögerung [m/s^2]} \\ & g_n \dots \text{Normfallbeschleunigung [m/s^2]} \\ & i \dots \text{Neigung [-]} \\ & m_{rot,rd} \dots \text{rotierende Masse des Radsatzes [kg]} \\ & m_{st,rd} \dots \text{statische auf den Radsatz wirkende Masse [kg]} \end{split}$$

4.6.7 Übertragbare Bremskraft (FBüb,ax)

Es handelt sich um die Bremskraft, die maximal auf die Schiene übertragen werden kann. Dabei wurde lediglich die Formel 36 aus der Norm umgeformt. Laut dieser ist der Wert achsbezogen, in der "Bremssim"- Simulation wird der Wert jedoch wieder pro Rad berechnet.

$$F_{B\ddot{\mathbf{u}}b,rd} = \frac{\tau_{req,rd} * m_{st,rd} * g_n}{\sqrt{1+i^2}} + m_{rot,rd} * a$$

Formel 37: übertragbare Bremskraft

 $\begin{array}{l} F_{B\ddot{u}b,rd} \hdots \mbox{momentane Bremskraft der Bremseinrichtung [N]} \\ \tau_{req,rd} \hdots \mbox{eq} \mbox{eff} \mbox{ff} \\ \tau_{req,rd} \hdots \mbox{eff} \mbox{eff} \mbox{ff} \\ \tau_{req,rd} \hdots \mbox{eff} \mbox{ff} \\ \tau_{req,rd} \hdots \mbox{eff} \mbox{eff} \mbox{ff} \\ \tau_{req,rd} \hdots \mbox{eff} \mbox{eff} \mbox{ff} \\ \tau_{req,rd} \hdots \mbox{eff} \mbox{eff} \mbox{eff} \\ \tau_{req,rd} \hdots \mbox{eff} \mbox{eff} \\ \tau_{req,rd} \hdots \mbox{eff} \mbox{eff} \mbox{eff} \\ \tau_{req,rd} \hdots \mbox{eff} \mbox{eff} \mbox{eff} \\ \tau_{req,rd} \hdots \mbox{eff} \mbox{eff} \mbox{eff} \mbox{eff} \mbox{eff} \\ \tau_{req,rd} \hdots \mbox{eff} \mbox{eff$

4.6.8 Werte pro Zeitschritt

Folgende Werte werden in jedem Zeitschritt berechnet und bieten die Grundlage für die Berechnung der oben genannten Parameter.

$$v_{i+1} = v_i - a_i * \Delta t$$

Formel 38: Geschwindigkeit zum Zeitpunkt t_i (EN14531-2:2015, 2015)

$$s_{i+1} = s_i + v_i * \Delta t - \frac{1}{2} * a_i * \Delta t^2$$

Formel 39: Weg zum Zeitpunkt t_i (EN14531-2:2015, 2015)

$$a_{i+1} = \frac{\left(\sum F_{Bi} + \sum F_{ext} - \sum F_{g}\right)_{i+1}}{m_{dvn}}$$

Formel 40: Verzögerung zum Zeitpunkt t_i (EN14531-1, 2015)

$$t_{i+1} = t_i + \Delta t$$

Formel 41: Anhalte- Verzögerungszeit zum Zeitpunkt t_i (EN14531-1, 2015)

i = i + 1

Formel 42: Integrationsschritt (EN14531-1, 2015)

 a_i ... Verzögerung zum Zeitpunkt t_i [m/s²]

 $v_i \dots {\sf Geschwindigkeit}$ zum Zeitpunkt t_i [m/s]

 $s_i \dots$ Weg zum Zeitpunkt t_i [m]

 t_i ... Verzögerungszeitpunkt beim Integrationsschritt i [s]

i ... Zählnummer des Integrationsschrittes [-]

 Δt ... Zeitschritt [s]

 m_{dyn} ... dynamische Masse des Zuges [kg]

 $\sum F_{Bi}$... Bremskraft aller Bremseinheiten zum Zeitpunkt i [N]

 $\sum F_{ext}$... Externe Kräfte zum Zeitpunkt i [N]

 $\sum F_g$... Hangabtriebskraft zum Zeitpunkt i [N]

5. Umsetzung in der Programmierung

5.1 Requirements Model (Anforderungsmodell)

Im Anforderungsmodell werden die funktionalen Anforderungen an die zu entwickelnde Software festgelegt.

Diese Anforderungen gelten an ein fahrdynamisches Simulationsprogramm (Spiess, 2005):

- Alle wesentlichen fahrdynamischen Parameter müssen durch den/die Anwender/in variierbar sein
- Es muss die Möglichkeit der Stapelverarbeitung gegeben sein. D.h. eine sequenzielle Abarbeitung der Anwenderkommandos
- Input- und Outputmöglichkeiten
- Gegebenfalls Exportmöglichkeit
- Die Ergebnisdarstellung muss alle Möglichkeiten zur sinnvollen Ansicht bieten
- Das User-Interface muss speziellen Anforderungen genügen
- Der Quellcode muss ausreichend dokumentiert und kommentiert werden

Wie man gut erkennt sind oberhalb genannte Requirements sehr oberflächlich gehalten und diese wurden für "Bremssim" in 5.1.1 - 5.1.4 genauer spezifiziert.

Das erstellte Anforderungsmodell ist dabei in folgende größere Themenblöcke aufgespalten:

- Anforderungen an das User-Interface
- Anforderungen an die Berechnung
- Anforderungen an die Ausgabe
- Benötigte Inputparameter für die Berechnung

5.1.1 Anforderungen an die Berechnung

In der Abbildung 31 sind die Anforderungen an die Berechnung dargestellt. Die Berechnung benötigt zuerst die eingegebenen "Bremsfalldaten". Dabei ist wichtig, dass eine konstante Steigung vorgegeben werden kann. Optional wurde zu Beginn festgelegt, dass die Berechnung für variable Steigungen funktionieren sollte, dies ist jedoch nur soweit umgesetzt als die Referenzabstände für Räder vorzusehen sind. Diese Referenzabstände der Räder beziehen sich auf das Fahrwerk, die Referenzabstände der Fahrwerke auf den zugehörigen Zugteil und diese wiederum auf die Zugspitze. Beispielsweise bei einer Bremsung auf einem Hügel könnten die Räder unterschiedliche Hangabtriebskräfte aufweisen. Gleiches gilt für den Kraftschlusswert, der ein begrenzender Vorgabewert ist. Somit kann ein Rad nicht mehr Bremskraft übertragen, als durch den Kraftschlusswert möglich ist. Optional ist ebenfalls die Umsetzung eines variablen Kraftschlusswertes. Für die Umsetzung der Definition von Ausfallszenarien kann gesagt werden, dass diese pro Fahrwerk und pro Bremssystem festgelegt werden. Beispielsweise bedeutet das, dass alle ED-Bremsen am Triebfahrwerk 2 ausfallen und es nicht möglich ist nur eine der beiden ED-Bremsen ausfallen zu lassen. In den zu definierenden Bremsungsarten muss es möglich sein, alle von der EN 13452-1:2003 (EN13452-1:2003, 2003) und der BOStrab TR Br (BOStrab TR Br, 2008) geforderten Bremsungsarten einstellen zu können. Weiters sollen auch eigenständig zusammengestellte Parameter innerhalb technisch sinnvoller Bremsungsarten möglich sein. Die Bremssteuerung ist eine sehr wichtige Komponente der Berechnung und zuständig für die Weitergabe der korrekten Bremskraftanforderungen. Die Bremssteuerung muss in der Lage sein, den gewünschten "B-Regelwert" zu halten, falls dieser erreicht werden kann. Dazu muss sie sämtliche Bremssysteme überwachen können, d.h. sehen welche Bremseinheit eingeschaltet ist und welche nicht, und ihr Leistungsvermögen kennen. Sie reicht einen normierten Wert bezogen auf die Maximalkraft an die jeweilige Bremseinheit weiter. Die Steuerung muss in der Lage sein die Bremskraft der elektrodynamischen Bremsen, aktiven Scheibenbremsen und passiven Scheibenbremsen ruckgesteuert (mit konstantem bzw. begrenztem Ruck) aufzubauen und Magnetschienenbremsen einen linearen Bremskraftaufbau weiterzureichen. Ebenfalls soll die Bremssteuerung einen geregelten Abbau der Bremskraft ermöglichen. Als ganz wichtige Anforderung kann die generelle Anlehnung und Gültigkeit der Berechnung nach EN 14531-2:2015 (EN14531-2:2015, 2015) gesehen werden. Weitere Berechnungsanforderungen sind, dass die Berechnung als starres Punktmassenmodel beschrieben wird, bei dem die Kupplungskräfte bzw. Dämpferkräfte zwischen den Zugteilen nicht miteinbezogen werden. Die Masse wird pro Rad berechnet und mittels der Neigung in einen Kraftvektor aufgeteilt. Der Zug muss die Anordnung seiner Räder kennen, dies wird in einem weiteren Ausbau der Software zur Berechnung von variabler Steigung und variablem Kraftschluss benötigt. Die Bremskraft ist ebenfalls radbezogen und wird bei Radsatzpaaren zwischen den beiden aufgeteilt. Diese Verteilung ist in Abbildung 26 genauer beschrieben. Die Gleitschutzeffizienz wird hier ebenfalls berücksichtigt. Als Ergebnisparameter soll die Berechnung alle in der Ausgabe benötigten Werte liefern, diese sind in 5.1.4 genauer beschrieben.

5.1.2 Anforderungen an das User-Interface

In der Abbildung 32 sind die Anforderungen an das User-Interface dargestellt. Als Erstes wird eine Login-Maske benötigt, die einen Benutzernamen und ein Passwort abfragt. Anschließend gelangt man in die "Startmaske", welche als projektübergeordnetes Fenster in Kachelstruktur aufgebaut ist. Dort hat man die Möglichkeit gewisse Standardkomponenten und Bremsungsarten zu definieren und Einstellungen am Programm vorzunehmen. In den Einstellungen soll der/die Benutzer/in gewisse Voreinstellungen an die Berechnung und Ausgabe treffen können und den Speicherpfad für die Pooldatei (eine Datei, welche die Pool Bremsungsarten und Fahrwerke beinhaltet) vorgeben können. Die Voreinstellungen betreffen die Abbruchzeit (Vorgabe maximale Anhaltzeit) für die Berechnung eines Bremsfalles, ob es alle zehn Sekunden eine Überprüfung (Hangabtriebskraft < Bremskraft + Externe Kraft) geben soll, ob die Bremskraft am Ende des Bremsvorganges abgebaut werden soll und welche

der in 4.6.2 und 4.6.3 beschriebenen Rucke und Verzögerungen in der Ausleitung sein sollen. In der Maske zur Konfiguration von Bremsungsarten soll es möglich sein, neue Bremsungsarten zu erstellen, zu bearbeiten und zu löschen. In der Maske zur Konfiguration von Komponenten soll es möglich sein, Fahrwerke zu erstellen, zu bearbeiten, zu löschen, zu importieren und zu exportieren. Von der Startmaske kommt man in die Maske "Projektdefinition" in der man sowohl mit Projektgruppen als auch Projekten arbeitet. Dabei sollen neue Projektgruppen erstellt und bestehende Projektgruppen geöffnet werden können. In einer Projektgruppe befinden sich ein oder mehrere Projekte, die wiederum bearbeitbar (Projektnummer und -name), zu öffnen, kopierbar, exportierbar (in ein lokales Verzeichnis) und importierbar (von lokalem Verzeichnis) sein sollen. Sobald man ein Projekt geöffnet hat, soll man in der "Einstiegsmaske" landen, die ein projektinternes Menü ist. Von der "Einstiegsmaske" gelangt man in ein Fenster für die Zugkonfiguration. Dort soll der bei der Erstellung eines Projekts festgelegte Zugtyp nochmals änderbar sein. Es soll eine Liste aus Standardfahrwerken geben (dem Fahrwerkpool), die in der "Komponentenmanagementmaske" festgelegt werden. Das Komponentenmanagement soll wie bereits beschrieben über die "Startmaske" als auch über einen Button in der "Zugkonfiguration" erreichbar sein. In der "Zugkonfiguration" soll es möglich sein per "Drag & Drop" einzelne Fahrwerke auf den Zug zu ziehen. Mit dem "Hinziehen" auf den Zug sollen auch die Zuordnung und die automatische Beschriftung der Komponenten im Zug erfolgen. Ebenfalls muss dort ein PropertyGrid zum Verändern der bereits verbauten Fahrwerke vorhanden sein. Man soll einfach die Fahrtrichtung erkennen können und die Beschriftung der einzelnen Radkombinationen, Räder und Fahrwerke soll übersichtlich und gut erfassbar sein. Weiters soll es auch möglich sein, Fahrwerke, die im Zug bereits verbaut sind, zu exportieren und gegebenenfalls in den Pool zu importieren. Von der "Einstiegsmaske" gelangt man in eine Maske, die genau die Eigenschaften der verbauten Bremskomponenten im Zug anzeigen soll. Die Parameter sollen dabei in tabellarischer Form vorliegen und einfach einzugeben sein. Dort soll der Zug nochmals dargestellt sein um den Verbauungsort einfach nachvollziehen zu können. Wichtig ist hier, dass die Bremseinheiten nach ihrem Typ gegliedert sind. Das Fenster zum Bearbeiten der Bremseinheiten soll zusätzlich auch über die "Zugkonfiguration" erreichbar sein. Das Fenster zur Definition der Bremsungsarten und Ausfallszenarien im Projekt soll ebenfalls über die "Einstiegsmaske" erreichbar sein. Darin soll es möglich sein Bremsungsarten und Ausfallszenarien zu erstellen, zu bearbeiten und zu löschen. Die Maske "Beladungszustand" soll auch über das projektinterne Menü erreichbar sein und dient dazu neue Beladungszustände zu erstellen (beliebig viele), diese umzubenennen und zu löschen. Außerdem soll die Beladung für jede Achse und jeden Beladungszustand inklusive der Massenträgheit hier eingegeben und bearbeitet werden. Als eines der wichtigsten Fenster in der grafischen Oberfläche dient die "Bremsfallmaske" zur Erstellung von Bremsfällen, die aus den Vorgabeparametern zusammengesetzt werden. Ebenfalls können Bremsfälle in andere Projekte exportiert und aus anderen Projekten importiert werden. Die Vorgabeparameter, bei denen für jeden Bremsfall mindestens ein Wert aus jeder Kategorie ausgewählt werden muss sind: Bremsungsart, Ausfallszenario, Bremsausgangsgeschwindigkeit, Beladungszustand, Raddurchmesser, Neigung und Kraftschlusswert für Trieb- und Lauffahrwerke. Die erstellten Bremsfälle sollen danach in einer Tabelle dargestellt werden und darin kann man nachträglich noch die Bremsendgeschwindigkeit, die Stufe für die passiven Scheibenbremsen und die Werte für die aktiven Scheibenbremsen einstellen. Ebenfalls sollen die Bremsfälle sortierbar sein und der B-Regelwert nachträglich noch, anders als bei der Bremsungsart vordefiniert, verändert werden können. Nach dem Durchführen der gesamten Berechnung soll man in die "Bremsergebnismaske" kommen. Diese stellt die Bremsfälle wieder in einer Tabelle dar, jedoch sind diese hier nicht mehr bearbeitbar. Es wird ebenfalls eine Auswahl der Bremsfälle, die es in der Excelausleitung geben soll, geben und die Funktion diese dann auszuleiten. Sowohl von der "Bremsfallmaske" als auch von der "Bremsergebnismaske" gelangt man in die "Ausgabemaske", die es ermöglicht einen Bremsfall genau zu begutachten. Dort soll es Charts für die Geschwindigkeit, die Beschleunigung, den Weg, die Hangabtriebskraft, die externen Kräfte, die Kraftschlusswerte an den Fahrwerken, die Gesamtbremskraft und die Bremskräfte der einzelnen Bremssysteme über die Zeit geben. Die Geschwindigkeit soll zusätzlich über den Weg ausgegeben werden. Ebenfalls soll es dort eine Ergebnistabelle, für alle geforderten Bremsergebnisse aus 5.1.4 Anforderungen an die Ausgabegeben.

5.1.3 Anforderungen an die Eingabe

Die Darstellung der Anforderungen an die Eingabe in Abbildung 33 zeigt die benötigten Eingabewerte um eine vollständige Berechnung liefern zu können. Man kann daraus sehr gut einige benötigte Klassen und ihre Eigenschaften ableiten und bekommt teilweise einen Systementwurf. Dies wurde versucht mit der Färbung in Abbildung 33 zu zeigen. Die goldenen Elemente spiegeln die sich daraus ergebenden Klassen wieder. Alle grün gefärbten Anforderungen sind Eigenschaften dieser Klassen und die rosa gefärbten Rechtecke stellen spezielle Auswahlparameter dar. Klassen, die mit roten Konturlinien dargestellt sind, haben zusätzlich zu den im Diagramm beschriebenen, noch eine Eigenschaft Bezeichnung. Beginnen möchte ich auf der Seite der Bremseinheiten, dort kann man entnehmen, dass Parameter wie Tot- und Schwellzeit für Betriebs- als auch für Gefahrenbremsungen sowohl für ED-Bremsen, aktive Scheibenbremsen und passive Scheibenbremsen gelten. Durch die Gemeinsamkeiten dieser Elemente ergibt sich die abstrakte Klasse "Bremseinheit", die an diese drei gewisse Eigenschaften vererbt. Die elektrodynamische Bremse besitzt einen Motor, dem ein Motormoment vorgegeben wird und der zwei Motorkennlinien (je eine für Betriebsbremsungen und eine für Gefahrenbremsungen) enthält. Die Motorkennlinien benötigen vier Drehzahlwerte (n1, n2, n3, n4), welche die Knickpunkte in Abbildung 23 beschreiben. Die elektrodynamische Bremse besitzt ebenfalls ein Getriebe, das einen Getriebewirkungsgrad η und eine Übersetzung i hat. Die passive Scheibenbremse setzt sich aus einem Federspeichersattel, einem Getriebe (gleiches wie ED-Bremse) und einer Bremsscheibe zusammen. Der Federspeichersattel enthält die Informationen für die Bremssattelkräfte der drei Stufen: Stufe1 F_F, Stufe2 F_F und Stufe_var F_F. Die Bremsscheibe benötigt den mittleren Belagsreibwert μ_{BS} und den Bremsradius r_Z . Die aktive Scheibenbremse setzt sich aus Aktivsattel und Bremsscheibe zusammen. Der Aktivsattel benötigt Informationen über die maximale Sattelkraft F_{A} , die sechs einstellbaren Werte, die Bremsgestängeübersetzung iz, den Bremsgestängewirkungsgrad η_Z und die Anzahl der Kraftangriffspunkte je Bremsscheibe n. Eine Radkombination besitzt keine bis mehrere Bremseinheiten, eine Bezeichnung und einen Gleitschutz, der hier lediglich mit einer bestimmten Gleitschutzeffizienz ausgeführt wird. Sie ist für die Bremskraftverteilung zwischen den Rädern zuständig. Eine Radkombination besteht aus einem (Radsatzpaar) oder 2 Rädern (Einzelräder). Räder wiederum besitzen einen Referenzabstand zum Fahrwerk, einen Kraftvektor, der die Neigung i berücksichtigt, eine Schiene, die den Kraftschlusswert τ berücksichtigt und einen "Beladungsmanager". Der "Beladungsmanager" kann null bis viele Beladungsstufen besitzen, die wiederrum über eine statische Masse mst und Bezeichnung verfügen. Der "Beladungsmanager" verfügt über die Massenträgheit J pro Rad, sodass er sich die rotierende Masse m_{rot} berechnen kann. Zwei Räder werden immer quer zur Fahrtrichtung zu einer Achse zusammengefasst, die Eingabe der Beladungsstufen funktioniert nämlich anhand der Aufteilung auf die beiden Räder einer Achse. Zwei bis vier Radkombinationen ergeben ein Fahrwerk. Dieses Fahrwerk muss seinen Referenzabstand zum Zugteil und seinen Fahrwerkstyp kennen, dieser ist wichtig für die Zuordnung des Kraftschlusswertes. Dabei kann zwischen "Triebfahrwerk" (besteht aus 2 Radsatzpaaren), "Lauffahrwerk" (besteht aus 4 Einzelrädern) und "Sonderfahrwerk" unterschieden werden. Die Magnetschienenbremsen sind direkt am Fahrwerk angebracht und ein Fahrwerk kann keine bis viele Magnetschienenbremsen besitzen. Die MG-Bremse hat eine Totzeit, Schwellzeit und eine Abschaltgeschwindigkeit. Zusätzlich besitzt sie MG-Kurven, welche die Konstanten k_0 und k_1 für eine bestimmte Bremsausgangsgeschwindigkeit v_0 beschreiben. Ein Zugteil besteht aus keinem bis einem Fahrwerk im Falle des Avenios. Fahrwerkslos sind sogenannte Mittelmodule beim Avenio M. Der Zugteil besitzt eine Bezeichnung und einen Referenzabstand zum Zug. Ein Zug (eine Straßenbahn) setzt sich dann aus mindestens zwei Zugteilen zusammen. Der Zug besitzt die Informationen über die externen Kräfte und den zulässigen Ruck für Betriebs- und

Gefahrenbremsung. Die externen Kräfte setzen sich aus Laufwiderstand, der Daten für Rollwiderstandsbeiwert f_R, Stoßwiderstandsbeiwert c_d und Luftwiderstandsbeiwert C benötigt, und Windkraft, die Eingabewerte für den Luftwiderstandsbeiwert C und den Beiwert der Zugaerodynamik aufgrund der Windkraft D erhält, zusammen. Ein Projekt beinhaltet genau einen Zug und erhält einen Projektnamen und eine Projektnummer. Eine Projektgruppe kann mehrere Projekte enthalten und bekommt eine Bezeichnung und einen Speicherpfad. Unter einer Projektgruppe kann man sich z.B. eine Sammlung von Avenio 3-Teilern und Avenio 4-Teilern, die in einem Auftrag für eine Stadt ausgeschrieben sind, vorstellen. Um nun mit dem Projekt rechnen zu können, benötigt man noch die Eingabewerte für die Bremsfälle ("Bremsfalldaten"). "Bremsfalldaten" beinhalten eine Bremsungsart und ein Ausfallszenario. Die Bremsungsart benötigt eine Bezeichnung, jeweils einen boolschen Wert ob die elektrodynamischen Bremsen, aktiven Scheibenbremsen, passiven Scheibenbremsen oder Magnetschienenbremsen eingeschalten sind, einen Wert (von 1 bis 6) für die aktiven Scheibenbremsen und eine Stufe (1, 2, var) für die passiven Scheibenbremsen, die Information ob es sich um eine "Betriebsbremsung" oder eine "Gefahrenbremsung" handelt und einen "B-Regelwert". Das Ausfallszenario bekommt eine Bezeichnung und ihm werden die jeweiligen Objekte zugeordnet, die ausfallen oder ersetzt werden sollen. Um dann vollständige "Bremsfalldaten" zu liefern wird noch eine Bezeichnung dieser, ein Beladungszustand, eine Bremsausgangsgeschwindigkeit, eine Bremsendgeschwindigkeit, eine Neigung, ein Kraftschlusswert, ein Wert für die aktiven Scheibenbremsen, eine Stufe für die passiven Scheibenbremsen und ein Raddurchmesser benötigt. Die Stufe und der Wert der elektrohydraulischen Scheibenbremsen wird einerseits bei der Bremsungsart vorgegeben, kann aber wenn es sich um ein spezielles Ausfallszenario handelt nochmals direkt in den "Bremsfalldaten" überschrieben werden.

5.1.4 Anforderungen an die Ausgabe

In Abbildung 34 sieht man die Anforderungen an die Ausgabe aus "Bremssim". Einerseits gibt es die Ausgabe in der Simulationssoftware selbst, bei der einzelne Bremsfälle genau betrachtet werden können. Andererseits gibt es die Excelausleitung, die als Vorlage für ein Behördendokument dient. Bei der Ausgabe einzelner Bremsfälle, sollen alle Ergebnisparameter aus der Berechnung angezeigt werden (teilweise als Charts über der Zeit als auch als Einzelwerte). In der Exceldatei können sowohl Bremsfälle, die sich aus der Bremsmatrix ergeben als auch solche, die sich aufgrund interner Überprüfungen und Anforderungen ergeben enthalten sein. Für das Behördendokument müssen die einzelnen Excelblätter noch in eine Wordvorlage eingebettet werden. Dazu ist es wichtig, dass die gewünschten Bremsfälle angewählt werden können (nicht automatisch alle exportiert werden) und die gewünschten und Rucke und Verzögerungen ausgewählt werden können. Ruck, Verzögerung, Geschwindigkeit, Weg, Gesamtbremskraft und die Kraftschlusswerte an den einzelnen Fahrwerken sollen über der Zeit als Bremskurven dargestellt werden. Dies deutet die Färbung der Elemente in hell rosa an.



Abbildung 31: Anforderungen an die Berechnung



Abbildung 32: Anforderungen an das User-Interface



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek. **Bibliothek**



Abbildung 34: Anforderungen an die Ausgabe

5.2 Class Model (Klassenmodell)

Im Klassenmodell wird ein Model für die Zusammenstellung der Klassen in der objektorientierten Programmierung gewählt. Dabei wird die Funktion der Software in einzelne Klassen aufgeteilt, die jeweils eine Verantwortung haben. Für die Entwicklung des Klassenmodells ist es besonders wichtig das gesamte Bremssystem und den Aufbau der Straßenbahn zu kennen.

Das Klassenmodell ist aufgrund seiner Größe und der Übersichtlichkeit halber in die grafische Oberfläche und das Bremssystem/-berechnung aufgeteilt und liegt im Anhang der Arbeit bereit. Man erkennt im Klassendiagramm auch sehr gut den Aufbau der Berechnung und die Kardinalitäten zwischen den einzelnen Klassen.

Beim Klassendiagramm zum Bremssystem kann man die Systemkomponenten einer Straßenbahn begutachten. Es bildet sozusagen einen digitalen Zwilling des Straßenbahnbremssystems. Der digitale Zwilling ist möglichst an die Komponenten des realen Produkts angelehnt. (Raimund, 2018) Das Besondere an diesem Ansatz ist, dass die Funktionen auch ständig ausgebaut werden können. Wenn man nun neue Elemente anfügt können diese die Informationen des Bremssystems verarbeiten bzw. die Funktionen des Bremssystems ausbauen. Die Multiplizität in den Abbildungen beschreibt die mögliche Häufigkeit im System. Beispielsweise besteht eine Radkombination aus 1 bis 2 Rädern und ein Rad ist genau in einer Radkombination verbaut.

Im Klassendiagramm zur grafischen Oberfläche erkennt man gut, dass allen Klassen die Eigenschaft "Startmaske" übergeben wird um die Information zur Projektgruppe oder zum Projekt zu haben.

5.2.1 Bremssystem

In den beiden ersten Abbildungen im Anhang ist das Klassenmodell des Bremssystems dargestellt. Als Verbindung zwischen dem Teil 1 und Teil 2 kann ein Zugteil 0 bis 1 Fahrwerke besitzen. Eine Instanz eines Fahrwerks kann nur in genau einem Zugteil verbaut sein.

5.2.2 Grafische Oberfläche

In der dritten Abbildung im Anhang kann man gut erkennen, dass alle Masken die Eigenschaft "Startmaske" besitzen und somit die Information über das aktuelle Projekt, das "Config_File" und den Pool überall verfügbar ist.

5.3 Use-Case Model (Durchführungsmodell)

Mithilfe der Anforderungen konnten nun konkrete Use-Cases überlegt werden. Wobei sich die Anforderungen im Softwareentwicklungsvorgang und während der Testung erheblich verändert haben im Vergleich zu den ursprünglichen Gedanken. Die in der Arbeit abgebildeten Requirements-Models sind ausschließlich die finalen Versionen.

Das Durchführungsmodell orientiert sich an den im Anforderungsmodell festgelegten Fenstern und gibt daher alle Funktionen aus der Benutzersicht wieder. Dabei sind alle notwendigen Funktionen der Software den jeweiligen Masken zugeordnet und umgesetzt worden.

5.3.1 Startmaske

Die "Startmaske" stellt die zentrale projektexterne Navigationsmaske dar und bietet über die vier ersichtlichen Kacheln mehrere weiterführende Fenster an. Dabei kann man in die Projektdefinition (Projekte), zu den Bremsungsarten, zu den Komponenten (Komponentenmanagement) und in die Einstellungen der Software selbst gelangen. In Abbildung 36 sind sämtliche Use-Cases und die "Startmaske" als Screenshot ersichtlich.

Folgende Use-Cases ergeben sich in der "Startmaske":

- Login
- Projektdefinition öffnen
- Komponentenmanagement öffnen
- Bremsungsarten öffnen
- Einstellungen öffnen

Login (Abbildung 37)

Bevor die Startmaske selbst geöffnet wird, kommt man in die "Loginmaske" und der/die User/in muss dort den Benutzernamen und das Passwort eingeben. Die angelegten Benutzer und Passwörter sich in einem "Config_File" abgelegt. Für die firmeninterne Anwendung der Software ist das ausreichend, außerdem kann die Loginfunktion jederzeit erweitert werden.

	User Name	
K	Passwort	
80	Lonin	cit

Abbildung 35: Loginmaske

Der/die User/in öffnet die "Bremssim".exe Datei und landet in der "Loginmaske". Vor dem Anzeigen der "Loginmaske" wird noch das "Confiq_File" geladen in dem allgemeine Konfigurationseinstellungen der Software und die Passwörter hinterlegt sind. Nach der Eingabe der Userkennung und des Passwortes überprüft der "Loginmanager" anhand der in der statischen Klasse "User" hinterlegten Werte, ob die Eingabe korrekt ist. Wenn ja, gelangt man in die "Startmaske". Wenn nein, kann die Eingabe wiederholt werden. Sobald die "Loginmaske" manuell geschlossen wird, beendet sich die Applikation.

Projekdefinition öffnen (Abbildung 38)

Dabei wird beim Öffnen der "Projektdefintionsmaske" eine neue Instanz der "Projektdefinition" erzeugt und die "Projektdefinition_Show()" Methode ausgeführt, die dafür sorgt, dass zuerst eine Projektgruppe geöffnet wird, bevor man ein Projekt wählen kann. Man kommt also zuerst nur in den Reiter des "Projektgruppen – Fensters", bei dem die Projektgruppe gewählt werden kann. Erst nach Wahl dieser kann man ein Projekt öffnen. Die weiterfolgenden Use-Cases werden in 5.3.3 Projektdefinition beschrieben.

Komponentenmanagement öffnen (Abbildung 39)

Es wird beim Öffnen des Komponentenmanagements eine neue Instanz des "Komponentenmanagements" erzeugt und die Fahrwerksliste aus dem Pool geladen und in der ListBox angezeigt. Wie im Komponentenmanagement weitergearbeitet werden kann sieht man in 5.3.5.

Bremsungsarten öffnen (Abbildung 40)

Beim Öffnen der "Bremsungsartenmaske" wird eine neue Instanz der "Bremsungsart_Übersicht" erzeugt und anschließend die Methode "Bremsungsart_Übersicht_Load()" ausgeführt, bei der die Bremsungsarten aus dem Pool geholt und in einer ListBox angezeigt werden. Wie man mit den Bremsungsarten weiter vorgeht wird in 5.3.4 beschrieben.

Einstellungen öffnen (Abbildung 41)

Die Einstellungen an "Bremssim" können dabei von der "Startmaske" aus geöffnet werden. Dabei wird eine neue Instanz des "Einstellungs" Fensters erzeugt und dort wird das "Config_File" im Property Grid angezeigt. Während die "Einstellungsmaske" aktiv ist wird die "Startmaske" ausgeblendet. Die weiteren Vorgänge in der Maske werden im nächsten Kapitel beschrieben.



Abbildung 36: Use-Cases Startmaske (Icons von (Commons, 2018))



Abbildung 37: Sequenzdiagramm Login



Diplomarbeit











5.3.2 Einstellungen

Die Use-Cases und ein Screenshot der Maske "Einstellungen" sind in Abbildung 42 ersichtlich. Von der "Startmaske" gelangt man über einen Klick auf die "Einstellungen-Kachel" zu den Einstellungen. Dort befindet sich lediglich ein PropertyGrid an dem sich die Änderungen sofort durchführen lassen. Gespeichert werden die Einstellungen in einem Konfigurationsfile (dem Confiq_File). Folgende Einstellungen lassen sich hier vornehmen:

- Boolsche Auswahl, ob die Bremskraft am Ende des Bremsvorganges abgebaut werden soll
- Boolsche Auswahl, ob jeweils nach 10s Bremsvorgang eine Überprüfung Bremskraft > Hangabtriebskraft stattfinden soll
- Eingabe der Abfangzeit, d.h. beim Erreichen dieser Bremszeit wird der Bremsfall automatisch abgebrochen
- Boolsche Vorauswahl ob bestimmte Verzögerungen und Rucke in Ausleitung erhalten sein sollen
- Eingabe der Erdbeschleunigung (spezielle Kundenwünsche)
- Speicherpfad der Pool Dateien (Bremsungsarten und Fahrwerke)

Die beiden Use-Cases die sich daraus ergeben sind oben in der Grafik erkennbar:

- Einstellungen an "Bremssim" vornehmen
- Fenster schließen

Einstellungen an "Bremssim" vornehmen (Abbildung 43)

Das Bearbeiten der Einstellungen an "Bremssim" wird in einem PropertyGrid vorgenommen und die Änderungen werden in einem "Config_File" als ".xml-Datei" abgespeichert.

Fenster schließen (Abbildung 44)

Beim Schließen des "Einstellungen" Fensters wird das bearbeitete "Config_File" in einem konkreten Unterverzeichnis zur "Bremssim".exe gespeichert. Man gelangt wieder zurück in die "Startmaske".



Diplomarbeit







5.3.3 Projektdefinition

Die "Projektdefintion" dient zum Managen von Projektgruppen und Projekten. Folgende Funktionen lassen sich dabei realisieren:

- Projektgruppe öffnen
- Projektgruppe erstellen
- Neues Projekt erstellen
- Referenzprojekt öffnen
- Projektnamen ändern
- Projekt exportieren
- Projekt kopieren
- Projekt löschen
- Projekt importieren
- Projektdefinition schließen

In Abbildung 45 sind die Use-Cases gemeinsam mit dem User-Interface dargestellt

Projektgruppe erstellen (Abbildung 46)

Bei der Erstellung einer Projektgruppe, die in der Klasse "Projekte" abgebildet ist, handelt es sich um die Zusammenfassung mehrerer Projekte/Züge, die für eine Ausschreibung abgewickelt werden. Das sind häufig unterschiedliche Zugtypen, aber die gleichen Bremsfälle. Nach Eingabe des Projektgruppennamens klickt der/die Anwender/in auf die Kachel "neue Projektgruppe erstellen". Nun wird überprüft ob tatsächlich ein Name eingegeben wurde. Im Falle, dass ein Name eingegeben wurde, kommt eine Abfrage, ob die momentan offene Projektgruppe gespeichert werden soll. Bei Bestätigung wird diese über den später beschriebenen Use-Case "Projektgruppe speichern" gespeichert. Nun erscheint ein OpenFileDialog, wo der/die Benutzer/in das Verzeichnis, in dem die Projektgruppe abgelegt wird, angibt. Anschließend werden dort die Ordner "Ausleitungen", "Abbildungen" und "Archiv" angelegt. Nun wird noch die neue Instanz von "Projekte" erzeugt und der "Startmaske" zugewiesen. Die "Startmaske" hat eine Eigenschaft "Projekte", welche die Projektgruppe in jeder Maske verfügbar macht. Abschließend wird noch ein "LockFile" erzeugt, dass als "xml-Datei" im selben Verzeichnis wie die Projektgruppe liegt. Dieses verhindert, dass eine Projektgruppe mehr als einmal, beziehungsweise von mehreren Nutzern geöffnet werden kann.

Projektgruppe öffnen (Abbildung 47)

Bei diesem Use-Case klickt der/die Benutzer/in zuerst auf "bestehende Projektgruppe öffnen". Wo abgefragt wird, ob die aktuell geöffnete Projektgruppe noch gespeichert werden soll. Beim Bestätigen des "Ja" wird die Projektgruppe gespeichert, ansonsten kommt man ohne speichern direkt in den OpenFileDialog. Dort wählt der/die Nutzer/in die bestehende Datei aus. Bevor die Datei noch geöffnet wird, wird das im selben Verzeichnis liegende "LockFile" geöffnet und ausgelesen. Sollte kein "LockFile" vorhanden sein wird ein neues erzeugt und in das Verzeichnis gelegt. Wenn im vorhandenen File die Eigenschaft "Open" auf "false" gesetzt ist, wird das Laden der Projektgruppe fortgesetzt und diese der "Startmaske" zugeordnet. Anschließend wird umgeschaltet auf den "Projekt-Tab" und dort die Liste der bestehenden Projekte angezeigt. Sowohl im PropertyGrid als auch im Label in der Mitte wird die Projektgruppe angezeigt. Sollte die Projektgruppe bereits durch eine/n andere/n Benutzer/in geöffnet sein, wird eine Fehlermeldung ausgegeben und die Projektgruppe nicht geladen.

Neues Projekt erstellen (Abbildung 48)

Zum Erstellen eines neuen Projekts wird im User-Interface ein Projektname (eindeutig – darf noch nicht vergeben sein), eine Projektnummer und der Zugtyp eingegeben werden. Durch den Klick auf das rote Feld mit "neues Projekt erstellen" werden folgende Instanzen erzeugt:

- ein Projekt
- ein Zug, der dem Projekt zugeordnet wird
- Externe Kräfte, die dem Zug zugeordnet werden
- Rollwiderstand und Windkraft, die beide den externen Kräften zugeordnet werden
- ein Bremsungsmanager
- ein Bremsfallmanager
- eine Bremssteuerung
- ein Ausfallszenario (Instanz von "Ausfall") mit der Bezeichnung: "kein Ausfall"

Anschließend werden alle Bremsungsarten aus dem Pool per "Deep Copy" (Hakger, 2009) in das Projekt geladen. Somit sind alle davor projektunabhängigen Bremsungsarten in das Projekt geladen und können dort noch verändert werden. Nun wird das Projekt in die "Projektliste" der "Projekte" Instanz hinzugefügt und gespeichert. Im letzten Schritt wird noch eine Instanz der "Einstiegsmaske" erstellt und diese angezeigt.

Referenzprojekt öffnen (Abbildung 49)

Wenn man ein bestehendes Projekt öffnen will, muss man zuerst ein Projekt in der ListBox auswählen. Anschließend klickt man auf die PictureBox mit "bestehendes Projekt öffnen". Nun wird das gewünschte Projekt aus der Projektgruppe geholt und der "Startmaske" als Projekt zugeordnet. Die "Startmaske" wird jeder weiteren projektinternen Maske als Eigenschaft übergeben. Somit kann immer auf das Projekt zugegriffen werden. Abschließend wird noch eine neue Instanz der "Einstiegsmaske" erzeugt und diese geöffnet.

Projektnamen ändern (Abbildung 50)

Zum Ändern des Projektnamens oder der Projektnummer benutzt man diese im PropertyGrid, das direkt mit dem Objekt verbunden ist.

Projekt exportieren (Abbildung 51)

Projekte können auch exportiert werden, das ist gleichbedeutend damit, dass sie in einem Verzeichnis lokal auf dem Computer abgelegt werden. Dies geschieht separat von ihrer Projektgruppe und sie können von dort aus in eine beliebige Projektgruppe importiert werden. Der Importvorgang wird im übernächsten Schritt beschrieben. Dabei wählt der/die User/in zuerst das gewünschte Projekt aus der ListBox und klickt anschließend auf den "Exportbutton". Mittels SaveFileDialog wählt er dann das gewünschte Verzeichnis für den Speicherort. Das Projekt wird dort als "Binary-Datei" gespeichert.

Projekt kopieren (Abbildung 52)

Im "Bremssim" ist es auch möglich Projekte zu kopieren. Dies kann beispielsweise angewendet werden, wenn Projekte innerhalb einer Projektgruppe bis auf den Zugtyp gleiche Daten und Bremsfälle aufweisen. Dabei wird ein Projekt aus der ListBox ausgewählt und auf den "Kopierbutton" geklicket. Anschließend öffnet sich eine "Inputbox" für den neuen Projektnamen. Der Kopiervorgang wird dann mittels Speichern in einem Zwischenverzeichnis und anschließendem Laden ausgeführt. Dabei wird das geladene Projekt der gerade geöffneten Projektgruppe hinzugefügt. Zum Schluss wird noch die ListBox aktualisiert.

Projekt importieren (Abbildung 53)

Wie bereits oben beschrieben können Projekte, die lokal am PC abgelegt sind, in eine Projektgruppe importiert werden. Dies geschieht mittels Klick auf den "Importbutton" und anschließendem Open-FileDialog. Das gewählte Projekt wird anschließend der Projektgruppe hinzugefügt.

Projekt löschen (Abbildung 54)

Ein Projekt kann auch aus einer Projektgruppe entfernt werden. Dazu muss das gewünschte Projekt zuerst aus der ListBox ausgewählt werden und anschließend der "Löschen-Button" betätigt werden. Sofort erscheint eine Messagebox mit der Abfrage, ob man sich sicher ist. Beim bestätigen des "Ja" wird das Projekt aus der Projektgruppe entfernt. Ansonsten endet der Use-Case.

Projektdefinition schließen (Abbildung 55)

Beim Schließen des "Projektdefinition" Fensters erscheint eine Abfrage, ob man die aktuelle Projektgruppe speichern möchte. Ebenso wird das "LockFile" für die aktuell geöffnete Projektgruppe überschrieben und "Open" auf "false" gesetzt. Abschließend wird noch die "Startmaske" angezeigt.



Abbildung 45: Use-Cases Projektdefinition

	_ D X
n eines	s neuen Projektes
er	
	•
lliste b	estehender Proiekte
	Test
	X
enname	rojektgruppe
enname	rojektgruppe
enname ende P ges nnung	rojektgruppe Test
enname ende P ges nnung epfad t gespeid	rojektgruppe Test C:\Users\z002zu4y\Des
enname ende P ges nnung epfad t gespeict	Test C:\Users\z002zu4y\Des tent
enname ende P ende P epfad t gespeid reversion nutzer	Test C:\Users\z002zu4y\Des eet V1.0 AD001\z002zu4y
enname ende P ges annung epfad t gespeict reversion nutzer	Test C:\Users\z002zu4y\Des Pert V1.0 AD001\z002zu4y
enname ende P ges nnung epfad t gespeict reversion nutzer	Test C:\Users\z002zu4y\Des Hent V1.0 AD001\z002zu4y
enname ende P ges nnung apfad t gespeid eversion nutzer	Test C:\Users\z002zu4y\Des Pert V1.0 AD001\z002zu4y
enname ende P ges inung spfad gespeid gespeid gespeid	rojektgruppe
enname ende P ges nung epfad t gespeict eversion nutzer	rojektgruppe Test C:\Users\z002zu4y\Des eet V1.0 AD001\z002zu4y
enname ende P ges nnung apfad gespeid eversion autzer	rojektgruppe Test C:\Users\z002zu4y\Des hert V1.0 AD001\z002zu4y



Diplomarbeit

Seite 68 von 141

Roman Schwarz





Abbildung 48: Sequenzdiagramm neues Projekt erstellen



Diplomarbeit







Seite 70 von 141

TU **Bibliothek**, Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar wiew knowedgehub Yhe approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.







Projektnummer(): string











Abbildung 52: Sequenzdiagramm Projekt kopieren



Seite 72 von 141

TU **Bibliothek**, Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar Wien Nourknowlede hub Your knowlede hub






Diplomarbeit

Roman Schwarz



5.3.4 Bremsungsarten und Ausfallszenarios

Von der "Startmaske" und von der "Einstiegsmaske" gelangt man in das "Bremsungsarten und Ausfallszenarien" Fenster. Erreicht man dieses von der "Startmaske", kann man lediglich die Bremsungsarten sehen und bearbeiten, da die Ausfallszenarien projektintern sind. Von der "Einstiegsmaske" können sowohl die projektinternen Bremsungsarten, als auch die Ausfallszenarien bearbeitet werden.

Dabei ergeben sich folgende Use-Cases, die in Abbildung 58 dargestellt sind:

- Neue Bremsungsart hinzufügen
- Bremsungsart bearbeiten
- Bremsungsart löschen
- Pool/Projektgruppe speichern
- Neues Ausfallszenario hinzufügen
- Ausfallszenario bearbeiten
- Ausfallszenario löschen

Neue Bremsungsart hinzufügen (Abbildung 59)

Mit dem Klick auf "Hinzufügen einer neuen Bremsungsart" öffnet sich das darunter abgebildete Inputfenster. Hier kann eine Bezeichnung eingegeben werden. Dabei ist wichtig, dass, falls es sich um eine "Sicherheitsbremsung" handelt, die CheckBox mit "Ruckbegrenzung deaktivieren" markiert ist, weil es dadurch keine Begrenzung des maximalen Rucks gibt. Ansonsten können die Bremssysteme beliebig eingeschalten bzw. abgeschaltet werden und Voreinstellungswerte für die Stufe der passiven Scheibenbremse und für die Werte der aktiven Scheibenbremse eingegeben werden. Ebenfalls unterschieden wird, ob es sich um eine "Betriebsbremsung" oder "Gefahrenbremsung" handelt, dies kann mittels ComboBox ausgewählt werden. Abschließend wird noch der B-Regelwert eingegeben. Mit dem Klick auf "OK" wird die Bremsungsart in die Liste der Bremsungsarten hinzugefügt. Beim Abbruch gehen die Eingaben verloren und die Bremsungsart wird nicht in die Liste hinzugefügt. In beiden Fällen gelangt man wieder in die Übersicht der Bremsungsarten und Ausfallszenarios zurück.

📴 Bremsungsart erstellen			3 🕺
Bezeichnung	T		
ED Bremsen eingeschalten			
Passive Scheibenbremsen eingeschalten			•
Aktive Scheibenlbremsen eingeschalten			
Magnetschienenbremsen eingeschalten			
BB oder GB	1		
B-Regler		×	m/s²
Ruckbegrenzung deaktivieren			
ОК	Abbrech	ien	

Abbildung 56: Inputfenster Bremsungsart erstellen

Bremsungsart bearbeiten (Abbildung 60)

Das Bearbeiten einer Bremsungsart geschieht über das PropertyGrid unterhalb der ListBox, wie in Abbildung 58 ersichtlich ist. Dort kann man sämtliche Eigenschaften der jeweiligen Instanz "Bremsungsart" bearbeiten. Zuerst muss die gewünschte Bremsungsart in der ListBox ausgewählt werden, die das "list_Bremsungsarten_SelectedIndexChanged()" Ereignis auslöst, das dem PropertyGrid die richtige Bremsungsart zuordnet.

Bremsungsart löschen (Abbildung 61)

Beim Löschen einer Bremsungsart wird ebenfalls mit dem Auswählen der gewünschten Bremsungsart begonnen, die das Ereignis "list_Bremsungsarten_SelectedIndexChanged()" auslöst. Dabei wird dem PropertyGrid wieder die angewählte Bremsungsart zugeordnet. Mit dem Klick auf den "Löschen-Button" wird das "btn_ba_löschen_Click()" Ereignis ausgelöst, bei dem, je nachdem ob man sich in einem Projekt oder außerhalb befindet, die Bremsungsart aus dem Pool oder dem Projekt gelöscht wird.

Pool/Projektgruppe speichern (Abbildung 62)

Dabei wird je nachdem in der projektinternen Sicht die Projektgruppe gespeichert oder in der projektexternen Ansicht der Pool gespeichert. Der Speichervorgang des Pools ist in Abbildung 72 abgebildet. Da jedes Fenster die "Startmaske" als Eigenschaft besitzt und diese wiederum die Projekt-(Projekte), wird beim Klick auf den "Speicherbutton" gruppe die Methode "Speichern Projektgruppe()" der "Startmaske" ausgeführt. Dabei wird der speichernde Windows-Benutzer, die in "Bremssim" hinterlegte Softwareversion und der "Bremssim"- Benutzer als Eigenschaft in die Projektgruppe (Projekte) geschrieben. Anschließend wird mit dem "Dat Speichermanager" die Methode "SpeichereObject()" ausgeführt. Die Speicherung in "Bremssim" erfolgt generell immer über die gesamte Projektgruppe als "Binary-Datei".

Neues Ausfallszenario hinzufügen (Abbildung 63)

Um ein neues Ausfallszenario zu erstellen wird zuerst der "Hinzufügen-Button" aus Abbildung 58 geklickt. Dieser löst das Ereignis "add_Ausfall_Click()" aus, das ein "Inputfenster" für den Ausfall liefert. Die Ausfälle und Ersätze können hier fahrwerksweise und pro Bremssystem eingegeben werden.

1 Ausfallszenario erstelle	en			
Hier wird ein neuer Ausfallsze	enario erstellt, bitte wählen Sie ein	e sinnvolle Bezeichnung - z.B., Ersat	zbremsung	
Bezeichnung	Ersatzbremsu	ng		
Neuer Ausfall/Ersatz	Ein Ausfallszenario kann	mehrere Ausfälle/Ersätze haben		
Ausfall 🗸	löschen)		
TFW1 •	ED Bremsen	Aktive Scheibenbremsen	Passive Scheibenbremsen	MG Bremsen
Ersatz 🔹	löschen			
TFW1 •	ED Bremsen	Aktive Scheibenbremsen	Passive Scheibenbremsen	MG Bremsen
Ersatz 👻	löschen	Ì		
LFW1 -	ED Bremsen	Aktive Scheibenbremsen	Passive Scheibenbremsen	MG Bremsen
ок				

Abbildung 57: Fenster für die Erstellung eines Ausfallszenarios

Mit dem Klick auf den "OK-Button" wird eine neue Instanz "Ausfall", die alle Bremseinheiten und Magnetschienenbremsen als Objekte enthält, erzeugt und dem Projekt in der Liste "Ausfälle" hinzugefügt. Anschließend wird das "Inputfenster" geschlossen und die Übersicht über die Bremsungsarten und Ausfallszenarios wieder geöffnet.

Ausfallszenario bearbeiten (Abbildung 64)

Aufgrund der Zuordnung der Instanzen der Bremseinheiten und Magnetschienenbremsen bei den Ausfallszenarien ist es notwendig, beim Bearbeiten eines Ausfallszenarios dieses neu zu Erstellen. Als Erstes wird das zu bearbeitende Ausfallszenario ausgewählt. Dies löst das Ereignis "list_ausfälle_SelectedIndexChanged()" aus, aufgrund dessen die korrekte Instanz "Ausfall" aus Liste "Ausfälle" des Projekts geladen wird. Mit dem Klick auf den "Bearbeiten-Button" erfolgt die Erzeugung des Inputfensters (siehe Abbildung 57), worin das Ausfallszenario bearbeitet wird. Mit dem Klick auf den "OK-Button" gelangt man wieder in die Übersicht der Bremsungsarten und Ausfallszenarien zurück.

Ausfallszenario löschen (Abbildung 65)

Das Löschen eines Ausfallszenarios erfolgt wiederum über die Auswahl des gewünschten Szenarios aus der ListBox. Mit dem Betätigen des "Löschen-Buttons" wird das Ausfallszenario aus der Liste der Ausfälle im Projekt gelöscht.



Abbildung 58: Use-Cases Bremsugnsarten und Ausfallszenarios

		×
allED+Antriebsn allED	Hinzufügen	
	Bearbeiten	
	Löschen	
	<u>.</u>	





























Diplomarbeit

5.3.5 Komponentenmanagement

Das "Komponentenmanagement" (Abbildung 66) dient dazu, Fahrwerke für den Pool anzulegen. Da es sich beim Siemens Avenio um ein Plattformfahrzeug handelt gibt es einige Standardfahrwerke, die im Pool gespeichert sind und bei denen lediglich die Bremskomponenteneigenschaften von Projekt zu Projekt variieren. Folgende Use-Cases ergeben sich im "Komponentenmanagement":

- Neues Fahrwerk anlegen
- Fahrwerk löschen
- Fahrwerk bearbeiten
- Fahrwerk exportieren
- Fahrwerk importieren
- Pool speichern

Neues Fahrwerk anlegen (Abbildung 67)

Das Anlegen eines neue Fahrwerks passiert über den "Kompontente erzeugen - Button". Danach wird das neu erzeugte Fahrwerk im PropertyGrid angezeigt und kann von dem/der Benutzer/in dort bearbeitet werden. Beim erzeugen wird das Fahrwerk auch sofort dem Pool in die Liste "Fahrwerke" hinzugefügt.

Fahrwerk löschen (Abbildung 68)

Es ist auch möglich Fahrwerke wieder aus dem Pool zu löschen. Dies geschieht mit der Auswahl des zu löschenden Fahrwerks aus der ListBox und anschließendem Klick auf den "Löschen-Button".

Fahrwerk bearbeiten (Abbildung 69)

Das Bearbeiten eines Fahrwerks erfolgt mit der Auswahl des zu wählenden Fahrwerks und der Zuordnung dessen als "SelectedObject" des PropertyGrids. Die weitere Bearbeitung erfolgt im PropertyGrid wo die im Sequenzdiagramm ersichtlichen Instanzen erzeugt und bearbeitet werden können. Im Pool können bereits sämtliche Eigenschaften mit Standardwerten hinterlegt werden, die dann beim Platzieren im Zug übernommen werden.

Fahrwerk exportieren (Abbildung 70) und importieren (Abbildung 71)

Fahrwerke können auch vom Pool exportiert und in den Pool importiert werden. Der Vorgang dabei ist trivial und erfolgt nach demselben Prinzip wie das Exportieren und Importieren von Projekten. Beim Import eines Fahrwerks ist es jedoch wichtig, dass die Beziehungen zu sämtlichen vorherigen Projekten entfernt werden.

Pool speichern (Abbildung 72)

Der Speichervorgang des Pools wird mit einem Klick auf den "Speicher-Button" ausgelöst. In dem daraus hervorgehenden Ereignis wird abgefragt ob ein Pool vorliegt, bzw. geladen werden konnte. Ist dies nicht der Fall wird ein SaveFileDialog ausgeführt und man kann den Pool in ein beliebiges Verzeichnis speichern. In beiden Fällen wird dann mit dem "Dat_Speichermanager" das File abgespeichert. Der Pool wird als "Binary-Datei" gespeichert und liegt in einem fest vorgegebenen Laufwerk, sodass er für alle Mitarbeiter zugänglich ist.



Abbildung 66: Use-Cases Komponentenmanagement

	x
verk 👻	
Kamponente	
erzeugen	
	-











Abbildung 70: Squenzdiagramm Fahrwerk exportieren

Abbildung 71: Sequenzdiagramm Fahrwerk importieren



Abbildung 72: Sequenzdiagramm Pool speichern

5.3.6 Einstiegsmaske

Die "Einstiegsmaske" dient als projektinterne Navigation. Wie man in der darunterliegenden Darstellung gut erkennt, ist sie mit Kacheln aufgebaut. Folgende Use-Cases ergeben sich in der "Einstiegsmaske":

- Anderes Projekt öffnen / Fenster schließen
- Projektgruppe speichern
- Bremsungsarten und Ausfallszenarien öffnen
- Zugkonfiguration öffnen
- Projektbremsparameter öffnen
- Beladungszustände öffnen
- Bremsfälle öffnen
- Bremseinheiten öffnen







Abbildung 74 : Einstiegsmaske

Die Sequenzdiagramme zu diesen Use-Cases führe ich in dieser Arbeit nicht an, da dabei immer eine Instanz des jeweiligen Fensters erzeugt wird und anschließend das "Shown-" oder "Load-Ereignis" dieser Instanz ausgeführt wird.

5.3.7 Zugkonfiguration

Die "Zugkonfiguration" (Abbildung 75) hat eine ganz wichtige Funktion in "Bremssim". Sie wird zum "Zusammenstellen" bzw. konfigurieren des Zuges verwendet. Dies ist besonders wichtig, da das Fahrzeug einfach und schnell konfiguriert werden soll. In der darunterliegenden Abbildung kann man die Use-Cases in der Zugkonfiguration entnehmen. Diese sind:

- Komponentenmanagement öffnen
- Bremseinheiten öffnen
- Verbautes Fahrwerk exportieren
- Fahrwerk zuordnen
- Fahrwerk auf Zugteil bearbeiten
- Zugtyp ändern

Fahrwerk zuordnen (Abbildung 76)

Der softwaretechnische Ablauf beim Zuordnen eines Fahrwerks ist in Abbildung 76 ersichtlich. Dabei wird zuerst aus der Liste der vorhandenen "Fahrwerkinstanzen" ein Element angeklickt. Dieses Element lässt sich nun auf die vorhandenen Plätze für Fahrwerke im Zug platzieren. Beim anklicken eines Elementes wird das "listBoxfwinstanzen_MouseDown()" Ereignis ausgeführt, welches die "Drag and Drop"-Funktion ermöglicht und das "Fahrwerksgrafik_DragEnter()" Ereignis ausführt. Wenn das ausgewählte Fahrwerk nun auf einem korrekten Platz ausgelassen wurde, wird das "Fahrwerksgrafik_DragDrop()" Ereignis ausgeführt, in dem zuerst überprüft wird, ob bereits andere Ausfallszenarien außer das "kein Ausfall"-Szenario definiert wurden. Falls das der Fall ist gibt es eine Abfrage, ob man sich sicher ist das Fahrwerk auszutauschen, da sonst eventuell Ausfallszenarien nicht mehr korrekt sind. Beim Bestätigen des "Nein" endet die Methode und es wird kein Fahrwerk zugeordnet. Im Falle eines "Ja" und wenn noch keine Ausfallszenarien definiert wurden, wird das Methode "dragDropZuordnung()" ausgeführt. In der "dragDropZuordnung()" werden zuerst eventuelle, bereits vorhandene Beladungszustände aus dem vorherigen Fahrwerk ausgelesen. Anschließend wird mittels "Deep Co-

py" (Hakger, 2009) eine unabhängige Kopie der neu hinzugefügten Instanz eines Fahrwerks angefertigt und diese auf dem Platz zugewiesen. Anschließend wird einzelnen Subinstanzen (z.B.: den ED-Bremsen) der Zug zugewiesen. Auch die standardmäßige Benennung der Fahrwerke, Radkombinationen, Räder, Bremseinheiten und Magnetschienenbremsen erfolgt innerhalb dieser Methode. Gleichzeitig werden auch die Räder, die sich gegenüberliegen, der "Achse1" oder "Achse2" zugeordnet.

Zugtyp ändern (Abbildung 77)

Beim Ändern des Zugtyps muss zuerst der "Zugtyp ändern – Button" betätigt werden, welcher die "comboBox1" auf sichtbar schaltet. Anschließend kann im Dropdownmenü der gewünschte Zugtyp ausgewählt werden. Nach dem Klick auf den gewünschten Zugtyp werden die Methoden "Bilde-Zug()", "BildeZuggrafik()" und "beschriftungslabel()" ausgeführt. "BildeZug()" ordnet dem Zug die notwendige Anzahl und Art der Zugteile, aufgrund der Vorlage aus der statische Klasse "Zugtypen", zu. In "BildeZuggrafik()" wird die Zuggrafik gebildet und daran die leeren Felder für die Fahrwerksgrafik erzeugt. Anschließend läuft eine Schleife über die Zugteile und es wird für jeden Zugteil, der ein Fahrwerk enthalten kann, eine "Labelbox" für die Beschriftungen der Fahrwerke und Räder erzeugt.

Verbautes Fahrwerk exportieren (Abbildung 78)

Nicht nur Fahrwerke aus dem Pool sondern auch Fahrwerke die bereits im Zug verbaut sind, sind exportierbar. Der Vorgang passiert mit dem Klick auf die jeweilige Fahrwerksgrafik des Fahrwerks und der Zuordnung zum PropertyGrid. Mit Betätigen des "Exportbuttons" kommt man in einen OpenFileDialog, indem der Nutzer einen Pfad eingibt. Das Fahrwerk wird dann als "Binary-Datei" gespeichert. Die Beziehungen sind noch aufrecht und werden erst mit dem eventuellen Import entfernt.

Fahrwerk auf Zugteil bearbeiten (Abbildung 79)

Mit einem Klick auf die gewünschte Fahrwerksgrafik des Fahrwerks werden die Eigenschaften ebendieses in dem PropertyGrid angezeigt. Dort kann der/die User/in die Eigenschaften der Instanzen bearbeiten und auch neue Instanzen von beispielsweise Bremskomponenten erzeugen.

Bremseinheiten öffnen (Abbildung 80)

Die Übersicht über die Bremseinheiten kann sowohl über die projektinterne "Einstiegsmaske", als auch direkt über den zugehörigen Button in der Zugkonfiguration erreicht werden. Beim Öffnen des "Bremseinheiten" Fensters wird das Ereignis "Bremseinheiten_Load()" ausgeführt.

Komponentenmanagement öffnen (Abbildung 81)

Das "Komponentenmanagement" kann ebenfalls über einen Button direkt aus der Zugkonfiguration geöffnet werden. In dieser Maske können dann die Pool Fahrwerke bearbeitet werden. Eigentlich handelt es sich dabei um keine projektinterne Ansicht, jedoch wäre es sehr umständlich wenn man immer aus Projekten aussteigen muss, wenn sich während der "Zugkonfiguration" neue Anforderungen an Fahrwerke ergeben, die auch für zukünftige gelten können. Beim Klick auf den "Komponentenmanagement-Button" wird das Ereignis "Komponenten_hinzufügen_Load()" der neuen Instanz von "Komponentenmanagement" ausgeführt.



Abbildung 75: Use-Cases Zugkonfiguration







Abbildung 77: Sequenzdiagramm Zugtyp ändern



Abbildung 78: Sequenzdiagramm verbautes Fahrwerk exportieren









5.3.8 Bremseinheiten

Im "Bremseinheiten" Fenster lassen sich die Eingabeparameter aller im Zug verbauten Bremseinheiten bearbeiten. Dies geschieht über mehrere DataGridViews, die nach Bremssystem geclustert sind. Diese Eingaben könnten auch in der "Zugkonfiguration" erfolgen, sind jedoch wesentlich aufwendiger in den PropertyGrids. In der "Bremseinheitenmaske" ist ausschließlich die Bearbeitung der Parameter verbauter Bremseinheiten möglich, nicht jedoch das Verbauen neuer Systeme. Um einen besseren Überblick zu haben, ist darüber noch eine Grafik des Fahrzeuges abgebildet. Dabei lässt sich über die Bezeichnung auch gut erkennen auf welcher Radkombination die Bremseinheit oder auf welchem Fahrwerk die Magnetschienenbremse sitzt. Die eingegebenen Werte werden den jeweiligen Objekten als Eigenschaft zugeordnet.



Abbildung 82: Use-Case Bremseinheiten

5.3.9 Beladungszustand

Das "Beladungszustand" Fenster dient zur Eingabe der Laststufen und der Massenträgheit. Die Implementierung für die Eingabe erfolgte achsweise, da die Beladungsdaten so angegeben sind. Die Last wird dann gleichmäßig zwischen den Rädern einer Achse aufgeteilt. Die in Abbildung 83 ersichtlichen Use-Cases ergeben sich in diesem Fenster.

Projektgruppe speichern (Abbildung 62)

Das Speichern der Projektgruppe wurde bereits mehrmals beschrieben und erfolgt wieder nach demselben Prinzip.

Massenträgheit eingeben

Die Eingabe der Massenträgheit jeder Achse erfolgt, wie in Abbildung 83 ersichtlich, über das DataGridView.

Neuen Beladungszustand erstellen inklusive Eingabe der Werte (Abbildung 84)

Um einen neuen Beladungszustand zu erstellen, klickt man zuerst auf den "weiteren Beladungszustand – Button". Mit dem Klick auf den Button wird das "button1_Click()" Ereignis ausgelöst, das ein Inputfenster für die Namensgebung des Beladungszustandes. Falls ein noch nicht vorhandener Name eingegeben wurde, wird für jedes Rad eine Instanz von "Beladungsstufe" erzeugt und der Name aus dem Inputfenster als Eigenschaft zugewiesen. Die Beladungsstufe wird dem "Beladungsmangement" jedes Rades in die "Beladungsliste" hinzugefügt. Anschließend kann der/die Benutzer/in die Werte pro Achse für diesen Beladungszustand im DataGridView eingeben.

Beladungszustand umbenennen (Abbildung 85)

Die nachträgliche Umbenennung von Beladungszuständen ist durch einen Rechtsklick auf die gewünschte Beladungsspalte gegeben. Mit dem Klick auf "umbenennen" im ContextMenuStrip wird eine Instanz der "Inputbox" erzeugt, in welche die neue Bezeichnung eingegeben werden kann. Anschließend wird der gewählte Beladungszustand für alle Räder umbenannt. Wichtig dabei ist, dass der Beladungszustand auch in der "Bremsfallliste" des Projekts umbenannt wird. Dabei werden alle "Bremsfalldaten" durchlaufen und der alte Name durch den neuen ersetzt.

Beladungszustand löschen (Abbildung 86)

Das Löschen eines Beladungszustandes erfolgt ebenfalls mit einem Rechtsklick und anschließend klickt man "Löschen" an. Dabei wird eine Schleife durchlaufen, die für jedes Rad im "Beladungsmanagement" die gewünschte Instanz des Beladungszustandes entfernt.

Fenster schließen

Beim Schließen des Fensters werden die eingegebenen Werte für die Massenträgheit und die Beladung eines Beladungszustandes übernommen und der entsprechenden Instanz zugewiesen.

Summe berechnen

Mit dem Klick auf den "Summe-Button" kann für jede Spalte die Summe berechnet werden.



Abbildung 83: Use-Cases Beladungszustand



Abbildung 84: Sequenzdiagramm neuen Beladungszustand erstellen inklusive Eingabe der Werte





TU **Bibliothek**. Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar wiew wowede hub The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

5.3.10 Projektbremsparameter

Die Projektbremsparameter dienen dazu, Eingaben die für das ganze Projekt(Zug) gelten zu verwalten. Das beinhaltet den zulässigen Ruck für Betriebs- und Gefahrenbremsungen, die Gleitschutzeffizienz und die externen Kräfte in Form von Rollwiderstand und Windkraft. Die dabei einzugebenden Parameter wurden in den vorangegangenen Kapiteln bereits erläutert. Es ist auch möglich die Projektgruppe hier zu speichern. Die Eingabe der Werte erfolgt über ein PropertyGrid, das mit der Instanz des Zuges verbunden ist. Eine Darstellung über Sequenzdiagramme ist nicht notwendig, da über das PropertyGrid direkt die Eigenschaften der Instanzen verändert werden. Im PropertyGrid wurden alle nicht benötigten Eigenschaften der Instanzen von "Zug" und Subinstanzen mittel "System.ComponentModel" auf "lesbar" oder "unsichtbar" geschalten. Dies lässt sich mit dem ".NET Framework" leicht umsetzen.



Abbildung 87: Use-Cases Projektbremsparameter



Abbildung 88: Projektbremsparameter Fenster

5.3.11 Bremsfallmaske

Die "Bremsfallmaske" dient als zentrale Berechnungsmaske. Hier können sowohl einzelne Bremsfälle ausgegeben werden als auch die gesamte Berechnung durchlaufen werden. Aus den Standardvorgabefeldern (oben ersichtlich in Abbildung 90) muss aus jeder CheckedListBox mindestens ein Element ausgewählt werden um neue Bremsfälle zu erzeugen. Die Hilfswerte rechts oben dienen der Einstellung der aktiven und passiven Scheibenbremse. Spalten, die im DataGridView gelb markiert sind, können auch als bereits erzeugte Bremsfälle in der Tabelle bearbeitet werden. Die Namensgebung eines Bremsfalles basiert auf seinen Parametern und setzt sich wie folgt zusammen:

Bremsungsart + Ausfallszenario + Bremsausgangsgeschwindigkeit + Beladungszustand + Bremsendgeschwindigkeit + Kraftschlusswert

Folgende Use-Cases ergeben sich in der "Bremsfallmaske":

- Bremsfälle anlegen
- Bremsfälle löschen
- Bereits angelegte Bremsfälle ändern
- Bremsfälle nach Ordnung sortieren
- Bremsfälle nach Name sortieren
- Berechnung durchführen
- Berechnung abbrechen (nur möglich, wenn Berechnung läuft)
- Bremsfälle importieren
- Bremsfälle exportieren
- Neuen Auswahlparameter hinzufügen
- Auswahlparameter löschen
- Projektgruppe speichern
- Bremsfall ausgeben



Abbildung 89: Use-Cases Bremsfallmaske


Abbildung 90: Bremsfallmaske

Bremsfälle anlegen (Abbildung 91)

Das Anlegen der Bremsfälle erfolgt über die Checkboxen oben auf der Seite. Dabei können alle gewünschten Kombinationen von Parametern angewählt werden und ergeben eine Vielzahl von Bremsfällen. Nach der Auswahl wird mit dem Klick auf den "markierte Bremsfälle hinzufügen-Button" die Methode "bremsfall_add()" ausgeführt, in der eine neue Instanz von "Bremsfalldaten" erzeugt wird und die Werte aus den Checkboxen als Eigenschaften eingehen. Diese "Bremsfalldaten" werden dann in die "Bremsfallliste" des Projekts hinzugefügt und abschließend das DataGridView aktualisiert. Es zeigt immer die gesamte "Bremsfallliste" an.

Bremsfälle löschen (Abbildung 92)

Beim Löschen der Bremsfälle wird ein Rechtsklick auf die markierten Zeilen oder eine Zeile ausgeführt. Danach geht ein ContextMenu auf in dem man mit dem Klick auf "Löschen" die jeweiligen Instanzen von "Bremsfalldaten" aus der "Bremsfallliste" löscht. Abschließend wird das DataGridView wieder aktualisiert und zeigt die noch vorhandenen "Bremsfalldaten" an.

Bereits angelegte Bremsfälle ändern

Bereits angelegte Bremsfälle können direkt im DataGridView bearbeitet werden, dabei lassen sich einige Eigenschaften verändern, aber beispielsweise nicht die Bremsungsart und das Ausfallszenario. Wenn hier etwas geändert werden soll, muss ein neuer Bremsfall angelegt werden.

Bremsfälle nach Ordnung und Namen sortieren

Die Sortierung erfolgt mittels "Query-Datenbankbefehls" und anschließend wird das DataGridView sortiert.

Berechnung durchführen (Abbildung 93)

Das Durchführen der Bremsberechnung erfolgt in einem BackgroundWorker um nicht alle Rechenkerne des verwendeten Computers auszulasten und parallel das Arbeiten in anderen Programmen zu ermöglichen. Aktiviert wird die Berechnung mit dem Klick auf den "Bremsberechnungs-Button". Dabei werden zuallerst sämtliche Controls ausgeschalten. Nur der "Abbruch-Button" wird aktiviert. Nun wird die Berechnungsschleife des BackgroundWorkers aktiviert und dort laufend der Fortschritt in der ProgressBar angezeigt. Im Falle, dass der BackgroundWorker bis zum Ende durchgelaufen ist oder die Bremsberechnung abgebrochen wurde, werden die Controls wieder aktiviert, bis auf den "Abbruch-Button", welcher deaktiviert wird. Wenn der Bremsvorgang ordnungsgemäß zu Ende gelaufen ist, gelangt man in das "Bremsergebnisse" Fenster. Hiervon wird eine neue Instanz erzeugt und das "Bremsergebnisse_Load()" Ereignis ausgeführt.

Berechnung abbrechen (nur möglich, wenn Berechnung läuft)

Das Abbrechen der Bremsberechnung erfolgt über den "Abbruch-Button" der nur aktiviert ist, wenn die Bremsberechnung läuft und der den BackgroundWorker beendet.

Bremsfälle exportieren

Das Exportieren von Bremsfälle ist ähnlich trivial wie es im Falle von Projekten und Fahrwerken ist. Dabei wird mittels SaveFileDialog und "Dat_Speichermanager" die Instanz des Projektes lokal am Laufwerk abgelegt um beim Importieren die "Bremsfallliste" herauszuziehen.

Bremsfälle importieren (Abbildung 94)

Bremsfälle zu importieren bedeutet sie von einem lokalen Laufwerk in das Projekt zu holen. Dabei wird mittels Klick auf den Import-Button ein OpenFileDialog gestartet und nach Eingabe des Pfades durch den/die Benutzer/in mit dem "Dat_Speichermanager" das Projekt geladen. Dabei wird überprüft welche Bremsfälle Ausfälle haben, die bereits vorhanden sind. Falls Ausfälle nicht vorhanden sind, wird eine Instanz des "Ausfall_Ersatz_hinzufügen" Fensters erstellt und in dieser der Name des Ausfallszenarios übernommen. Man kreiert somit diesen Ausfall im aktuellen Projekt. Nach dem Erstellen des/der Ausfallszenarios wird die vollständige Liste aus dem geladenen Projekt in das aktuelle Projekt übernommen. Alle Bremsfallparameter außer den Ausfällen sind nicht projektspezifisch.

Neuen Auswahlparameter hinzufügen (Abbildung 95)

Auswahlparameter sind Eigenschaften des Zuges und dort in einer Liste hinterlegt. Neue Werte können einfach über die TextBox unterhalb der CheckedListBox und mit betätigen des "Neu-Buttons" hinzugefügt werden.

Auswahlparameter löschen (Abbildung 96)

Um nicht eine Ansammlung nicht gebrauchter Werte in den CheckListBoxes stehen zu haben gibt es eine Löschfunktion, die mittels Rechtsklick und einem ContextMenu ausgelöst wird.

Bremsfall ausgeben (Abbildung 99)

Dieser Use-Case ist bei der "Bremsergebnismaske" beschrieben und ist bis auf die Bezeichnung des DataGridViews und der zugehörigen Methode identisch.



Diplomarbeit







Diplomarbeit





Abbildung 94: Sequenzdiagramm Bremsfälle importieren



Abbildung 95: Sequenzdiagramm neuen Auswahlparameter hinzufügen



Roman Schwarz

Seite 115 von 141

Diplomarbeit



5.3.12 Bremsberechnung

Als der wichtigste Sequenzvorgang im "Bremssim" kann die eigentliche Bremsberechnung eines Bremsfalls bezeichnet werden. Diese wird sowohl bei der Ausgabe eines Bremsfalles, als auch wenn die gesamte Bremsberechnung durchgeführt wird (mehrmals) durchlaufen. Der "Bremsungsmanager" führt dabei die Methode "Bremsberechnung()" durch, in der zu allererst die alten Datensätze gelöscht werden. Der "Bremsfallmanager" führt die Methode "Einstellen()" aus um die für die Bremsungsart zusammen mit dem Ausfallszenario notwendigen Bremseinheiten ein- und auszuschalten bzw. für die aktive und passive Scheibenbremse den Wert und die Stufe vorzugeben. Nun werden auch noch die maximalen Bremskräfte aus der letzten Berechnung auf 0 gesetzt um neu berechnet zu werden. Der erste Datensatz für den nullten Zeitschritt wird als nächstes kreiert. Ab nun beginnt der eigentliche Bremsvorgang, dieser wird in einer "While-Schleife" für jeden Zeitschritt, solange die Zuggeschwindigkeit größer als die Bremsendgeschwindigkeit ist und kein Fehler auftritt, durchlaufen. In jedem Zeitschritt werden die Geschwindigkeit, der Weg und die Zeit zu Beginn ausgerechnet. Nun setzt die Bremssteuerung ein und führt das "Bremsmanagement()" durch. Dabei gelangt ein Wert für die "Kurve_Bremssteuerung" an jede eingeschaltete Bremseinheit. Die tatsächlich wirkende Bremskraft einer Bremseinheit auf die Radkombination ergibt sich, wenn "Kurve Bremssteuerung" * Fmax kleiner ist als "Kurve_Erzeugbar" * Fmax aus Ersterem und umgekehrt aus Zweiterem. Mithilfe der Bremskraft, der Hangabtriebskraft und den externen Kräften kann nun die Verzögerung berechnet werden. Da nicht sicher ist ob die Bremskraft auf ein oder zwei Räder aufgeteilt werden muss erfolgt dieser Vorgang in "Verteile_Bremskraft()" nach dem Schaubild in Abbildung 26. Nun werden noch Ruck, Verzögerung, Geschwindigkeit, Weg, Zeit, Bremskraft, Hangabtriebskraft, externe Kräfte, ED-Bremskraft, Bremskraft der aktiven Scheibenbremsen, Bremskraft der passiven Scheibenbremsen und die MG-Bremskraft berechnet und in jedem Zeitschritt gespeichert. Abschließend werden noch die Kraftschlusswerte an jedem Rad berechnet, fahrwerksweise in "Kraftschlusswerte" gespeichert und überprüft, ob die Abfangzeit (in den "Bremssim" Einstellungen vorgegeben) und das Abbruchkriterium (in den Einstellungen vorgegeben) nicht überschritten bzw. erreicht wurden. Die "While-Schleife" wiederholt sich nun bis ihr Kriterium nicht mehr zutrifft. Das Sequenzdiagramm der Bremsberechnung ist aufgrund seiner Größe ebenfalls im Anhang abgelegt.

5.3.13 Bremsergebnisse

Die "Bremsergebnismaske" ist nur nach dem Berechnen aller Bremsfälle erreichbar um definitiv alle Daten auf dem neuesten Stand zu haben. Die Tabelle ist "read-only", es kann nur in der ersten Spalte ausgewählt werden welche Bremsfälle in der Ausleitung sein sollen und in der letzten Spalte ein Bremsfall detailliert angesehen werden. Aufgrund der vorhergehenden Berechnung sind die Daten definitiv auf dem neuesten Stand. Die zugehörigen Use-Cases können der Abbildung 98 entnommen werden.

Auswahl der Bremsfälle in Ausleitung und Auswahl der gewünschten Verzögerungen und Rucke in Ausleitung

Diese beiden Use-Cases erfolgen über Checkboxen. Standardmäßig sind alle Bremsfälle angehakt und somit in der Ausleitung. Will man die Bremsfälle nicht in die Ausleitung aufnehmen, können diese Häkchen entfernt werden. Die Checkboxen für die Verzögerungen und Rucke, die in der Excel-Ausleitung aufscheinen sollen sind manuell zu betätigen und entsprechen ohne Änderung der Standardauswahl in den Einstellungen von "Bremssim".

Einzelnen Bremsfall ausgeben (Abbildung 99)

Bremsfälle können auch einzeln ausgegeben werden. Dies geschieht mittels Klick auf den "Ausgabe – Button" der Ausgabespalte, die man ausgegeben haben möchte. Dabei können die Kurven und Ergebniswerte genauer betrachtet werden. Die "Ausgabemaske" hat zwei Tabs zum Umschalten, wobei einer davon in Abbildung 104 ersichtlich ist und der andere in Abbildung 100 abgebildet ist. Mit dem Klick auf den Ausgabe-Button wird eine neue Instanz des "Ausgabe" Fensters erstellt und dieses bekommt die "Bremsfalldaten" der angeklickten Zeile übermittelt. In der Methode "Ausgabe_Load()" werden die Labels und Charts auf der Seite mit den Werten aus den Eigenschaften "Bremsfalldaten" versehen. Diese ergeben sich durch die vorherige Durchführung der "Bremsberechnung()". Die Methode "nosort()" verhindert die Sortierbarkeit der Spalten bei den Bremsergebniswerten in den DataGridViews. Beim Fahren über die Linie eines Charts wird das "MouseMove()" Ereignis ausgelöst, das den jeweiligen Wert der X-Achse und Y-Achse anzeigt.

Excel Ausleitung erzeugen

Mit dem Klick auf den "Excel Export-Button" kann man eine Excelausleitung erzeugen. Dazu wird ein Vorlagendokument hergenommen und aus diesem die Blätter kopiert und mit den Werten der Berechnung gefüllt. Die Nutzung eines Vorlagendokuments hat den Vorteil, dass das Layout jederzeit an die Bedürfnisse des Ausleitungsdokuments angepasst werden kann.

Fenster Schließen

Beim Schließen des "Bremsergebnis – Fensters" gelangt man wieder zurück in die "Bremsfallmaske" und kann dort sämtliche Funktionen ausführen.



Abbildung 97: Sequenzdiagramm Fenster schließen



Abbildung 98: Use-Cases Bremsergebnisse

valente_Verzőç	Maximaler_Ruck	Mittlerer_Ruck	Bremskraft_Max	Bremsfall darstellen
1,51	1,47	1,25	83871,01	Ausgabe
1,43	1,11	1,02	107982,02	Ausgabe
1,29	0,98	0,91	107982,02	Ausgabe
1,52	1,62	1,25	83870,99	Ausgabe
1,46	1,25	1,24	107982,02	Ausgabe
1,32	1,12	1,11	107982,02	Ausgabe
1,46	1,62	1,26	83871,05	Ausgabe
1,39	1,25	1,24	107982,02	Ausgabe
1,26	1,12	1,11	107982,02	Ausgabe
2,50	6,38	4,15	228611,59	Ausgabe
3,06	8,94	4,99	185643,19	Ausgabe
2,74	6,91	4,48	215629,84	Ausgabe
2,48	6,18	4,00	216018,99	Ausgabe
3,10	9,27	5,13	188895,02	Ausgabe
2.76	7,13	4,63	228257,15	Ausgabe
3,10	9,78	5,46	188895,23	Ausgabe
2,74	7,54	4,88	228248,73	Ausgabe
2,49	6,75	4,38	228655,69	Ausgabe
1,51	1,47	1,25	83871,01	Ausgabe
1,47	1,85	1,17	79769,17	Ausgabe
1,44	1,74	1,06	105415,77	Ausgabe
1,30	1,85	0,95	105415,77	Ausgabe
1.44	2,00	1,18	79769,16	Ausgabe
1,45	1.86	1,18	105415,77	Ausgabe
1,31	2,01	1,08	105415,77	Ausgabe
1,40	2,00	1,19	79769,18	Ausgabe
1,39	1,86	1,18	105415,77	Ausgabe
1,27	2,01	1,08	105415,77	Ausgabe
1,31	7,82	0,98	183895,58	Ausgabe
0,98	6,61	0,85	213822,18	Ausgabe
0.72	5.91	0.76	216021.27	Ausgabe
1.36	8.34	1.00	196164.25	Ausgabe
1,02	7.04	0.91	226316.77	Ausgabe
0,77	6.31	0.82	228614,11	Ausgabe
1,38	8,83	1.06	196233.07	Ausgabe
1,03	7,41	0,96	226492,50	Ausgabe
0,79	6.64	0.86	228640.35	Ausgabe
0,83	1.98	1.98	78610.01	Ausgabe
0.87	2.04	2,04	91194,71	Ausgabe
0,92	2.24	2.24	91222.63	Ausgabe
1,61	6.56	6.43	87259.80	Ausgabe
1,25	5.04	4 94	87259.80	Ausgabe
1,13	4.51	4.42	87259.80	Ausgabe
1.58	6.56	6.43	87259.80	Ausgabe
1,23	5.04	4.94	87259 80	Ausgabe
1.11	A 51	4.42	87250 00	Ausgabe



Abbildung 99: Sequenzdiagramm einzelnen Bremsfall ausgeben



Screenshot

6. Test – Vergleichsrechnung

6.1 Ablauf

Die Ergebnisse der jeweiligen Bremsfälle in der "Bremssim" Simulation sind mit den Ergebnissen der "PBremssim" Simulation (bereits vorhandenes Simulationstool) und den tatsächlichen Messungen am Fahrzeug (eines Typtests) zu vergleichen. Als Vergleichsprojekte dienen die Plattformberechnungen, stellvertretend dafür wird ein Avenio 4-Teiler Projekt herangezogen.

6.2 Definition der zu testenden Bremsfälle

Folgende Bremsungsarten sind zu testen:

- Betriebsbremsung = Notbremsung 2 = Notbremsung 5 Dabei unterscheidet sich lediglich die Auslösung
- Betriebsersatz Bremsung
 - Ausfall ED-Bremse TFW 1 Ersatz EH-Bremse TFW1 (Stufe 1) und EH-Bremse LFW1 (Ersatzbremskraft)
- Notbremsung 3
- Ersatzbremsung der NB 3 (Ersatzbremsung der Gefahrenbremsung) Ausfall ED-Bremse TFW 1 – Ersatz EH-Bremse TFW1 (Stufe 1)
- Sicherheitsbremsung
- Schienenbremsung

Jede der oben angeführten Bremsungsarten ist zu testen mit:

- Bremsausgangsgeschwindigkeit:
 - o 70 km/h
 - o 50 km/h
 - o 30 km/h
- Beladungsstufen:
 - o Leer
 - VDV 2/3
 - VDV 3/3
- Neigung:
 - o **0%**
- Kraftschlusswert (TFW;LFW):
 - o **0,32;0,25**

Weitere Bremsfälle:

- Betriebsbremsung: Kraftschlusswert Rad/ Schiene = 0,12
- Betriebsbremsung: Kraftschlusswert Rad/ Schiene = 0,12 im Gefälle 7%
- Notbremsung 3: Kraftschlusswert = 0,12
- Notbremsung 3: Kraftschlusswert = 0,12 im Gefälle 7%

Aus dem Vergleichsprojekt ergeben sich die konkreten Werte für die Beladungsstufen, den "B-Regler", die Raddurchmesser, den zulässigen Ruck für Betriebs- und Gefahrenbremse, die Ausfallszenarien, die externen Kräfte und die eingestellten Stufen der elektrohydraulischen Bremseinheiten.

Es sind identische Bremssysteme wie in den Vergleichsprojekten zu verwenden. Sämtliche Einstellund Eingabeparameter müssen übereinstimmen.

6.3 Zu vergleichende Parameter

Folgende Ergebniswerte sind zu vergleichen:

- Anhalteweg s
- Mittlere Verzögerung am

Weitere Parameter können begutachtet werden, liefern aber keine relevante Aussage bzw. sind nicht in beiden Programmen erhältlich:

- Mittlere Verzögerung a_{m3}
- Äquivalente Verzögerung a_e
- Maximalverzögerung a_{max}
- Maximaler Ruck r_{max}
- Mittlerer Ruck r_m
- Kraftschlusswerte an den Fahrwerken au

6.4 Dokumentation der Abweichungen

Sämtliche Abweichungen sind in Excel zu dokumentieren und in % - Werten anzugeben. Dabei sollen die Abweichungen sowohl in Bezug auf die "PBremsim" Simulation als auch auf die Ergebnisse der Typprüfungen angegeben werden.

					Pbremssim	Bremssim		Pbremssim	Bremssim	
Bremsungsart 💌	Beladung 💌	v₀ [km/h] 💌	Neigung [%] 💌	Kraftschlusswert 💌	Weg [m] 💌	Weg [m] 💌	Abw. 💌	a _m [m/s²] ▼	a _m [m/s² ▼	Abw. 💌
Betriebsbremsung	leer	70	0	0,33;0,25	132	132,15	0,11%	1,43	1,43	0,00%
Betriebsbremsung	VDV 2/3	70	0	0,33;0,25	140	139,99	-0,01%	1,35	1,35	0,00%
Betriebsbremsung	VDV 3/3	70	0	0,33;0,25	154	154	0,00%	1,2	1,23	2,50%
Betriebsbremsung	leer	50	0	0,33;0,25	71	68,9	-2,96%	1,4	1,4	0,00%
Betriebsbremsung	VDV 2/3	50	0	0,33;0,25	71	71,32	0,45%	1,35	1,35	0,00%
Betriebsbremsung	VDV 3/3	50	0	0,33;0,25	78	78,12	0,15%	1,23	1,23	0,00%
Betriebsbremsung	leer	30	0	0,33;0,25	28	26,97	-3,68%	1,28	1,29	0,78%
Betriebsbremsung	VDV 2/3	30	0	0,33;0,25	28	28,27	0,96%	1,22	1,23	0,82%
Betriebsbremsung	VDV 3/3	30	0	0,33;0,25	31	30,71	-0,94%	1,12	1,13	0,89%
Notbremsung 3	leer	70	0	0,33;0,25	62	58,91	-4,98%	3,03	3,21	5,94%
Notbremsung 3	VDV 2/3	70	0	0.33:0.25	61	61.14	0.23%	3.08	3.09	0.32%
Notbremsung 3	VDV 3/3	70	0	0.33:0.25	68	66.98	-1.50%	2.8	2.82	0.71%
Notbremsung 3	leer	50	0	0.33:0.25	33	31.36	-4.97%	2.93	3.08	5.12%
Notbremsung 3	VDV 2/3	50	0	0.33:0.25	33	32.47	-1.61%	2.97	2.97	0.00%
Notbremsung 3	VDV 3/3	50	0	0.33:0.25	36	35,15	-2.36%	2.71	2.74	1,11%
Notbremsung 3	leer	30	0	0.33:0.25	13	12.38	-4.77%	2.69	2.8	4.09%
Notbremsung 3	VDV 2/3	30	0	0.33:0.25	13	12.89	-0.85%	2.7	2.69	-0.37%
Notbremsung 3	VDV 3/3	30	0	0.33:0.25	14	13,65	-2.50%	2.5	2,54	1.60%
Sicherheitsbremsung	leer	70	0	0.33:0.25	122	122.27	0.22%	1.54	1.55	0.65%
Sicherheitsbremsung	VDV 2/3	70	0	0.33.0.25	155	155.35	0.23%	1 22	1 22	0.00%
Sicherheitsbremsung	VDV 3/3	70	0	0.33:0.25	172	171.68	-0,19%	1.1	1.1	0.00%
Sicherheitsbremsung	leer	50	0	0.33:0.25	64	64.32	0.50%	1.5	1.5	0.00%
Sicherheitsbremsung	VDV 2/3	50	0	0.33.0.25	81	81 19	0.23%	1 19	1 19	0.00%
Sicherheitsbremsung	VDV 3/3	50	0	0.33.0.25	90	89.51	-0.54%	1.08	1,10	0.00%
Sicherheitsbremsung	leer	30	0	0.33.0.25	25	24 78	-0.88%	1 4	1.4	0.00%
Sicherheitsbremsung	VDV 2/3	30	0	0.33.0.25	31	30.84	-0.52%	1 12	1 13	0.89%
Sicherheitsbremsung	VDV 3/3	30	0	0.33.0.25	34	33.84	-0.47%	1.03	1.03	0.00%
Betriebsersatzbremsung	leer	70	0	0.33.0.25	130	130.91	0,70%	1,00	1 44	-1.37%
Betriebsersatzbremsung	VDV 2/3	70	0	0 33.0 25	145	145 25	0.17%	13	13	0.00%
Betriebsersatzbremsung	VDV 3/3	70	0	0.33.0.25	140	159.93	-0.04%	1,8	1 18	0,00%
Betriebsersatzbremsung	leer	50	0	0.33:0.25	69	69.28	0.41%	1.4	1,39	-0.71%
Betriebsersatzbremsung	VDV 2/3	50	0	0.33.0.25	74	74 75	1 01%	1 29	1 29	0.00%
Betriebsersatzbremsung	VDV 3/3	50	0	0.33:0.25	82	81.88	-0.15%	1,18	1,18	0.00%
Betriebsersatzbremsung	leer	30	0	0.33.0.25	27	27 19	0.70%	1 29	1 28	-0.78%
Betriebsersatzbremsung	VDV 2/3	30	0	0.33:0.25	29	29.24	0.83%	1,19	1,19	0.00%
Betriebsersatzbremsung	VDV 3/3	30	0	0.33.0.25	32	31.76	-0.75%	11	1.09	-0.91%
Ersatzbremsung der Notbremsung 3	leer	70	0	0.33.0.25	70	60.82	-13 11%	2 69	3 11	15.61%
Ersatzbremsung der Notbremsung 3	VDV 2/3	70	0	0.33.0.25	71	70.42	-0.82%	2,66	2.68	0.75%
Ersatzbremsung der Notbremsung 3	VDV 3/3	70	0	0.33:0.25	78	77.55	-0.58%	2.42	2,00	0.83%
Ersatzbremsung der Notbremsung 3	leer	50	0	0.33:0.25	37	32.11	-13.22%	2.62	3	14,50%
Ersatzbremsung der Notbremsung 3	VDV 2/3	50	0	0.33:0.25	37	36.78	-0.59%	2.59	2.62	1,16%
Ersatzbremsung der Notbremsung 3	VDV 3/3	50	0	0.33:0.25	41	40.32	-1.66%	2.36	2.39	1.27%
Ersatzbremsung der Notbremsung 3	leer	30	0	0.33:0.25	14	12.64	-9.71%	2.45	2.75	12.24%
Ersatzbremsung der Notbremsung 3	VDV 2/3	30	0	0.33:0.25	14	14.14	1.00%	2.4	2.46	2.50%
Ersatzbremsung der Notbremsung 3	VDV 3/3	30	0	0.33.0.25	16	15.37	-3.94%	2 22	2.26	1 80%
Betriebsbremsung	leer	70	7	0 12.0 12	967	700.01	-27 61%	0.2	0.27	35.00%
Betriebsbremsung	VDV 2/3	70	7	0 12.0 12	944	756 34	-19.88%	0,2	0.25	25.00%
Betriebsbremsung	VDV 3/3	70	7	0 12:0 12	954	779.34	-18.31%	0.2	0.24	20,00%
Betriebsbremsung	leer	50	7	0.12:0.12	506	359.92	-28.87%	0.19	0.27	42.11%
Betriebsbremsung	VDV 2/3	50	7	0.12:0.12	494	389.03	-21 25%	0.2	0.25	25.00%
Betriebsbremsung	VDV 3/3	50	7	0.12:0.12	500	400.93	-19.81%	0 19	0.24	26.32%
Betriebsbremsung	leer	30	7	0.12:0.12	193	133.99	-30.58%	0 18	0.26	44.44%
Betriebsbremsung	VDV 2/3	30	7	0.12:0.12	188	145.66	-22.52%	0 18	0.24	33,33%
Betriebsbremsung	VDV 3/3	30	7	0.12:0.12	191	150,54	-21,18%	0,18	0,23	27.78%

Schienenbremsung	leer	70	0	n/a	176	173,73	-1,29%	1,08	1,09	0,93%
Schienenbremsung	VDV 2/3	70	0	n/a	224	222,04	-0,88%	0,84	0,85	1,19%
Schienenbremsung	VDV 3/3	70	0	n/a	248	245,76	-0,90%	0,76	0,77	1,32%
Schienenbremsung	leer	50	0	n/a	85	84,07	-1,09%	1,13	1,15	1,77%
Schienenbremsung	VDV 2/3	50	0	n/a	108	107,06	-0,87%	0,89	0,9	1,12%
Schienenbremsung	VDV 3/3	50	0	n/a	120	118,36	-1,37%	0,81	0,81	0,00%
Schienenbremsung	leer	30	0	n/a	29	27,93	-3,69%	1,20	1,24	3,33%
Schienenbremsung	VDV 2/3	30	0	n/a	36	35,23	-2,14%	0,96	0,99	3,13%
Schienenbremsung	VDV 3/3	30	0	n/a	40	38,82	-2,95%	0,87	0,89	2,30%
Betriebsbremsung	leer	70	0	0,12;0,12	244	206,53	-15,36%	0,77	0,92	19,48%
Betriebsbremsung	VDV 2/3	70	0	0,12;0,12	238	211,85	-10,99%	0,79	0,89	12,66%
Betriebsbremsung	VDV 3/3	70	0	0,12;0,12	237	214,03	-9,69%	0,8	0,88	10,00%
Betriebsbremsung	leer	50	0	0,12;0,12	128	106,42	-16,86%	0,76	0,91	19,74%
Betriebsbremsung	VDV 2/3	50	0	0,12;0,12	125	109,24	-12,61%	0,77	0,88	14,29%
Betriebsbremsung	VDV 3/3	50	0	0,12;0,12	124	110,42	-10,95%	0,78	0,87	11,54%
Betriebsbremsung	leer	30	0	0,12;0,12	48	39,78	-17,13%	0,72	0,87	20,83%
Betriebsbremsung	VDV 2/3	30	0	0,12;0,12	47	41,04	-12,68%	0,73	0,85	16,44%
Betriebsbremsung	VDV 3/3	30	0	0,12;0,12	47	41,59	-11,51%	0,73	0,83	13,70%
Notbremsung 3	leer	70	0	0,12;0,12	93	83,37	-10,35%	2,04	2,27	11,27%
Notbremsung 3	VDV 2/3	70	0	0,12;0,12	108	94,75	-12,27%	1,75	2	14,29%
Notbremsung 3	VDV 3/3	70	0	0,12;0,12	111	99,35	-10,50%	1,71	1,9	11,11%
Notbremsung 3	leer	50	0	0,12;0,12	47	42,2	-10,21%	2,03	2,29	12,81%
Notbremsung 3	VDV 2/3	50	0	0,12;0,12	55	48,05	-12,64%	1,75	2,01	14,86%
Notbremsung 3	VDV 3/3	50	0	0,12;0,12	57	50,43	-11,53%	1,7	1,91	12,35%
Notbremsung 3	leer	30	0	0,12;0,12	18	15,3	-15,00%	1,98	2,27	14,65%
Notbremsung 3	VDV 2/3	30	0	0,12;0,12	20	17,43	-12,85%	1,71	1,99	16,37%
Notbremsung 3	VDV 3/3	30	0	0,12;0,12	21	18,32	-12,76%	1,67	1,9	13,77%
Notbremsung 3	leer	70	7	0,12;0,12	129	116,13	-9,98%	1,46	1,63	11,64%
Notbremsung 3	VDV 2/3	70	7	0,12;0,12	164	139,88	-14,71%	1,15	1,35	17,39%
Notbremsung 3	VDV 3/3	70	7	0,12;0,12	171	150,25	-12,13%	1,1	1,26	14,55%
Notbremsung 3	leer	50	7	0,12;0,12	64	57,98	-9,41%	1,5	1,66	10,67%
Notbremsung 3	VDV 2/3	50	7	0,12;0,12	82	69,89	-14,77%	1,18	1,38	16,95%
Notbremsung 3	VDV 3/3	50	7	0,12;0,12	85	75,13	-11,61%	1,13	1,28	13,27%
Notbremsung 3	leer	30	7	0,12;0,12	23	20,47	-11,00%	1,49	1,7	14,09%
Notbremsung 3	VDV 2/3	30	7	0,12;0,12	29	24,65	-15,00%	1,19	1,41	18,49%
Notbremsung 3	VDV 3/3	30	7	0,12;0,12	31	26,53	-14,42%	1,14	1,31	14,91%

Abbildung 101: Vergleich "PBremssim"" mit "Bremssim"

Bei der "Sicherheitsbremsung", die ungeregelt (kein B-Regelwert, keine Erreichung der Kraftschlussgrenze) ist, erkennt man schön, dass die Werte übereinstimmen.

Die starken Abweichungen bei der "Ersatzbremsung der Notbremse 3" im leeren Beladungszustand ergeben sich durch die genaue Berechnung an die Kraftschlussgrenzen. In der alten Software wurde manuell der Wert für die aktive Scheibenbremse genau so eingestellt, dass man auf 0,25 Kraftschlusswert kommt, dadurch ergab sich eine Abweichung. Einen noch viel stärkeren Effekt hat die in "Bremssim" verwendete tatsächliche Magnetschienenbremskurve, dadurch muss die ED-Bremskraft nicht über den ganzen Zeitraum reduziert werden, sondern kann immer am maximal möglichen Grenzwert arbeiten. Es sollte jedoch darauf geachtet werden hier nicht besser als in der Realität sein zu wollen und eventuell mit einem etwas niedrigeren Kraftschlusswert zu rechnen.

Auffällig hohe Abweichungen treten auch bei Verminderung des Kraftschlusswertes auf. Hier musste in der alten Software manuell versucht werden, den Kraftschlusswert zu erreichen. Bei genauer Durchsicht habe ich festgestellt, dass die eingestellten Kraftschlusswerte sich irgendwo zwischen 0,09 und 0,12 abgespielt haben, daher kommen diese großen Abweichungen zustande. Bei Berechnungen im Gefälle ist der Beschleunigungsvorgang nicht durch die Massenträgheit eingeschränkt worden. Weiters hat sich der Rollwiderstand, der in der Vergleichsrechnung mit $f_R=0,004$ angesetzt ist (kommt aus der ursprünglichen Berechnung) direkt auf den Kraftschlusswert ausgewirkt. In der "Bremssim" Simulation wird er nicht direkt, sondern nur indirekt über die Momentanbeschleunigung berücksichtigt. Daher sind größere Bremskräfte zulässig.

Um einen realistischen Anhalteweg zu erhalten muss man noch den Gleitschutz beachten. Gerade im leeren Zustand gibt es sehr oft Gleitschutzvorgänge, die mit eingerechnet werden müssen. In "Bremssim" ist das wie bereits beschrieben über eine Gleitschutzeffizienz möglich. Vorgänge, bei denen der zulässige Kraftschlusswert überschritten wurde, sind in der "Bremsfallmaske" und "Bremsergebnismaske" mit einer Nennung der jeweiligen Radkombination in der Eigenschaftenspalte "Überschreitung" gekennzeichnet.

Bei dem darunterliegenden Vergleich zwischen Typprüfung (Burgard, 2014) am Fahrzeug und "Bremssim" kann man einige signifikante Abweichungen feststellen. Man erkennt, dass es bei der Magnetschienenbremse große Abweichungen gibt, das liegt teilweise an der Temperatur der MG-Bremse. Die Tests wurden zuerst alle im "leeren" Beladungszustand, anschließend mit "VDV 2/3 Beladung" und zum Schluss mit "VDV 3/3 Beladung" durchgeführt. Dabei erkennt man, dass nach dem "Einfahren" der neuen MG-Bremse die Werte mit "VDV 3/3 Beladung" immer näher an die Berechnung herankommen. Generell ergeben sich bei der Magnetschienenbremse enorme Schwankungen auch zwischen den drei Versuchen eines Bremsfalles. Die großen Abweichungen bei der "Notbremsung 3" und "Ersatzbremsung der Notbremsung 3" ergeben sich aus der nicht berücksichtigen Gleitschutzaktivität. Aufgrund der Vergleichbarkeit wurde diese bei 100% gewählt. Mit Werten im Bereich von 90% ergeben sich wesentlich genauere Ergebnisse, die näher an der Typprüfung sind. Bei der Typprüfung werden zu jedem Bremsfall drei Tests gemacht und die Geschwindigkeit weicht etwas von der gewünschten Bremsausgangsgeschwindigkeit ab. Zur Vergleichbarkeit habe ich den arithmetischen Mittelwert der drei Bremsungen herangezogen. Da die elektrohydraulischen Bremsen in der Realität oft höher als im "Bremssim" eingestellt werden, ergeben sich für die "Betriebsersatzbremsung" und "Ersatzbremsung der Notbremsung 3" oft bessere Bremswerte. Bei der "Ersatzbremsung der Notbremsung 3" werden diese jedoch durch den Gleitschutz wieder verschlechtert.

					Typprüfung	Bremssim		Typprüfung	Bremssim	
Bremsungsart 💌	Beladung 💌	v _o [km/h] 💌	Neigung [%] 💌	Kraftschlusswert 💌	Weg [m] 💽	Weg [m] 💌	Abw. 💌	a _m [m/s] 💌	a _m [m/s] 💌	Abw. 💌
Betriebsbremsung	leer	70	0	0,33;0,25	131,1	132,15	0,80%	1,45	1,43	-1,38%
Betriebsbremsung	VDV 2/3	70	0	0,33;0,25	136,91	139,99	2,25%	1,38	1,35	-2,17%
Betriebsbremsung	VDV 3/3	70	0	0,33;0,25	150,23	154	2,51%	1,24	1,23	-0,81%
Betriebsbremsung	leer	50	0	0,33;0,25	65,87	68,9	4,60%	1,46	1,4	-4,11%
Betriebsbremsung	VDV 2/3	50	0	0,33;0,25	70,4	71,32	1,31%	1,36	1,35	-0,74%
Betriebsbremsung	VDV 3/3	50	0	0,33;0,25	76,34	78,12	2,33%	1,24	1,23	-0,81%
Betriebsbremsung	leer	30	0	0,33;0,25	25,81	26,97	4,49%	1,35	1,29	-4,44%
Betriebsbremsung	VDV 2/3	30	0	0,33;0,25	26,85	28,27	5,29%	1,27	1,23	-3,15%
Betriebsbremsung	VDV 3/3	30	0	0,33;0,25	29,09	30,71	5,57%	1,15	1,13	-1,74%
Notbremsung 3	leer	70	0	0,33;0,25	60,39	58,91	-2,45%	3,14	3,21	2,23%
Notbremsung 3	VDV 2/3	70	0	0,33;0,25	64,22	61,14	-4,80%	2,95	3,09	4,75%
Notbremsung 3	VDV 3/3	70	0	0,33;0,25	67,1	66,98	-0,18%	2,84	2,82	-0,70%
Notbremsung 3	leer	50	0	0,33;0,25	30,97	31,36	1,26%	3,15	3,08	-2,22%
Notbremsung 3	VDV 2/3	50	0	0,33;0,25	36	32,47	-9,81%	2,65	2,97	12,08%
Notbremsung 3	VDV 3/3	50	0	0,33;0,25	35,91	35,15	-2,12%	2,64	2,74	3,79%
Notbremsung 3	leer	30	0	0,33;0,25	14,68	12,38	-15,67%	2,38	2,8	17,65%
Notbremsung 3	VDV 2/3	30	0	0,33;0,25	14,14	12,89	-8,84%	2,43	2,69	10,70%
Notbremsung 3	VDV 3/3	30	0	0,33;0,25	13,84	13,65	-1,37%	2,46	2,54	3,25%
Betriebsersatzbremsung	leer	70	0	0,33;0,25	125,27	130,91	4,50%	1,52	1,44	-5,26%
Betriebsersatzbremsung	VDV 2/3	70	0	0,33;0,25	134,99	145,25	7,60%	1,4	1,3	-7,14%
Betriebsersatzbremsung	VDV 3/3	70	0	0,33;0,25	151,07	159,93	5,86%	1,24	1,18	-4,84%
Betriebsersatzbremsung	leer	50	0	0,33;0,25	61,58	69,28	12,50%	1,56	1,39	-10,90%
Betriebsersatzbremsung	VDV 2/3	50	0	0,33;0,25	71,21	74,75	4,97%	1,37	1,29	-5,84%
Betriebsersatzbremsung	VDV 3/3	50	0	0,33;0,25	77,63	81,88	5,47%	1,26	1,18	-6,35%
Betriebsersatzbremsung	leer	30	0	0,33;0,25	24,84	27,19	9,46%	1,44	1,28	-11,11%
Betriebsersatzbremsung	VDV 2/3	30	0	0,33;0,25	27,29	29,24	7,15%	1,28	1,19	-7,03%
Betriebsersatzbremsung	VDV 3/3	30	0	0,33;0,25	30,81	31,76	3,08%	1,1	1,09	-0,91%
Ersatzbremsung der Notbremsung 3	leer	70	0	0,33;0,25	65,56	60,82	-7,23%	2,9	3,11	7,24%
Ersatzbremsung der Notbremsung 3	VDV 2/3	70	0	0,33;0,25	69,96	70,42	0,66%	2,71	2,68	-1,11%
Ersatzbremsung der Notbremsung 3	VDV 3/3	70	0	0,33;0,25	75,07	77,55	3,30%	2,49	2,44	-2,01%
Ersatzbremsung der Notbremsung 3	leer	50	0	0,33;0,25	31,84	32,11	0,85%	3,02	3	-0,66%
Ersatzbremsung der Notbremsung 3	VDV 2/3	50	0	0,33;0,25	41,81	36,78	-12,03%	2,29	2,62	14,41%
Ersatzbremsung der Notbremsung 3	VDV 3/3	50	0	0,33;0,25	40,49	40,32	-0,42%	2,41	2,39	-0,83%
Ersatzbremsung der Notbremsung 3	leer	30	0	0,33;0,25	13,59	12,64	-6,99%	2,6	2,75	5,77%
Ersatzbremsung der Notbremsung 3	VDV 2/3	30	0	0,33;0,25	15,94	14,14	-11,29%	2,2	2,46	11,82%
Ersatzbremsung der Notbremsung 3	VDV 3/3	30	0	0,33;0,25	15,24	15,37	0,85%	2,27	2,26	-0,44%
Schienenbremsung	leer	70	0	n/a	260,23	173,73	-33,24%	0,74	1,09	47,30%
Schienenbremsung	VDV 2/3	70	0	n/a	260,94	222,04	-14,91%	0,72	0,85	18,06%
Schienenbremsung	VDV 3/3	70	0	n/a	262,16	245,76	-6,26%	0,72	0,77	6,94%
Schienenbremsung	leer	50	0	n/a	97,61	84,07	-13,87%	0,99	1,15	16,16%
Schienenbremsung	VDV 2/3	50	0	n/a	136,16	107,06	-21,37%	0,72	0,9	25,00%
Schienenbremsung	VDV 3/3	50	0	n/a	115,88	118,36	2,14%	0,85	0,81	-4,71%
Schienenbremsung	leer	30	0	n/a	49,99	27,93	-44,13%	0,71	1,24	74,65%
Schienenbremsung	VDV 2/3	30	0	n/a	41,12	35,23	-14,32%	0,85	0,99	16,47%
Schienenbremsung	VDV 3/3	30	0	n/a	36,3	38,82	6,94%	0,93	0,89	-4,30%

Abbildung 102: Vergleich Typprüfung mit "Bremssim"

Zusätzlich wurden alle oben gezeigten Bremsfälle genau angesehen und mittels der Diagramme (r(t), a(t), $F_B(t)$, ...) auf Plausibilität geprüft und notfalls kleine Vergleichsrechnungen angefertigt. Es wurden noch zwei weitere Projekte verglichen, dabei traten dieselben Abweichungsmuster auf.

6.5 Spezielle Vergleiche

6.5.1 Betriebsbremsung 70km/h leer

Bei der Betriebsbremse ergibt sich lediglich der Unterschied aus der "B-Regelung". Während in "PBremssim" das Motormoment manuell reduziert wird um einen bestimmten Verzögerungswert zu erhalten, geschieht dies in "Bremssim" automatisch. Die Reduzierung des Motormoments als Eingabewert bewirkt jedoch einen Fehler. Die Schwellzeit bezieht sich dann auf den eingegebenen Wert und somit baut sich die Bremskraft wesentlich langsamer auf, als dies in der Realität der Fall ist. Der "B-Regelwert" für das gezeigte Beispiel liegt bei $a_b = 1,61m/s^2$.



Abbildung 103: Betriebsbremsung, 70km/h, Beladungszustand: leer, "PBremssim""

In der Abbildung aus "Bremssim" erkennt man gut, dass auch ein Abbau der Bremskraft simuliert wird. Der kleine Ausschlag nach unten ergibt sich im Moment des Wechselns von einem auf den anderen Abschnitt der Motorkennlinie. Man erkennt auch einen parabolischen Verlauf beim Aufbau, dieser entsteht durch die Motorkennlinie.



Abbildung 104: Ruck für Betriebsbremse, 70km/h, Beladungszustand: leer, "Bremssim"

Hier erkennt man gut, das konstante Einhalten des "B-Regelwertes", ab dem Zeitpunkt der Erreichung.







Abbildung 106: Geschwindigkeit, Weg für Betriebsbremse, 70km/h, Beladungszustand: leer, "Bremssim"



Abbildung 107: Kraftschlusswerte für Betriebsbremse, 70km/h, Beladungszustand: leer, "Bremssim"



Abbildung 108: Bremskräfte für Betriebsbremse, 70km/h, Beladungszustand: leer, "Bremssim"

6.5.2 Notbremsung 3 70km/h VDV 2/3

Bei der "Notbremsung 3" zeigen sich in der Bremssteuerung und Ausgabe der Bremskraft einige Unterschiede auf. Man erkennt schön, dass "PBremssim" keine Bremssteuerung simuliert. Die Kräfte bauen alle nach Tot- und Schwellzeit auf und verharren dann konstant.



Abbildung 109: Notbremsung 3, 70km/h, Beladungszustand: VDV 2/3, "PBremssim""

In "Bremssim" wird wie bereits beschrieben ruckgesteuert aufgebaut, dies erfolgt jedoch nur für die Bremseinheiten und nicht für die Magnetschienenbremse. Weiters erkennt man gut, dass die Magnetschienenbremse einer parabolischen Kurve folgt und in Richtung niedrigerer Geschwindigkeit zunimmt.



Abbildung 110: Ruck für Notbremsung 3, 70km/h, Beladungszustand: VDV 2/3, "Bremssim"



Abbildung 111: Verzögerung für Notbremsung 3, 70km/h, Beladungszustand: VDV 2/3, "Bremssim"



Abbildung 112: Geschwindigkeit und Weg für Notbremsung 3, 70km/h, Beladungszustand: VDV 2/3, "Bremssim"

Der notwendige Kraftschlusswert zwischen Rad/Schiene reduziert sich ebenfalls sobald die ED-Bremskraft reduziert wird. Der kleine Spitz am Beginn der maximalen Bremskraft am Lauffahrwerk ergibt sich durch die Massenträgheit und die noch ansteigende Verzögerung.



Abbildung 113: Kraftschlusswerte für Notbremsung 3, 70km/h, Beladungszustand: VDV 2/3, "Bremssim"

Um den konstanten "B-Regelwert" von 3,65m/s² halten zu können, wird die ED-Bremskraft reduziert. Dies lässt sich im darunterliegenden Diagramm gut erkennen. Die Magnetschienenbremskraft erhöht sich im Laufe des Bremsvorganges und sobald die Verzögerung von 3,65m/s² erreicht wurde, reduziert sich die ED-Bremskraft.



Abbildung 114: Bremskräfte für Notbremsung 3, 70km/h, Beladungszustand: VDV 2/3, "Bremssim"

Bei der "Notbremsung 3" kann man gut die Verbesserungen der neuen Software erkennen. Es wird nicht mit einer mittleren MG-Bremskraft, sondern mit der tatsächlichen Kurve gerechnet. Deshalb muss am Ende die ED-Bremskraft leicht reduziert werden, um den "B-Regelwert" zu halten. Da die Tot- und Schwellzeit im neuen Programm T₁₀ und T₉₀ entspricht, erfolgt der Aufbau der ED-Bremskraft etwas früher.

6.5.3 Schienenbremsung 70km/h leer

In den folgenden Diagrammen kann man die "Schienenbremsung" mit der Magnetschienenbremse erkennen. Der Unterschied von "Bremssim" zur einfacheren Rechnung mit dem mittleren Kraftschlusswert zwischen MG-Bremse und Schiene lässt sich hier gut ablesen. Dies kann bei kombinierten Bremssystemen Auswirkungen haben, da zu Beginn in der Realität die Magnetschienenbremskraft geringer ist und am Ende wesentlich stärker. In der nachfolgenden Abbildung ist die Berechnung in "PBremssim"" mit dem mittleren Kraftschlusswert zu sehen.



Abbildung 115: Schienenbremsung, 70km/h, Beladungszustand: leer, "PBremssim""

In den nachfolgenden Abbildungen kann man den Bremsvorgang im "Bremssim"-Simulationsprogramm nachvollziehen. Hier kann man erkennen, dass der Ruck niedriger ist zu Beginn. Dies rührt daher, dass zwar der Aufbau bis auf die vorher erläuterte t₀, t₁₀, t₁₀₀, t₉₀ identisch ist, jedoch die Bremskraft, die zu Beginn aufgebaut wird, wesentlich geringer ist.





Man erkennt die Steigerung der Bremskraft und Verzögerung mit der Reduktion der Geschwindigkeit.



Abbildung 117: Verzögerung für Schienenbremsung, 70km/h, Beladungszustand: leer, "Bremssim"



Abbildung 118:Geschwindigkeit und Weg für Schienenbremsung, 70km/h, Beladungszustand: leer, "Bremssim"

Man erkennt im darunterliegenden Chart, dass kein Kraftschlusswert zwischen Rad/Schiene notwendig ist um die Bremskraft zu übertragen. Dies ist logisch, da die Magnetschienenbremse nicht auf den Kraftschlusswert zwischen Rad/Schiene angewiesen ist.



Abbildung 119: Kraftschlusswert Rad/ Schiene für Schienenbremsung, 70km/h, Beladungszustand: leer, "Bremssim"

Hier kann man erkennen, dass die Gesamtbremskraft und die Magnetschienenbremskraft identisch sind und sonst nur eine konstante externe Kraft die eingestellt ist wirkt.



Abbildung 120: Bremskräfte für Schienenbremsung, 70km/h, Beladungszustand: leer, "Bremssim"



7. Zusammenfassung

Abbildung 121: Zusammenfassung Bremssim

Das darüberliegende Schaubild fasst die Grundfunktion von "Bremssim" nochmals zusammen. Die Eingabedaten gekoppelt mit den "Bremsfalldaten" liefern Ergebniswerte. Festhalten kann man insgesamt, dass "Bremssim" die in der Entwicklung geforderten Anforderungen und Use-Cases erfüllt und dadurch eine wesentliche Verbesserung der aktuell vorhandenen Bremssimulation darstellt. Die Anforderungen haben sich im Softwareentstehungsprozess häufig noch geändert oder sind erweitert worden. Die Dokumentation in dieser Arbeit dient in Zukunft zur Wartung und Adaption der Software. Der Quellcode ist ebenfalls gut auskommentiert. Die Berechnungsergebnisse liefern eine gute Näherung und sind aufgrund der Streckenverhältnisse oft etwas abweichend von der Realität. Zusätzlich hängt die Ergebnisqualität auch stark von der Eingabe der korrekten Daten und vor allem dem Vorhandensein dieser ab. Die Kraftschlussgrenzwerte können im realen Betrieb sowohl höher als auch niedriger liegen. Für die Zulassung des Fahrzeuges ist jedoch der theoretische Nachweis mit einer Kraftschlussgrenze von 0,33 ausreichend. Es hat sich in den Typtests gezeigt, dass man meistens in der Realität einen höheren Kraftschlusswert bzw. höhere externe Kräfte hat. Nur die berechneten Werte bei Gleitschutzeingriff und bei Bremsungen mit der Magnetschienenbremse liefern teilweise schlechtere Ergebnisse als in der Realität. Die Gleitschutzeingriffe kann man mit dem beschriebenen Korrekturfaktor allerdings gut an die Realität annähern. Dies erfordert jedoch noch zukünftige Vergleiche zur Eingabe von Erfahrungswerten für die Gleitschutzeffizienz. Mithilfe der vielseitig nutzbaren Diagramme und Ergebniswerte können viele neue Erkenntnisse gewonnen werden. Beispielsweise war zuvor nie bewusst, dass bei realer Kennlinie der Magnetschienenbremskraft, zu Beginn der Bremsung oft unrealistische Annahmen an die ED-Bremse getroffen wurden. Um dabei den geforderten Verzögerungswert bei hoher Geschwindigkeit zu erreichen, würde man den vorgegebenen Kraftschlusswert zwischen Rad und Schiene überschreiten.

TU Bibliotheks Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar WLEN vour knowledge hub The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

8. Ausblick

Aufgrund der objektorientierten und gut dokumentierten Arbeitsweise soll eine laufende Weiterentwicklung der Software stattfinden. Als Anforderungen an das Programm, die in den weiteren Ausbaustufen verwirklicht werden sollen, können folgende Punkte festgehalten werden:

- Ausbau des Komponentenmanagements von aktuell nur Fahrwerken auf Einzelkomponenten, die beliebig (wo passend) zusammengesetzt werden können.
- Die Steuerung für den Abbau der Bremskraft soll verbessert werden und möglichst real abgebildet werden.
- Nutzung des Referenzabstandes der einzelnen Räder für die Vorgabe einer konkreten Strecke mit variabler Neigung und variablem Kraftschlusswert.
- Ausweitung auf andere Straßenbahntypen und eventuell mit etwas Adaption auch auf Metros.
- Die Eingabe der Beladungsstufen ist zwar in der Eingabe achsbezogen, jedoch bereits radbezogen programmiert. Falls in Zukunft die Eingabedaten und die Vorgabe der genaueren Gewichtsverteilung es erfordern, kann die Maske für Beladungszustände umgebaut werden.
- Die genauen Eigenschaften des Gleitschutzes wurden nicht berücksichtigt, es gibt momentan lediglich einen Korrekturfaktor, der beim Erreichen der Kraftschlussgrenze die Bremskraft mit einer "Gleitschutzeffizienz" multipliziert. Dies könnte ebenfalls verbessert werden.
- Als zusätzliche Ausbaumöglichkeit bietet sich auch das automatische Simulieren von in Fehlerbäumen festgelegten Bremsfällen.

Die "Bremssim" Software ist seit 01.05.2018 offiziell die Simulationssoftware für Bremsungen am Straßenbahntyp Siemens Avenio.

9. Literaturverzeichnis

Assmann, B. & Selke, P., 2004. *Technische Mechanik - Band 3: Kinematik und Kinetik*. 13. Auflage Hrsg. München: Oldenbourg.

BOStrab, 2008. Technische Regeln für die Bemessung und Prüfung der Bremsen von Fahrzeugen nach der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab), s.l.: beka GmbH.

Burgard, U., 2014. Bremsprüfung nach EN 13452-1 und BoStrab, Prüfcenter Wildenrath: s.n.

Commons, W., 2018. [Online] Available at: <u>https://commons.wikimedia.org/</u> [Zugriff am 12 01 2018].

EN13452-1:2003, 2003. Leistungsvermögen, Bahnanwendungen - Bremsen Bremssysteme des öffentlichen Nahverkehrs - Teil 1: Anforderungen an das. s.l.:s.n.

EN14531-1, 2015. *DIN EN 14531-1 Bahnanwendungen – Verfahren zur Berechnung der Anhalteund der Feststellbremsung – Teil1*. s.l.:DIN - Deutsches Institut für Normung.

EN14531-2:2015, 2015. Bahnanwendungen – Verfahren zur Berechnung der Anhalte und der Feststellbremsung – Teil 2: Schrittweise Berechnungen für Zugverbände oder Einzelfahrzeuge, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung.

Fritzsche, M. & Keil, P., 2007. *Kategorisierung etablierter Vorgehensmodelle und ihre Verbreitung in der deutschen Software-Industrie*. München: TU München.

Gfatter, Berger, Krause & Vohla, 2007. *Grundlagen der Bremstechnik*. 2. Auflage Hrsg. Mödling & München: Knorr-Bremse GmbH.

Hakger, 2009. [Online] Available at: <u>https://www.codeproject.com/Articles/38270/Deep-copy-of-objects-in-C</u> [Zugriff am 19 12 2017].

Ihme, J., 2016. Schienenfahrzeugtechnik. Wiesbaden: Springer.

Janicki, J., 2018. Bremstechnik und Bremsproben. 1. Auflage Hrsg. Berlin: Bahn Fachverlag GmbH.

Janicki, J., Reinhard, H. & Rüffer, M., 2013. *Schienenfahrzeugtechnik*. 3. Hrsg. Berlin: Bahn Fachverlag GmbH.

McCaffrey, J., 2012. *Matrixuntergliederung*. [Online] Available at: <u>https://msdn.microsoft.com/de-de/magazine/jj863137.aspx</u> [Zugriff am 03 12 2017].

Raimund, S., 2018. Digitalisierung auf mittelständisch. s.l.:Springer Vieweg.

Schlitter, K., 2010. Richtlinie Bremsberechnungen LR - Fahrzeuge, s.l.: Siemens.

Schwarz, R., 2018. Bremssteuerung für eine Straßenbahn "Bremssim" ulation. Wien: s.n.

Siemens, 2017. [Online] Available at: <u>http://www.siemens.com</u>

Spiess, P., 2005. *Fahrdynamik des Schienenverkehrs Wintersemester 2004/2005,* Minden: DB Systemtechnik.

Spörl, A., Fischer, T. & Osterhus, W., 2010. Systembeschreibung Avenio, s.l.: s.n.

VDV150, 1995. *Typenempfehlung Stadtbahn-Fahrzeuge,* Köln: Verband deutscher Verkehrsunternehmen (VDV).

VDV152, 10/2016. Empfehlungen für die Festigkeitsauslegung von Personenfahrzeugen nach BOStrab. s.l.:s.n.

10. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wasserfallmodell (Fritzsche & Keil, 2007)	10
Abbildung 2: Siemens Avenio 3-Teiler (Siemens, 2017)	11
Abbildung 3: Siemens Avenio M 5-Teiler (Siemens, 2017)	11
Abbildung 4: Triebfahrwerk und Lauffahrwerk Avenio München (Ihme, 2016, p. 193)	12
Abbildung 5: Übersicht über Schienenbremssysteme (Janicki, 2018)	13
Abbildung 6: Niederflur Triebdrehgestell mit hydraulischer Federspeicherbremse (Janicki, et al., 2013)	14
Abbildung 7: Laudfahrwerk Avenio Bremsen (Spörl, et al., 2010, p. 203)	14
Abbildung 8: Triebfahrwerk Avenio Bremsen (Spörl, et al., 2010, p. 203)	15
Abbildung 9: Kraft - Wegdiagramm - zeigt die Überlagerung von elektrodynamischer und Reibungsbremse	
(EN14531-1, 2015)	16
Abbildung 10: Bremsaufbau (EN13452-1:2003, 2003)	17
Abbildung 11: EL Laststufen (EN13452-1:2003, 2003)	18
Abbildung 12: Prinzip der Steuerung eines Siemens Avenio 4-Teilers (Spörl, et al., 2010)	19
Abbildung 13: Bremsungsart Betriebsbremsung	21
Abbildung 14: Bremsungsart Betriebsersatzbremsung	21
Abbildung 15: Einteilung Notbremsung (EN13452-1:2003, 2003, p. 7)	22
Abbildung 16: Bremsungsart Notbremsung 1	22
Abbildung 17: Bremsungsart Notbremsung 3	23
Abbildung 18: Bremsungsart Sicherheitsbremsung	24
Abbildung 19: Bremsungsart Schienenbremsung	24
Abbildung 20: Bremsungsart Ersatzbremsung der Notbremsung 3	25
Abbildung 21: Bremsmatrix Avenio (Spörl, et al., 2010, p. 2012)	26
Abbildung 22: Aufbau der Bremskraft	27
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie	
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015)	28
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015) Abbildung 24: Kraft- Geschwindigkeitsdiagramm der Magnetschienenbremse (EN14531-1, 2015)	28 30
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015) Abbildung 24: Kraft- Geschwindigkeitsdiagramm der Magnetschienenbremse (EN14531-1, 2015) Abbildung 25: Bremskraft der jeweiligen Bremseinheit	28 30 30
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015)	28 30 30 31
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015) Abbildung 24: Kraft- Geschwindigkeitsdiagramm der Magnetschienenbremse (EN14531-1, 2015) Abbildung 25: Bremskraft der jeweiligen Bremseinheit Abbildung 26: Aufteilung der Bremskraft bei Radsatzpaar Abbildung 27: Luftwiderstand (Ihme, 2016, p. 33)	28 30 30 31 33
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015)	28 30 30 31 33 36
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015)	28 30 31 33 36 37
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015)	28 30 31 33 36 37 39
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015)	28 30 31 33 36 37 39 47
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015)	28 30 31 33 36 37 39 47 48
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015)	28 30 31 33 36 37 39 47 48 49
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015)	28 30 31 33 36 37 39 47 48 49 50
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015)	28 30 31 33 36 37 39 47 48 49 50 52
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015)	28 30 31 33 36 37 39 47 48 49 50 52 55
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015) Abbildung 24: Kraft- Geschwindigkeitsdiagramm der Magnetschienenbremse (EN14531-1, 2015) Abbildung 25: Bremskraft der jeweiligen Bremseinheit Abbildung 26: Aufteilung der Bremskraft bei Radsatzpaar Abbildung 27: Luftwiderstand (Ihme, 2016, p. 33) Abbildung 28: Beschleunigungs- und Verzögerungszyklus im v(t) Diagramm (VDV150, 1995) Abbildung 29: äquivalente Ansprechzeit und äquivalente Verzögerung (EN13452-1:2003, 2003, p. 12) Abbildung 30: Anhalteweg (EN13452-1:2003, 2003, p. 12) Abbildung 31: Anforderungen an die Berechnung Abbildung 32: Anforderungen an die Suser-Interface Abbildung 34: Anforderungen an die Eingabe Abbildung 38: Loginmaske Abbildung 39: Use-Cases Startmaske (Icons von (Commons, 2018)) Abbildung 40: Sequenzdiagramm Login	28 30 31 33 36 37 39 47 48 49 50 52 55 56
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015)	28 30 31 33 36 37 39 47 48 49 50 55 56 57
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015) Abbildung 24: Kraft- Geschwindigkeitsdiagramm der Magnetschienenbremse (EN14531-1, 2015) Abbildung 25: Bremskraft der jeweiligen Bremseinheit Abbildung 26: Aufteilung der Bremskraft bei Radsatzpaar Abbildung 27: Luftwiderstand (Ihme, 2016, p. 33) Abbildung 28: Beschleunigungs- und Verzögerungszyklus im v(t) Diagramm (VDV150, 1995) Abbildung 29: äquivalente Ansprechzeit und äquivalente Verzögerung (EN13452-1:2003, 2003, p. 12) Abbildung 30: Anhalteweg (EN13452-1:2003, 2003, p. 12) Abbildung 31: Anforderungen an die Berechnung Abbildung 32: Anforderungen an die Berechnung Abbildung 33: Anforderungen an die Eingabe Abbildung 34: Anforderungen an die Ausgabe Abbildung 38: Loginmaske Abbildung 39: Use-Cases Startmaske (Icons von (Commons, 2018)) Abbildung 40: Sequenzdiagramm Login Abbildung 41: Sequenzdiagramm Projektdefinition öffnen Abbildung 42: Sequenzdiagramm Komponentenmanagement öffnen	28 30 31 33 36 37 39 47 48 49 50 55 55 56 57 57
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015)	28 30 31 33 36 37 39 47 48 49 50 55 55 55 55 57 57 58
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015)	28 30 31 33 36 37 39 47 48 49 50 55 56 57 57 58 58
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015) Abbildung 24: Kraft- Geschwindigkeitsdiagramm der Magnetschienenbremse (EN14531-1, 2015) Abbildung 25: Bremskraft der jeweiligen Bremseinheit Abbildung 26: Aufteilung der Bremskraft bei Radsatzpaar Abbildung 27: Luftwiderstand (Ihme, 2016, p. 33) Abbildung 28: Beschleunigungs- und Verzögerungszyklus im v(t) Diagramm (VDV150, 1995) Abbildung 29: äquivalente Ansprechzeit und äquivalente Verzögerung (EN13452-1:2003, 2003, p. 12) Abbildung 30: Anhalteweg (EN13452-1:2003, 2003, p. 12) Abbildung 31: Anforderungen an die Berechnung Abbildung 32: Anforderungen an die User-Interface Abbildung 33: Anforderungen an die Lingabe Abbildung 34: Anforderungen an die Lingabe Abbildung 39: Use-Cases Startmaske (Icons von (Commons, 2018)) Abbildung 40: Sequenzdiagramm Login Abbildung 41: Sequenzdiagramm Komponentenmanagement öffnen Abbildung 43: Sequenzdiagramm Bremsungsarten öffnen Abbildung 44: Sequenzdiagramm Einstellungen öffnen Abbildung 45: UseCases Einstellungen	28 30 31 33 36 37 39 47 49 50 52 55 56 57 58 58 61
Abbildung 23: Bremskraft der ED-Bremse aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Motorkennlinie (EN14531-1, 2015)	28 30 31 33 36 37 39 47 48 49 50 55 56 57 58 61 61

Abbildung 47: Sequenzdiagramm Einstellungen Fenster schließen	61
Abbildung 48: Use-Cases Projektdefinition	67
Abbildung 49: Sequenzdiagramm Projektegruppe erstellen	68
Abbildung 50: Sequenzdiagramm Projektgruppe öffnen	68
Abbildung 51: Sequenzdiagramm neues Projekt erstellen	69
Abbildung 52: Sequenzdiagramm Referenzprojekt öffnen	70
Abbildung 53: Sequenzdiagramm Projektnamen ändern	70
Abbildung 54: Sequenzdiagramm Projekt exportieren	71
Abbildung 55: Sequenzdiagramm Projekt kopieren	71
Abbildung 56: Sequenzdiagramm Projekt importieren	72
Abbildung 57: Sequenzdiagramm Projekt löschen	72
Abbildung 58: Sequenzdiagramm Projektdefinition schließen	73
Abbildung 59: Inputfenster Bremsungsart erstellen	75
Abbildung 60: Fenster für die Erstellung eines Ausfallszenarios	77
Abbildung 61: Use-Cases Bremsugnsarten und Ausfallszenarios	79
Abbildung 62: Sequenzdiagramm Bremsungsart erstellen	80
Abbildung 63: Sequenzdiagramm Bremsungsart bearbeiten	80
Abbildung 64: Sequenzdiagramm Bremsungsart löschen	81
Abbildung 65: Projektgruppe speichern	81
Abbildung 66: Sequenzdiagramm Ausfallszenario hinzufügen	82
Abbildung 67: Sequenzdiagramm Ausfallszenario bearbeiten	82
Abbildung 68: Sequenzdiagramm Ausfallszenario löschen	83
Abbildung 69: Use-Cases Komponentenmanagement	85
Abbildung 70: Sequenzdiagramm neues Fahrwerk anlegen	86
Abbildung 71: Sequenzdiagramm Fahrwerk löschen	86
Abbildung 72: Sequenzdiagramm Fahrwerk bearbeiten	87
Abbildung 73: Squenzdiagramm Fahrwerk exportieren	88
Abbildung 74: Sequenzdiagramm Fahrwerk importieren	88
Abbildung 75: Sequenzdiagramm Pool speichern	89
Abbildung 76: Use-Cases Einstiegsmaske (Icons von (Commons, 2018))	90
Abbildung 77 : Einstiegsmaske	91
Abbildung 78: Use-Cases Zugkonfiguration	93
Abbildung 79: Sequenzdiagramm Fahrwerk zuordnen	94
Abbildung 80: Sequenzdiagramm Zugtyp ändern	95
Abbildung 81: Sequenzdiagramm verbautes Fahrwerk exportieren	96
Abbildung 82: Sequenzdiagramm Fahrwerk auf Zugteil bearbeiten	97
Abbildung 83: Sequenzdiagramm Bremseinheiten öffnen	98
Abbildung 84: Sequenzdiagramm Komponentenmanagement öffnen	98
Abbildung 85: Use-Case Bremseinheiten	99
Abbildung 86: Use-Cases Beladungszustand	101
Abbildung 87: Sequenzdiagramm neuen Beladungszustand erstellen inklusive Eingabe der Werte	102
Abbildung 88: Sequenzdiagramm Beladungszustand umbenennen	103
Abbildung 89: Sequenzdiagramm Beladungszustand löschen	104
Abbildung 90: Use-Cases Projektbremsparameter	105
Abbildung 91: Projektbremsparameter Fenster	106
Abbildung 92: Use-Cases Bremsfallmaske	108
Abbildung 93: Bremsfallmaske	109
Abbildung 94: Sequenzdiagramm Bremsfälle anlagen	111
Abbildung 95: Sequenzdiagramm Bremsfälle löschen	111
Abbildung 96: Sequenzdiagramm Berechnung durchführen	112
Abbildung 97: Sequenzdiagramm Bremsfälle importieren	113
Abbildung 98: Sequenzdiagramm neuen Auswahlparameter hinzufügen	114
Abbildung 99: Sequenzdiagramm Auswahlparameter löschen	115
Abbildung 101: Sequenzdiagramm Fenster schließen	118
	-

Abbildung 102: Use-Cases Bremsergebnisse	119
Abbildung 103: Sequenzdiagramm einzelnen Bremsfall ausgeben	120
Abbildung 104: Ausgabe Werte	121
Abbildung 105: Vergleich "PBremssim"" mit "Bremssim"	125
Abbildung 106: Vergleich Typprüfung mit "Bremssim"	126
Abbildung 107: Betriebsbremsung, 70km/h, Beladungszustand: leer, "PBremssim""	127
Abbildung 108: Ruck für Betriebsbremse, 70km/h, Beladungszustand: leer, "Bremssim"	127
Abbildung 109: Verzögerung für Betriebsbremse, 70km/h, Beladungszustand: leer, "Bremssim"	128
Abbildung 110: Geschwindigkeit, Weg für Betriebsbremse, 70km/h, Beladungszustand: leer, "Bremssim"	128
Abbildung 111: Kraftschlusswerte für Betriebsbremse, 70km/h, Beladungszustand: leer, "Bremssim"	128
Abbildung 112: Bremskräfte für Betriebsbremse, 70km/h, Beladungszustand: leer, "Bremssim"	128
Abbildung 113: Notbremsung 3, 70km/h, Beladungszustand: VDV 2/3, "PBremssim""	129
Abbildung 114: Ruck für Notbremsung 3, 70km/h, Beladungszustand: VDV 2/3, "Bremssim"	129
Abbildung 115: Verzögerung für Notbremsung 3, 70km/h, Beladungszustand: VDV 2/3, "Bremssim"	130
Abbildung 116: Geschwindigkeit und Weg für Notbremsung 3, 70km/h, Beladungszustand: VDV 2/3,	
"Bremssim"	130
Abbildung 117: Kraftschlusswerte für Notbremsung 3, 70km/h, Beladungszustand: VDV 2/3, "Bremssim"	130
Abbildung 118: Bremskräfte für Notbremsung 3, 70km/h, Beladungszustand: VDV 2/3, "Bremssim"	131
Abbildung 119: Schienenbremsung, 70km/h, Beladungszustand: leer, "PBremssim""	131
Abbildung 120: Ruck für Schienenbremsung, 70km/h, Beladungszustand: leer, "Bremssim"	132
Abbildung 121: Verzögerung für Schienenbremsung, 70km/h, Beladungszustand: leer, "Bremssim"	132
Abbildung 122:Geschwindigkeit und Weg für Schienenbremsung, 70km/h, Beladungszustand: leer, "Brems	sim"
	132
Abbildung 123: Kraftschlusswert Rad/ Schiene für Schienenbremsung, 70km/h, Beladungszustand: leer,	
"Bremssim"	133
Abbildung 124: Bremskräfte für Schienenbremsung, 70km/h, Beladungszustand: leer, "Bremssim"	133
Abbildung 125: Zusammenfassung Bremssim	134

11. Formelverzeichnis

Formel 1: 1. Abschnitt ED-Bremse (EN14531-1, 2015, p. 27)	. 28
Formel 2: 2. Abschnitt ED-Bremskraft (EN14531-1, 2015, p. 28)	. 28
Formel 3: 3. Abschnitt ED-Bremskraft (EN14531-1, 2015, p. 28)	. 28
Formel 4:4. Abschnitt ED-Bremskraft (EN14531-1, 2015, p. 28)	. 28
Formel 5: Maximalkraft der ED-Bremse (Schlitter, 2010, p. 13)	. 28
Formel 6: Bremskraft aktive Scheibenbremse (Schlitter, 2010, p. 10)	. 29
Formel 7: Bremskraft passive Scheibenbremse (Schlitter, 2010, p. 10)	. 29
Formel 8: Bremskraft der Magnetschienenbremse (EN14531-1, 2015, p. 31)	. 30
Formel 9: Rollwiderstand (EN14531-2:2015, 2015)	. 31
Formel 10: Laufwiderstand (Ihme, 2016, p. 37)	. 32
Formel 11: Rollwiderstand (Ihme, 2016, p. 36)	. 32
Formel 12: Konstante A	. 32
Formel 13: Stoßwiderstand (Ihme, 2016, p. 37)	. 32
Formel 14: Konstante B	. 33
Formel 15: Luftwiderstand Wa von Bug und Heck (Ihme, 2016, p. 33)	. 33
Formel 16: Staudruck q (Ihme, 2016, p. 33)	. 33
Formel 17: Luftreibung Wb (Ihme, 2016, p. 34)	. 33
Formel 18: Beiwert für den Luftwiderstand der Zugoberfläche als zylindrischer Körper	. 33
Formel 19: Konstante C	. 34
Formel 20: Konstante A real	. 34
Formel 21: Konstante B real	. 34
Formel 22: Laufwiderstand am Fahrzeug	. 34
Formel 23: Windkraft (EN14531-1, 2015)	. 34
Formel 24: Hangabtriebskraft Fg (EN14531-1, 2015)	. 35
Formel 25: Dynamische Masse (EN14531-1, 2015, p. 13)	. 35
Formel 26: äquivalente rotierende Masse (EN14531-1, 2015)	. 35
Formel 27: Mittlere Verzögerung (BOStrab_TR_Br, 2008, p. 15)	. 36
Formel 28: Mittlere Verzögerung 3	. 36
Formel 29: Äquivalente Ansprechzeit (EN13452-1:2003, 2003)	. 37
Formel 30: Äquivalente Verzögerung (EN13452-1:2003, 2003)	. 37
Formel 31: Ruck (Assmann & Selke, 2004, p. 30)	. 38
Formel 32: Ruck in der schrittweisen Berechnung	. 38
Formel 33: Mittlerer Ruck	. 38
Formel 34: Anhalte- Verzögerungsbremsweg s	. 39
Formel 35: Anhaltezeit t	. 39
Formel 36: erforderlicher Kraftschlusswert (EN14531-2:2015, 2015, p. 16)	. 39
Formel 37: übertragbare Bremskraft	. 40
Formel 38: Geschwindigkeit zum Zeitpunkt ti (EN14531-2:2015, 2015)	. 40
Formel 39: Weg zum Zeitpunkt t _i (EN14531-2:2015, 2015)	. 40
Formel 40: Verzögerung zum Zeitpunkt t _i (EN14531-1, 2015)	. 40
Formel 41: Anhalte- Verzögerungszeit zum Zeitpunkt t _i (EN14531-1, 2015)	. 40
Formel 42: Integrationsschritt (EN14531-1, 2015)	. 40

12. Anhang



Klassendiagramm des Bremssystem

S

class Bremssystem







Bibliothek verfügbar der TU Wien I J Wien Biblioth an ist at marbeit in print Diplon ailable leser av <u>.</u> thesi ion this : of Origir uckte /eľ าล te 'ed approbiei Die The **Bibliothek**

S Teil N

Klassendiagramm

d

les

Bremssyste

З




