

Studie für eine innovative, lärm- und verschleißarme Bremsung am Abrollberg StilvA

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2015
(VIF2015)

August 2018





Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien

Radetzkystraße 2

A – 1030 Wien



*Bundesministerium
für Verkehr,
Innovation und Technologie*

ÖBB-Infrastruktur AG

Nordbahnstraße 50

A – 1020 Wien



Autobahnen-

und

Schnellstraßen-Finanzierungs-

Aktiengesellschaft

Rotenturmstraße 5-9

A – 1010 Wien





Für den Inhalt verantwortlich:

Fachhochschule St. Pölten GmbH

Carl Ritter von Ghega Institut für integrierte Mobilitätsforschung

Matthias Corvinus-Straße 15

3100 St. Pölten



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH

Thematische Programme

Sensengasse 1

A – 1090 Wien



Studie für eine innovative, lärm- und verschleißarme Bremsung am Abrollberg *StilvA*

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2015)

Autoren:

FH-Prof. DI DI(FH) Frank MICHELBERGER, EURAIL-ING (Leitung)

FH-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Christian Fabian

FH-Prof. DI Dr. Mario JUNGWIRTH

Martin KALTEIS, BSc

Simon MERSCHAK, BSc MSc

FH-Prof. Dr. techn. Burkhard STADLMANN

Lukas STOCK

DI Adrian WAGNER, BSc



Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

Fachhochschule St. Pölten GmbH (Projektleitung)

Fachhochschule OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH

INHALTSVERZEICHNIS

1. Kurzzusammenfassung	12
1.1. Abstract.....	12
1.2. Zusammenfassung	13
1.2.1. Problemstellung	13
1.2.2. Methode.....	13
1.2.3. Ergebnisse.....	13
1.2.4. Schlussfolgerungen	17
2. Grundlagen	18
2.1. Begriffsdefinitionen	18
2.1.1. Arbeitsrichtung.....	18
2.1.2. Langsamläufer / Schlechtläufer / Gutläufer	18
2.1.3. Brechpunkt / Bergspitze.....	18
2.1.4. Lauffläche / Spurkranzspitze	19
2.2. Abstecken des Untersuchungsraumes	20
2.3. Ermittlung der Bestandssituation	20
2.3.1. Verschiebebahnhöfe in Österreich	20
2.3.2. Betriebsablauf.....	21
2.3.3. QUELLENVERZEICHNIS.....	34
3. Innovationsprozess	37
3.1. Ablauf/Methodik externe	37
3.1.1. Allgemeine Rahmenbedingungen für die Workshops.....	37
3.1.2. Workshop-Grundlagen.....	37
3.2. Ablauf Innovationsworkshop	38
3.3. Ablauf Workshop intern.....	39
3.4. Ergebnisse des Workshops	39
4. Ausarbeitung der Varianten	43

4.1.	Energieumwandelnde Schiene	43
4.1.1.	Varianten	44
4.2.	Wannenbremse / Wasserbremse	46
4.2.1.	Varianten	46
4.3.	Induktivbremse / Wirbelstrombremse	47
4.3.1.	Varianten	48
4.4.	Anhebbare Schiene	49
4.4.1.	Varianten	50
4.5.	Mobiler Prellbock	50
4.6.	Trägheitsmodul zur Energieumwandlung	52
4.7.	Vakuumbremse.....	53
4.8.	Intelligenter Stupser	54
4.9.	Bremsschuh 4.0	55
4.10.	Einhaksystem	56
4.10.1.	Varianten.....	56
4.11.	Prellbock mit langem Bremsweg	57
4.11.1.	Varianten.....	58
4.12.	Magnetorheologischer Retarder	58
4.13.	Pufferbremse mit Seilzug Rotationsprinzip – ausklappbarer Puffer	60
4.14.	Hakenwagen	61
4.15.	Bremswagen - Flüssigkeitszylinder mit Schrauben.....	62
5.	Bewertung.....	63
6.	Validierung.....	70
6.1.	Variante 1 – Variabler Rollwiderstand.....	71
6.1.1.	Realisierung eines variablen Rollwiderstandes	71
6.1.2.	Überlegungen zur Umsetzung einer verform- und regelbaren Schiene	74
6.1.3.	Hypothesen zum Verhalten des variablen Rollwiderstandes.....	76

6.1.4.	Die Experimente	79
6.1.5.	Projektion der Ergebnisse auf den Maßstab 1:1	100
6.1.6.	Zu berücksichtigende Faktoren bei der Installation des Bremssystems an einem Rangierbahnhof.....	104
6.1.7.	Weiterführende Einflussfaktoren.....	109
6.1.8.	Zusammenfassung	111
6.1.9.	Quellenverzeichnis	112
6.2.	Variante 2 - Variabler Rollwiderstand	114
6.2.1.	Anwendung.....	114
6.2.2.	Dielektrische Elastomere (DE).....	114
6.2.3.	Magnetorheologische Elastomere (MRE).....	115
6.2.4.	Anordnung der Bremsen im Gleis.....	115
6.2.5.	Die Bremsung	116
6.2.6.	Erzielbare Bremskraft	117
6.2.7.	Weitere Probleme	118
6.2.8.	Das Modell.....	119
6.2.9.	Zusammenfassung	119
6.2.10.	QUELLENVERZEICHNIS	120
6.3.	Gummiradbremse - Friction Drive	121
6.3.1.	Physik des friction drive bei Fahrgeschäften	121
6.3.2.	Zusammenwirken des friction drive und dem Radsatz	122
6.3.3.	Fazit.....	125
6.3.4.	QUELLENVERZEICHNIS.....	125
6.4.	Variante 3 - Umgekehrter Radsatzschubwagen	126
6.4.1.	Ursprünglicher Verwendungszweck	126
6.4.2.	Funktion	127
6.4.3.	Nutzen	127

6.4.4.	Einsatzbeispiel.....	127
6.4.5.	Anforderungen für Bremsung	128
6.4.6.	Mögliche Problemstellung.....	129
6.4.7.	Notwendige Energie	130
6.4.8.	Möglichkeiten seitens des Herstellers	131
6.4.9.	Ergebnis.....	131
6.4.10.	QUELLENVERZEICHNIS	131
6.5.	Variante 4 - Adaptierter Retarder.....	133
6.5.1.	Anwendung von konventionellen Retardern	133
6.5.2.	Aufbau eines Retarders	135
6.5.3.	Funktionsweise	141
6.5.4.	Situierung im Gleis.....	145
6.5.5.	Verschleiß.....	149
6.5.6.	Anforderungen an ein adaptiertes System	152
6.5.7.	Lärmschutzgrundlagen	154
6.5.8.	Schallemissionsermittlung	157
6.5.9.	Auswertung und Interpretation.....	160
6.5.10.	Rückschlüsse der bisherigen Ergebnisse	166
6.5.11.	Konstruktion eines Demonstrators	176
6.5.12.	Verifizierung der umgesetzten Maßnahmen	182
6.5.13.	Auswertung und Interpretation der adaptierten Maßnahmen.....	187
6.5.14.	Einschätzung der Lebensdauer der Beschichtung.....	194
6.5.15.	Mögliche Beschichtungsmethoden	197
6.5.16.	QUELLENVERZEICHNIS	204
6.6.	Variante 5 - Wirbelstrombremse	208
6.6.1.	Bauformen von Wirbelstrombremsen	209
6.6.2.	Aufgabenstellung	209

6.6.3.	Vektor der Magnetposition	211
6.6.4.	Geschwindigkeitsverteilung am Rad.....	211
6.6.5.	Durchgeführte Simulationen mit Comsol Multiphysics.....	212
6.6.6.	Auslegung des Bremsmagneten.....	212
6.6.7.	Bestimmung der Magnetisierung	214
6.6.8.	2D Simulation mit Lorentz-Term (Kupfer)	215
6.6.9.	2D Simulation Magnetisierung (M3, 50 Hz)	216
6.6.10.	2D Simulation Wirbelströme (M1) / Material: Kupfer	217
6.6.11.	Vergleich der Materialeigenschaften:	217
6.6.12.	Magnetisierungen für 2D Simulation der Bremskraft	219
6.6.13.	Auswirkung des Skins-Effekts (Kupfer)	220
6.6.14.	2D Simulation der Bremskraft (Kupfer) bei $v = 1\text{m/s}$	220
6.6.15.	2D Simulation der Bremskraft (Vergleich: Kupfer-Stahl).....	221
6.6.16.	Erkenntnisse der 2D Simulationen.....	221
6.6.17.	2D Simulation der Wirbelströme – Moving Mesh	222
6.6.18.	3D Simulation der Wirbelströme - Kupfer.....	223
6.6.19.	Berechnung des Bremsmoments mit Matlab	227
6.6.20.	Berechnung der Bremsarbeit (Energieänderung) eines einzelnen Magneten: 229	
6.6.21.	Berechnung der kinetischen Energie:	229
6.6.22.	Mögliche Belastung durch elektromagnetische Strahlung (EMV)	230
6.6.23.	Gründe für das geringe Bremsmoment.....	231
6.6.24.	Fazit	231
6.6.25.	QUELLENVERZEICHNIS	231
7.	Umsetzungsszenarien	233
7.1.	Umsetzungsszenario adaptierter Retarder	233
7.2.	Umsetzungsszenario variabler Rollwiderstand.....	234

7.2.1.	Definition der Schnittstellen	234
7.2.2.	Notwendige Infrastruktur.....	235
7.2.3.	Beschreibung der geometrischen Abmessungen	236
7.2.4.	Beschreibung der notwendigen Komponenten.....	236
7.2.5.	Abschätzung des Installationsaufwandes	237
7.2.6.	Integration in bestehende Anlagen	237
7.2.7.	Abschätzung des Verschleißes und der Lärm- bzw. Umweltverträglichkeit ...	237
8.	Abbildungsverzeichnis	239
9.	Tabellenverzeichnis	245

1. KURZZUSAMMENFASSUNG

Bestehende Technologien zur Abbremsung frei rollender Wagen an Abrollbergen in Verschubbahnhöfen sind zwar bewährt, weisen aber Nachteile wie unter anderem aufwändige Wartung und Instandhaltung (z.B. durch Verschleiß oder aufgrund notwendiger Hydraulikanlagen), hohe Lärmemissionen oder fehlende Automatisierungsmöglichkeiten auf.

Ziel des Projekts „StilvA - Studie für eine innovative, lärm- und verschleißarme Bremsung am Abrollberg“ war es, neue Lösungen zu finden mit denen ein wirtschaftliches, lärm- und verschleißarmes Abbremsen möglich erscheint. Im Rahmen eines ergebnisoffenen Innovationsprozesses wurden mehrere Ideen entwickelt, vertieft ausgearbeitet und hinsichtlich Machbarkeit bewertet und überprüft. Schlussendlich liegen zwei Varianten vor deren Umsetzung am realistischsten erscheint: Variabler Rollwiderstand und Adaptierte Retarder.

1.1. Abstract

Existing technologies for braking free-rolling wagons on a marshalling hump in shunting stations have proven their worth but have disadvantages such as extensive maintenance and repair (e.g. due to wear or due to necessary hydraulic systems), high noise emissions or a lack of automation options. The aim of the project "StilvA - Study for innovative, low-noise and low-wear braking for marshalling humps" was to find new solutions with which economical, low-noise and low-wear braking seems possible. As part of an open-minded innovation process, several ideas were developed, elaborated in depth, evaluated and reviewed with regard to feasibility. Finally, two variants are most realistic for implementation: variable rolling resistance and adapted Retarders.

1.2. Zusammenfassung

1.2.1. Problemstellung

In der Produktion und Betriebsdurchführung des Güterverkehrs und insbesondere des Einzelwagenverkehrs sind Verschubbahnhöfe eine wesentliche Komponente. Zur Erfüllung der Hauptaufgabe, dem Auflösen und Zusammenstellen von Zügen (Zugbildung), ist unter anderem ein Ablauf- bzw. Abrollberg notwendig. Ein wesentlicher Teil innerhalb dieser Ablaufanlage ist die Bremsenrichtung, oft auch als Gleisbremse bezeichnet. Bestehende Technologien zur Abbremsung frei rollender Wagen sind zwar bewährt, weisen aber Nachteile wie unter anderem aufwändige Wartung und Instandhaltung (z.B. durch Verschleiß oder aufgrund notwendiger Hydraulikanlagen), hohe Lärmemissionen oder eine fehlende Automatisierungsmöglichkeit auf.

Ziel des Projekts „StilvA - Studie für eine innovative, lärm- und verschleißarme Bremsung am Abrollberg“ war es, neue Lösungen zu finden mit denen ein wirtschaftliches, lärm- und verschleißarmes Abbremsen möglich erscheint.

1.2.2. Methode

Mithilfe eines moderierten Innovationsprozesses wurden zunächst auf abstrakter Ebene Ideen gesammelt und skizziert. Dieser ergebnisoffene Ansatz führte dazu, dass auch Technologien und Methoden untersucht wurden, die selbst noch innovativ sind, und deren Anwendung im Bereich Bahn, oder sogar überhaupt im Bereich der angewandten Technik, noch wenig bis gar keine Verwendung fanden. Die Ideen wurden ausgearbeitet und in mehreren Schritten bewertet. So blieben von anfänglich 18 Ideen nach der ersten Bewertungsrunde sechs Varianten übrig, die weiter ausgearbeitet wurden. In den weiteren Schritten wurden vier Varianten ausgeschieden, so dass sich am Ende zwei Vorschläge herauskristallisierten.

1.2.3. Ergebnisse

Als Gesamtergebnis liegen zwei ausgearbeitete Varianten vor, deren Umsetzung kurzfristig und mittelfristig realistisch ist, diese sind:

- Variabler Rollwiderstand
- Adaptierte Retarder

Bei der Variante variabler Rollwiderstand wird bei einer erforderlichen Bremsung der Rollwiderstand angehoben. Der große Vorteil bei der Bremsung mittels variablem Rollwiderstandes liegt darin, dass sich das abzubremsende Rad stetig über eine längere Strecke auf dem Bremsselement bewegt, somit sind sämtliche Unstetigkeiten reduziert, die den Radkörper bzw. die Bremse zum Schwingen anregen könnten. Dies wird dadurch umgesetzt, dass im Bereich der Bremsstrecke im Fall einer Bremsung elastische Gummielemente einen Teil der Lastabtragung der Güterwagen übernehmen. Durch das Anschmiegen von elastischen Elementen an die Laufflächen der Räder wird der Rollwiderstand erhöht und der Wagen verzögert.



Abbildung 1: Demonstrator Variabler Rollwiderstand

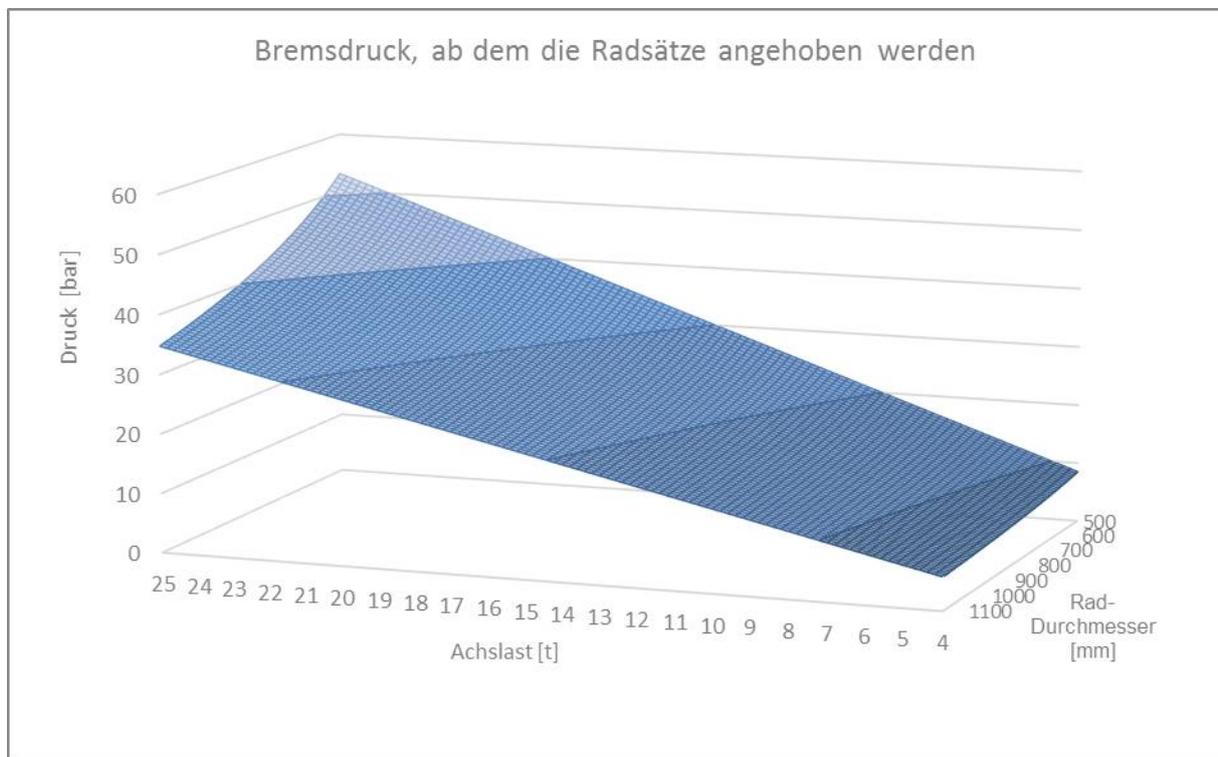


Abbildung 2: Gegenüberstellung der Achslasten zu den Raddurchmessern, ab welchen Druck es zur Anhebung der Güterwagen kommt.

Bei der Variante adaptierte Retarder war es das Ziel, bestehende Retarder vor allem hinsichtlich Lärm zu optimieren. Dazu wurden durch Akustikmessungen am Wiener Zentralverschiebebahnhof jene Komponenten ermittelt, welche für die Emissionsbildung verantwortlich sind. Aus diesen Erkenntnissen konnten als Maßnahmen die Entkopplung des Retarders von der Schiene, die Einhausung des Gehäuses und die Beschichtung der Haube abgeleitet werden, welche an einem Demonstrator validiert wurden. Die Beschichtung beziehungsweise das Verwenden einer Spurkranzspitzenschmierleiste wiesen hierbei das größte Emissionsminderungspotential auf, das der Entstehung von Resonanzen und hochfrequenten Tönen entgegenwirkt.



Abbildung 3: Demonstrator Einhausung



Abbildung 4: Beschichtete Haube einer Retarderkapsel



Abbildung 5: Messaufbau im Audiostudio

1.2.4. Schlussfolgerungen

Die Ziele des Projekts und aller Arbeitspakete konnten erreicht werden. Im Innovationsprozess wurden Ideen gesammelt, die zum Teil gänzlich neu und innovativ sind. Diese Ideen wurden von der Projektleitung, unter Mitarbeit der Projektpartner, ausgearbeitet und u.a. mit Vor- und Nachteilen beschrieben. Anschließend erfolgten regelmäßige Bewertungen dieser Ideen mit dem Auftraggeber. Ergebnis waren Varianten, die in weiterer Folge vertieft ausgearbeitet und validiert oder ausgeschieden wurden. Im Rahmen der vertieften Ausarbeitungen hat sich z.B. gezeigt, dass die eine Umsetzung der Wirbelstrombremse technisch nicht möglich ist. Daher wurden die Umsetzungsszenarien nur für die Varianten variabler Rollwiderstand und adaptierter Retarder durchgeführt.

Gegenüber dem ursprünglichen Ziel, eine Variante zu entwickeln, konnten somit sogar zwei Varianten identifiziert und ausgearbeitet werden. Als Highlight kann einerseits der Prototyp zur Variante variabler Rollwiderstand erwähnt werden, der für Tests zum Nachweis der Machbarkeit aufgebaut wurde und andererseits die erfolgreichen Emissionsmessungen plus Demonstratoren im Rahmen der Variante adaptierter Retardern. Generell ist die Tatsache, dass neue Varianten gefunden wurde und außerdem gezeigt werden konnte, dass diese die hohen Anforderungen dieses Einsatzbereichs erfüllen können, ein Highlight, da zu Beginn noch nicht wirklich erkennbar war, ob es tatsächlich überhaupt eine Variante geben wird. Dies zeigt sich auch an der Tatsache, dass die Variante Wirbelstrombremse als technisch nicht machbar ausgeschlossen werden musste. Dies ist insofern interessant, da diese Variante in der Branche immer wieder als mögliche Methode zur Abbremsung kursiert. Nun konnte hiermit nachgewiesen werden, dass sich die Wirbelstrombremse für diesen Anwendungsfall nicht eignet.

2. GRUNDLAGEN

2.1. Begriffsdefinitionen

2.1.1. Arbeitsrichtung

Die Arbeitsrichtung beschreibt in welcher Richtung ein Verschiebebahnhof betrieben wird. Diese charakterisiert den Laufweg von Güterwagen am Abrollberg. Die Arbeitsrichtung zeigt immer vom Abrollberg in die Richtungsgruppe. Besitzt ein Verschiebebahnhof zwei Abrollberge von denen Wagen in eine Richtungsgruppe rollen können, so weist er zwei Arbeitsrichtungen auf.¹

2.1.2. Langsamläufer / Schlechtläufer / Gutläufer

Als Schlecht- oder Langsamläufer bezeichnet man einen Güterwagen, welcher durch seine spezifischen Widerstände schlechtere Laufeigenschaften als ein Gutläufer aufweist.²

2.1.3. Brechpunkt / Bergspitze

Als Brechpunkt oder Bergspitze wird der höchste Punkt des Abrollberges bezeichnet.³ Nachdem die Güterwagen diesen Punkt passiert haben rollen sie selbstständig ins jeweilige Richtungsgleis. Die nachstehende Grafik bildet diesen Punkt mit einem „X“ gekennzeichnet ab:

¹ Vgl. Pacht, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 7. Auflage. Braunschweig 2013, S.233-4.

² Vgl. Ebd., S.239.

³ Vgl. Barta, Michael: Entwicklung eines Tools zur Simulation eines rollenden Eisenbahnwagens am Abrollberg. St. Pölten 2013, S.4.

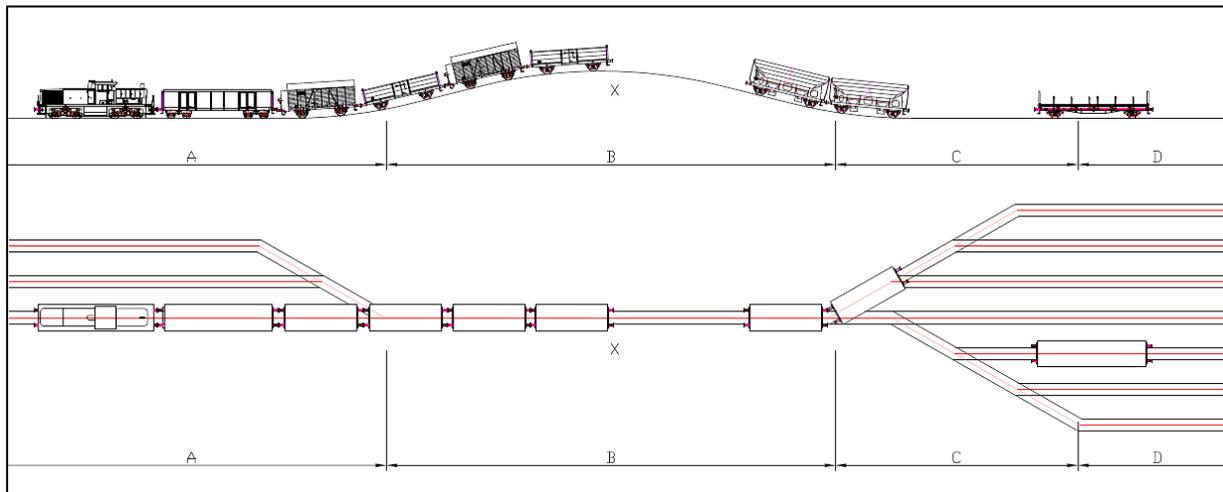


Abbildung 6: Übersicht Abrollberg (A - Einfahrgruppe, B – Abrollberg, C – Verteilzone, D – Richtungsgleise)⁴

2.1.4. Lauffläche / Spurkranzspitze

Der Radsatz kann in verschiedene Bereiche eingeteilt werden. Die für diese Arbeit relevanten Bezeichnungen sind die Lauffläche und die Spurkranzspitze. In der nachfolgenden Abbildung sind die Lauffläche und die Spurkranzspitze, grüner Punkt am Spurkranz, eingezeichnet:

⁴ Abbildung entnommen aus: Academic (Hg.): Schlechtläufer. URL: <http://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/1249448> [Stand 20.12.2017].

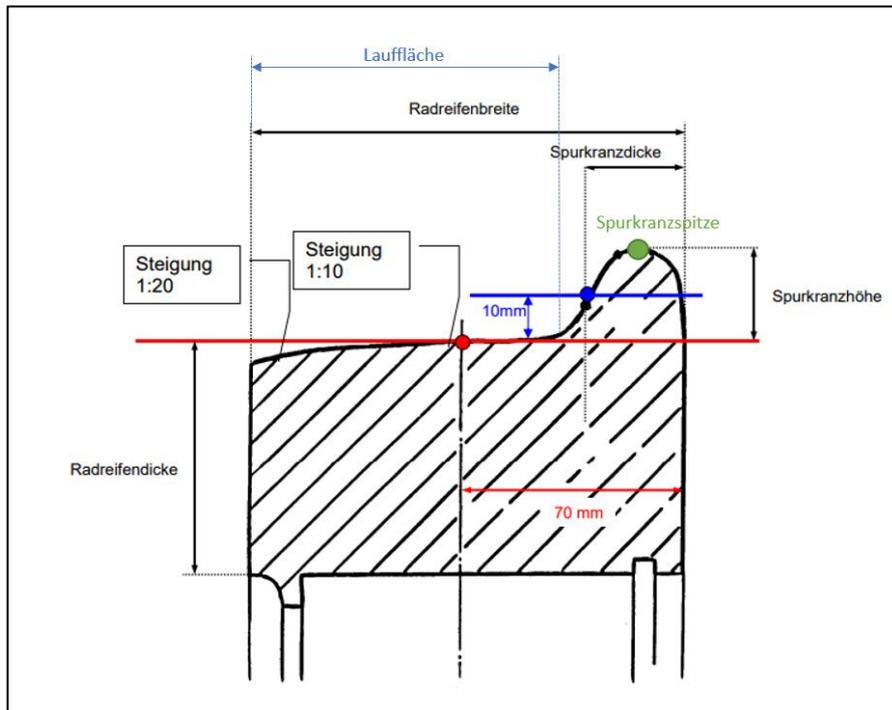


Abbildung 7: Ausschnitt eines Radsatzes⁵

2.2. Abstecken des Untersuchungsraumes

Im Zuge dieses Projekts werden der Einzelwagenladungsverkehr und dessen Zusammenhänge nicht näher betrachtet. Jedoch werden die Betriebsabläufe auf Verschiebebahnhöfen und die Behandlung von Einzelwagen grob skizziert. Diese Erklärungen dienen zum Verständnis der vertiefenden Untersuchung.

Des Weiteren werden gängige Bremstechniken gestreift um Vergleiche mit den neuen Varianten zu ziehen.

2.3. Ermittlung der Bestandssituation

2.3.1. Verschiebebahnhöfe in Österreich

Um Güter effizient von A nach B zu transportieren bedarf es einer Ausnutzung von Synergien, was den Transportweg angeht. So werden Güter aus dem Einzelwagenladungsverkehr in

⁵ Vgl. Abbildung entnommen aus: Diendorfer, Anton. Haubenwallner, Werner: Fahrzeug- und Traktionstechnik. Aufbau der Triebfahrzeuge, Reisezug- und Güterwagen. St. Pölten 2013, S.8.

Knotenpunkten (Sattelitenbahnhöfen) gebündelt. Zusätzlich erfolgt bei langen Transportstrecken eine Sortierung in Verschiebebahnhöfen. So können von dort Güterwagen mit dem gleichen Zielort in einem gemeinsamen Verband zum Zielbahnhof transportiert werden.

Die nachfolgende Grafik veranschaulicht diesen Vorgang:

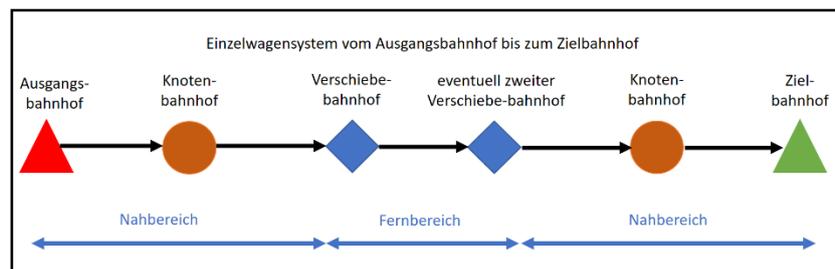


Abbildung 8: Ausnutzung von Synergien im Einzelwagenverkehr⁶

Solche Verschiebebahnhöfe gibt es in Österreich an sechs Standorten:⁷

- Graz Verschiebebahnhof
- Linz/Donau Verschiebebahnhof
- Salzburg Gnigl
- Villach Süd
- Wels Verschiebebahnhof
- Wien Zentralverschiebebahnhof

2.3.2. Betriebsablauf

Der Betriebsablauf an diesen Verschiebebahnhöfen ist durchwegs vergleichbar. Die Aufgabe besteht in dieser Betriebsstelle darin, eingehende Güterwagen nach ihrer Zieldestination zu formieren. Im Groben besteht ein solcher Bahnhof aus einer Einfahrgruppe, einem Abrollberg (Ablaufberg), einer Richtungsgruppe und einer Ausfahrgruppe. Es existieren verschiedene Ausführungen mit mehreren Ein- und Ausfahrgruppen. Die nachstehende Abbildung zeigt einen einfachen Aufbau eines Verschiebebahnhofes:

⁶ Eigene Darstellung / Vgl. Abbildung verändert entnommen: VDV Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (Hg.): Handbuch Schienengüterverkehr. Hamburg 2008, S.28.

⁷ Vgl. ÖBB Infra(Hg.): NETZKARTE. Ausgabe Fahrplanjahr 2018. Wien 2018.

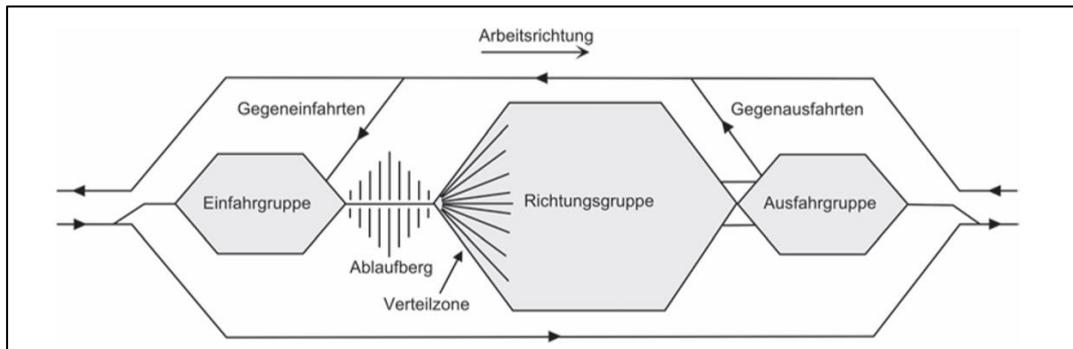


Abbildung 9: Schematische Darstellung eines Verschiebebahnhofes⁸

2.3.2.1. Einfahrgruppe

Die ankommenden Züge werden in der Einfahrgruppe abgestellt. Dort ist es das Ziel Wagenverbände mit unterschiedlichen Destinationen für das Entkuppeln vorzubereiten. Es werden daher an den entsprechenden Trennstellen die Kupplungen langgemacht. Dabei wird durch die Schwenkel die Spindelposition so verändert, dass die Kupplung zwischen den beiden Wagen locker durchhängt.⁹ Am Wiener Zentralverschiebebahnhof besteht die Einfahrgruppe aus 15 Einfahrgleisen.¹⁰

Zwischen der Einfahrgruppe und dem Ablaufberg befinden sich die Anrückgleise. Seitlich von diesen befinden sich Plattformen für das Verschubpersonal. Damit haben diese eine erhöhte Position und können die Wagen mittels einer Trennstange entkuppeln. Dies erfolgt an den im Vorfeld langgemachten Trennstellen.¹¹ Die nachfolgende Grafik zeigt eine Übersicht von diesem Bereich:

⁸ Abbildung entnommen aus: Pachl, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 7 Auflage. Braunschweig 2013, S.234.

⁹ Vgl. Pachl, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 7 Auflage. Braunschweig 2013, S.236.

¹⁰ Vgl. ÖBB Infrastruktur Betrieb AG (Hg.): Zentralverschiebebahnhof Wien. URL: https://web.archive.org/web/20090323143800/http://www.railnet.at/de/Produkte_und_Services/Zentralverschiebebahnhof_Wien/index.jsp [Stand 12.02.2017].

¹¹ Eigene Beobachtung: Wien Zentralverschiebebahnhof am 29.04.2016.

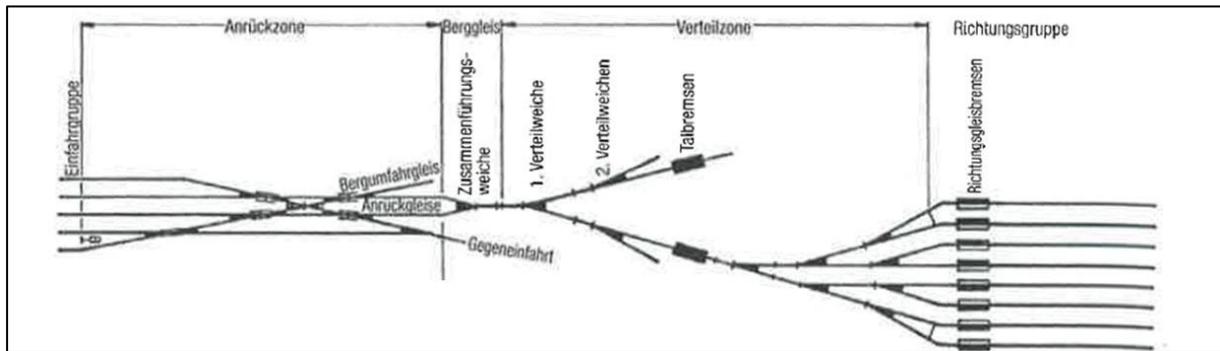


Abbildung 10: Aufbau Abrollberg¹²

2.3.2.2. Abrollberg

Durch eine Verschiebung, diese ist am Zentralverschiebebahnhof Kledering ein ferngesteuertes Triebfahrzeug der Reihe 1064 (1064.006, 1064.007, 1064.008), wird entsprechend dem vom Steuerrechner vorgegebenem Anpressdruck abgerollt.¹³ Durch das passieren des Brechpunktes rollen die Güterwagen nun über die Steilneigung in Richtung der Verteilzone. Die Geschwindigkeit der Wagen in diesem Bereich beträgt ungefähr 4,5 m/s. Je nach Art des Bremsverfahrens sind unmittelbar nach dem Brechpunkt bereits die ersten Bremsen angeordnet, spätestens vor der Verteilzone erfolgt eine Abbremsung der Wagen. Eine Ausnahme stellt hierbei das Bremsverfahren mit Hemmschuhen dar, hier können die Wagen auch erst im Richtungsgleis gebremst werden.¹⁴

Die nachfolgende Abbildung zeigt eine Übersicht über beispielhafte Neigungsverhältnisse auf Verschiebebahnhöfen:

¹² Vgl. Abbildung entnommen aus: Strassmayer, Thomas: Exkursion Wien Zentralverschiebebahnhof. Anwendung technischer Systeme im Eisenbahnbetrieb. Wien 2016, S.6.

¹³ Vgl. ÖBB Infra (Hg.): Betriebsstellenbeschreibung (Bsb) des Bahnhofs Wien Zentralverschiebebahnhof und der ihm unterstellten Betriebsstellen. Gültig ab 25.09.2017. Wien 2017, S.8-10.

Vgl. Strassmayer, Thomas: Abrollablauf ATSEB. St. Pölten 2016, S.1.

¹⁴ Vgl. ÖBB Infra (Hg.): Alternative Abroll-Bremstechnik. Ergebnisse TRIZ. Wien 2016, S.3.

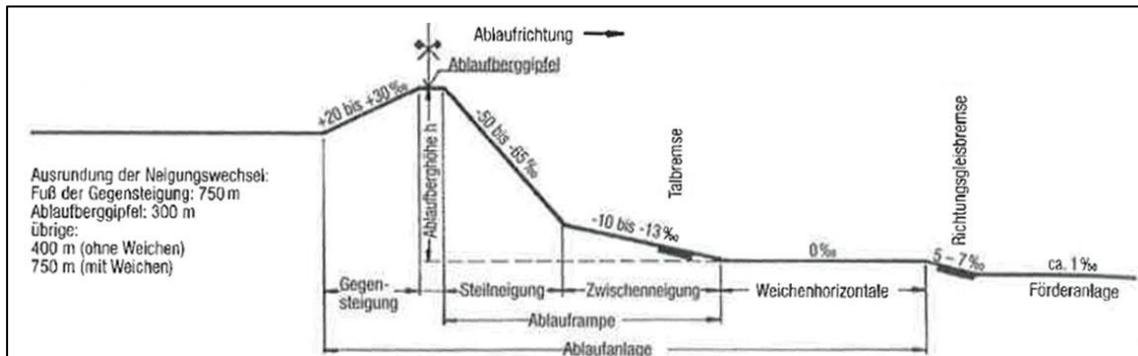


Abbildung 11: Neignungsverhältnisse Abrollberg¹⁵

2.3.2.3. Richtungsgruppe

Die Richtungsgruppe besteht aus mehreren Richtungsgleisen. Jedes dieser Gleise hat einen Zielbahnhof. Für jedes Gleis ist eine Grundgleiswidmung festgelegt, wie zum Beispiel „Gleis 323 = Richtpunktcode Linz“. Daher werden Güterwagen, welche als Ziel diesen Bahnhof haben oder dort weiter behandelt werden müssen, auf dieses Gleis abgerollt.¹⁶ Die Anzahl der Richtungsgleise variiert je nach Verschiebebahnhof. Der Wiener Zentralverschiebebahnhof verfügt über 48 Richtungsgleise.¹⁷ Die Geschwindigkeit in diesen Gleisen beträgt bei österreichischen Verschiebebahnhöfen bis zu 1,5 m/s. In diesem Gleisbereich befinden sich auch die Richtungsgleisbremsen und eine Neigung zur Mitte des Gleisstranges um die Wagen zum Stillstand zu bringen. Zum Ausziehen des Wagonverbandes sind weitere Verschiebemaßnahmen notwendig. Dazu müssen die Richtungsgleise auch von Triebfahrzeugen befahrbar sein.¹⁸ Gemäß den derzeit gültigen Vorschriften liegt die Höchstgeschwindigkeit für das Befahren bei 15 km/h.¹⁹

¹⁵ Vgl. Abbildung entnommen aus: Ebd., S.6.

¹⁶ Vgl. Pacht, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 7. Auflage. Braunschweig 2013, S.236.

Vgl. Abbildung entnommen aus: Strassmayer, Thomas: Exkursion Wien Zentralverschiebebahnhof. Anwendung technischer Systeme im Eisenbahnbetrieb. Wien 2016, S.18.

¹⁷ Vgl. ÖBB Infra (Hg.): Wartungsplan Zvbf Wien. Stand November 1998.

¹⁸ Vgl. ÖBB Infra (Hg.): Alternative Abroll-Bremstechnik. Ergebnisse TRIZ. Wien 2016, S.3.

¹⁹ Vgl. ÖBB Infra (Hg.): Betriebsstellenbeschreibung (Bsb) des Bahnhofs Wien Zentralverschiebebahnhof und der ihm unterstellten Betriebsstellen. Gültig ab 25.09.2017. Wien 2017, S.60.

2.3.2.4. Ausfahrgruppe

Nachdem die Vereinigung der Güterwagen im Richtungsgleis erfolgt ist, werden diese in die Ausfahrgruppe verschoben. Dort erfolgt die Ausgangszugbehandlung. Nachdem ein gebildeter Güterzug den technischen und betrieblichen Anforderungen (Zugpapiere vollständig, Bremsprobe erfolgreich, Abfahrtszeit erreicht, ...) entspricht, wird er durch den/die TriebfahrzeugführerIn abfahrtsbereit gemeldet.²⁰ Die Ausfahrgruppe des Wiener Zentralverschiebebahnhofes umfasst zehn Gleise.²¹

2.3.2.5. Leistungsfähigkeit

Die Leistungsfähigkeit eines Verschiebebahnhofes wird durch den Durchsatz der Wagen pro Zeiteinheit und der mittleren Durchlaufzeit der Wagen definiert. Das Produkt dieser Parameter ergibt die Anzahl jener Wagen, welche sich unmittelbar im Ablaufprozess befinden und sich gegenseitig beeinflussen. Dieser ermittelte Wert beeinflusst die Ausdehnung von Verschiebebahnhöfen. Eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit ist also nur möglich, wenn die Sammelzeiten der für das Abstoßen vorbereiteten Wagen und die Durchlaufzeit möglichst gering sind. Ist die Bergleistung erhöht, müssen auch ausreichend Richtungsgleise zur Verfügung stehen um die Durchlaufzeit auch auszunutzen.²² Am Wiener Zentralverschiebebahnhof stehen am Hauptabrollberg zwei Anrückgleise (Gleis 250 und Gleis 260) zur Verfügung. Damit kann die Sammelzeit geringgehalten werden.²³ Die Leistungsfähigkeit dieses Bahnhofes liegt in 24 Stunden bei bis zu 5.500 Wagen.²⁴

Die Betriebszeiten der Verschiebebahnhöfe sind an die Behördenvorschrift und die Anzahl der ankommenden Güterzüge gebunden.²⁵

²⁰ Vgl. Hinterndorfer, Martin: Betriebsführung. Sommersemester 2014. St. Pölten 2014, S. 5-52.

²¹ Vgl. ÖBB Infrastruktur Betrieb AG (Hg.): Zentralverschiebebahnhof Wien. URL: https://web.archive.org/web/20090323143800/http://www.railnet-austria.at/de/Produkte_und_Services/Zentralverschiebebahnhof_Wien/index.jsp [Stand 12.02.2017].

²² Vgl. Pahl, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 7. Auflage. Braunschweig 2013, S.249-250.

²³ Vgl. ÖBB Infra (Hg.): Wien Zentralverschiebebahnhof (Zur). Lageskizze. Laufende Nummer 005. Wien 2016, S.1.

²⁴ Vgl. ÖBB Infrastruktur Betrieb AG (Hg.): Zentralverschiebebahnhof Wien. URL: https://web.archive.org/web/20090323143800/http://www.railnet-austria.at/de/Produkte_und_Services/Zentralverschiebebahnhof_Wien/index.jsp [Stand 12.02.2017].

²⁵ Vgl. FH St. Pölten: Betriebliche Anforderungen an einen Bahnkupplungsroboter für den Zentralverschiebebahnhof Wien. St. Pölten 2014, S.10

2.3.2.6. Angewandte Bremsverfahren

Es werden verschiedene Elemente verwendet um rollende Güterwagen abzubremsen. Diese unterschiedlichen Systeme sind nicht nur auf den jeweiligen Stand der Technik im Planungs- und Errichtungszeitraum zurückzuführen, sondern ebenso auf die nationalen Regelwerke.²⁶

Die Prinzipien und verwendeten Verfahren sind:²⁷

- Balkengleisbremsen (verschiedenster Bauarten)
- Elektrodynamische Gleisbremse
- Hemmschuhbremsen
- Kolbenkleinbremsen (Retarder)
- Schraubengleisbremsen
- Gummigleisbremsen

Die ersten drei Varianten sind die gängigsten Verfahren und finden auf Österreichs Verschiebebahnhöfen Anwendung. Oft werden auch mehrere Bremssysteme auf einer Betriebsstelle angewandt. Am Schweizer Rangierbahnhof (Verschiebebahnhof) Limmattal werden drei Varianten angewandt. Als Talbremsen werden hydraulische Bremsen (Balkengleisbremsen) verwendet, nach den Verteilzonen befinden sich elektrodynamische Gleisbremsen gefolgt von Kolbenkleinbremsen (Trackmaster).²⁸

²⁶ Vgl. Ebd., S.9.

²⁷ Strassmayer, Thomas: Exkursion Wien Zentralverschiebebahnhof. Anwendung technischer Systeme im Eisenbahnbetrieb. St. Pölten 2016, S.16.

²⁸ Vgl. Wagner, Adrian:

Bremstechnologien Verschiebebahnhof Limattal. Interview mit Jermann Hansruedi. St. Pölten 2017. Zeile 48 – 69.

Die nachfolgende Abbildung zeigt ein Blockschema dieses Bahnhofes:

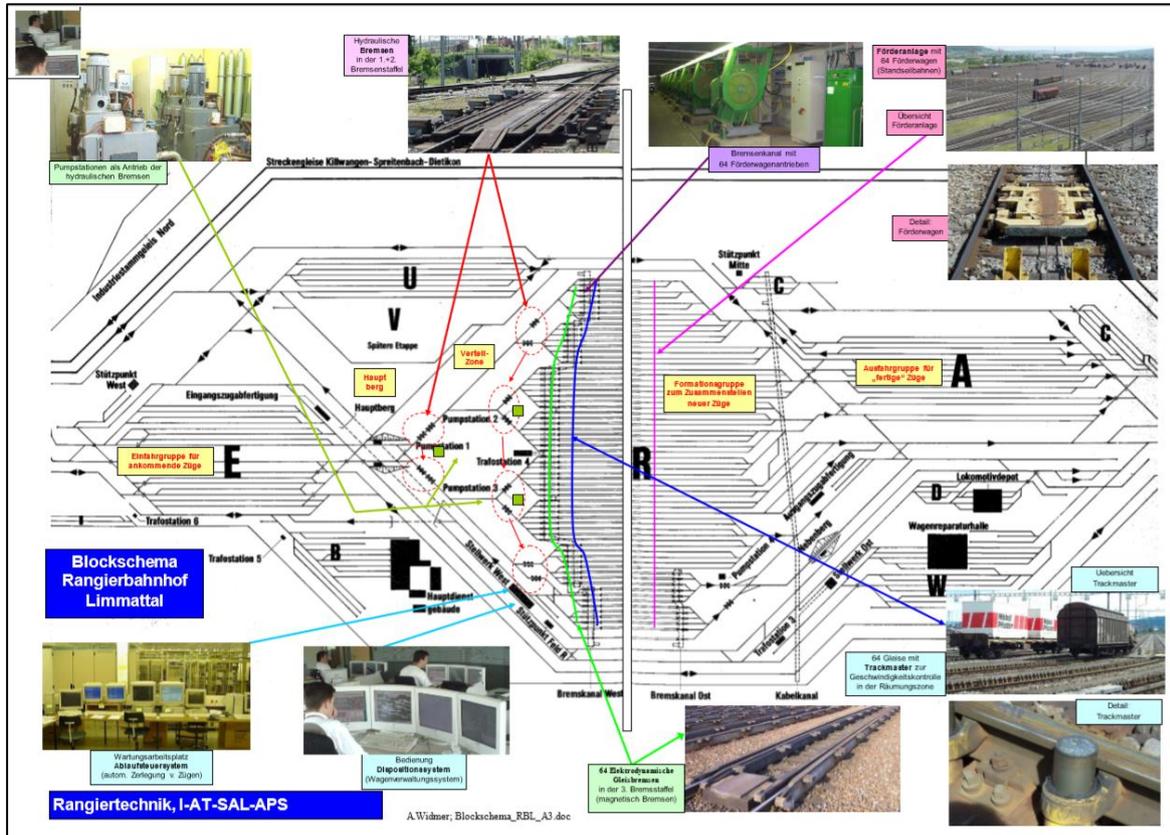


Abbildung 12: Blockschema Verschiebebahnhof Limmattal²⁹

Es wird also ersichtlich, dass die verschiedenen Systeme verschiedene Eigenschaften aufweisen und Einsatzmöglichkeiten an verschiedenen Stellen am Verschiebebahnhof haben. Der markanteste Unterschied ist die Dauer der Bremswirkung. Ist sie bei den Balkengleisbremsen punktuell (Siehe Kapitel Balkengleisbremse), kann die Einwirkung bei Kolbenkleinbremsen als quasikontinuierlich angesehen werden (Siehe Kapitel Anwendung von konventionellen Retardern). Im Nachfolgenden werden die Balkengleisbremse und die artverwandten Methoden sowie das Hemmschuhlegen beschrieben. Da diese Arbeit ihren Schwerpunkt in den Kolbenkleinbremsen hat, werden diese im darauffolgenden Kapitel genauer erörtert.

²⁹ Vgl. SBB CFF FFS Infrastruktur Anlagen und Technologie(Hg.): Blockschema_RBL_A3. Limmattal 2017.

2.3.2.6.1. Hemmschuhlegen

Beim Hemmschuhlegen handelt es sich um ein Verfahren bei welchem der Reibbeiwert durch einen Hemmschuh erhöht wird. Dieser legt sich ähnlich wie ein Bremskeil vor die erste Achse und wird von dieser mitgezogen. Daher ist der Hemmschuh nicht als Gleisbremse im klassischen Sinn zu sehen, sondern als Betriebsmittel um den Widerstand zu erhöhen. Der spezifische Bremswiderstand eines Hemmschuhs beträgt 150 ‰. Ein Hemmschuh ist keine Gleisbremse im klassischen Sinn, sondern ein punktuell platziertes Element, welches zu einer kontinuierlichen Abbremsung führt.³⁰

Die Platzierung der Hemmschuhe wird manuell durchgeführt, der Auswurf aus dem Gleis kann auch durch eine Auffangvorrichtung (Büssinggleisbremse) erfolgen. Es ist daher notwendig, dass der Mitarbeiter einerseits Erfahrung hat, wie er die Hemmschuhe platzieren muss. Andererseits müssen die Wagen durch die Hemmschuhe bremsbar sein. Dazu gibt es bei der ÖBB-Infrastruktur AG in der Dienstvorschrift DV V3 für abgestoßene oder abgerollte Wagen, welche mit einem Hemmschuh abgebremst werden sollen, folgende Vorgaben:³¹

Auffangen mit einzeltem Hemmschuh

- Max. 300 t Gesamtmasse (Wenn diese nicht bekannt ist, dann max. 12 Achsen) sofern an der Spitze ein beladener Wagen ist
- Max. 180 t Gesamtmasse (Wenn diese nicht bekannt ist, dann max. 8 Achsen) sofern an der Spitze ein leerer Wagen ist
- Die Verwendung von absperribaren Hemmschuhen ist nicht zulässig

Diese Vorgaben beziehen sich auf die Anwendung der Hemmschuhe in Richtungsgleisen von Verschiebebahnhöfen oder konventionellen Güterbahnhöfen. Eine Anwendung in den Verteilzonen ist nur dann möglich, wenn die Hemmschuhe vor den Weichen aus dem Gleis entfernt werden. Dies erfolgt durch eine Auffangvorrichtung (Auswurfanlage). Spezielle Hemmschuh Typen können ohnedies auch im Weichenbereich verwendet werden.³²

³⁰ Vgl. Pahl, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 7. Auflage. Braunschweig 2013, S.249.

³¹ Vgl. ÖBB Infra (Hg.): Betriebsvorschrift V3. Dienstvorschrift 30 01 Betriebliche Richtlinien. Stand 10.12.2017. Wien 2017, S.31.

³² Vgl. Pahl, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 7. Auflage. Braunschweig 2013, S.249.

■ Büssinggleisbremse

Um Hemmschuhe vor der Verteilzone unter bewegten Wagen hervorzuziehen, ist ein spezieller Abschnitt im Oberbau notwendig. Hierbei wird der Hemmschuh durch eine Unterbrechung der Schiene, vergleichbar mit einer Schienenauszugsvorrichtung, nach außen befördert. Dort landet er in einer Auffangwanne.³³ Diese Variante wurde bis ins Jahr 2009 am Verschiebebahnhof Graz am Abrollberg angewandt. Seither wurde das System durch Balkengleisbremsen und absenkbare Kolbenkleinbremsen ersetzt.³⁴ Die nachstehende Abbildung zeigt eine Büssinggleisbremse:

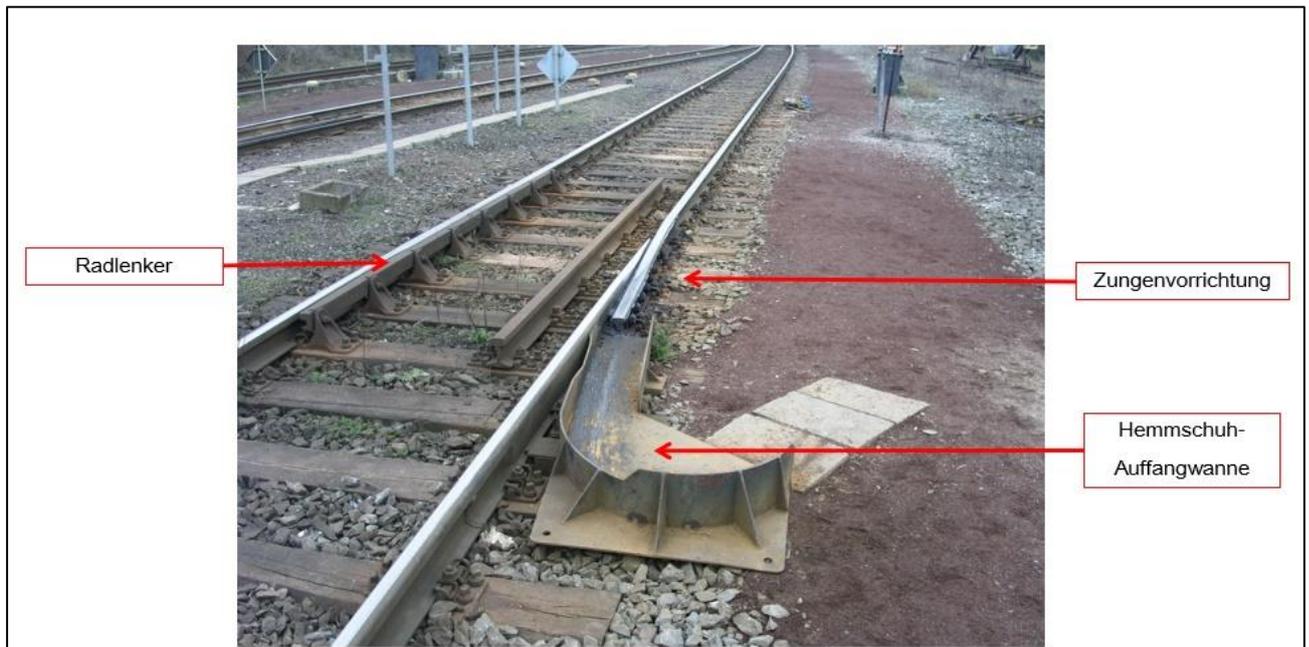


Abbildung 13: Büssinggleisbremse mit Bestandteilbeschreibung³⁵

³³ Vgl. Ebd., S.249

³⁴ SIGNAL + DRAHT (Hg). Krims, Verena. Sturm, Peter: Modernisierung Verschiebebahnhof Graz. 105 Ausgabe – 3 / 2013, S.24.

³⁵ Abbildung entnommen aus: Strassmayer, Thomas: Anwendung technischer Systeme im Eisenbahnbetrieb. GLEISBREMSSEN. St. Pölten 2016, S.4.

2.3.2.6.1.1. Vorteile / Nachteile³⁶

Vorteile:

- Keine technischen Anlagen notwendig (Ausnahme Auswurfanlage)
- Keine Ausfälle aufgrund von Störungen
- Geringe Kosten
- Kaum Instandhaltung notwendig (Ausnahme Auswurfanlage)

Nachteile:

- Bremsung schlecht steuerbar
- Personaleinsatz notwendig
- Verschubpersonal muss Erfahrung aufweisen
- Verletzungsgefahr
- Nicht alle Wagenverbände bremsbar (Vorgaben anhand des Wagengewichts)

2.3.2.6.1.2. Einsatzbereich

Das Verfahren des Hemmschuhlegens wird nur noch auf Altanlagen eingesetzt, da es, wie im oben angeführten Absatz beschrieben, wesentliche Nachteile aufweist. Eingesetzt werden können Hemmschuhe in der Verteilzone mit einer Auswurfanlage oder im Richtungsgleis mit anschließender Entfernung durch das Verschubpersonal.³⁷

2.3.2.6.2. Balkengleisbremse

Bei Balkengleisbremsen handelt es sich um 6 – 20 m lange Gefälleausgleichsbremsen, bei welchen die Abbremsung durch mechanisches Anpressen von Bremsbalken erfolgt. Bezogen auf eine 22,5 t Achse können die Bremsen 20 – 50 kJ/m Energie umwandeln. Besondere Hochleistungsbauformen sogar bis zu 70 kJ/m.³⁸

Die Ausführungsarten können in folgende Varianten unterteilt werden:³⁹

³⁶ Vgl. Ebd., S.3.

³⁷ Vgl. Pacht, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 7. Auflage. Braunschweig 2013, S.249.

³⁸ Vgl. Pacht, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 7. Auflage. Braunschweig 2013, S.247.

³⁹ Vgl. Strassmayer, Thomas: Anwendung technischer Systeme im Eisenbahnbetrieb. GLEISBREMSSEN. St. Pölten 2016, S.5.

- Hydraulisch
 - Einseitig (System Saxby) der Radreifen angeordnet
 - Beidseitig (System Thyssen) der Radreifen angeordnet
- Pneumatisch (System Westinghouse)
- Elektrodynamisch

Die Bremsung kann gewichtsunabhängig (Zweikraftbremse) oder gewichtabhängig (Dreikraftbremse) durch Ausnutzung des Wagengewichts erfolgen. Durch die exakte Steuerung der Rechnertechnologien wird jedoch eher die Zweikraftbremse bevorzugt.⁴⁰

Die nachfolgende Abbildung zeigt eine Zweikraft-Balkengleisbremse.



Abbildung 14: Balkengleisbremse Wien Zentralverschiebebahnhof⁴¹

■ Zweikraftsystem

Ein Zweikraftsystem besteht aus den Bremsbalken, seitlichen Tragbalken, Hubzylindern und Bügelaggregaten. Gleichzeitig verfügt es über einen Antrieb, welcher mittels einer Rohrleitung

⁴⁰ Vgl. Pahl, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 7. Auflage. Braunschweig 2013, S.247.

⁴¹ Eigene Aufnahme am Zentralverschiebebahnhof Wien aufgenommen am 29.04.2016.

mit den Hub- und Bremszylindern verbunden ist. Zusätzlich verfügt diese Anlage über Lageprüfer und eine elektrische Ansteuerung. Befindet sich die Anlage nicht in Betrieb, sind die Balken in Grundstellung und eine Befahrung durch Triebfahrzeuge ist möglich. Wird abgerollt, wird die Anlage vom Bedienpersonal entsprechend gesteuert. Die Balken befinden sich dann in Bereitschaft. Durch Betätigung der Einlaufkontakte werden die Bremsbalken entsprechend der Bremsstellung auf die Durchfahrbreite (abhängig vom Wagengewicht 120 – 135 mm Rillenbreite) eingestellt. Die einlaufenden Radreifen schneiden somit beim Einlaufen die Bremsbacken auf und drücken diese auseinander. Eine Schmierung der Bauteile hat in Abhängigkeit der Belastung zu erfolgen. Gleichermaßen sind Wartungs- / Inspektionsintervalle nach der Überrollung von 100.000 Achsen oder nach drei Monaten und nach 500.000 Achsen oder nach einem Jahr vorgesehen.⁴²

■ Dreikraftsystem

Ein Dreikraftsystem besteht aus einer zentralen Ölhydraulikversorgungsanlage und kann mehrere Bremsen gleichzeitig versorgen. Im Grunde besteht dieses System aus einer Maschinenanlage mit einem Doppelpumpaggregat, den entsprechenden Druckschaltern, den Speicheraggregaten und einem Rohrleitungssystem. Mittels eines Arbeitsdruckes von 180 bar werden die Balken der Außenanlage bewegt. Bei diesem System müssen alle sechs Monate die Druckbegrenzungsventile geprüft werden. Weitere Prüfungen sind abhängig von der Betriebsdauer. Dies umfasst den Wechsel der Druckflüssigkeit oder die Reinigung der Rücklauffilter.⁴³

■ Elektrodynamische Gleisbremse

Hier wird das Rad zwischen Polschuhen eines Elektromagneten geführt. Die Polschuhe sind beweglich gelagert. Durch die magnetischen Feldlinien kommt es zu einem Anpressen der

⁴² Vgl. Lehner, Harald. Marchler, Meinrad. Zmaritsch, Josef: Ablaufanlagen. Aufbau, Funktionsweise, Wartung und Inspektion von Balkengleisbremsen und Retarderbremsen (Kolbengleisbremsen). St. Pölten 2015, S.5, 9-12.

⁴³ Vgl. Ebd., S.2, 4-5.

beweglich gelagerten Polschuhe an das Rad. Diese Ausführung hat eine bauliche Länge von 10 – 20 m.⁴⁴

Anwendung finden elektrodynamische Bremsen beispielsweise in Richtungsgleisen. Als solche werden sie auch im Schweizer Rangierbahnhof Limmattal eingesetzt.⁴⁵

2.3.2.6.2.1. Vorteile / Nachteile⁴⁶

Vorteile:

- Individuell steuerbar
 - Bremsleistung regelbar
 - Auf verschiedene Wagen einstellbar
- Bremsselement nur in einem bestimmten Gleisbereich

Nachteile:

- Steuerung von Bestandsanlagen erfordern Bedienpersonal (BremsmeisterIn / AbrollmeisterIn)
- Komplexe Anlagen erforderlich
 - Hydraulik
 - Steuerung
 - Schnittstelle zum Ablaufrechner
- Fundamentierung notwendig
- Instandhaltungen nur mit erheblichem Aufwand möglich
 - Einsatz eines Krans zum Balkentausch
 - Gleissperre für Instandhaltung
 - Nicht in Bögen einsetzbar

2.3.2.6.2.2. Einsatzbereich

Nachdem die Bremsleistung der Balkengleisbremse neben der Anpresskraft auch durch die bauliche Länge der Bremse abhängt, wird sie bevorzugt als Talbremse eingesetzt. Wobei sie

⁴⁴ Vgl. Pacht, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 7 Auflage. Braunschweig 2013, S.247.

⁴⁵ Vgl. Abbildung 12: Blockscheema Verschiebebahnhof Limmattal.

⁴⁶ Vgl. Eigene Beobachtung am Zentralverschiebebahnhof Wien am 29.04.2016.

Strassmayer, Thomas: Anwendung technischer Systeme im Eisenbahnbetrieb. GLEISBREMSSEN. St. Pölten 2016, S.6.

in kürzerer Bauform auch in Richtunggleisen angewandt wird.⁴⁷ Am Wiener Zentralverschiebebahnhof werden Balkengleisbremsen als Talbremsen am Nebenabrollberg eingesetzt.⁴⁸

2.3.3. QUELLENVERZEICHNIS

Pachl, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 7. Auflage. Braunschweig 2013.

VDV Verband Deutscher Verkehrsunternehmen e.V. (Hg.): Handbuch Schienengüterverkehr. Hamburg 2008.

Academic (Hg.): Schlechtläufer. URL: <http://deacademic.com/dic.nsf/dewiki/1249448> [Stand 20.12.2017].

ÖBB Infrastruktur Betrieb AG (Hg.): Zentralverschiebebahnhof Wien. URL: https://web.archive.org/web/20090323143800/http://www.railnetaustria.at/de/Produkte_und_Services/Zentralverschiebebahnhof_Wien/index.jsp [Stand 12.02.2017].

Standard (Hg.): Österreich ist im Schienen-Güterverkehr im europäischen Spitzenfeld. URL: <https://derstandard.at/2000058276927/Oesterreich-ist-im-Guetertransport-im-europaeischen-Spitzenfeld> [Stand: 10.11.2018].

Präsentationen

ÖBB Infra (Hg.): Alternative Abroll-Bremstechnik. Ergebnisse TRIZ. Wien 2016 [18] [19] [22]

Hinterndorfer, Martin: Betriebsführung. Sommersemester 2014. St. Pölten 2014 [24]

⁴⁷ Vgl. Pachl, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 7. Auflage. Braunschweig 2013, S.247.

⁴⁸ Vgl. ÖBB Infra (Hg.): Wien Zentralverschiebebahnhof (Zur). Lageskizze. Laufende Nummer 005. Wien 2016, S.1.

Strassmayer, Thomas: Anwendung technischer Systeme im Eisenbahnbetrieb. GLEISBREMSSEN. St. Pölten 2016. [39] [40] [43] [50]

Strassmayer, Thomas: Exkursion Wien Zentralverschiebebahn. Anwendung technischer Systeme im Eisenbahnbetrieb. Wien 2016 [16] [20] [31]

Protokolle

Wagner Adrian: Dokumentation – Startbesprechung Innovationsworkshop. StilvA – Studie für eine innovative, lärm- und verschleißarme Bremsung am Abrollberg. St. Pölten 2016. [4]

Wagner, Adrian: StilvA – Meeting Bewertung. Protokoll Meeting Dezember 17. St. Pölten 2017. [56]

Publikationen

Barta, Michael: Entwicklung eines Tools zur Simulation eines rollenden Eisenbahnwagens am Abrollberg. St. Pölten 2013. [7]

Diendorfer, Anton. Haubenwallner, Werner: Fahrzeug- und Traktionstechnik. Aufbau der Triebfahrzeuge, Reisezug- und Güterwagen. St. Pölten 2013 [9]

FH St. Pölten: Betriebliche Anforderungen an einen Bahnkupplungsroboter für den Zentralverschiebebahn Wien. St. Pölten 2014. [29] [30]

Kores Consulting und Projektentwicklung / Brenner – Managementberatung GmbH (Hg.): Modell zur Optimierung der Wirkungen der Beihilfen des Bundes für die Erbringung von Schienengüterverkehrsleistungen im Einzelwagenverkehr (EWW), St. Andrä i. L. / Wiener Neustadt 2015. [2]

Lehner, Harald. Marchler, Meinrad. Zmaritsch, Josef: Ablaufanlagen. Aufbau, Funktionsweise, Wartung und Inspektion von Balkengleisbremsen und Retarderbremsen (Kolbengleisbremsen). St. Pölten 2015. [46] [47]

MetaLine (Hg.): Lärmhemmende Anti-Dröhn-Spritzbeschichtung. Ausgabe P440AD-7-DE. Hildrizhausen. [17]

Michelberger, Frank: Inhalt des Angebotes für das Programm VIF2015. 5.Ausschreibung Herbst 2015. Version 1.9.2015. St. Pölten 2015. [3]

Richtlinien

ÖBB Infra (Hg.): Betriebsstellenbeschreibung (Bsb) des Bahnhofs Wien Zentralverschiebebahn und der ihm unterstellten Betriebsstellen. Gültig ab 25.09.2017. Wien 2017. [23]

ÖBB Infra (Hg.): Betriebsvorschrift V3. Dienstvorschrift 30 01 Betriebliche Richtlinien. Stand 10.12.2017. Wien 2017. [35]

ÖBB Infra(Hg.): NETZKARTE. Ausgabe Fahrplanjahr 2018. Wien 2018. [11]

ÖBB Infra (Hg.): Wartungsplan Zvbf Wien. Stand November 1998. [20]

ÖBB Infra (Hg.): Wien Zentralverschiebebahn (Zur). Lageskizze. Laufende Nummer 005. Wien 2016. [27]

SBB CFF FFS Infrastruktur Anlagen und Technologie(Hg.): Blockschema_RBL_A3. Limmattal 2017. [33]

Transskripte

Wagner, Adrian: Bremstechnologien Verschiebebahn Limattal. Interview mit Jermann Hansruedi. St. Pölten 2017. [32]

Zeitschriften (Fachmagazine)

SIGNAL + DRAHT (Hg). Krims, Verena. Sturm, Peter: Modernisierung Verschiebebahn. Graz. 105 Ausgabe – 3 / 2013. [38]

3. INNOVATIONSPROZESS

Drei Workshops wurden geplant und sind auch im vorgesehenen Zeitraum durchgeführt worden. Zwei Workshops wurden mit externen Experten durchgeführt, ein Workshop innerhalb des Konsortiums. Die zwei ersten Workshops fanden unter Moderation durch VertreterInnen der FH St. Pölten statt, die Expertise bei der Durchführung von Innovationsprozessen haben. Die Teilnehmer der ersten beiden Workshops erhielten vorab Informationen, dass ein Innovationsprozess durchgeführt wird, aber keine Infos zum konkreten Thema. Diese sollten in den Workshops frei und kreativ Ideen einbringen können.

Im Workshop erhielten sie als Problemstellung, Lösungen zu finden, mit denen ein rollendes Objekt von außen gebremst werden kann.

Die Teilnehmer wurden unter deren Einverständnis gefilmt und mit einem Tonband aufgenommen. Diese Aufnahmen dienen lediglich zur Ergebnisauswertung und werden nicht veröffentlicht.

Diese wurden so ausgewählt, dass Expertise aus verschiedenen Bereichen vorhanden ist (Physik, Telematik, Maschinenbau, Medientechnik, Mobilität, Robotik, Mechatronik, Elektrotechnik, ...).

3.1. Ablauf/Methodik externe

3.1.1. Allgemeine Rahmenbedingungen für die Workshops

- Problemstellung: Kreative Ideenfindung für externe Abbremsung des Güterverkehrs
- Teilnehmer: je ca. 6 Personen

3.1.2. Workshop-Grundlagen

- Methode / Dokumentation: Imagery Modeling
- Gruppen: 2 Gruppen á 3 Personen – je 1 Coach
- Material: Plastilin / Play-Do
- Limitation: Fahrzeug darf nicht verändert werden
- Ziel: möglichst viele Ideen visualisieren
- Aufgabenstellung: Bewegter Körper – muss durch externe Faktoren gebremst werden.
- Beispiele zur Erklärung: z.B. Lawine, Wasserrutsche, 8-er-Bahn, Katze, Magnete □ Bilder!

- Diskussion / auf Eignung für Zug umlegen, geordnet nach div. Kriterien wie Lautstärke, Effizienz, Bremseffekt, Steuerbarkeit, ...

Die Workshops fanden am 14. und 18. November 2016 an der FH St. Pölten statt.

3.2. Ablauf Innovationsworkshop

15.30 bis 16 Uhr: Eintreffen WS-Leiter / Teilnehmer

16.00 bis 16.15 Eintreffen und kurze Kennenlernrunde

16.15 bis 16.30 Genaues Briefing (was wollen wir bzw. was ist die Prämisse, mit welchen Methoden arbeiten wir und warum) und Einteilung der Gruppen

16.45 bis 17.15 Erste Phase der Ideengenerierung

17.15 bis 17.45 Beginn der Visualisierung (Quick & Dirty Prototyping, Imagery Modelling)

18.00 bis 18.30 Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse

Neben zwei Workshops mit fachfremden Experten wurde auch ein Termin mit den Projektteilnehmern abgehalten. Hierbei sollten das Konsortium und die Auftraggeber, unabhängig von den anderen Workshops, ihre Ideen einbringen können. Dieser Ansatz soll garantieren, dass sowohl Ideen und Anregungen von unabhängigen TechnologieexpertInnen als auch von FachexpertInnen eingebracht werden können und zwar ohne gegenseitige Beeinflussung. Erwartetes Ergebnis sind verschiedenste Lösungsansätze auf einer abstrakten Ebene.

Der interne Workshop fand am 28.11.2016 an der FH St. Pölten statt.

Beginn: 09:30

Ende: 12:00

Ort: FH St. Pölten

3.3. Ablauf Workshop intern

- Vorstellung bestehender Ideen
- Kreative Nachdenkpause
- Brainstorming
- Diskussion der Ideen

3.4. Ergebnisse des Workshops

Folgende Ideen konnten in den Workshops gesammelt werden und sind in weiterer Folge hier aufgelistet:

- Energieumwandelnde Schiene
- Federnde Elemente
- Wannensbremse / Wasserbremse
- Induktivbremse / Wirbelstrombremse
- Anhebbare Schiene
- Mobiler Prellbock
- Trägheitsmodul zur Energieumwandlung
- Vakuumbremse
- Intelligenter Stupser
- Bremschuh 4.0 (Mobiler Hemmschuh)
- Hydraulisches Puffersystem
- Prellbock mit Bremsweg
- Magnetorheologischer Retarder
- Pufferbremse mit Seilzug Rotationsprinzip
- Hakenwagen
- Bremswagen mit Flüssigkeitszylinder

Diese wurden im anschließenden Arbeitspaket AP3 ausgearbeitet. Als Gesamtergebnis des Projekts liegen zwei ausgearbeitete Varianten vor, deren Umsetzung kurzfristig (adaptierte Retarder) und mittelfristig (Variabler Rollwiderstand) realistisch sind. Eine Übersicht über den gesamten Innovationsprozess ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

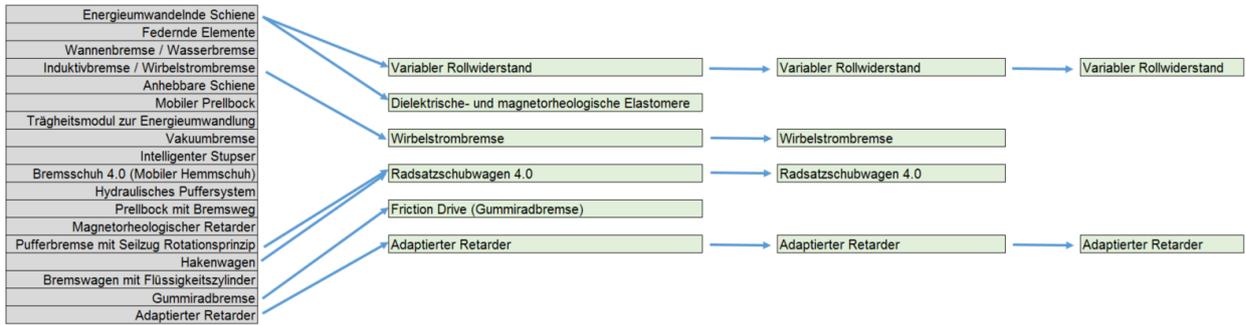


Abbildung 15: Gesamtübersicht Innovationsprozess

Anbei beispielhafte Abbildungen aus den Workshops:

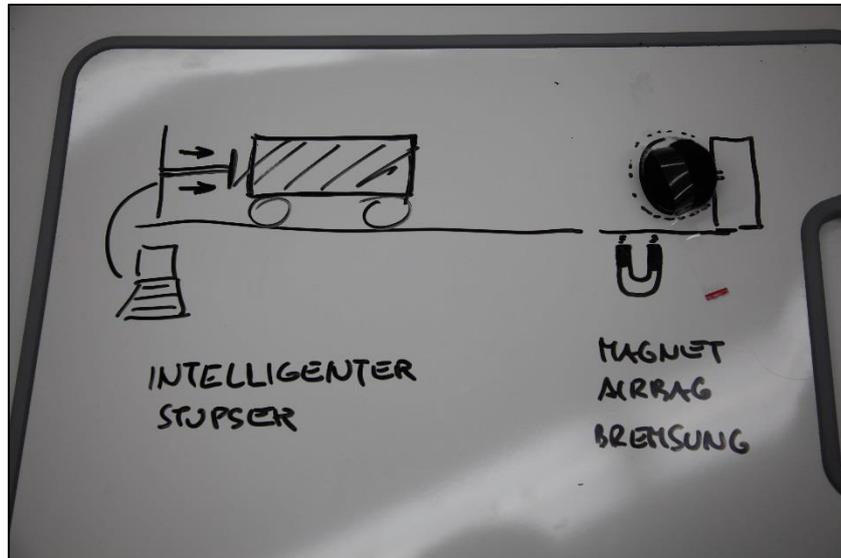


Abbildung 16: Skizze zu Intelligenter Stupser



Abbildung 17: Tafeln die zur Ideenentwicklung verwendet wurden



Abbildung 18: Beispiel für eine Anwendung der Methode Imagery Modeling

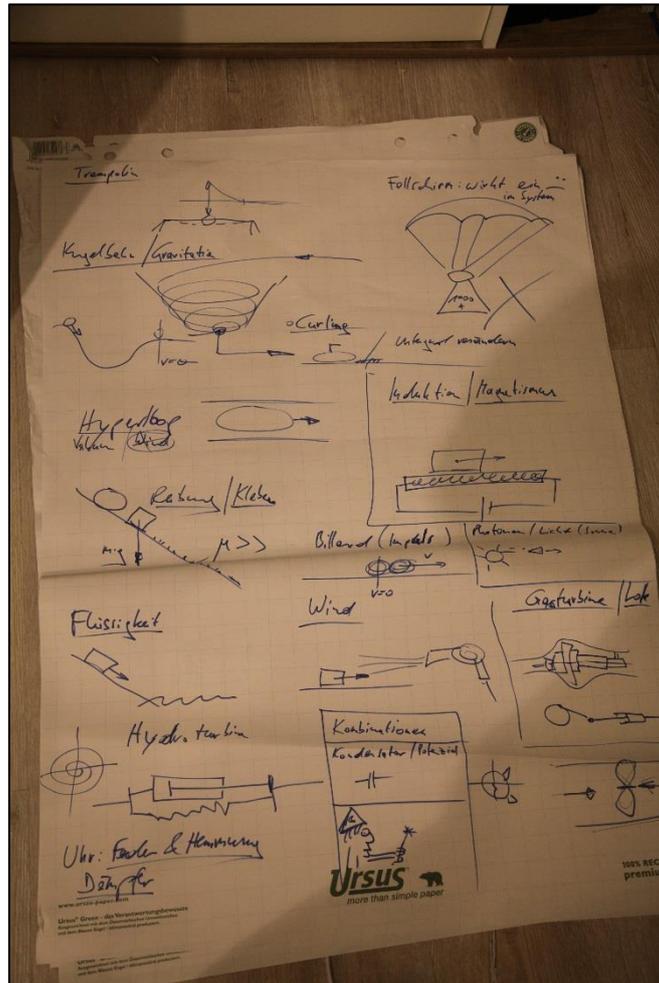


Abbildung 19: Flipchart mit gesammelten Ideen

4. AUSARBEITUNG DER VARIANTEN

Die gesammelten Ideen wurden im Zuge dieses Arbeitspaktes (AP3) ausgearbeitet und vertieft, so dass eine anschließende Bewertung möglich war. Dazu wurden die technischen Grundfunktionalitäten ausgearbeitet, erste Anforderungen definiert, Skizzen erstellt und pro Variante auch Vor- und Nachteile definiert.

4.1. Energieumwandelnde Schiene

Ziel dieser Idee ist es die Schiene mit einer gummiartigen Oberfläche auszustatten um Energie umzuwandeln. Die Teilnehmer nannten dies auch Gummimatte. Dabei soll die Oberfläche mit einem dämpfenden Material belegt werden, dieses kann nach jeder Überfahung wieder neu appliziert werden und auf die jeweilig folgende Tonnage ausgelegt werden. Die Gummibeschichtung soll abziehbar sein, damit die Schiene auch normal befahrbar gemacht werden kann.

Die nachstehende Abbildung zeigt das Funktionsprinzip dieser Idee. Es handelt sich um eine nichtmaßstäbliche Extremdarstellung:

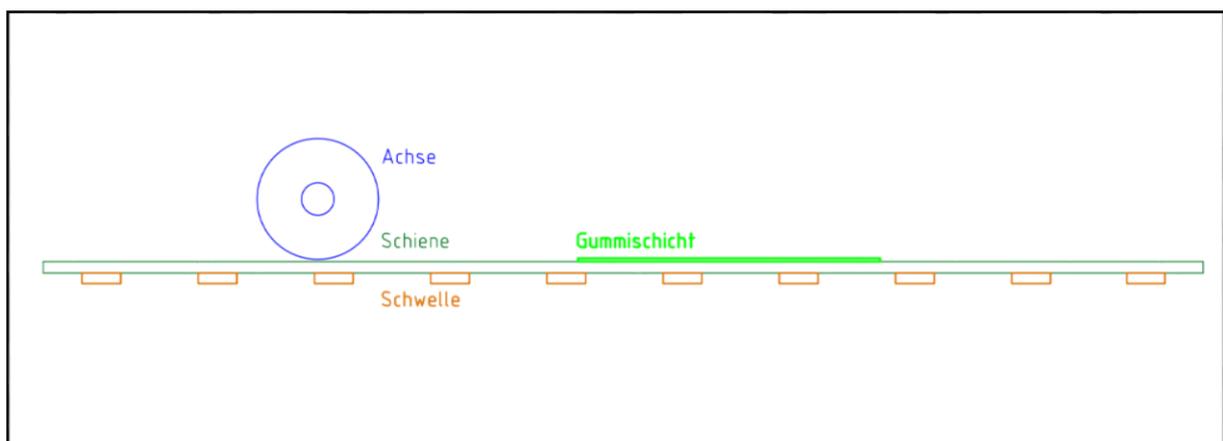


Abbildung 20: Prinzipskizze energieumwandelnde Schiene

4.1.1. Varianten

4.1.1.1. Gummigleisbremse

Aufbringung von zäher Flüssigkeit (Elektro- oder Magnetorheologische Flüssigkeit) auf die Schienen, welche einen Keil vor dem zu rollenden Rad bildet.

Durch das Fraunhofer Institut in Deutschland gab es diesbezüglich bereits Forschungsarbeiten. Seitens der FH Köln wurden auch bezüglich der regelbaren Elastomere Versuche angestrebt. Fraglich ist ob diese sinnvoll auf dem Gleis aufgebracht werden können. Eine andere Alternative zu der zähen Flüssigkeit wäre das Aufbringen von Elastomeren, jedoch müssen diese oft getauscht werden.

Möglicherweise ist es auch denkbar sein, die Schiene dämpfend zu lagern, beispielsweise in dem die UIC 60 Schiene auf Kolben gelagert wird. Durch das Wagengewicht würde diese hinuntergedrückt. Dies würde einen Umbau des Unterbaus erfordern.

Der Auftraggeber merkt dazu an, dass auch Kesselwagen gebremst werden müssen. Diese dürfen diese zwar nur voll transportiert werden. Jedoch können Sie trotzdem schwappen, wenn sie gebremst werden.

Vorteile:

- Keine externe Energieversorgung notwendig
- Geräuscharm

Nachteile

- In dieser Form Mitarbeiter zur Aufbringung der Beschichtung notwendig
- Schichtstärke muss variiert werden
- Je nach Variante nicht steuerbar
- Hoher Instandhaltungsaufwand

4.1.1.2. Federnde Elemente

Auf diesen sollen die Schienen gelagert werden. Bei der Befahrung wird die Schiene durch die Last abgesenkt. Damit soll Energie umgewandelt werden. Die Absenkung soll etwa 2 cm betragen. Wie auch schon im vorangegangenen Absatz ersichtlich, ist es nicht gewünscht Stöße zu produzieren oder den Wagen zum Schwanken zu bringen.

Die nachstehende Abbildung zeigt das Funktionsprinzip dieser Idee. Es handelt sich um eine nichtmaßstäbliche Extremdarstellung:

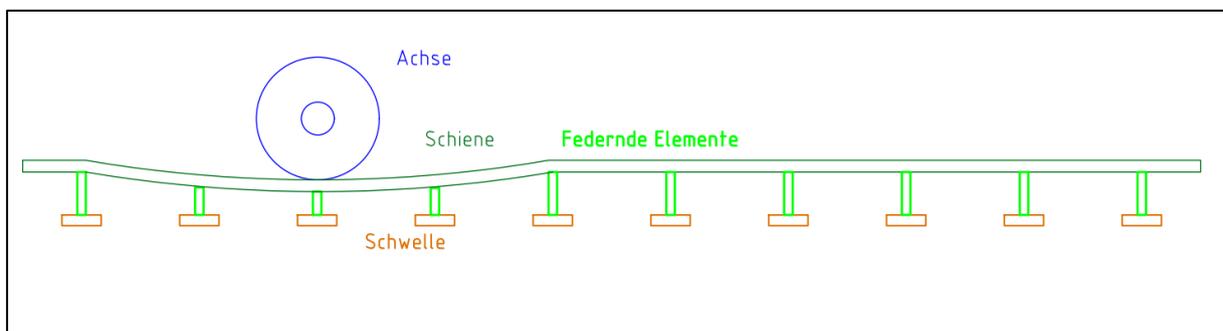


Abbildung 21: Prinzipskizze federnde Elemente

4.1.1.2.1. Varianten

4.1.1.2.1.1. Retarder Bremsung

Diese Idee ist relativ ähnlich zu Retarder Bremsen, jedoch werden hier Elemente unter der Schiene angeordnet.

4.1.1.2.1.2. Dynamische Grube

Die dynamische Grube ist vergleichbar mit der Wassergleisbremse. Hier wird jedoch die Tiefe der Grube variiert, jedoch wird kein Medium als Widerstand verwendet.

Vorteile:

- Keine externe Energieversorgung notwendig
- Keine Steuerung notwendig

Nachteile:

- Wartungsintensiv
- Möglicherweise nicht lärmarm
- Beschränkte Bremswirkung
- Bremsleistung nicht ausreichend

4.2. Wannenbremse / Wasserbremse

Hier wird eine abgesenkte Schiene in Wannenform verwendet. Diese wird in ein Wasserbecken geführt, wobei die Wasserhöhe bis etwa zur Achse gehen soll. Durch den Widerstand des Wassers soll die Bremskraft steuerbar werden. Mitunter kann der Wasserspiegel gehoben oder gesenkt werden. Von einigen Teilnehmern wurde auch noch die Ergänzung der Wasserbremse mit Luftkissen angedacht um noch mehr Widerstand zu erzeugen.

Die nachstehende Abbildung zeigt das Funktionsprinzip dieser Idee. Es handelt sich um eine nichtmaßstäbliche Extremdarstellung:

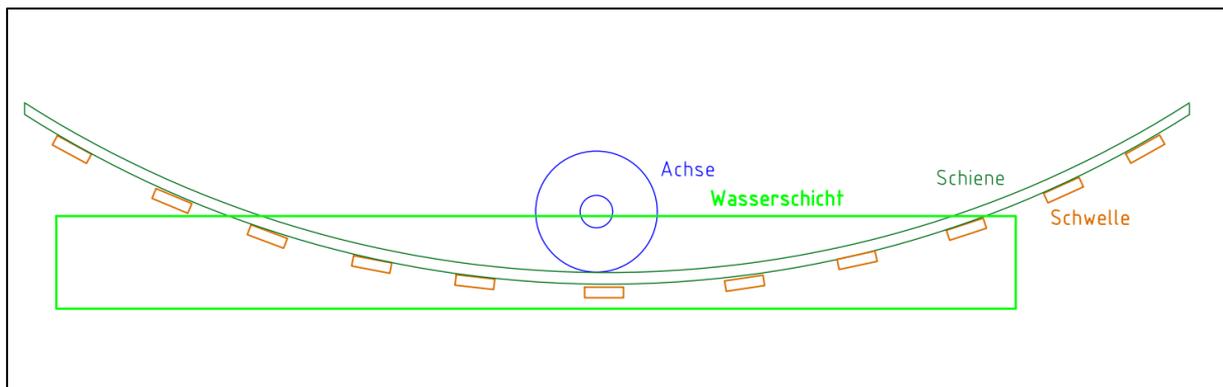


Abbildung 22: Prinzipskizze Wasserbremse

4.2.1. Varianten

Flüssigkeits- / Elastomere-Wannenbremsung

Diese Variante entspricht in etwa der Wannenbremsung vom Expertenworkshop, wobei dort die Wanne mit Flüssigkeit oder Elastomere gefüllt werden würde.

Vorteil:

- Keine externe Energieversorgung notwendig
- Geräuscharm

Nachteil:

- Fragliche Bremswirkung
- Flüssigkeit trifft auf Wagen
- Möglicherweise Wagen dafür nicht geeignet
- Infrastrukturaufwand
- Keine normale Befahrung möglich

4.3. Induktivbremse / Wirbelstrombremse

Im Gegensatz zu den Wirbelstrombremsen an Triebfahrzeugen soll hier die Bremse an der Infrastruktur verbaut werden. Dazu soll jeweils außerhalb des Radsatzes mittels Leiterplatten ein Magnetfeld erzeugt werden. Dieses soll als Angriffsfläche die untere Hälfte des Radreifens haben um die Wagen abzubremsen.

Diese wäre eine dynamische Bremse. Sie ist Frequenz- und Geschwindigkeitsabhängig. Um eine Bremswirkung zu erzielen sind hier hohe Frequenzen von rund 500.000 Hz erforderlich. Dafür stellt sie sich als praktisch wartungsfrei dar. Typischerweise werden Wirbelstrombremsen im kHz Bereich verwendet, noch höhere Frequenzen fördern dann lediglich den Skin Effekt, welcher dabei auftritt.

Der Vorteil dieser Variante ist, dass der Strom nur eingeschalten werden muss solange ein Wagen vorbeifährt. Daher ist auch der Energieverbrauch überschaubar. Wirbelstrombremsen bei ICE Garnituren weisen einen Luftspalt von 7-8 mm auf. Da bei Wirbelstrombremsen, welche sich auf einem Fahrzeug befinden eine vollkommen andere Funktionsweise vorliegt muss dieser Spalt auf 5 mm reduziert werden, da der Wagen nur eine kurze Zeit den Bereich der Wirbelstrombremse passiert.

Diese Variante erfüllt insbesondere die Anforderung der niedrigen Lärmemission, da sie geräuschlos ist. Weiters entstehen kaum Wartungskosten und nur wenig Energiekosten.

Elektromagnetische Gleisbremsen befinden sich bereits in der Anwendung. Fraglich ist jedoch ob für die gewünschte Anwendung die Bremsleistung ausreicht, da im vorliegenden Projekt auch die Talbremsen mit einem innovativen System ausgerüstet werden sollen. Eventuell wäre eine elektrodynamische Gleisbremse möglich.

Die nachstehende Abbildung zeigt das Funktionsprinzip dieser Idee. Es handelt sich um eine nichtmaßstäbliche Extremdarstellung:

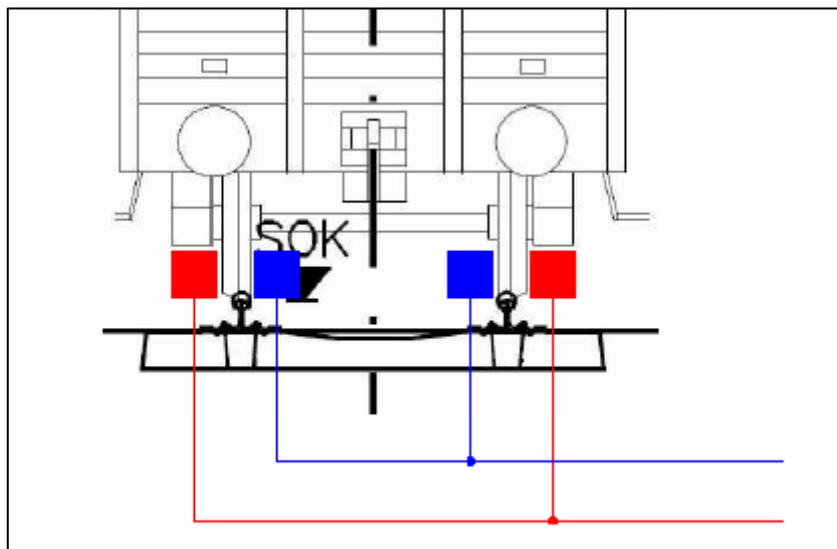


Abbildung 23: Wirbelstrombremse

4.3.1. Varianten

4.3.1.1. Trogspulen

Um die Schiene wird ein U-förmiger Trogkörper angelegt, durch Spulen wird ein Magnetfeld im Trog erzeugt (Wirbelstrom). Zusätzlich werden Bremsbalken auf das durchfahrende Rad gepresst. Aufgrund der kurzen Bauform kann diese Variante zwischen den Schwellen montiert werden. Die Bremswirkung setzt sich also durch Wirbelstrom und Reibkraft zusammen. Ziel muss es hier sein das Quietschen der Räder zu verhindern.

Diese Variante ist nicht mit der Variante der Bremsung durch hydraulisches Zusammendrücken (ASIP) zu vergleichen. Dazu gab es Versuche in Graz, wo durch zu viel

Anpressdruck Wagen aus dem Gleis sprangen. Laut Auftraggeber ist es sehr schwierig je nach Gewicht zu bremsen, sprich Wagenverbände aus leichten- und schweren Wagen gemeinsam zu bremsen.

Vorteile:

- Geräuscharm
- Wartungsarm

Nachteile:

- Vermutlich nicht genug Bremskraft aufbringbar
- Realisierung evtl. schwierig

4.4. Anhebbare Schiene

Die Fahrschiene wird hydraulisch angehoben um Energie umzuwandeln. Daher gibt es Fixpunkte an denen die Schiene mittels Zylindern angehoben werden kann. Die Höhe der Anhebung kann abhängig von der abzubremsenden Geschwindigkeit variiert werden.

Die nachstehende Grafik zeigt die prinzipielle Funktionsweise der anhebbaren Schiene:

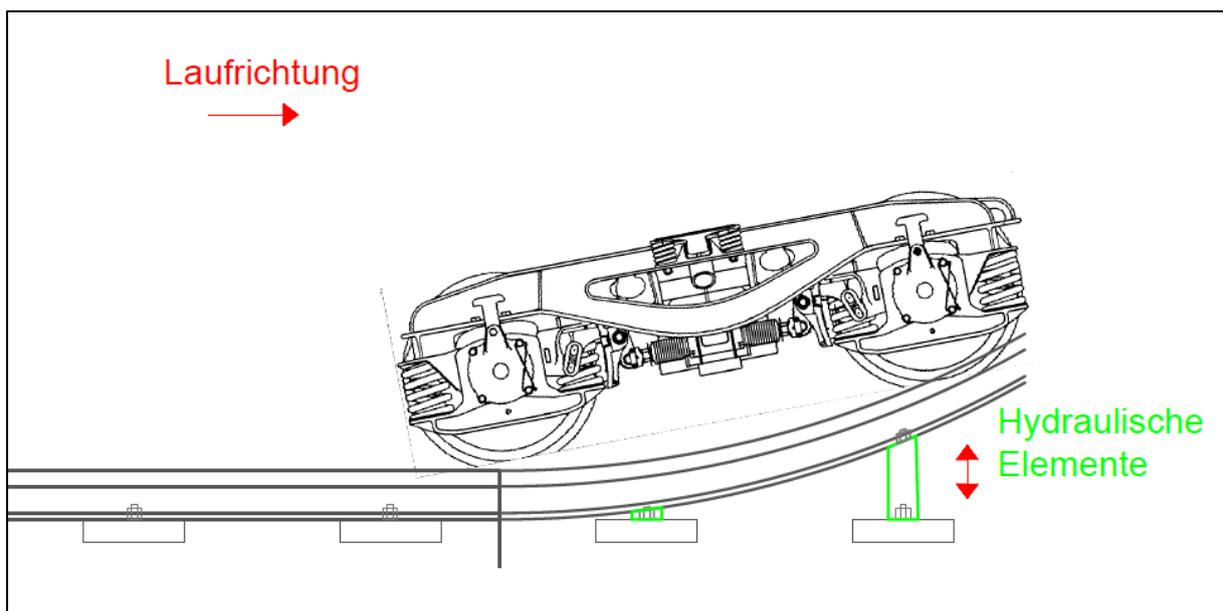


Abbildung 24: Prinzipskizze anhebbarer Bremshügel

4.4.1. Varianten

4.4.1.1. Run Away Track Ramp

Eine Abwandlung dieser Variante stellt die Run Away Track Ramp dar. Hierbei würde eine Weichenverbindung zu einer anhebbaren Schiene bestehen. Möchte man einen Wagen bremsen, so wird er in Richtung der Rampe geleitet. Er verliert dadurch Geschwindigkeit, soll jedoch selbstständig zurückrollen. Vom Aufbau her ist die Idee jedoch gleich wie die anhebbaren Schiene.

4.4.1.2. Absenkbare Wanne / dynamische Grube

Ähnliches Prinzip wie die Wasserbremse, jedoch ohne Bremsmedium.

Vorteile:

- Keine zusätzliche Verbindung zum Wagen notwendig

Nachteile:

- Infrastruktureingriff notwendig
- Steuerung notwendig
- Bremsleistung vermutlich nicht ausreichend

4.5. Mobiler Prellbock

Neben dem abzubremsenden Wagen gibt es hier auch einen beweglichen Bremswagen (steuerbares Objekt). Bei diesen zwei Objekten herrscht ein Geschwindigkeitsunterschied. Zu Beginn ist der Wagen schneller als das Bremsobjekt. Das Bremsobjekt bremst dann den Wagen ab, bis zum Stillstand. Um das Ganze auf die Anwendung am Abrollberg umzulegen wird das schnellere Objekt mit der Geschwindigkeit v_1 als der Wagen definiert. Der Mobile Prellbock kann z.B. ein fahrbarer Wagen sein, der selbst in der Lage ist zu bremsen. Die Bremsung könnte auch durch Federn, oder Seilzüge wie auf Flugzeugträgern ergänzt werden.

Die nachfolgende Skizze zeigt die prinzipielle Überlegung dazu:

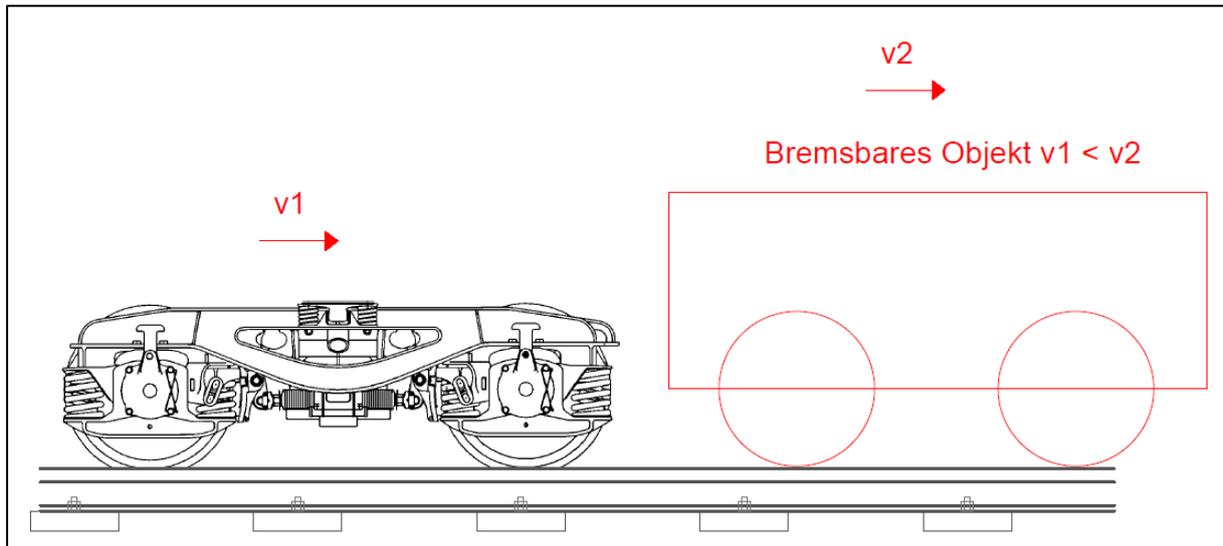


Abbildung 25: Skizze Mobiler Prellbock

Vorteile:

- Individuelle Abbremsung
- Nutzung der Energie möglich

Nachteile:

- Steuerung notwendig
- Infrastrukturumbauten
- Normale Befahrung nicht möglich

4.6. Trägheitsmodul zur Energieumwandlung

Hierbei werden ähnlich zu den letzten drei Varianten Gewichte oder ein Federsystem verwendet um die Bremsenergie umzuwandeln. Somit soll der Wagen zum Stillstand gebracht werden. Die Anordnung dieser Feder kann unterhalb der Schieneninfrastruktur sein.

Die nachfolgende Skizze zeigt eine Überlegung zu dieser Variante:

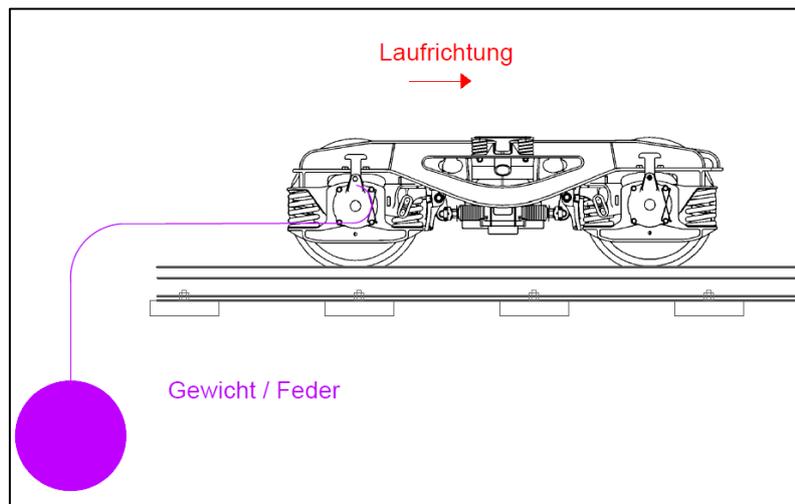


Abbildung 26: Skizze Trägheitsmodul

Vorteile:

- Nutzung der Energie möglich

Nachteile:

- Infrastruktureingriff notwendig
- Verbindung zum Wagen notwendig

4.7. Vakuumbremse

Hier wurde andiskutiert, ein Vakuum um die abzubremsenden Wagen zu bilden und sie dort zu bremsen. Die Umsetzung einer solchen Variante stellt sich jedoch als sehr realitätsfremd und nicht praktikabel dar.

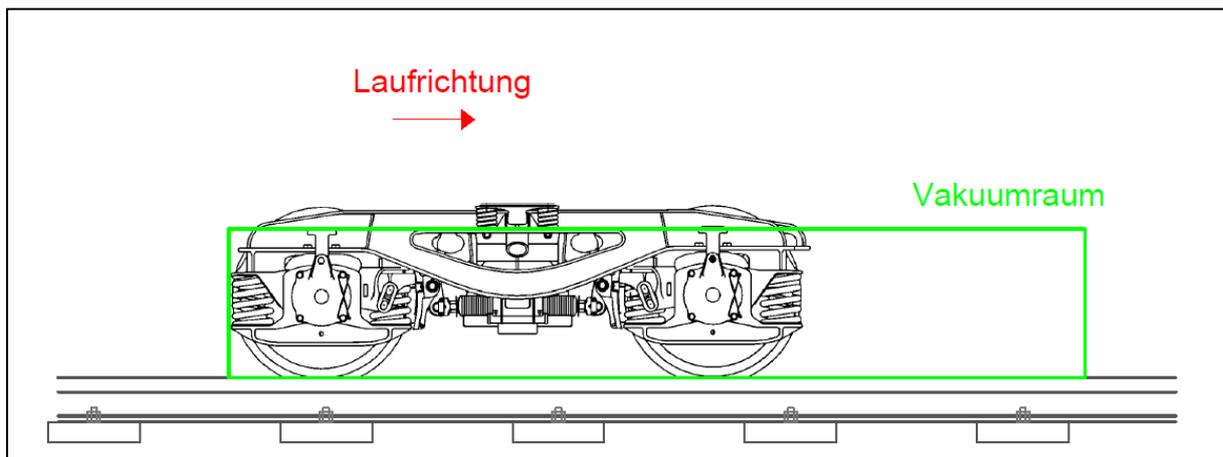


Abbildung 27: Skizze Vakuumbremse

Vorteile:

- Keine Verbindung zum Wagen notwendig

Nachteile:

- Wenig realistisch
- Erheblicher Aufwand
- Massiver Infrastruktureingriff

4.8. Intelligenter Stupser

Bei dieser Variante wird der Wagen mittels einem intelligenten Stupser abgestoßen. Daher erhält jede Wagengruppe nur entsprechend Energie, je nach Zielgleis. Am Zielpunkt wird er mittels einer Airbag- oder Magnetbremse zum Stillstand gebracht.

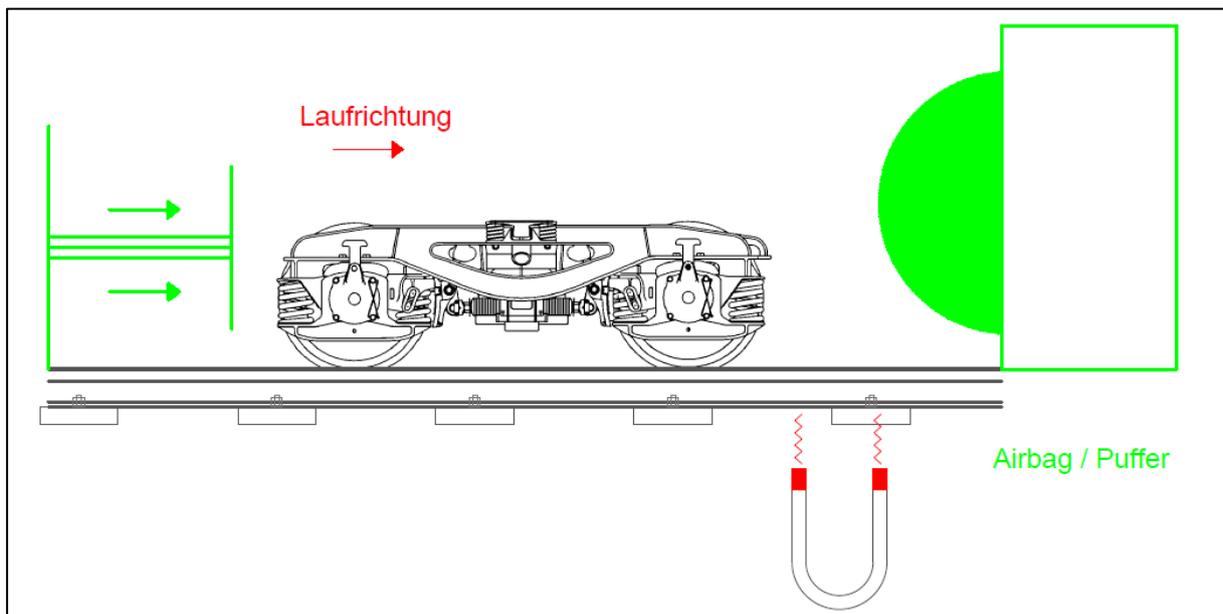


Abbildung 28: Prinzipskizze intelligenter Stupser

Vorteile:

- Zielgesteuerte Bremsung

Nachteile:

- Infrastrukturumbau notwendig
- Durchfahrt nicht möglich

4.9. Bremsschuh 4.0

Hierbei ist es gedacht den Bremsschuh mit Rollen auszustatten. Ebenso soll er über eine Sensorik verfügen und das Auftreffen der ersten Achse voraussagen. Anhand der ermittelten Geschwindigkeit rollt der Bremsschuh mit dem Wagen mit und wird dann beim gewünschten Zielort gestoppt. Die Zielbremsung könnte mittels Magnetbremse erfolgen.

Die nachfolgende Abbildung zeigt eine Skizze dieser Variante:

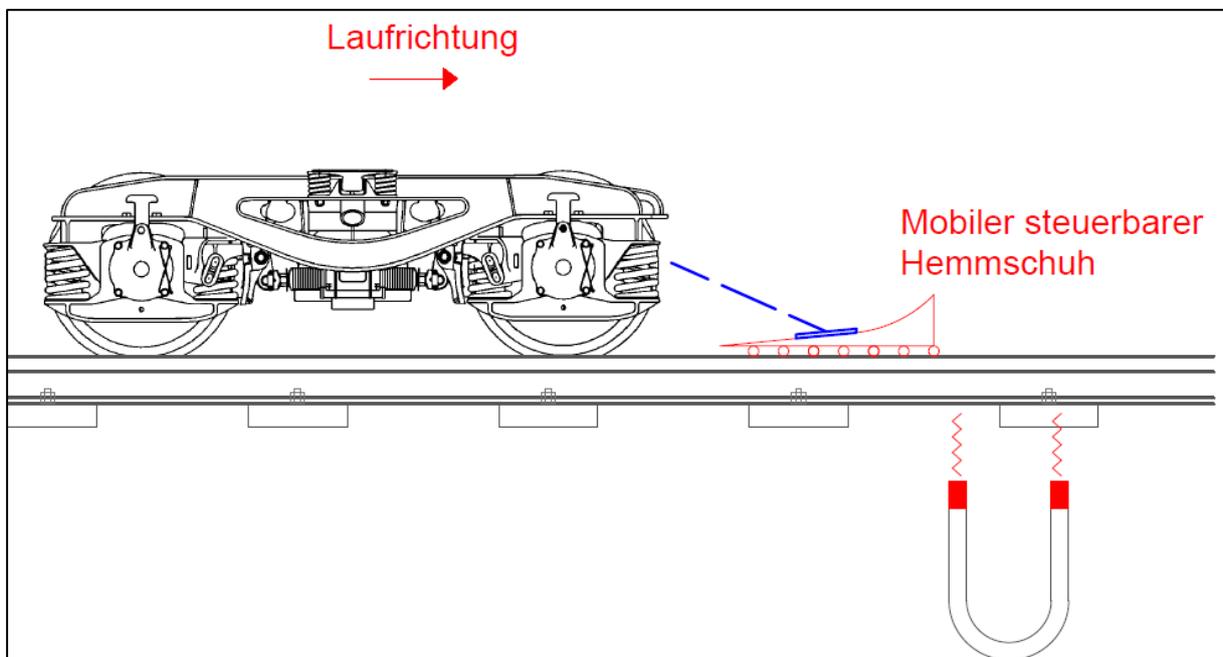


Abbildung 29: Prinzipskizze Bremsschuh 4.0

Vorteile:

- Kompakte Variante
- Zielgerichtete Bremsung
- Keine Bedienung notwendig

Nachteile:

- Bremskraft möglicherweise nicht ausreichend

4.10. Einhaxsystem

Ähnlich wie bei Flugzeugträgern soll ein Haken oder Seilzug an die Wagen eingehängt werden. Dies kann entweder automatisch oder manuell erfolgen. Unter dem Gleis können sich nun hydraulische Bremsen befinden, eine einfache Feder oder ein Generator. Diese bremsen den Wagen.

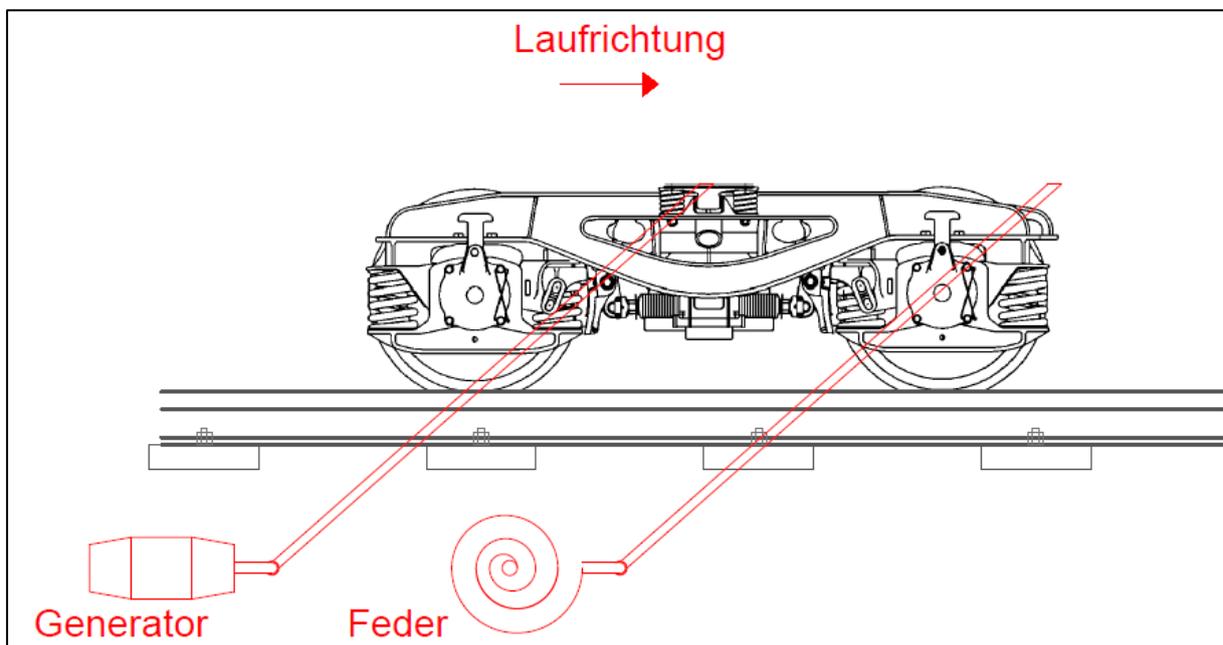


Abbildung 30: Einhaxsystem

4.10.1. Varianten

4.10.1.1. Hydraulisches Puffersystem

Es wird auch hier Energie umgewandelt, diese kann man nutzen, indem man diese in einen Generator überführt. Der Bauraum zwischen den Gleisen ist zwar vorhanden, jedoch muss ein solches System den Bedienraum freilassen. Die Energierückgewinnung steht nicht im Vordergrund, da die gesparte Energie nicht vermutlich nicht hoch sein wird. Es gibt g-Kräfte die nicht überschritten werden dürfen. Beispielsweise das Verschieben (max. g-Kraft 1,5 m/s). Ziel muss es also sein Wagen möglichst schonend abzubremsen.

Vorteile:

- Nutzung der Energie
- Bremskraft ausreichend

Nachteile:

- Infrastrukturumbauten notwendig
- Großer Platzaufwand

4.11. Prellbock mit langem Bremsweg

Bei dieser Methode soll der Wagen auf einen beweglichen Prellbock auffahren. Dieser soll einen langen Bremsweg haben. Durch ein Federsystem oder hydraulisches bzw. pneumatisches Abbremsen soll die Bewegungsenergie des Wagens umgewandelt werden. Die Lokalisation könnte hier durch Sensorikkomponenten erfolgen. Ebenso wäre anstatt einer Energieumwandlung eine Energierückgewinnung durch einen Generator denkbar.

Die nachfolgende Skizze zeigt mögliche Ausführungen eines solchen Prellbocks:

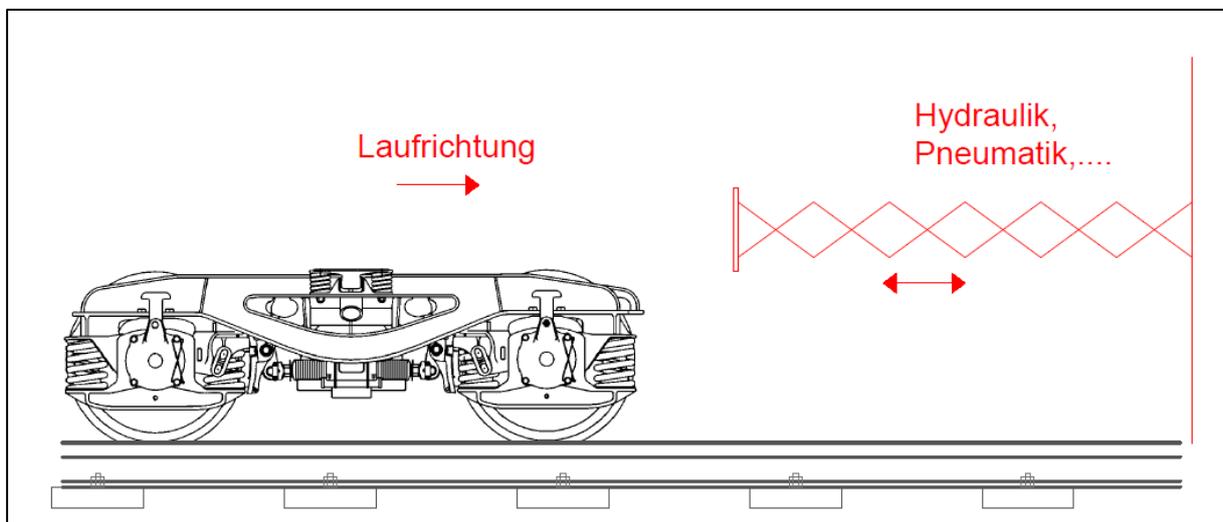


Abbildung 31: Prinzipskizze Prellbock mit langem Bremsweg

4.11.1. Varianten

4.11.1.1. Hydraulisches Puffersystem

Hier ist eine relative Ähnlichkeit mit der Idee des hydraulischen Puffersystems vom vorherigen Punkt festzustellen.

Vorteile:

- Nutzung der Energie
- Zielgerichtete Bremsung

Nachteile:

- Infrastrukturumbauten notwendig
- Großer Platzaufwand

4.12. Magnetorheologischer Retarder

Hierbei wird statt Hydrauliköl eine elektro- oder magnetorheologische Flüssigkeit verwendet. Dadurch wird die Fließeigenschaft regelbar. Ziel ist es den Achsdruck auf z.B. 90% der Wagenachslast zu regeln. Momentan sind Retarder so eingestellt, dass umso schwerer ein Wagen ist, umso stärker muss der Retarder sein. Aktuell muss eine Achslast von mindestens 4 Tonnen aufgebracht werden. Sinnvoll wäre es 2 Tonnen zu ermöglichen. Dadurch könnte man auch die Retarderzahl um etwa 60% reduzieren

Laut Auftraggeber müssen im gegenständlichen Projekt die Retarder um ein Vielfaches leiser werden um den Anforderungen zu entsprechen. Aktuell werden diese aus Manganstahl und Polyethylen ausgeführt. Der Kopf des Retarders muss bei der Überfahrt gedreht werden, sonst kommt es zu einer ungleichen Abnutzung. Am Wagen verursachen die Retarder an den Spurkranzansfassungen Abnutzung. Ab 15 mm Abnutzung müssen diese mit einem Rotzettel versehen werden.

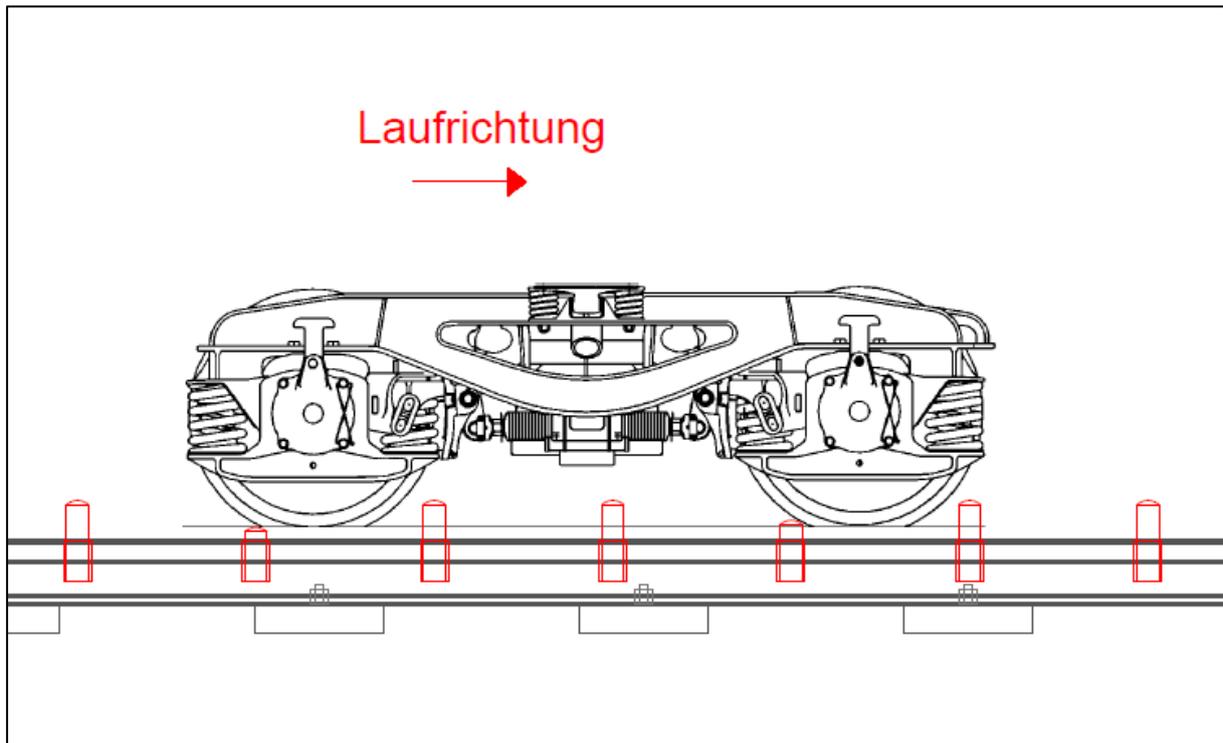


Abbildung 32: Skizze Magnetorheologischer Retarder

Vorteile:

- Kein großer Infrastruktureingriff
- Mitunter kein erheblicher Steuerungseingriff

Nachteile:

- Retarder
- Lärm
- Instandhaltungsaufwand

4.13. Pufferbremse mit Seilzug Rotationsprinzip – ausklappbarer Puffer

Es gibt in Deutschland Förderanlagen, welche mittels Seil die Wagen zusammenschieben. Zum Teil werden diese mit bewegten Wagen ausgeführt. Dazu ist ein großes mechanisches System mittels beweglichen Teilen erforderlich. Laut Auftraggeber gibt es in Innsbruck einen nicht benutzen klappbaren Puffer.

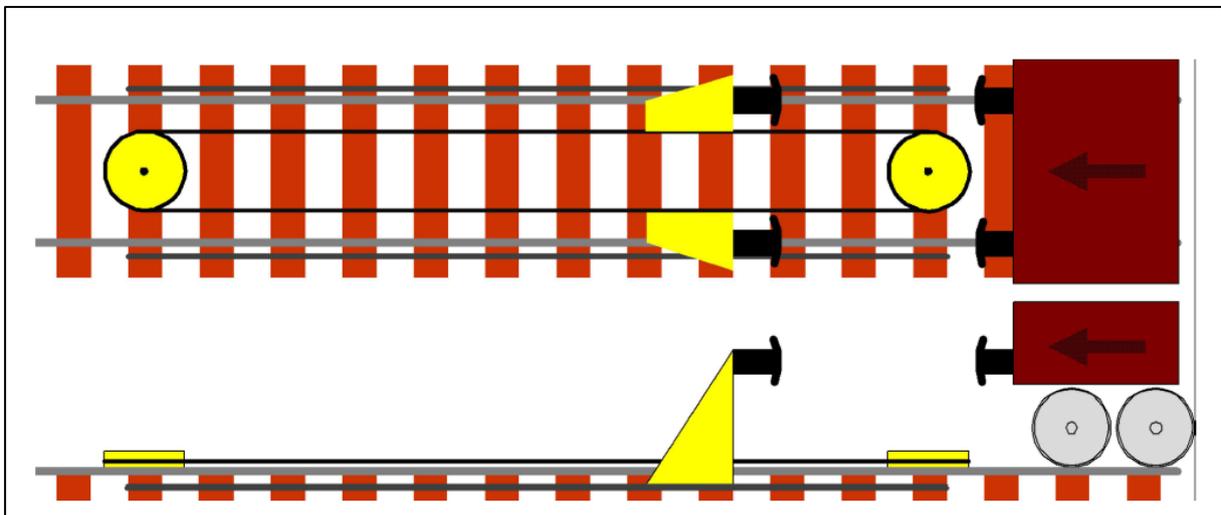


Abbildung 33: Pufferbremse mit Seilzug Rotationsprinzip

Vorteile:

- Durchfahrt bei wegklappbaren Systemen
- Zielgerichtete Bremsung

Nachteil

- Infrastrukturumbauten notwendig
- Steuerung notwendig

4.14. Hakenwagen

Durch eine zentral angeordnete Zahnstange wird ein beweglicher Wagen zum abzubremsenden Wagen gebracht, dort hackt sich der bewegliche Wagen ein. Die Energie wird somit durch den Getriebewiderstand umgewandelt.

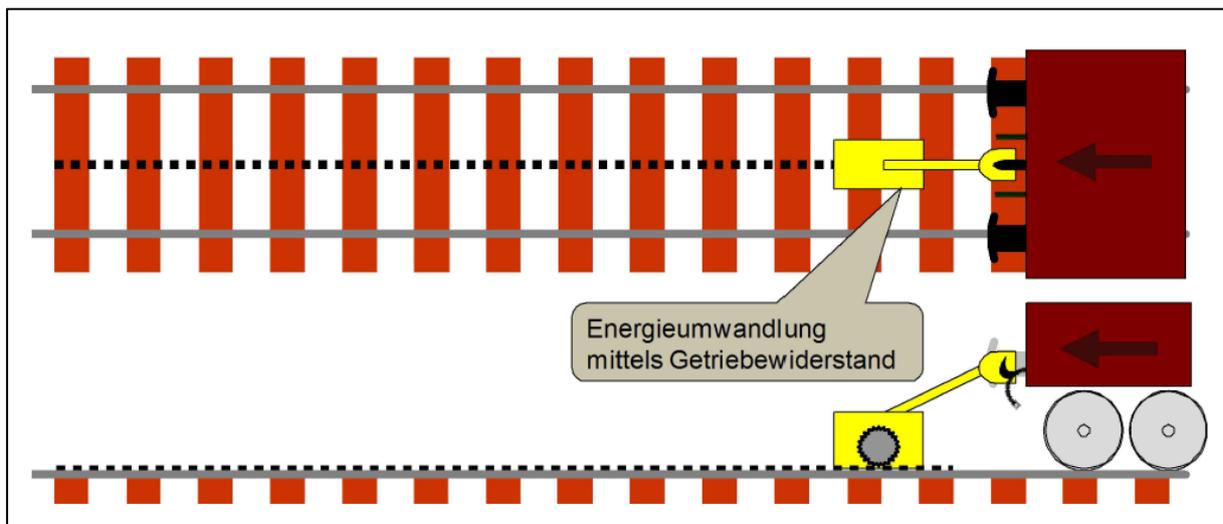


Abbildung 34

Vorteile:

- Gezielte Bremsung

Nachteile:

- Steuerung notwendig
- Keine Befahrung bei eingesetztem Wagen

4.15. Bremswagen - Flüssigkeitszylinder mit Schrauben

Ähnlich wie bei vorangegangenen Methoden wird hier der zu bremsende Wagen mit einem Verschwabwagen verbunden. Die Energieumwandlung erfolgt jedoch nicht durch Generatoren. Diese wird durch in Flüssigkeit gelagerten Schrauben umgewandelt.

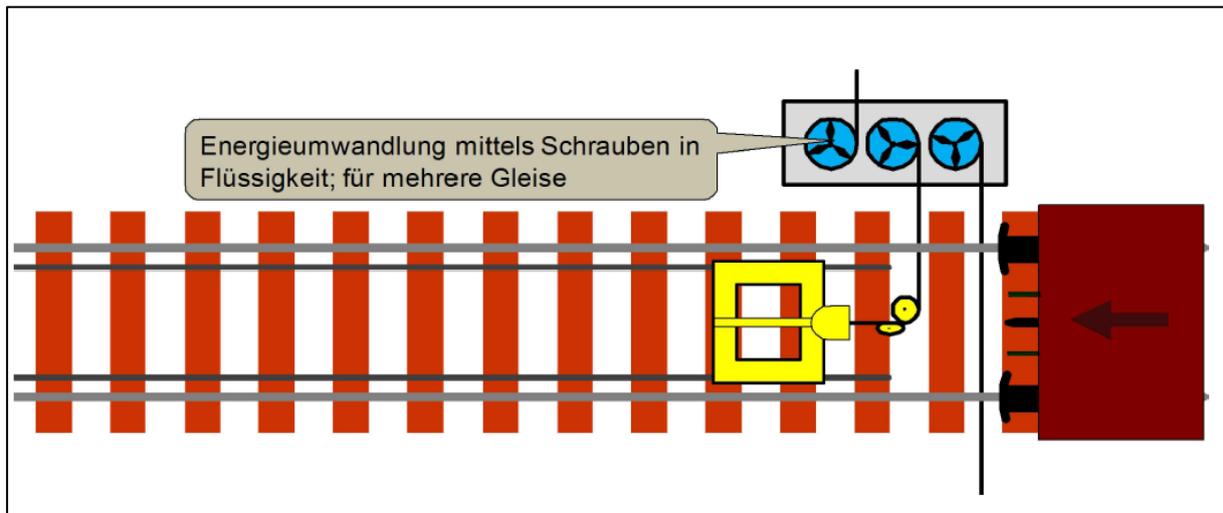


Abbildung 35: Bremswagen mit Flüssigkeitszylinder

Vorteile:

- Zielgerichtete Bremsung
- Kein massiver Infrastruktureingriff

Nachteile:

- Verbindung zum Wagen notwendig
- Keine zielgerichtete Bremsung

5. BEWERTUNG

Die Bewertung wurde in zwei unabhängigen Pfaden durchgeführt, einerseits durch konsortiumsinterne Workshops und parallel dazu anhand einer Bewertungsmatrix.

In den Workshops war es das Ziel, aus den Ideen aus dem Innovationsprozess eine Vorselektion durchzuführen. Damit am Ende drei bis vier umsetzungswürdige Varianten festgelegt werden um diese tiefergehend zu untersuchen. Die Varianten wurden allen Projektbeteiligten präsentiert. Nach einer gemeinsamen Diskussion hatte jeder Teilnehmer die Möglichkeit fünf Bewertungspunkte für die favorisierten Varianten zu vergeben. Jene Varianten mit den höchsten Punkteanzahlen wurden nochmals durchdiskutiert. Schlussendlich erfolgte eine Einigung auf die weitere Vorgangsweise. Im Rahmen der Diskussion über die einzelnen Varianten auch weitere Ideen eingebracht: wie z.B. Gummiradbremse und Adaptierter Retarder. Am Ende dieser Bewertung standen die folgenden Varianten, an denen im Projekt weitergearbeitet wurde:

- Energieumwandelnde Schiene / Variabler Rollwiderstand
- Wirbelstrombremse
- Umgekehrter Radsatzschubwagen
- Gummiradbremse
- Adaptierter Retarder

Parallel dazu wurde eine Bewertungsmatrix mit definierten Kriterien erstellt. Alle Varianten wurden auch noch anhand dieser Matrix bewertet um zu prüfen, ob die Auswahl die im Zuge des Workshops durchgeführt wurde auch den Kriterien der Bewertungsmatrix standhält.

Folgende Kriterien wurden für die Bewertung identifiziert und verwendet:

- Produktreife
- Arbeitnehmerschutz
- Entwicklungskosten
- Montagekosten
- Beschädigungen durch Entgleisungen
- aut. Fehlererkennung
- Lärm

- Ausfallsicherheit
- Verschleiß
- Bremsung 630t

Als Bewertungsschlüssel diene folgendes Schema:

1 = optimal

2 = gut

3 = befriedigend

4 = unzureichend

5 = nicht möglich

Auf Basis der Ausarbeitungen wurden alle Varianten anhand der Kriterien bewertet. Das Ergebnis ist in der folgenden Abbildung dokumentiert.

Varianten	Gesamtpunkte	Produktreife	Arbeitnehmerschutz	Entwicklungs-kosten	Montagekosten	Beschädigungen durch Ergleisungen	aut. Fehlererkennung	Lärm	Ausfallsicherheit	Verschleiß	Bremsung G30
Variablem Rollwiderstand	28	3	2	3	5	5	2	1	3	3	1
Federnde Elemente	31	4	3	4	5	5	3	2	2	2	1
Wasserbremse	38	5	5	5	5	4	3	3	4	2	2
Wirbelstrombremse	29	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2
Anhebbare Schiene	36	5	5	5	5	4	3	2	2	3	2
Mobiler Prellbock	34	5	5	4	3	4	3	3	4	2	1
Trägheitsmodul zur Energieumwandlung	38	5	5	5	4	4	3	2	3	3	4
Vakuumbremse	44	5	5	5	5	5	4	3	5	3	4
Intelligenter Stützer	41	5	4	5	5	4	4	3	4	3	4
Bremsschuh 4.0	39	5	3	5	5	4	4	3	4	3	4
Einhaksystem	41	5	4	5	5	4	4	4	4	3	3
Prellbock mit langem Bremsweg	41	5	4	5	5	4	4	4	4	3	3
Umgekehrter Radsatzschubwagen	27	3	3	4	4	3	2	2	2	2	2
Retarder adaptiert	20	2	1	3	1	3	3	1	2	4	1
Magnetorheologischer Retarder	38	5	3	5	3	4	3	4	4	4	3
Pufferbremse mit Seilzug Rotationsprinzip	40	5	4	5	5	4	4	3	4	3	3
Hakenwagen	37	5	5	5	5	4	4	3	4	3	2
Wagen mit Flüssigkeitszylinder mit Schrauben	37	5	4	5	5	4	3	3	3	3	2
Gummiraubremse	28	3	3	3	3	3	3	2	3	3	2
Energieumwandelnde Schiene	31	5	3	4	3	2	2	2	3	4	3

Abbildung 36: Bewertungsmatrix

Als Mindestwert wurden 50 % definiert. Das bedeutet, dass nur jene Varianten ausgewählt werden, die diesen Wert erreichen. Wie in der folgenden Abbildung ersichtlich ist, trifft dies auf die fünf Varianten Variabler Rollwiderstand, Gummiradbremse, adaptierter Retarder, umgekehrter Radsatzschubwagen und Wirbelstrombremse zu.

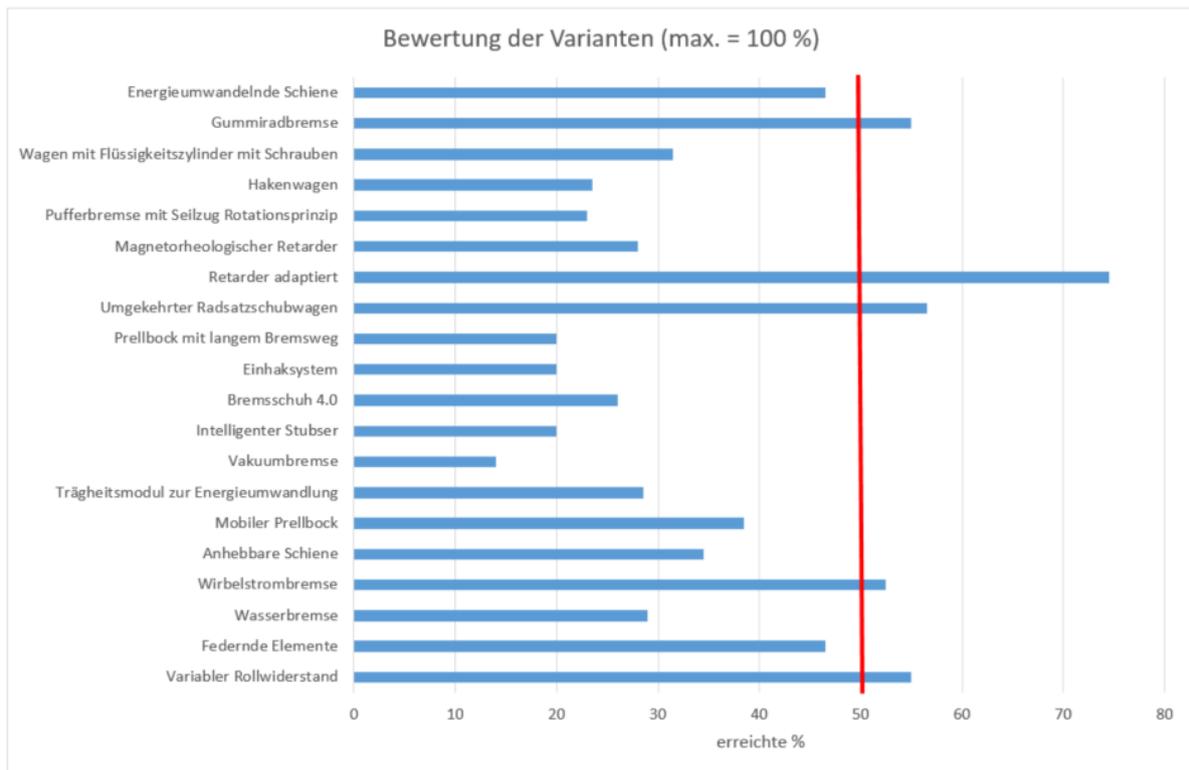


Abbildung 37: Übersicht Bewertung der Varianten

Anbei die Detailansicht der bestbewerteten Varianten.

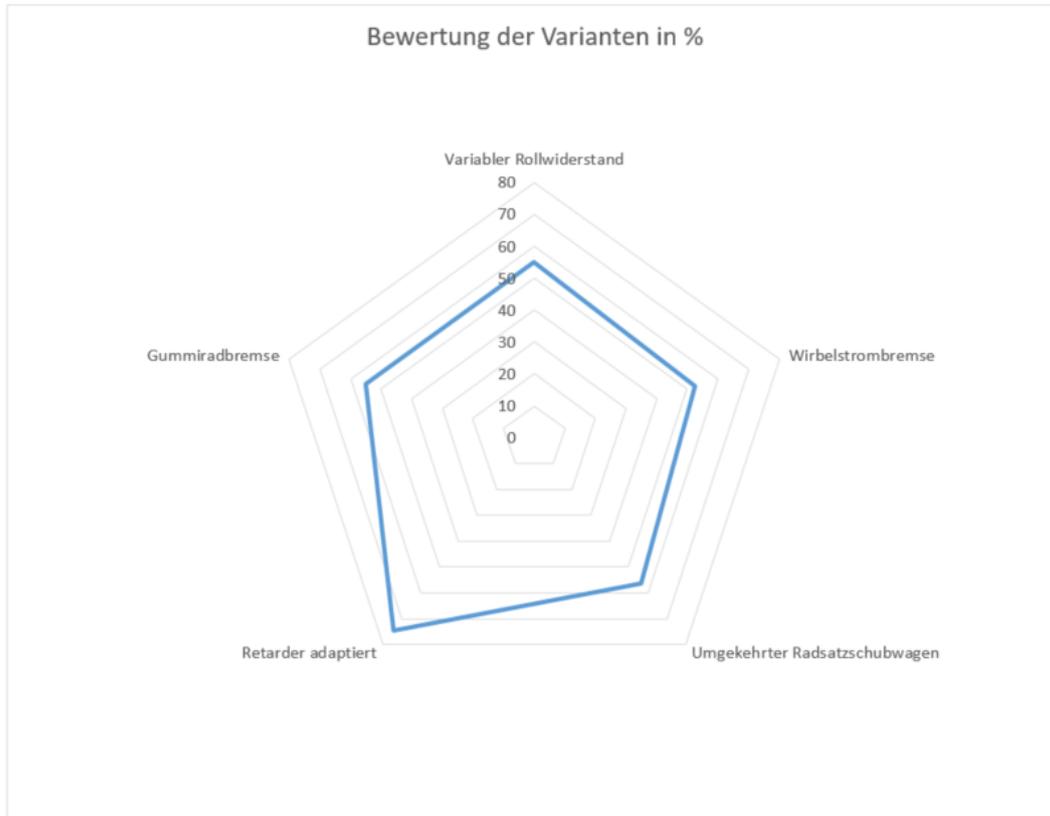


Abbildung 38: Bestbewertete Varianten

Im Folgenden sind zur weiteren Übersicht die Bewertungen der Varianten nach den Kriterien in zwei unterschiedlichen Darstellungen angeführt.

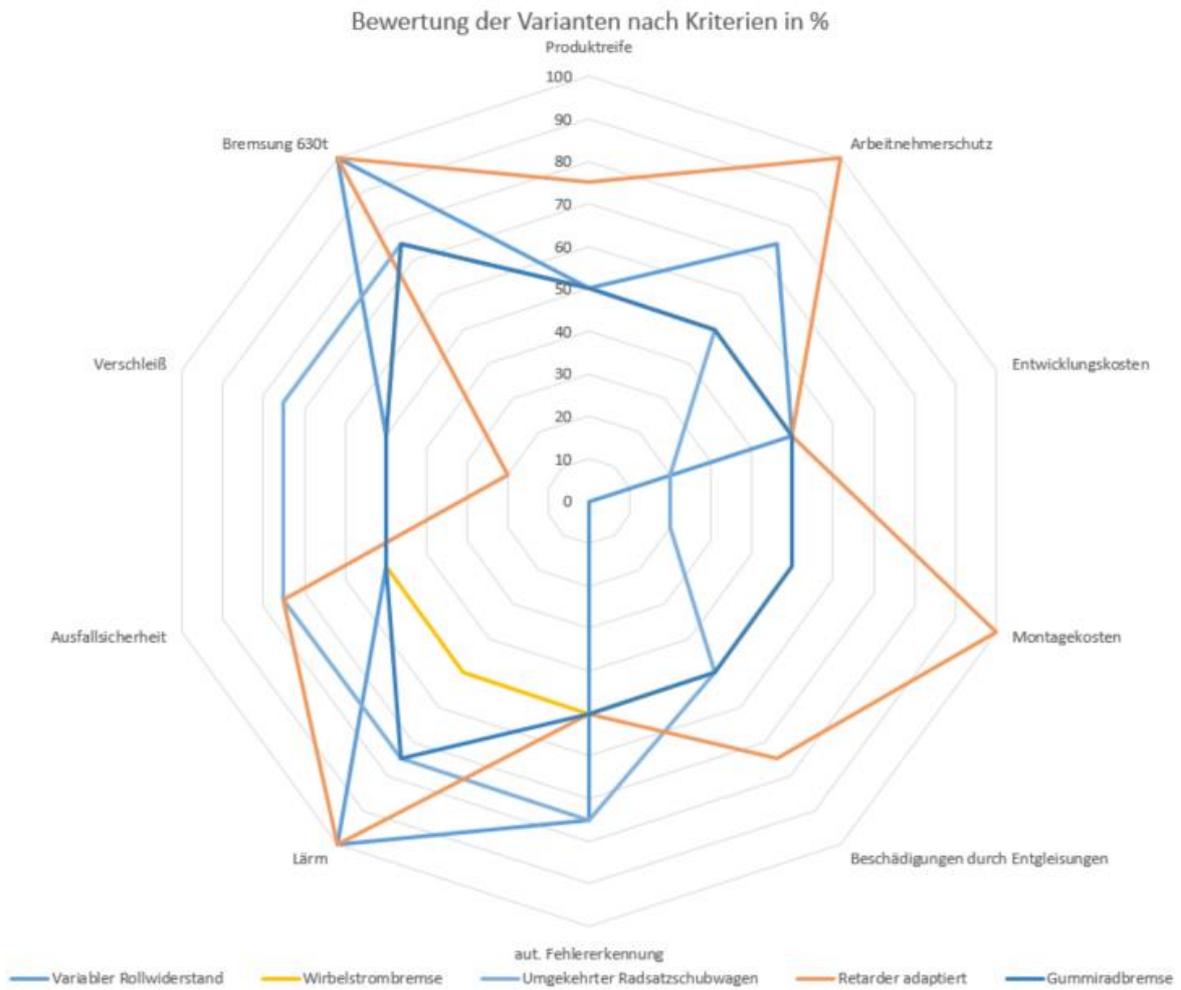


Abbildung 39: Bewertung der Varianten nach Kriterien

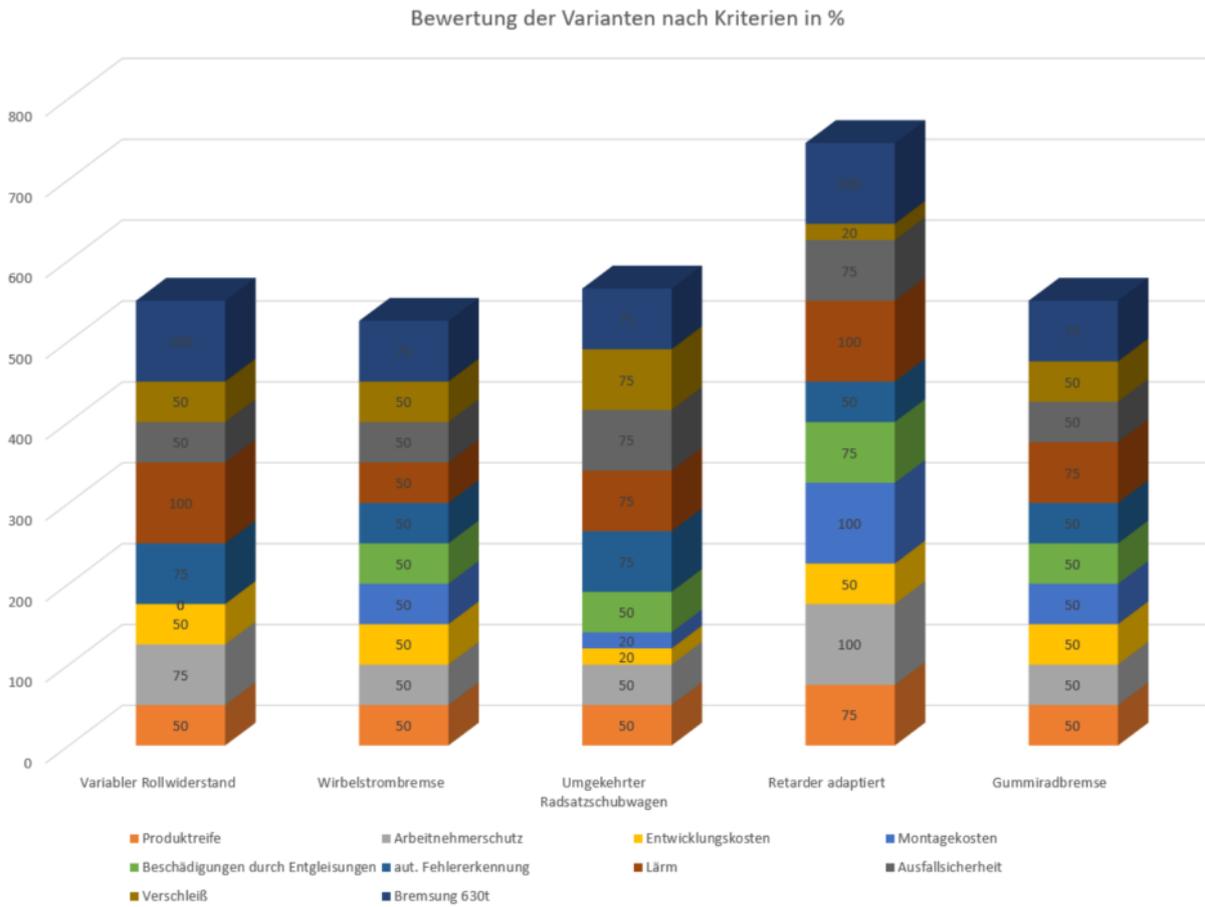


Abbildung 40: Bewertung der Varianten nach Kriterien in %

Die Bewertungen stimmen somit überein, womit das Ergebnis der Workshops bestätigt werden kann. Gemeinsam mit dem Auftraggeber wurde beschlossen, diese Varianten zunächst im Rahmen von AP5 auszuarbeiten und während der Bearbeitung wieder eine gemeinsame Bewertung der Zwischenstände durchzuführen um gemeinsam zu entscheiden ob weitere Varianten ausgeschieden werden müssen. Diese Bewertungen wurden im Rahmen von AP5 durchgeführt.

6. VALIDIERUNG

Der in AP4 identifizierten Varianten wurden soweit ausgearbeitet wurden, dass innerhalb dieses Arbeitspakets (AP5) eine Entscheidung zur Weiterführung oder nicht Weiterführung getroffen werden konnte.

Folgende Entscheidungen dazu wurden getroffen:

Variante	Aktion
Variabler Rollwiderstand	Modellaufbau (z.B. Gartenbahn)
Gummiradbremse - Friction Drive (Achterbahnantrieb)	In diesem Projekt nicht mehr weiterverfolgen
Umgekehrter Radsatzschubwagen	Darstellung eines Konzepts
Adaptierter Retarder	Weiterführung gemäß den erarbeiteten Empfehlungen
Wirbelstrombremse	Weiterführung gemäß den erarbeiteten Empfehlungen

Somit wurden die Varianten Variabler Rollwiderstand, adaptierter Retarder und Wirbelstrombremse und vertieft und deren Machbarkeit überprüft, wobei sich schlussendlich gezeigt hat, dass diese zwei Varianten umsetzbar erscheinen:

- Variabler Rollwiderstand
- Adaptierte Retarder

Im Folgenden finden sich die Dokumentationen aller fünf Varianten.

6.1. Variante 1 – Variabler Rollwiderstand

In Variante 1 wird eine Abbremsung der Güterwagen durch elastische Elemente überprüft, welche sich an die Laufflächen der Räder anschmiegen und so den Rollwiderstand erhöhen.

6.1.1. Realisierung eines variablen Rollwiderstandes

Naturgemäß besitzt die Eisenbahn einen der geringsten Rollwiderstände im Vergleich zu anderen Transportsystemen, wodurch es möglich ist, schwere Güter mit geringem Kraftaufwand zu transportieren. Im umgekehrten Sinn jedoch geht kaum Bewegungsenergie der beschleunigten Wagen durch Rollreibung verloren, wodurch der geringe Rollwiderstand bei der Bremsung nachteilig ist.

Die Bremssysteme, welche an Ablaufanlagen zur Anwendung kommen, wirken alle auf die Räder der Güterwagen. Durch die Bremsbalken einer Balkengleisbremse oder auch durch die Hubbewegung der Kleinkolbenbremse wird ein Bremsmoment am Radkörper hervorgerufen, dieses Moment ist für die Verzögerung des Wagens verantwortlich. Jedoch verursacht auch der Rollwiderstand ein kleines Bremsmoment an den Radsätzen, welches der Rollreibung des Rad-Schienenkontaktes entspricht. Wäre es nun möglich, die Rollreibung bei Bedarf anzuheben, sollte eine Bremsung erforderlich sein, könnte der Rollwiderstand die gesamte Bremsarbeit verrichten. Doch zu beachten ist, dass der Rollwiderstand regelbar ausgeführt sein muss, denn es gibt unterschiedliches Wagenmaterial mit abweichenden Laufeigenschaften (Anzahl der Achsen, Lagerausrüstung, etc.).

Der physikalische Zusammenhang zwischen Bremsmoment und Rollwiderstand setzt sich ausfolgender Formel (1) zusammen [1, S. B15].

$$M_W = F_W \times r$$

Formel 1

M_W = Bremsmoment

F_W = Rollwiderstand

r = Laufkreisdurchmesser

Ist nun das erforderliche Bremsmoment bekannt, welches benötigt wird, um einen Güterwagen abzubremsen, so kann anhand des Raddurchmessers der erforderliche Rollwiderstand berechnet werden. Die Zusammensetzung des Rollwiderstandes in der einfachsten Näherung ist in Formel (2) ersichtlich [1, S. B15].

$$F_W = F_Q \times \mu$$

Formel 2

F_W = Rollwiderstand

F_Q = vertikale Gewichtskraft, die auf das Rad bzw. den Untergrund wirkt

μ = Rollwiderstandskoeffizient

Für Eisenbahnräder auf Schienen wird ein Rollreibungskoeffizient von 0,001-0,002 laut Fachliteratur angegeben [39, S. 14]. Infolgedessen entsteht bei einem vollbeladenen 4-achsigen Güterwagen (Achslast 22,5 t, $\mu = 0,002$) ein gesamtes Bremsmoment, hervorgerufen durch die acht Räder, von lediglich 1,8 kNm (Lagerreibungen nicht berücksichtigt).

Da die Gewichtskraft (F_Q), sowie der Raddurchmesser (r) unveränderbar sind, soll der Rollreibungskoeffizient näher betrachtet werden (Formel 3) [1, S. B15].

$$\mu = \frac{f}{r}$$

Formel 3

μ = Rollwiderstandskoeffizient

f = Hebelarm der Rollreibung

r = Laufkreisdurchmesser

Des Weiteren ist nun durch Formel (3) erkennbar, dass das wesentliche Element, welches den Rollwiderstand verursacht, der „Hebelarm der Rollreibung (f)“ ist. Um die geometrischen Zusammenhänge des Rollwiderstandes und speziell die des Rollwiderstandskoeffizienten besser zu verdeutlichen, soll Abbildung (41) dienen.

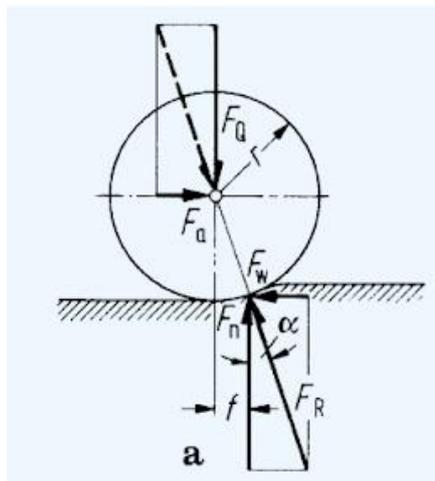


Abbildung 41: Geometrische Zusammenhänge des Rollwiderstandes [1, S. B15]

Nach Abbildung (41) verformt das Rad den Untergrund durch die lotrechte Gewichtskraft (F_Q). Damit sich das Rad nach vorne bewegen kann, ist auch eine horizontale Kraft (F_A) nötig. Durch diese beiden Kräfte (F_Q u. F_A) stellt sich eine Resultierende ein, welche nach dem dritten Newton'schen Axiom eine Gegenkraft im Untergrund hervorrufen muss. Von dieser Gegenkraft ist die Horizontalkomponente (F_W) der Rollwiderstand [1, S. B15].

Wird nun der Rollwiderstandskoeffizient (μ) mithilfe Abbildung (41) und Formel (3) betrachtet, lässt sich der „Hebelarm der Rollreibung (f)“ besser verstehen. Durch die Resultierende aus (F_W und F_N) ergibt sich ein Punkt auf der Lauffläche, den das Rad „übersteigen“ muss, um sich vorwärts zu bewegen. Dieser Punkt wird in der Fachliteratur auch Kippunkt genannt. Der Hebelarm (f) definiert hierbei die horizontale Strecke vom Achsmittelpunkt zum Kraftansatz der Resultierenden. Somit ist eine Kraft vorhanden (Gewichtskraft) und eine Strecke (f), folglich entsteht ein Moment, in diesem Fall das Bremsmoment. Veranschaulichen lässt sich dies auch durch die Momenten-Gleichgewichtsbedingung, denn beim Stillstand des Rades darf kein Moment wirken (Formel 4) [2]. Generell wird für den Rad-Schienen-Kontakt die Länge des Hebels (f) mit ca. 0,5 mm angegeben [1, S. B15].

$$M_R = F_N \times f - F_A \times r = 0$$

Formel 4

*M_R = Moment am Rad
 F_N = Gewichtskraft
 f = Hebelarm der Rollreibung
 F_A = Kraft, die den Wagen beschleunigt
 r = Laufkreisdurchmesser*

Die oben angeführte Berechnungsmethode ist lediglich eine grobe Näherung zum tatsächlichen Rollwiderstand, da in dieser Berechnung die unterschiedlich wirkenden Kräfte als Einzelkraft zu einer Resultierenden zusammengefasst werden. Jedoch werden sich beide Körper (Rad so wie auch die Schiene) in einem elastischen und plastischen Bereich verformen. Des Weiteren wird die Rauigkeit der Körper nicht betrachtet, welche ebenfalls den Rollwiderstand beeinflusst. Dennoch kann durch diese einfachen Überlegungen zusammengefasst werden:

Die größten Einflussfaktoren des Rollwiderstands sind die vertikale Gewichtskraft (F_Q) und der Hebelarm (f).

Je tiefer das Rad in den Untergrund „einsinkt“, desto größer wird der Hebelarm (f).

Je größer der Hebelarm (f), umso höher ist auch der Rollwiderstand bzw. das Bremsmoment.

Diese Erkenntnis ist der Ausgangspunkt für den Modellaufbau, denn es soll ein System entwickelt werden, in welchen die Wagenräder in den Untergrund „einsinken“.

6.1.2. Überlegungen zur Umsetzung einer verform- und regelbaren Schiene

Die Randbedingungen für eine verform- und regelbare Schiene sind primär dadurch abgesteckt, dass eine solche Schiene für den Versuchsaufbau durch die FH St. Pölten selbst herzustellen ist und die Grundidee des Prototyps auch in der tatsächlichen Anwendung an einem Ablaufberg funktionieren würde. Infolge dieser Abgrenzung wurde die Entscheidung für ein pneumatisches bzw. hydraulisches System getroffen.

Im Bremsabschnitt am Ablaufberg, wo der variable Rollwiderstand Einsatz finden soll, werden die Spurkränze der Radsätze durch speziell angefertigte Führungsschienen geleitet. Diese Schienen sollen die Vertikalkräfte (Gewichtskräfte) und auch die Lateralkräfte (Seitenbeschleunigungen) aufnehmen, ein identes Prinzip wird bereits bei der Gummigleisbremse angewandt. Da nun die gesamten Kräfte über den Spurkranz abgetragen werden, bleibt die Lauffläche der Räder frei, auf welche der variable Rollwiderstand wirken kann. Die Führungsschiene soll in jenem Bereich, wo diese von der Lauffläche der Räder überrollt wird, eine breite Nut aufweisen bzw. es wird an der tatsächlichen Führungsschiene, welche die Lastabtragung übernimmt, ein weiteres Stahlprofil (z.B. U-Profil) angeschlossen. Die Nut bzw. das Stahlprofil sollen an der offenen Seite mittels eines Elastomers geschlossen werden. Hierdurch entsteht ein geschlossener Hohlraum, der durch Druckluft oder Flüssigkeiten befüllt werden kann. Wird nun der Druck in diesem Hohlraum erhöht, beult sich das Elastomer nach außen, der Luftspalt zwischen dem statischen Trägersystem und der Lauffläche der Radsätze schließt sich. Folglich schmiegt sich das Elastomer an die Lauffläche des Rades an, wodurch der Rollwiderstand erhöht wird. Um dies zu verdeutlichen, soll Abbildung (42 u. 43) dienen, wobei in Abbildung (42) die Bremse inaktiv ist und in Abbildung (43) aktiv, die elastischen Bremsen sind jeweils rot eingezeichnet. Im inaktiven, drucklosen Zustand findet keine Berührung zwischen Elastomer und Lauffläche der Räder statt, der Rollwiderstand reduziert sich auf den Kontakt zwischen Spurkranz und Führungsschiene. Wird das Bremssystem mit Druck beaufschlagt, addiert sich zum Rollwiderstand des Spurkranzes auch der Rollwiderstand des Elastomer-Radlaufflächen-Kontaktes bis zu dem Punkt, wo die gesamte Lastabtragung über das Bremsenlement erfolgt.



Abbildung 42: Bremse inaktiv (eigene Darstellung)

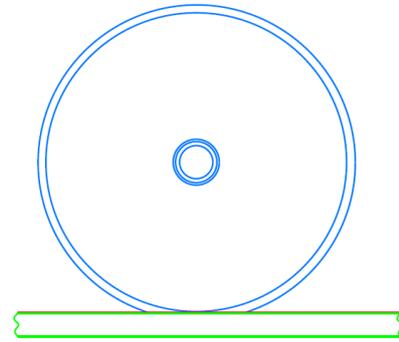
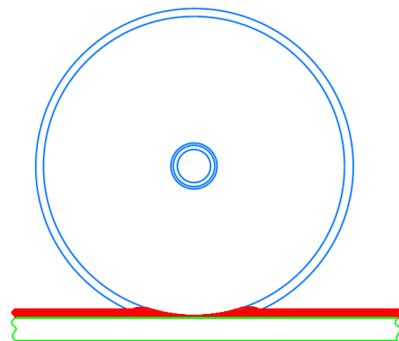


Abbildung 43: Bremse aktiv (eigene Darstellung)



Werden nun diese Überlegungen auf dieses Modell übertragen, müsste der Rollwiderstand in Abhängigkeit zur Einsinktiefe des Rades in dem druckgestützten Bremselement stehen. Darüber hinaus verändert sich der Lastfall am Rad durch die Druckbeaufschlagung des Bremssystems. Bei geringem Druck im Bremssystem wird die Gewichtskraft der Wagen größtenteils über die Spurkränze abgeleitet, wird jedoch der Druck erhöht, wandert der Hauptteil der Lastabtragung in Richtung der Lauffläche. Dadurch sollte der Rollwiderstandskoeffizient (μ) von der Einsinktiefe im Schlauch abhängig sein. Ebenfalls wird die Gewichtskraft (F_Q), welche über die Bremse abgeleitet wird, den Rollwiderstand erhöhen, wobei der Lastfall vom Druck im Schlauch abhängig ist. Ebenfalls zu erwarten ist, dass auch durch die Verformung des Elastomers eine Bremswirkung erzielt wird.

Zu beachten ist jedoch, dass die generelle Formel (2) für den Rollwiderstand ausschließlich für Festkörper geeignet ist. Im Fall der Gleisbremse wird diese Bedingung nur vom Wagenrad und dem Elastomer, welches auf das Rad drückt, erfüllt. Aussagen über das Verhalten des pneumatischen bzw. hydraulischen Stützmediums können nicht getätigt werden.

6.1.3. Hypothesen zum Verhalten des variablen Rollwiderstandes

Gegenwärtig sind keine Literatur bzw. Rechenverfahren verfügbar, die sich mit einer solchen Problemstellung befasst haben. Deshalb wurden Hypothesen entwickelt, die es mittels Experimenten zu überprüfen galt. Grundsätzlich stellt sich die Frage, wie viel Bremsenergie mit einer solchen Bremsanordnung im tatsächlichen Anwendungsfall, sprich am Rangierbahnhof realisierbar ist. Im Gegensatz dazu steht das Experiment im verkleinerten Maßstab, wodurch die Hypothesen auch nur im verkleinerten Maßstab überprüft werden können. Um die Ergebnisse der Modellversuche auf den Anwendungsfall des Rangierbahnhofes zu projizieren, werden unterschiedliche physikalische Zusammenhänge überprüft.

6.1.3.1. Hypothese 1: Die Bremsleistung wird vom Schlauchmantel erbracht

In dieser Überlegung wird angenommen, dass lediglich der Mantel, welcher auf die Räder gepresst wird, eine Bremsleistung hervorruft. Zur experimentellen Überprüfung wurde eine Rampe konstruiert, die beweglich gelagert ist und somit ein Gefälle für den Modellwagen simuliert. Im Experiment wird anstatt des U-Stahlprofils, welches mit einer Elastomerlauffläche versehen ist, ein Flachschauch verwendet, der in einem U-Stahlprofil eingebettet ist. Wird dieser mit Druck beaufschlagt, schmiegt sich der Schlauch an die Modellwagenräder, wodurch sich der Rollwiderstand erhöht. Trifft die Hypothese zu, dass die Bremsleistung hauptsächlich vom Schlauchmantel abhängig ist, sollte der Rollwiderstand über verschiedene Druckbereiche in etwa gleichbleiben. Dies würde dadurch ersichtlich, dass der Modellwagen bei identen Rampenneigungen zu rollen beginnt.

6.1.3.2. Hypothese 2: Das Stützmedium im Schlauch trägt zur Bremsung bei

In dieser Annahme wird zusätzlich zur Hypothese 1 eine signifikante Bremsleistung durch das Stützmedium im Schlauch erwartet.

Wird der Rollwiderstand betrachtet und werden Überlegungen zum Kippunkt durchgeführt, ist offensichtlich, dass der Untergrund eine gewisse Schubspannung aufnehmen muss, damit sich ein Kippunkt im vorderen Bereich des Rades ausbildet. Hohe Schubspannungen können jedoch nur von Festkörpern aufgebracht werden (Ausnahme: Nicht-Newton'sche Fluide), wohingegen Gase fast keinen und Fluide nur mäßigen Widerstand gegen Scherung besitzen.

Der Widerstand gegen Scherung von Gasen und Fluiden ist die Viskosität. Folglich müsste sich bei einer höheren Viskosität der Rollwiderstand erhöhen, da sich die Flüssigkeit vor dem Rad bei einer größeren Resistenz gegen Scherung nur mit erhöhtem Kraftaufwand verdrängen lässt [3, S. 11]. Um den Rollwiderstand in Bezug auf die Verformung des Rades bzw. den Untergrund besser zu verstehen, sollen die wissenschaftlichen Arbeiten von Gelencsér [2] betrachtet werden, der die Ausprägungen von Kippunkten anhand 4 Modellen unterschied.

- Modell 1: Rad und Untergrund ist ideal starr (Abbildung 44a)

In diesem Fall befindet sich der Kippunkt (K) direkt unter dem Mittelpunkt der Drehachse, es kommt zu keiner Verformung an den Körpern. Folglich gibt es keinen Hebel für den Rollwiderstand (k) und der Rollwiderstand ist Null. Dieser Zustand lässt sich jedoch in der Realität nicht herstellen.

- Modell 2: Rad ist ideal starr und Untergrund ist ideal elastisch (Abbildung 44b)

Beim Überrollen des Untergrundes wird dieser durch das Rad im vorderen Bereich komprimiert. Da der Untergrund ideal elastisch ist, entspannt sich dieser nach der Überrollung und es geht keine Energie verloren. Es entsteht ein Kräftegleichgewicht, der Kippunkt befindet sich lotrecht unter der Drehachse und auch in diesem Fall ist kein Rollwiderstand vorhanden.

- Modell 3: Rad ist ideal starr und befindet sich auf einem nicht-ideal elastischen Untergrund (Abbildung 44c)

Im Gegensatz zu Modell 2 geht Energie im Bereich der Kompressionszone verloren (z.B. Wärme). Somit kommt es zu einer asymmetrischen Verteilung der Druckkräfte in der Kompressions- bzw. Entspannungszone. Der Kippunkt wandert aus dem lotrechten Mittel der Drehachse, wodurch nun ein Moment entgegen der Drehrichtung des Rades auftritt.

- Modell 4: Rad ist nicht-ideal elastisch und befindet sich auf einem ideal elastischen Untergrund (Abbildung 44d)

Ähnlich wie im Modell 3 kommt es ebenfalls zu einer asymmetrischen Druckverteilung durch die Verformung am Rad. Folglich entfernt sich der Kippunkt aus dem lotrechten Zentrum der Drehachse, was einen Rollwiderstand zufolge hat.

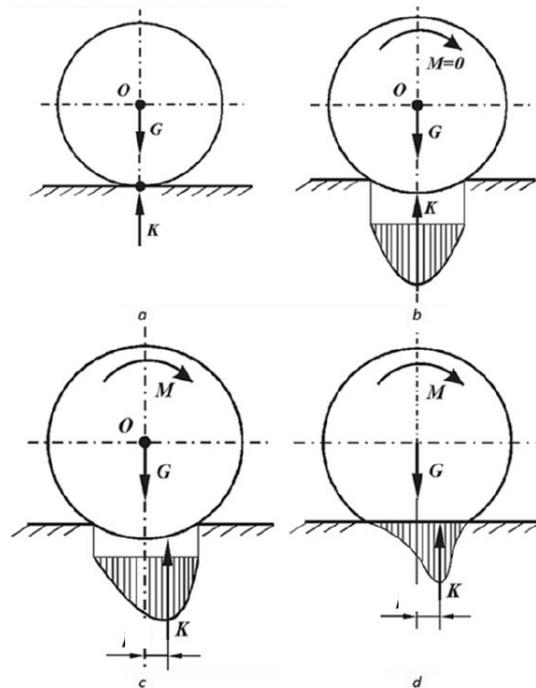


Abbildung 44: Modelle des Rollwiderstandes [2]

Im Experiment besteht das Rad des Modellwagens aus Grauguss, der Bremsabschnitt, den es zu überrollen gilt, ist ein verformbarer Flachslauch. Folglich ist anzunehmen, dass sich das Rad beinahe ideal starr verhält. Bei dem Untergrund (Flachslauch) hingegen stellt sich die Frage, ob sich das Modell 2 bzw. Modell 3 ausbildet.

Wird nun die Druckverteilung im Schlauch näher betrachtet, der durch das Rad verformt wird, so ist es offensichtlich, dass sich bei einem stillstehenden Rad ein gleichmäßiger Druck an der Berührungsfläche ausbilden wird. Infolgedessen kann hier von Modell 2 gesprochen werden. Bewegt sich jedoch das Rad über den Schlauch, kommt es zu einer Verdrängung des Füllmediums, wobei der Druck im vorderen Bereich des Rades gegenüber dem hinteren Bereich geringfügig ansteigen wird (ähnlich Modell 3). Folglich müsste für die Bremsleistung des Füllmediums die Geschwindigkeit des Modellwagens, die Viskosität und der Leitungswiderstand der Bremse verantwortlich sein.

Um diese Hypothese überprüfen zu können, wurde eine Ablauframpe für den Modellwagen konstruiert. Bei der Ablauframpe kam die Bremssektion zur Anwendung, die bereits zur Überprüfung der Hypothese 1 Verwendung fand. Bei den Abrollversuchen blieb die Geschwindigkeit des Wagens so wie die Leitungsgeometrie der Bremse über die Versuche unverändert, lediglich unterschiedliche Füllmedien wurden verwendet. Die Wahl der Füllmedien

fiel auf Luft, Wasser und Glycerin, da diese eine weite Spanne an dynamischer Viskosität abdecken.

6.1.4. Die Experimente

Um die Bremsleistung des variablen Rollwiderstandes zu ermitteln bzw. die Hypothesen zu überprüfen, wurden zwei unterschiedliche Experimente durchgeführt. In Experiment 1 kam ein Bremsabschnitt mit variablem Rollwiderstand mit einer Länge von 3 m zur Anwendung. Befestigt wurde dieser Bremsaufbau auf einem Rahmen, wobei es mithilfe dieses Rahmens möglich war, unterschiedliche Gefälle zu simulieren. Dadurch konnte festgestellt werden, bei welcher Gradienten der Rollwiderstand des Modellwagens überwunden wurde. Im Experiment 2 fand dieser Bremsaufbau weiter Verwendung, denn um die dynamische Bremsleistung zu erheben (Hypothese 2), wurde der Bremsaufbau in eine Ablauframpe für den Modellwagen integriert. Des Weiteren wurde nach dem Bremsaufbau eine Auslaufzone angefertigt, um den Modellwagen kontrolliert zum Stillstand zu bringen. Die Abmessungen des Versuchsaufbaus entsprechen in etwa die einer Grubenbahn.

6.1.4.1. Der Modellwagen

Der Modellwagen, der durch die FH St. Pölten für die Versuche angefertigt wurde, besitzt eine Spurweite von 73 cm, die Länge des Wagens beträgt 100 cm und die Höhe 80 cm. Der Wagen besitzt kugelgelagerte Spurkranzräder aus Grauguss, der Laufkreisdurchmesser beträgt 18 cm, die Laufflächenbreite 3,8 cm und der Spurkranz ist 1 cm hoch. Die Lauffläche der Spurkranzräder ist leicht konisch ausgeprägt. Der Rahmen des Wagens so wie die Achsen bestehen aus Formrohren in den Abmessungen 40x40x3 mm bzw. 35x35x4 mm und sind somit sehr verwindungssteif ausgeführt, um die erhobenen Messergebnisse nicht zu verfälschen. Der Wagen verfügt über keine Federung, denn die Achsen sind starr mit dem Rahmen verbunden. Der Aufbau des Wagens ist in Abbildung (45) ersichtlich.



Abbildung 45: Modellwagen

Im Zuge der Versuche fand eine Beladung des Wagens mittels 20 Liter Kanistern statt. Die sieben Kanister wurden randvoll mit Wasser gefüllt und gleichmäßig im Wagen aufgeteilt, damit es zu keinen unterschiedlichen Radlasten in den Versuchen kommen konnte (Abbildung 46). Das Gesamtgewicht des Modellwagens betrug während der Versuche 210 kg.



Abbildung 46: Beladung des Modellwagens während den Versuchsdurchgängen

6.1.4.2. Der Bremsabschnitt

Der variable Rollwiderstand am Modell wurde mithilfe eines Hochdruckflachschauches mit der Abmessung von 1 Zoll realisiert. Der Mantel des Schlauches besteht aus einer Gummimischung

und ist von einem synthetischen Gewebe umspinnen. In der Regel findet diese Art von Schläuchen in der Industrie bzw. bei Feuerwehren Anwendung. Dieser Schlauch wurde in einem U-Stahlprofil über eine Länge von 3 m situiert, wobei der Schlauchquerschnitt unter Druckbeaufschlagung zur Hälfte über das Stahlprofil ragte. Wird der Schlauch von dem Modellwagen überrollt, wirkt somit eine Einsinktiefe von $\frac{1}{2}$ " auf die Wagenräder. Das quadratische U-Profil (40x3 mm) diente gleichzeitig auch als Führungsschiene für die Spurkranzräder. Ist der Flachschauch drucklos, erfolgt die gesamte Lastabtragung durch die Innenflanke des U-Profiles. Wird hingegen der Flachschauch unter Druck gesetzt, verlagert sich die Lastabtragung auf den Schlauch. Im Versuchsaufbau erfolgte eine hundertprozentige Lastabtragung über den Schlauch, wenn der Druck 2,2 bar erreichte, denn ab dieser Druckstufe wurden die Spurkranzräder vom U-Profil abgehoben. Um den Aufbau dieser Bremsanlage besser zu verdeutlichen, soll Abbildung (47) dienen.

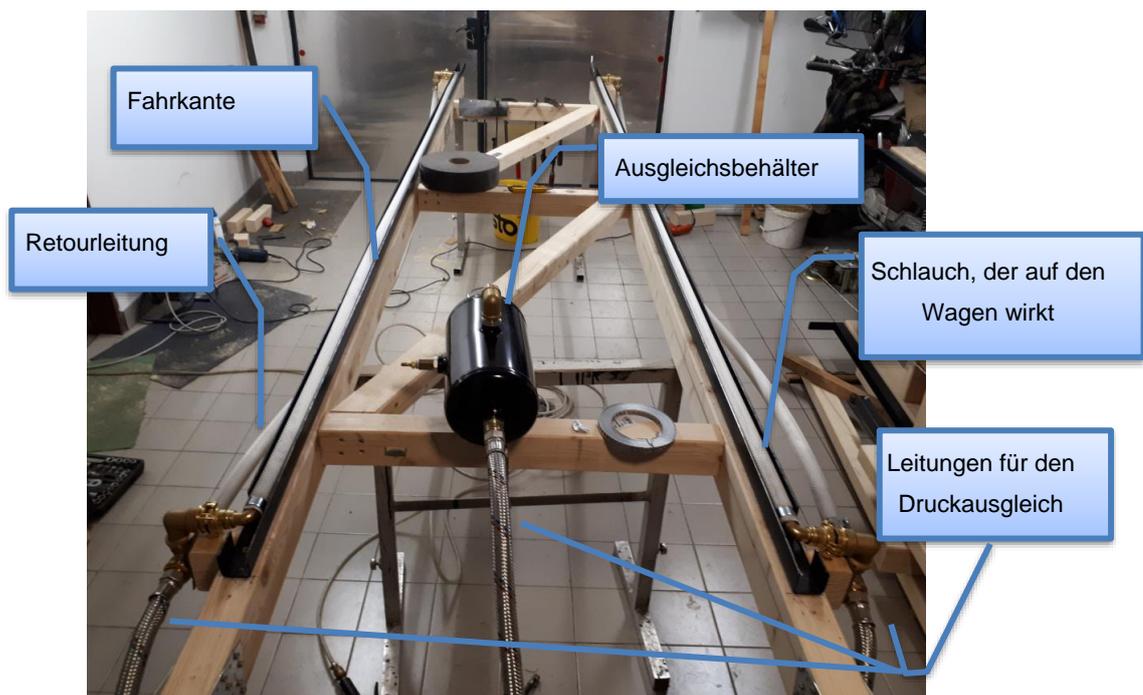


Abbildung 47: Herstellung der Bremse

Die beiden Flachschräuche, die in den Führungsschienen eingebettet sind, wurden als Ringleitung ausgeführt, somit kann sich das verdrängte Füllmedium beim Überrollen nicht vor den Wagenrädern stauen und den Druck erhöhen, wodurch unterschiedliche Lastfälle an den beiden Achsen auftreten würden. Des Weiteren wurden die beiden Ringleitungen durch einen Ausgleichsbehälter (Abbildung 48 Mitte) verbunden, somit wird sichergestellt, dass sich in den

beiden Ringsystemen keine Druckdifferenzen während der Versuche ausprägen. Der Ausgleichsbehälter ist auch dazu nötig, um den Druck im Bremssystem konstant zu halten, denn wird die Bremssektion vom Wagen überrollt, findet eine Verdrängung des Füllmediums durch die Räder statt. Dementsprechend hätte diese Verdrängung einen Druckanstieg im gesamten Bremssystem zufolge, wodurch die Messungen verfälscht würden. Um diesen Effekt auszuschließen, stellt der Ausgleichsbehälter ein 2,5 l großes Luftpolster als Gegendruck bereit. Der Ausgleichsbehälter verfügt auch über ein Manometer, mit welchem der Druck im System aufgezeigt wird, über ein Druckluftventil zur Regelung des Bremsdruckes und einen Einfüllstutzen, womit unterschiedliche Füllmedien verwendet werden konnten. Der gesamte Bremsaufbau wird von einem robusten Holzrahmen gestützt, der Verwindungen während des Experimentes reduzieren soll.

6.1.4.3. Experiment 1, Ermittlung des Rollwiderstandskoeffizienten

Für die Bestimmung des Rollwiderstandskoeffizienten wurde der Bremsabschnitt so adaptiert, dass das Gleis als verstellbare, schiefe Ebene Verwendung finden konnte. Durch das einseitige Anheben des Rahmens aus seiner waagrechten Lage war es möglich den Winkel zu bestimmen, ab wann sich der darauf befindende Wagen in Bewegung setzt. Die Messung fand mithilfe einer Schiebelehre statt, wobei die Differenz zwischen der waagrechten Lage des Gleisrahmens und jener, wo der Wagen zu rollen begann, gemessen wurde. Die Länge zwischen dem Auflager des Rahmens und dem Messpunkt betrug 3,51 m, weshalb es möglich war, den Rollwiderstandskoeffizienten mit einer hohen Präzision zu bestimmen. In Abbildung (48) ist das Zusammenwirken von Rad, Schlauch und Schiene bei einem dieser Versuche ersichtlich. In dieser Druckstufe (im Schlauch befinden sich 4 bar) wird das Rad bereits vollständig durch den Schlauch von der Schiene gehoben. Durch Abbildung (49) wird der Wagen auf der schiefen Ebene aufgezeigt, in Abbildung (50) ist der Messvorgang ersichtlich.



Abbildung 48: Abrollversuche bei 4 bar Schlauchdruck (Rad wird angehoben)



Abbildung 49: Wagen auf schiefer Ebene



Abbildung 50: Messung der Rampenneigung mittels Messschieber

6.1.4.3.1. Festgestellte Rollwiderstandskoeffizienten

Die mathematischen Zusammenhänge, wie der Rollwiderstandskoeffizient mithilfe einer schiefen Ebene ermittelt werden kann, sollen in Abbildung (51) und anhand der Formel (5) für die Momenten-Gleichgewichtsbedingung erklärt werden. Zu beachten ist, dass die Kraft G_N auf einer schiefen Ebenen jener entspricht, die auf einer horizontalen Ebene auf den Kippunkt wirkt (Kraft F_n).

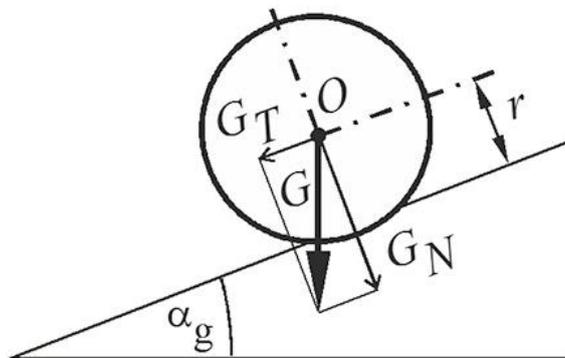


Abbildung 51: Ermittlung des Rollwiderstandskoeffizienten [2]

Wird nun die Momenten-Gleichgewichtsbedingung angewendet, so ergibt sich folgende Gleichung [40].

$$M_R = G_T \times r - G_N \times f = 0$$

Formel 5

*M_R = Moment am Rad
G_T = Gewichtskraft parallel zur schiefen Ebene
r = Laufkreisdurchmesser
G_N = Gewichtskraft orthogonal zur schiefen Ebene
f = Hebelarm der Rollreibung*

Zur Bestimmung des Hebelarms der Rollreibung kann nun Formel (5) umgestellt werden [2].

$$f = r \times \frac{G_T}{G_N} = r \times \frac{G \times \sin \alpha_g}{G \times \cos \alpha_g} = r \times \tan \alpha_g$$

Formel 6

*f = Hebelarm der Rollreibung
r = Laufkreisdurchmesser
G_T = Gewichtskraft parallel zur schiefen Ebene
G_N = Gewichtskraft orthogonal zur schiefen Ebene
G = Gewichtskraft
α_g = Grenzwinkel an der Stelle, an der sich der Wagen in Bewegung setzt*

Durch das Experiment 1 wurde der Winkel (α_g) bestimmt. Somit sind nun alle Parameter zur Berechnung des Hebelarms der Rollreibung (f) bekannt.

Wird nun im zweiten Schritt der Rollwiderstandskoeffizient mit Formel (7) ermittelt, so ist ersichtlich, dass der Rollwiderstandskoeffizient (μ) dem Tangens der Rampenneigung (α_g) entspricht.

$$\mu = \frac{f}{r} = \frac{r \times \tan \alpha_g}{r} = \tan \alpha_g$$

Formel 7

*μ = Rollwiderstandskoeffizient
f = Hebelarm der Rollreibung
r = Laufkreisdurchmesser
α_g = Grenzwinkel an der Stelle, an der sich der Wagen in Bewegung setzt*

Die experimentellen Versuche zur Erhebung des Grenzzustandes, wann der Wagen zu rollen beginnt, wurden mittels Druckluft in einem Druckbereich von 0,2 – 4,0 bar durchgeführt. Des Weiteren fanden Versuche ohne Bremssystem zur Referenz statt (Bremsschlauch demontiert).

Pro Versuchssequenz wurden mindestens 3 Versuche durchgeführt, anschließend wurde das arithmetische Mittel vom Winkel des Grenzzustandes gebildet. Die Drücke im Bremssystem wurden von 0,2 – 3,0 bar in 0,2 bar Schritten gesteigert, durch diese Vorgehensweise ließ sich der maximale Rollwiderstandskoeffizient ermitteln, der mit dem Versuchsaufbau möglich ist. Der maximale Rollwiderstandskoeffizient mit $\mu = 0,053$ liegt zwischen 2,0 und 2,2 bar und entspricht in etwa dem Neunfachen des Rollwiderstandskoeffizienten des Gleises mit demontiertem Bremssystem. Ab einem Druck von 2,2 bar kam es zum Ausheben des Modellwagens, folglich reduzierte sich auch die Einsinktiefe im Flachslauch, wodurch der Hebelarm der Rollreibung verkleinert wurde und der Rollwiderstandskoeffizient absank. Die Ergebnisse der Versuchssequenzen sind in Abbildung (5) aufgeführt.

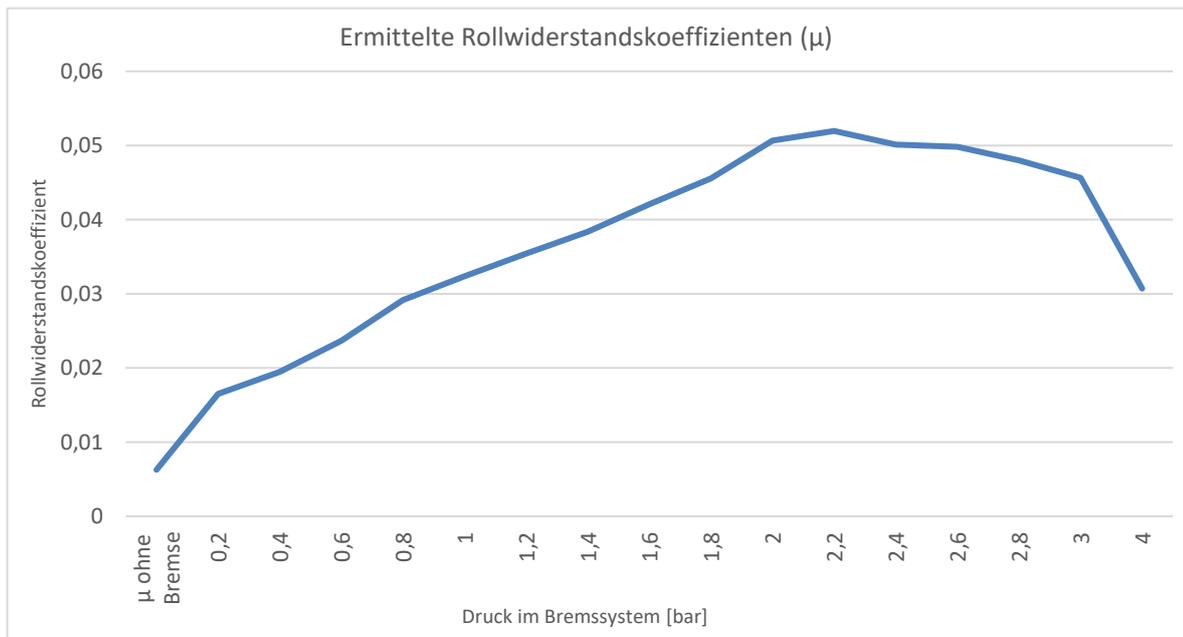


Abbildung 52: Ermittlung des Rollwiderstandskoeffizienten anhand der schiefen Ebene

In Hypothese 1 wurde angenommen, dass der Hebelarm der Rollreibung über die unterschiedlichen Druckstufen gleichbleiben sollte. Dies wurde anhand des Versuches widerlegt. Es wurde festgestellt, dass sich der Kippunkt des Rad-Schlauch Kontaktes mit dem Druck im Flachslauch verlagern muss. Interessant ist, dass sich eine annähernd lineare Funktion zwischen der geringsten Druckstufe und der Druckstufe mit dem höchsten Rollwiderstandskoeffizienten ausbildet. Deshalb ist anzunehmen, dass es zwischen dem Druck im Flachslauch und dem Rollwiderstandskoeffizienten einen linearen Zusammenhang gibt, wobei diese Funktion auch einen Faktor für die Bremswirkung des Schlauchmantels selbst

beinhalten muss. Wird nämlich der Schlauchmantel bei der Überrollung verformt, tritt eine Walkarbeit auf, die folglich durch die kinetische Energie des Wagens induziert wird. Diese Walkarbeit entsteht durch die Verformungen und hat eine thermische Belastung des Materials zu Folge, speziell an elastischen Werkstoffen. Diese Walkarbeit ist auch aus der Reifenindustrie bekannt, wobei sich Luftreifen bei unzureichendem Druck erwärmen und den Rollwiderstandskoeffizienten erhöhen [4, S. 64]. Die Verformung des Schlauchmantels war bei den Versuchsdurchgängen mit 0,2 – 2 bar ident, demzufolge müsste es sich bei der Bremswirkung, hervorgerufen durch die Walkarbeit, um eine Konstante handeln, die in den ermittelten Rollwiderstandskoeffizienten inbegriffen ist. Naheliegender ist auch, dass sich diese Konstante mit einer Funktion aus der Druckbeaufschlagung multiplizieren könnte, was wiederum den linearen Zusammenhang zwischen Rollwiderstandskoeffizienten und Druck im Bremssystem erklären könnte.

Ein weiterer Einfluss des Schlauchmantels ergibt sich durch die Oberflächenbeschaffenheit, denn der äußere Mantel des Flachschauches wurde aus einem Textilgewebe gefertigt. Inwiefern sich diese Rauheit des Textils bei dem Kontakt mit dem Rad auf den Rollwiderstand auswirkt, bleibt unbekannt.

6.1.4.4. Experiment 2, dynamische Ermittlung der Bremsleistung

Um die Einflussfaktoren auf das Bremssystem bestimmen zu können, welche sich anhand der unterschiedlichen Füllmedien im System ergeben, fanden dynamische Experimente statt. Im Wesentlichen wurden an der Bremssektion aus Experiment 1 eine Rampe zur Beschleunigung des Modellwagens so wie eine Auslaufzone mit Bremsschlitten angeschlossen. Mittels einer Winde erfolgte die Positionierung des Wagens in der Auslösungsvorrichtung an der Rampe. Bei der Auslösung der Arretierung beschleunigte der Wagen, angetrieben durch die Erdbeschleunigung, auf eine vordefinierte Geschwindigkeit von ca. 3,5 m/s. Danach überrollte der Wagen das Bremssystem, welches waagrecht an die Rampe montiert war. Auf dem Bremssystem stellte sich eine deutliche Bremswirkung ein, welche gemessen wurde. Am Ende der Bremse kam ein Bremsschlitten zur Anwendung, der sicherstellte, dass der Wagen kontrolliert zum Stillstand kommt. Durch die Abmessungen des Versuchsaufbaues mussten die Experimente im Freien durchgeführt werden, die Experimente fanden im Frühjahr an mehreren Tagen bei einer Temperatur von 16 – 20 °C statt. Es wurde ebenfalls darauf geachtet, dass die Abrollversuche bei möglichst geringen Windaktivitäten durchgeführt wurden. In Abbildung (53)

ist der Versuchsaufbau ersichtlich, wobei sich der Wagen mittig im Bremsabschnitt befindet, den es zu überprüfen galt.



Abbildung 53: Versuchsaufbau Experiment 2

Mit dem Versuchsaufbau wurden drei unterschiedliche Medien im Druckbereich von 0,2 – 3 bar überprüft:

- Luft
Dynamische Viskosität bei 20°C 0,0181 mPas unter Normaldruck [5, S. 38]
- Wasser
Dynamische Viskosität bei 20°C 1,0087 mPas unter Normaldruck [6]
- Glycerin
Dynamische Viskosität bei 20°C 1490 mPas unter Normaldruck [6]

6.1.4.4.1. Die Viskosität

Bei der Viskosität handelt es sich um eine Größe, welche die Fließfähigkeit bzw. die Zähigkeit von Stoffen beschreibt. Im Wesentlichen charakterisiert die Viskosität die innere Reibung von Flüssigkeiten oder Gasen. Je höher die Viskosität eines Stoffes ist, desto mehr Reibung herrscht zwischen deren Molekülen vor und umso zähflüssiger ist das Verhalten. Physikalisch betrachtet handelt es sich bei dem umgangssprachlich verwendeten Begriff „Viskosität“ um die sogenannte dynamische Viskosität (η), dessen Einheit die Pascal-Sekunde (Pas) ist. Zur Bestimmung der dynamischen Viskosität werden zwei Platten im zu überprüfenden Medium zueinander bewegt und die Kraft gemessen, derer es bedarf, um eine dieser Platten zu verschieben (Formel 8) [3, S. 10–13].

$$F = \eta \times \frac{A \times v}{x}$$

Formel 8

F = Kraft
 η = dynamische Viskosität
 A = Fläche der Platten
 v = Geschwindigkeit der Verschiebung
 x = Abstand der Platten zueinander

Daraus folgt, dass die dynamische Viskosität (η) eine Proportionalitätskonstante ist, die den Zusammenhang zwischen der Plattenfläche, der Geschwindigkeit, dem Abstand der Platten zueinander und der benötigten Kraft für die Verschiebung beschreibt (Formel 8) [7].

Werden diese Überlegungen auf das Experiment übertragen, so müsste sich bei einer höheren dynamischen Viskosität die Verzögerung auf dem Bremssystem ebenfalls erhöhen, denn grundsätzlich beschreibt die Proportionalitätskonstante die innere Reibung eines Stoffes. Demnach sollten zähflüssige Stoffe im Schlauchsystem, wie z.B. Glycerin, die kinetische Energie des Modellwagens besser absorbieren, da sich auch eine höhere innere Reibung und folglich ein erhöhter Leitungswiderstand im Bremssystem ausbildet, der wiederum das Glycerin an der Zirkulation hindert.

Um den Einfluss der dynamischen Viskosität auf das Bremsverhalten zu überprüfen, wurden die beiden Ringleitungen des Bremssystems in der ersten Versuchssequenz mit Druckluft gefüllt, die dynamische Viskosität von Luft entspricht in etwa 1/55 von jener des Wassers. In der zweiten Sequenz wurde das Bremssystem mit Wasser befüllt. Bei der dritten und letzten Sequenz kam 99,5 % reines Glycerin zur Anwendung, dessen dynamische Viskosität um den Faktor ~1500 höher ist als die des Wassers.

6.1.4.4.2. Die Messung

Zur Feststellung der Bremsleistung wurde eine Messung der Beschleunigungen während der Versuchssequenzen durchgeführt. Zur Anwendung kam ein Smartphone der Marke Motorola Moto G2, welches auf dem Modellwagen montiert wurde. Mit der Software Physics Toolbox Suite war es möglich, die linearen Beschleunigungen des Modellwagens in drei Achsen aufzuzeichnen, dies erfolgte mit einer Taktfrequenz von ca. 100 Hz.

Durch die Integration der Beschleunigung konnte anschließend auf die Geschwindigkeit und auch auf den zurückgelegten Weg geschlossen werden. Da die Position des Bremssystems auf dem Versuchsaufbau bekannt ist, war es möglich, mithilfe von zweifacher Integration der Beschleunigung nach Zeit die Zeitpunkte zu bestimmen, wann der Wagen auf die Bremse

aufläuft bzw. diese verlässt. Anschließend wurde aus dem Integral der Beschleunigung nach Zeit das Geschwindigkeitsdelta bestimmt, welches durch das Bremssystem verursacht wurde.

Aufgrund der Tatsache, dass durch die Beschleunigungsmessung der Integrand nur in Tabellenform vorhanden ist, kann demzufolge die Beschleunigung nach Zeit nicht explizit in eine Funktion überführt werden. Um eine Approximation der Geschwindigkeit und des Weges zu realisieren, fanden numerische Integrationen Anwendung (Formel 9).

$$\int_a^b f(x) dx = Q(f) + E(f)$$

Formel 9

*f(x) = Integrand über dem Intervall [a, b]
Q(f) = Summe aus dem Wert Q(f) mittels Quadraturformel
E(f) = Fehler der Approximation*

Anhand der Messfrequenz des Beschleunigungssensors wurden pro Versuchssequenz im Mittel 300 Datensätze generiert. Diese Datensätze waren die Grundlage für die Quadratur, wobei zwischen den Integranden Trapezflächen gebildet wurden (Formel 10) [8, S. 165].

$$Q(f) = \sum_{i=1}^{300} \frac{h}{2} \times [f(x_i) + f(x_{i+1})]$$

Formel 10

*Q(f) = Summe aus dem Wert Q(f)
h = Breite der Subintervalle über der x-Achse
x_i = Funktionswerte der Subintervalle, wobei x₁ den Beginn und x₃₀₀₊₁ das Ende eines Messdurchgangs beschreibt*

Durch die Approximation der Geschwindigkeit so wie auch den Weg lässt sich zu jedem Zeitpunkt die Geschwindigkeit und Position des Modellwagens auf der Rampe bestimmen.

In den Abbildungen (54) ist die Ablauframpe, mit dem zu überprüfenden Bremssystem schematisch aufgeführt. Wird die Auslösevorrichtung an der Rampe aktiviert, beschleunigt der Modellwagen auf den ersten 2,095 m des Versuchsaufbaues. Danach rollt der Wagen auf die Bremse auf, deren Baulänge 3 m beträgt. Da jedoch der Modellwagen einen Achsabstand von 0,7 m aufweist, befinden sich beide Achsen des Wagens nur über eine Weglänge von 2,3 m auf dem Bremssystem. Am Ende der Wegstrecke befindet sich ein Bremschlitten, der durch Federkraft vorgespannt ist und den Wagen innerhalb von ca. 0,7 m zum Stillstand bringt.

Durch Abbildung (55) sind die Beschleunigungswerte des Modellwagens parallel zum Gleis während des Experimentes ersichtlich. Abbildung (56) zeigt die Geschwindigkeit des Modellwagens, diese wurde numerisch integriert. Durch nochmalige numerische Integration ist der Weg des Modellwagens in Abbildung (57) ersichtlich. Diese Versuchssequenz soll nur als ein anschauliches Beispiel zur Datengenerierung dienen, tatsächlich wurden etwa 60 solcher Ablaufversuche durchgeführt.

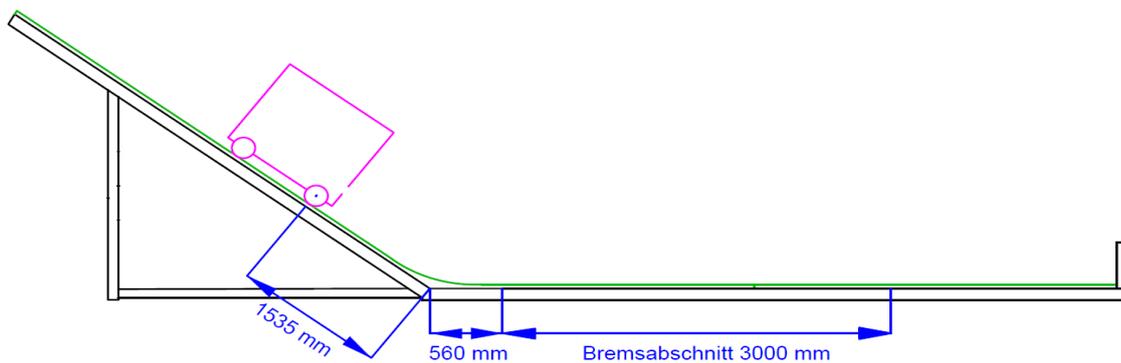


Abbildung 54: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus

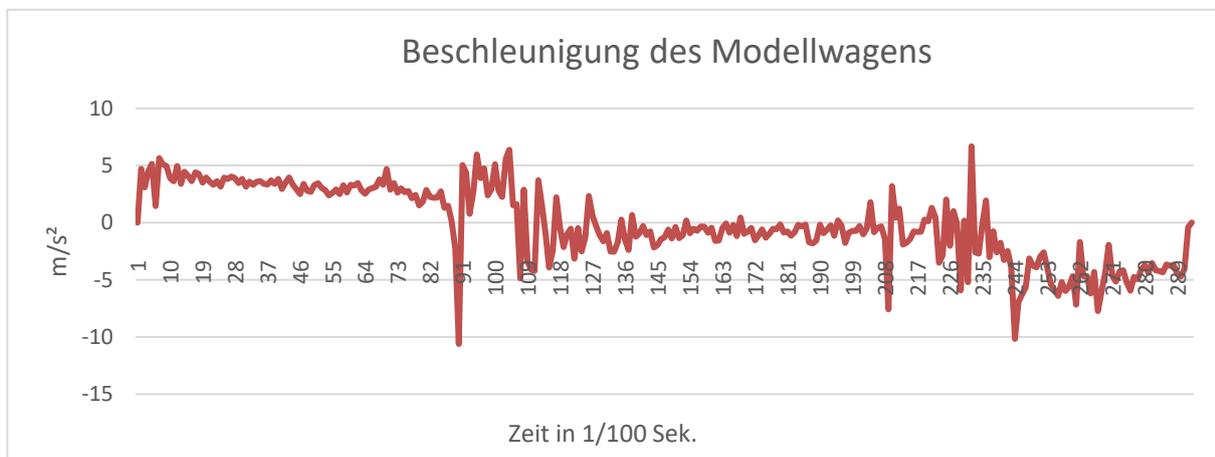


Abbildung 55: Aufgezeichnete Beschleunigung nach Zeit

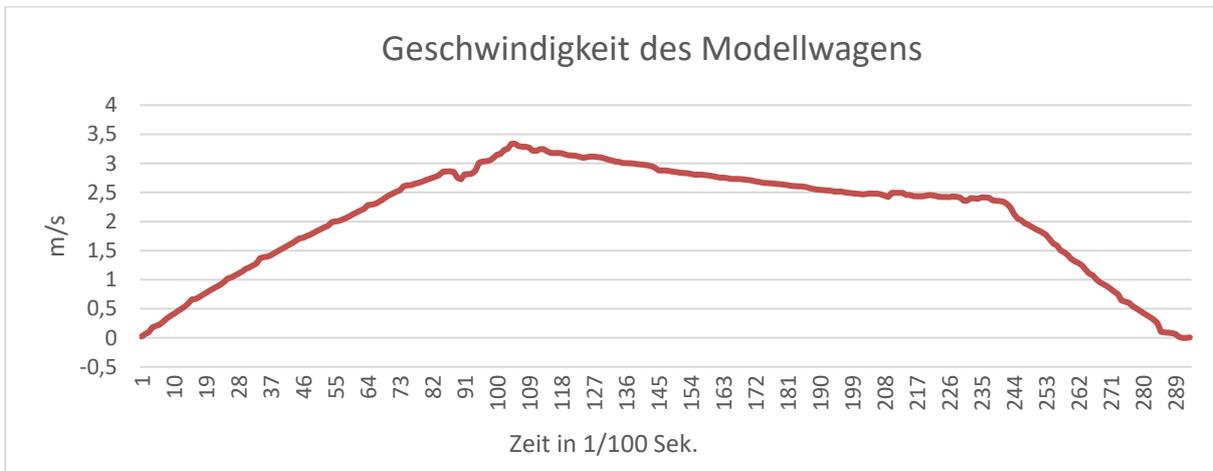


Abbildung 56: Erstes Integral der Beschleunigung nach Zeit

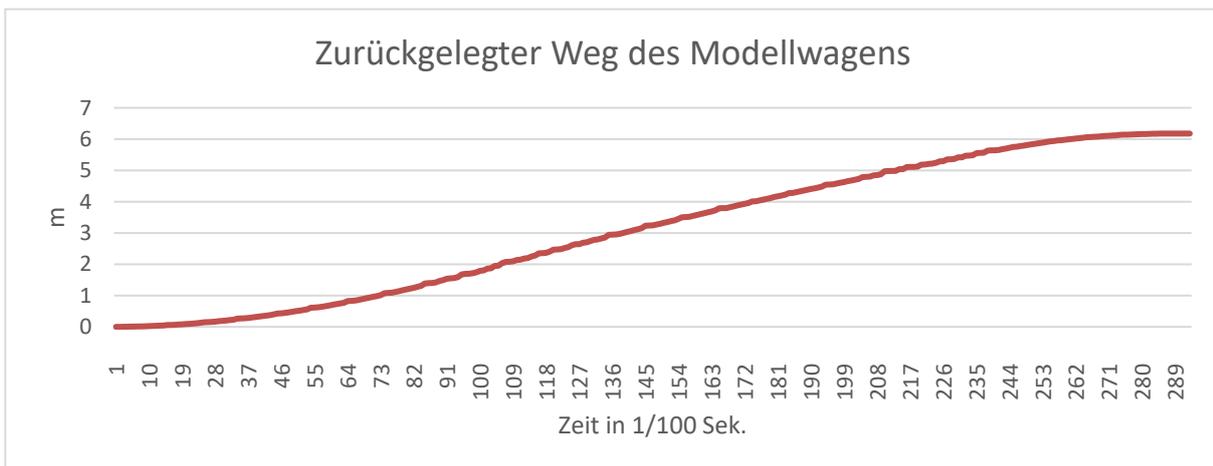


Abbildung 57: Zweites Integral der Beschleunigung nach Zeit

Werden die Abbildungen (54-57) von links nach rechts miteinander verglichen, so ist gut zu erkennen, dass der Modellwagen im ersten Drittel beschleunigt. Danach überrollt der Wagen die Ausrundung vom Übergang der Rampe zum waagrechten Abschnitt des Versuchsaufbaus, woraus die Beschleunigungssprünge um die Sekunde 1 resultieren. Im mittleren Bereich der Abbildungen befindet sich der Wagen am waagrechten Gleis, wo auch das Bremssystem überprüft wurde. Am Ende dieses Abschnittes, etwa bei Sekunde 2,25, läuft der Wagen auf den Bremsschlitten auf und wird zum Stillstand gebracht.

6.1.4.4.3. Die Versuchssequenzen

Eine Versuchssequenz beinhaltet einen Abrollvorgang an der Versuchsanlage, wobei Messdaten generiert wurden. Als Füllmedium für das Bremssystem kam Druckluft, Wasser oder

Glycerin zur Anwendung, dabei wurde nach jeder Sequenz der Druck im System um 0,2 bar gesteigert. Diese Sequenzen wurden bis 3 Bar durchgeführt, da die größte Bremswirkung in diesem Bereich auftrat. Des Weiteren kam es auch zur Durchführung von Abrollversuchen mit demontiertem Bremssystem, um die Energie der Verzögerung an der Gleisanlage selbst zu bestimmen.

6.1.4.4. Unerwartete Effekte während der Versuchssequenzen

Beim Überrollen des Bremssystems wurde der Flachschauchquerschnitt zur Hälfte eingedrückt, wodurch die Bremswirkung zu Stande kam. Die Führungsprofile, die den Schlauch in Position hielten, wurden so dimensioniert, dass eine feste Einspannung des Flachschauches gegen Verschiebungen gewährleistet war. Es wurde keine Verklebung des Schlauches mit den Führungsprofilen vorgenommen, was den Schlauch gegen Abheben sicherte. Diese Herangehensweise wird damit begründet, dass der Klebstoff tief in das Textilgewebe durch die Kapillarwirkung eindringt und so die Eigenschaften des Schlauches verändert, was wiederum zu unterschiedlichen Elastizitäten des Schlauchmantels führen würde.

Lief nun der Wagen im vorderen Bereich der Bremse mit der ersten Achse auf dem Flachschauch auf, kam es zu einem Torsionsmoment am Schlauch, welches sich durch eine leichte Verdrehung des Schlauches bemerkbar machte. Die Vermutung liegt nahe, dass dieses Moment durch das Zusammenwirken der leicht konischen Laufflächen der Räder mit dem Webmuster des Flachschauches entstand. Dieses Phänomen trat vermehrt bei Drücken über 1 bar auf. Obwohl diese Verdrehung relativ gering ausfiel, wurde dadurch auch der Schlauch vor der ersten Achse um bis zu 2 cm angehoben. Welchen Einfluss dieses Phänomen auf die Messergebnisse hat, ist gänzlich ungewiss.

6.1.4.4.5 Versuchsaufbau des Experimentes 2

Im Experiment 2 wurde die Bremsleistung mithilfe von Abrollversuchen festgestellt, der Versuchsaufbau ist den folgenden Abbildungen zu entnehmen. Des Weiteren ist auch die Benutzeroberfläche der verwendeten Smartphone APP ersichtlich, mit welcher die Beschleunigungsaufzeichnung am Wagen erfolgte.



Abbildung 58: Bremsabschnitt an der Ablauframpe



Abbildung 59: Druckausgleichsbehälter mit Ventil zur Bremsdrucksteuerung, montiert an der Ablauframpe



Abbildung 60: Bremschlitten an der Ablauframpe



Abbildung 61: Rad-Schlauch-Schienenkontakt am Bremssystem

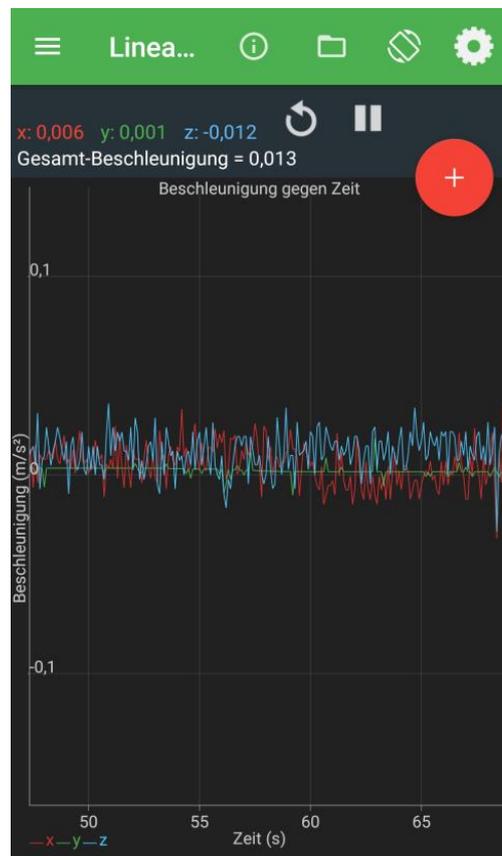


Abbildung 62: Aufzeichnung der Beschleunigung des Wagens mittels der APP Physics Toolbox Suite

6.1.4.4.5. Ermittelte Bremsleistung

Die Bremsleistung wurde durch das Delta der Geschwindigkeit, welches im Bremsabschnitt auftritt, berechnet (Formel 11). Es wurde ebenfalls die Bremsleistung des Gleises mit demontiertem Bremssystem bestimmt.

$$E_{kin} = \frac{m \times (v_a - v_e)^2}{2}$$

Formel 11

E_{kin} = kinetische Energie

m = Masse

v_a = Anfangsgeschwindigkeit

v_e = Endgeschwindigkeit

Aus Abbildung (63) ist die erbrachte Bremsenergie der Versuchssequenzen ersichtlich, wobei 2 m am Bremssystem betrachtet werden. Trotz größter Sorgfalt und Wiederholung der

Versuchssequenzen weisen die Messungen eine hohe Streuung bezüglich der gemessenen Bremsenergien zu den Drücken im Bremssystem auf. Durch Experiment 1 wurde festgestellt, dass sich der maximale Rollwiderstandskoeffizient im Bereich von 2 – 2,2 bar ausbildet, dies ist aus Experiment 2 nicht ersichtlich. Welche Einflussfaktoren zu diesen Streuungen führten, ist nicht bekannt. Die Vermutung liegt nahe, dass die gewählte Messmethode unzureichend ist und der Fehler der Approximation (Formel 9) signifikante Auswirkungen auf die Messergebnisse hat. Primär ist anzunehmen, dass die Messfrequenz des Beschleunigungssensors bzw. der Software mit 100 Hz zu gering ist, um die Integrale der Beschleunigung nach Zeit aus den unterschiedlichen Messsequenzen vergleichbar zu gestalten. Um eine höhere Messfrequenz zu erhalten, wurden Smartphones mit deutlich höherer Prozessorleistung getestet, jedoch konnte auch mit moderner Hardware die Messfrequenz nicht erhöht werden.

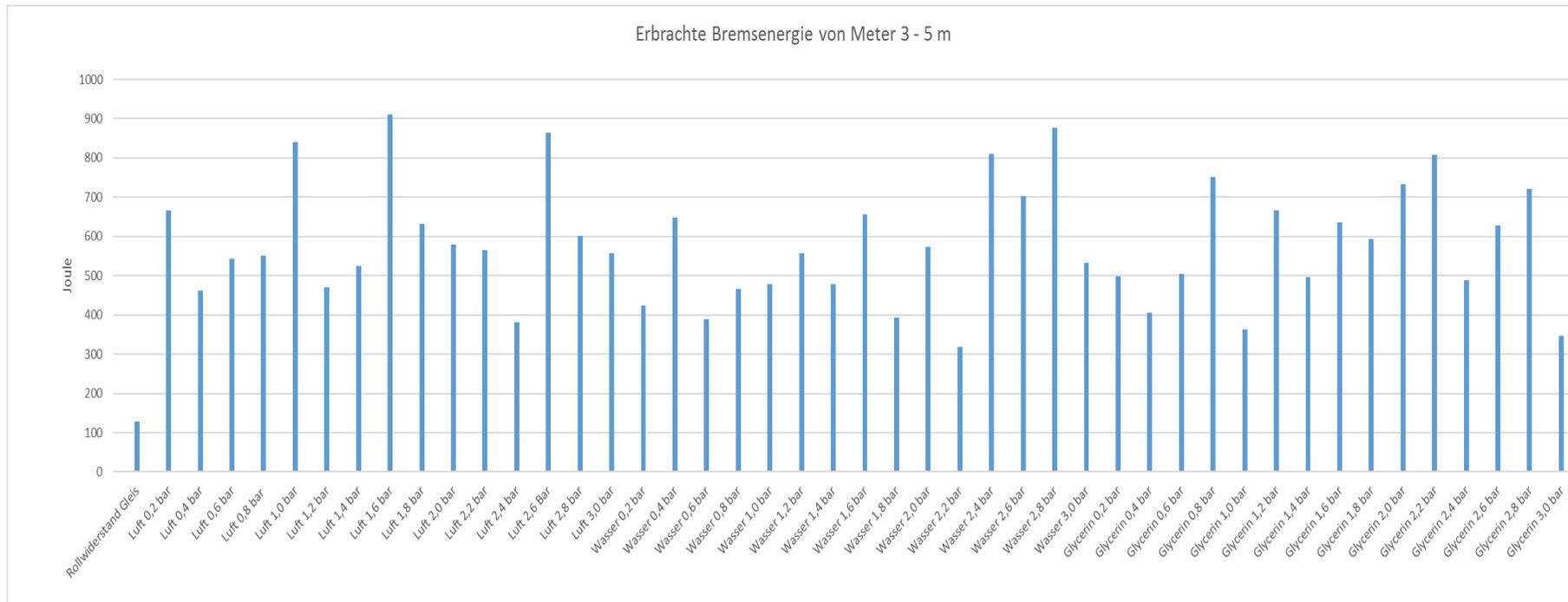


Abbildung 63: Erbrachte Bremsenergie der Abrollversuche

Obwohl die generierten Messergebnisse aus Experiment 2 aufgrund der hohen Streuungen sehr aussageschwach sind, soll eine Abschätzung zur Hypothese 2 getroffen werden. Diese Hypothese besagt, dass die Viskosität im Bremssystem einen Einfluss auf die Bremswirkung ausübt. Aus Experiment 2 ist kein signifikanter Beitrag der Viskosität (Luft, Wasser und Glycerin) auf die erbrachte Bremsenergie zu schließen, wodurch diese Annahme widerlegt wurde. Dennoch besteht die Möglichkeit, dass die Viskosität einen geringen Anteil zur Bremsung beiträgt, der unter der Auflösung der Messung liegt und nicht festgestellt werden kann.

Eine Erklärung für den vernachlässigbaren Einfluss der Viskosität auf das Bremsverhalten könnte sein, dass sich ein zu geringer Volumenstrom in den Ringleitungen gebildet hat. Infolgedessen sind auch die Energieverluste durch den Rohrreibungsbeiwert minimal. [9, S. 21]

6.1.4.4.6. Erkenntnisse des experimentellen Versuches

Ziel der beiden Experimente war es, das Zusammenwirken zwischen einem Rad und einem flüssigkeitsgestützten Untergrund, der in Form eines unter Druck stehenden Flachschauches simuliert wurde, besser zu verstehen. Hierfür wurden zwei Hypothesen entwickelt und überprüft.

Grundsätzlich hat sich keine der Hypothesen bestätigt, da sich der variable Rollwiderstand an den Experimenten nicht wie erwartet verhielt. Jedoch konnte mittels Experiment 1 ein beinahe linearer Zusammenhang zwischen dem Druck im Bremssystem und dem Rollwiderstandskoeffizienten nachgewiesen werden. Dadurch wurde auch bewiesen, dass sich mit einem solchen Bremssystem ein variabler, regelbarer Rollwiderstand realisieren lässt. Durch das zweite Experiment konnten keine gewichtigen Daten generiert werden, da sich die Messmethode als unzureichend erwies. Es liegt aber die Vermutung nahe, dass die Viskosität im Versuchsaufbau keinen nennenswerten Einfluss auf die Bremswirkung hat.

Im Versuchsaufbau (Experiment 1) wurde ein maximaler Rollwiderstandskoeffizient von $\mu = 0,053$ erreicht. Der Modellwagen hatte ein Gesamtgewicht von 210 kg, wodurch sich eine erzielbare Bremskraft von 111,3 N ergibt (Formel 2). Wird die Bremskraft in Energie pro Meter umgerechnet (Formel 12), so hat dies eine Bremsenergie von 111,3 J zur Folge.

$$W = F \times s$$

Formel 12

W = Energie

F = Kraft

s = Weg

Wird Experiment 1 (statischer Versuch) mit Experiment 2 (dynamischer Versuch) verglichen, so wurden, trotz der hohen Streuung der Messergebnisse aus Experiment 2, bei dem dynamischen Versuchen deutlich höhere Bremsenergien erzielt (im Mittel über die gesamten Versuchssequenzen ca. der zweifache Wert). Daraus lässt sich schließen, dass die Bremsenergie mit der Zunahme der Geschwindigkeit ansteigt.

Anhand der Versuche wurde festgestellt, dass ein wesentlicher Faktor für die Verzögerung der Bremse der Druck im Schlauchsystem ist. Ebenfalls wurde anhand der Messergebnisse abgeleitet, dass die Beschaffenheit des Schlauchmantels einen Einfluss auf die Bremswirkung haben muss. Jedoch gibt es weitere Parameter, die zur Bremsung beitragen, die anhand der Experimente nicht festzustellen waren (z.B. der Einfluss der Geschwindigkeit).

6.1.5. Projektion der Ergebnisse auf den Maßstab 1:1

Werden die Überlegungen des variablen Bremssystems auf einen Maßstab 1:1 projiziert, um den Anforderungen eines Rangierbahnhofes zu entsprechen, so weichen die geometrischen Radbedingungen des Versuchsaufbaus stark von den tatsächlichen Abmessungen von Schienenfahrzeugen und Gleisen ab. Es wurde versucht, Spurkranzräder für den Modellwagen in einer gleichwertigen Relation zu einem Güterwagenrad zu verwenden, doch solche Räder sind nicht am Markt verfügbar bzw. wäre eine teure Einzelanfertigung nötig. Deswegen kamen Spurkranzräder aus Industrieförderanlagen zur Anwendung, die jedoch in keinem identen Verhältnis zu Güterwagenrädern stehen. An erster Stelle sei hier der Laufkreisdurchmesser zu nennen, der im Faktor 5 zu einem Güterwagenrad (z.B. Typ 080 UIC, Laufkreisdurchmesser 870 – 923 mm) steht [10]. Wird die Laufflächenbreite eines Güterwagenrades betrachtet, wo die Bremsen ansetzen könnten, so steht hier eine Breite von ca. 80 – 100 mm zur Verfügung, je nach Radreifen bzw. Vollrad [11]. Dadurch ist hier der Faktor 2,5 gegeben, der das Modell in Relation zur tatsächlichen Größe stellt. Aus dem Verhältnis vom Laufkreisdurchmesser zur Laufflächenbreite der verwendeten Spurkranzräder ist somit kein identer Zusammenhang gegeben. Die Modellversuche wurden mit Achslasten von 105 kg durchgeführt, wobei in der Realität Achslasten von bis zu 22,5 t auftreten, dies entspricht in etwa dem Faktor 215. Allerdings ist dieser Faktor zu

vernachlässigen, denn wie in Formel (6) ersichtlich, ist die Gewichtskraft bei der Bestimmung des Rollwiderstandskoeffizienten irrelevant. Eine wesentliche Rolle hingegen nimmt die Gewichtskraft bei der Berücksichtigung der Haltbarkeit der Brems Elemente ein.

Durch diese unterschiedlichen Proportionalitäten erweist es sich als durchaus schwierig, Aussagen auf die Bremswirkung im Maßstab 1:1 zu tätigen. Wird nun angenommen, dass im Richtungsgleis zwei Retarder pro Meter Gleis angeordnet sind, kann von einer erbrachten Bremsenergie von 2 kJ/m ausgegangen werden (je Retarder 1 kJ). Dies entspricht nach Umstellung der Formel (12) einer Bremskraft von 2 kN. Mithilfe der benötigten Bremskraft kann nun der erforderliche Rollwiderstandskoeffizient berechnet werden (Formel 13).

$$\mu = \frac{F_W}{F_Q}$$

Formel 13

μ = Rollwiderstandskoeffizient

F_W = Rollwiderstand

F_Q = vertikale Gewichtskraft, die auf das Rad bzw. Untergrund wirkt

Unter der Annahme, dass ein vollbeladener Güterwagen mit einer Achslast von 22,5 t im Richtungsgleis abgebremst werden soll, ist mindestens ein Rollwiderstandskoeffizient von $\mu = 0,009$ nötig. Wird dieser Wert mit dem Rollwiderstandskoeffizienten des Rad-Schienenkontaktes verglichen ($\mu = 0,001 - 0,002$) [12, S. 14], muss der Rollwiderstandskoeffizient im Mittel um das Sechsfache angehoben werden. Im Zuge des Experimentes 1 war eine Erhöhung des Rollwiderstandskoeffizienten um ca. das Neunfache möglich. Somit scheint ein Bremssystem, welches im Versuch überprüft wurde, als durchaus realisierbar für die Anwendung im Richtungsgleis eines Ablaufberges.

Bei der Analyse der tatsächlichen Geometrie eines Güterwagenrades, wo die Breite des wirkenden Brems Elementes auf die Lauffläche mit ≤ 100 mm beschränkt ist, kann eine maximale „Einsinktiefe“ des Wagenrades in das Brems Element von 50 mm erzielt werden. Angenommen wird, dass das Brems Element, welches sich durch Druckbeaufschlagung an das Rad anschmiegt, einen halbrunden Querschnitt aufweist. Durch den Flachslauch (1“), der im Experiment Anwendung fand, konnten die Modellwagenräder 12,7 mm in den Schlauch „einsinken“. Erreicht wurde dabei ein maximaler Rollwiderstandskoeffizient von $\mu = 0,053$. Aus diesem Wert und dem Laufkreisdurchmesser des Modellwagens kann mit Formel (14) der Hebelarm der Rollreibung bestimmt werden.

$$f = \mu \times r$$

Formel 14

*f = Hebelarm der Rollreibung
 μ = Rollwiderstandskoeffizient
 r = Radius der Lauffläche*

Im Experiment 1 war ein maximaler Hebelarm der Rollreibung von 4,8 mm erreichbar. Die Vermutung liegt nahe, dass die Lage des Kippunktes, der durch den „Hebelarm der Rollreibung“ beschrieben wird, in Relation zur Kreissehne steht. Dabei beschreibt die Kreissehne jene Strecke, an der der Schlauch das Wagenrad berührt. Folglich ist die Kreissehne von der „Einsinktiefe“ im Schlauch so wie vom Laufkreisdurchmesser des Rades abhängig.

Wird nun die Lage des Kippunktes bzw. die Länge vom Hebelarm der Rollreibung in Relation zur Kreissehne beschrieben, bevor es zu einer vollständigen Aushebung des Wagens im Experiment kam, entspricht dies ca. 1/20 der Kreissehnenlänge. Unter der Voraussetzung, dass sich der Kippunkt bei einem Maßstab 1:1 ähnlich ausbildet wie im Experiment, kann der erzielbare Rollwiderstandskoeffizient mittels Formel (3) abgeschätzt werden. Durch diese Überlegung würde ein Güterwagenrad mit einem Durchmesser von 900 mm, welches 50 mm in das Bremssystem „einsinkt“, eine Kreissehnenlänge von 412 mm besitzen, die Länge des Hebelarms der Rollreibung würden 20,6 mm entsprechen. Infolgedessen errechnet sich aus diesen Randbedingungen ein Rollwiderstandskoeffizient von $\mu = 0,0458$. Dieser Wert liegt unterhalb des Rollwiderstandskoeffizienten, der im Versuch nachgewiesen werden konnte, denn die Relation vom Raddurchmesser zur Höhe der Kreissehne verringert sich bei der Projektion auf den Maßstab 1:1. Bei einer Achslast von 22,5 t hätte dies einen Rollwiderstand von 10,3 kN zufolge, womit auch ausreichend Bremskraft für eine Anwendung als Gefälleausgleichsbremse vorhanden ist (benötigte Bremskraft ca. 6 kN ~ entspricht in etwa 6 Dowty Retarder pro Meter). Die berechnete Bremswirkung ist jedoch nur dann zu erwarten, wenn alle anderen Parameter des Versuches eingehalten werden, wie z.B. die Beschaffenheit des Schlauchmantels. Des Weiteren beschreibt dieser Rollwiderstandskoeffizient nur den Widerstand bei sehr geringen Geschwindigkeiten, denn durch die Versuche kam es zur Feststellung, dass der Rollwiderstandskoeffizient mit der Geschwindigkeit zunimmt.

6.1.5.1. Verschleißfestigkeit des Schlauchsystems

In den Experimenten kam ein Flachschauch zur Überprüfung des Rollwiderstandes zur Anwendung. Das Material, aus dem der Schlauch gefertigt ist, ist gänzlich ungeeignet für den

Einsatz am Rangierbahnhof, denn es kam bereits bei den Abrollversuchen zu deutlichen Verschleißerscheinungen (Abbildung 64).

Ein möglicher Ansatz könnte sein, ähnliche Materialien wie in der Reifenindustrie zu verwenden, da die Laufflächen von Kraftfahrzeugrädern einen hohen Widerstand gegen Verschleiß aufweisen. Eine weitere Eigenschaft müsste sein, dass sich das Material dehnen kann, denn wird das Bremssystem unter Druck gesetzt, muss sich das Bremssegment bzw. der Gummi an das Rad anschmiegen. Um Kraftfahrzeugreifen widerstandsfähiger gegen äußere Einflüsse zu gestalten, besitzen moderne Reifen Stahlgürtel bzw. Verstärkungen aus Synthetikfasern [13, S. 5]. Diese Einlagen unterbinden jedoch die Dehnung, die für die Anwendung im Bremssystem nötig wäre.

Demzufolge ist es unabdingbar, bei einer Einführung eines solchen Bremssystems ein dauerhaftes Material zu entwickeln, das ausreichend Widerstand gegen die speziellen Belastungen aufweist.



Abbildung 64: Verschleißerscheinungen am Flachschauch

6.1.5.2. Auswirkungen auf die Bremsleistung durch Veränderung des Schlauchsystems

Wie bereits erwähnt, trägt die Walkarbeit im Schlauchmantel zur Bremswirkung bei. Es ist auch naheliegend, dass die Steifigkeit des Mantels einen Einfluss auf die Lage des Kippunktes haben wird. Folglich ist unter Verwendung eines anderen Materials eine ungleiche Bremswirkung zu erwarten.

Es ist anzunehmen, dass sich bei der Zunahme der Dicke des Schlauchmantels die Bremswirkung vergrößert, denn die Fläche der inneren Spannungen erhöht sich. Dies hat höhere Verformungen im Material zufolge, wodurch auch die innere Reibung ansteigt. Elastische Materialien besitzen eine hohe innere Energiedissipation, dementsprechend wird kinetische Energie in Wärme transformiert, was sich positiv auf die Bremsleistung auswirkt [14, S. 213]. Dieses Wirkprinzip findet auch an der Gummigleisbremse Anwendung.

Durch die günstige Wirkung von elastischen Materialien in Bezug auf die Bremsleistung des vorgestellten Systems kann durch die Wahl der Materialstärke die Bremskraft gestaltet werden. Folglich könnte die Bremsenergie eines solchen Systems deutlich höher liegen, als prognostiziert.

Jedoch ist es äußerst schwierig, die mögliche Bremsenergie aus den Dehnungen im Elastomer zu bestimmen. Elastomere bestehen aus Polymermolekülen, die im Ruhezustand kaum mit den benachbarten Molekülen wechselwirken, obwohl sie untereinander verwoben sind. Wird nun ein Elastomer unter Spannung gesetzt, beginnen sich die Polymermoleküle zu entflechten, wobei nur selten lineare mechanische Zusammenhänge auftreten [14, S. 213]. Aufgrund dieser Komplexität werden solche Berechnungen mithilfe der numerischen Mathematik und spezieller Software durchgeführt.

Die Bestimmung der Energiedissipationen in Elastomeren gestaltet sich als äußerst aufwändig, weshalb die Bremswirkung von Elastomeren nicht weiterverfolgt wurde.

Generell ist zu empfehlen, vor der Umsetzung eines solchen Bremssystems Versuche im Maßstab 1:1 durchzuführen. Durch das diffizile Zusammenwirken von Rad, Mantel und Stützmedium ist es nicht auszuschließen, dass bei der Skalierung auf die Originalgröße Faktoren auftreten, die in den Experimenten nicht zu erkennen waren.

6.1.6. Zu berücksichtigende Faktoren bei der Installation des Bremssystems an einem Rangierbahnhof

Damit das vorgestellte Bremssystem einwandfrei an einem Ablaufberg eingesetzt werden kann, müssen die Achslasten so wie die Raddurchmesser der ablaufenden Wagen bekannt sein, denn nur so ist es möglich, die Bremsleistung optimal den Umständen anzupassen. Gegenwärtig liegen Informationen über Achslasten und Wagentyp an vielen Ablaufanlagen vor (z.B. Zvbf. Wien). Diese Daten müssen mit dem Steuerungssystem der Bremsanlage verknüpft werden, damit die Drücke im Bremssystem bei leichten Wagen beschränkt und bei schweren Wagen erhöht werden.

6.1.6.1. Druckbegrenzung der Bremse

Das Bremssystem basiert darauf, dass die Bremsen Elemente einen Teil der Lastabtragung an den Laufflächen der Räder übernehmen und somit den Rollwiderstand variabel gestalten. Umgesetzt wird die Lastabtragung mit Bremsen Elementen, die sich unter Druckbeaufschlagung an die Wagenräder anschmiegen (Abbildung 48 und 49). Würde nun bei allen Wagen derselbe Druck im Bremssystem wirken, hätte dies zufolge, dass Wagen mit geringen Achslasten angehoben werden. Jedoch ergibt sich durch das Anheben der Radsätze ein nicht zu vernachlässigendes Problem. Am Bremssystem erfolgt die Spurführung der Güterwagen durch ein Stahlprofil, welches auf die Innenkante des Spurkranzes wirkt. Wird nun der Radsatz angehoben, kann der Spurkranz auf das Führungsprofil aufklettern, wodurch es im schlimmsten Fall zu einer Entgleisung kommen könnte. Eine Möglichkeit, um einer Entgleisung entgegenzuwirken, wäre die Erhöhung des Führungsprofils, womit ein Aufklettern des Spurkranzes auszuschließen ist.

Durch das Anheben der Radsätze kommt es jedoch auch zu einer Verringerung des Rollwiderstandes und somit der Bremsleistung (Experiment 1), folglich muss der Druck begrenzt werden, sobald die maximale Bremswirkung erreicht ist.

Zu beachten ist, dass Drücke in Gasen oder Flüssigkeiten nur Normalkräfte übertragen können, wodurch beim Zusammenwirken des Wagenrades und des unter Druck stehenden Bremsen Elementes alle Druckvektoren auf den Mittelpunkt des Rades wirken (Abbildung 65) [15, S. C82]. Demzufolge wirkt nur der vertikale Anteil (Sinuskomponente) der Druckvektoren über den Kreisbogen, die das Wagenrad anheben.

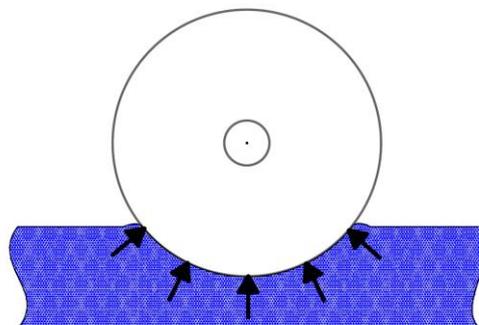


Abbildung 65: Projektion des Druckes auf das Wagenrad (eigene Darstellung)

Unter der Annahme, dass das Bremsen Element einen halbrunden Querschnitt mit dem Radius von 50 mm aufweist, wird sich eine beinahe elliptische Berührungsfläche am Kreisbogen

einstellen, wo das Rad das Bremsselement berührt. Da jedoch nur die Vertikalkomponente der Kraftvektoren eine Anhebung am Rad verursachen, wird die effektive Länge der Ellipse, auf welcher der Druck wirkt, eine Hauptachse aufweisen, die der Länge der Kreissehne des Rades entspricht, wo das Rad in das Bremsselement „eintaucht“. Die Nebenachse der Ellipse wird wiederum mit der Breite des Bremsselementes übereinstimmen. Da nun die Fläche bekannt ist, auf welcher der Bremsdruck vertikal auf das Rad wirkt, kann auch der Druck berechnet werden, ab wann das Rad ausgehoben wird.

Die Fläche einer Ellipse lässt sich wie folgt bestimmen (Formel 15), wobei die Hauptachse vom Raddurchmesser und von der „Einsinktiefe“ (50 mm) im Bremsselement abhängig ist. Die Nebenachse besitzt eine Länge, die der Laufflächenbreite von 100 mm entspricht.

$$A = a \times b \times \pi$$

Formel 15

a = Halbe Hauptachse
b = Halbe Nebenachse

Da Güterwagen unterschiedliche Raddurchmesser besitzen, kommt es beim Kontakt von Rad und Bremsselement zu differierenden Flächen. Je größer diese Kontaktfläche ist, desto höhere Kräfte können durch den Druck im Bremssystem auf den Wagen übertragen werden. Mittels Formel (16) soll diese Kraft pro Rad berechnet werden, die durch den Druck im Bremssystem hervorgerufen wird.

$$F = A \times p = a \times b \times \pi \times p = \frac{2\sqrt{2 \times r \times h - h^2}}{2} \times \frac{B}{2} \times \pi \times p$$

Formel 16

F = Kraft, die auf das Rad wirkt
A = Projizierte Fläche vom Kontakt Rad-Bremsselement
p = Druck im Bremssystem
a = Halbe Hauptachse der Ellipse
b = Halbe Nebenachse der Ellipse
r = Radius des Rades
h = „Einsinktiefe“ des Rades in das Elastomer
B = Breite des Bremsselementes

Anhand der Formel (16) und den bekannten Achslasten, die an einem Rangierbahnhof auftreten, soll der maximale Druck im Bremssystem bestimmt werden, bevor es zu einem Ausheben der Radsätze kommt. Abbildung (66) setzt die Achslasten zu den Raddurchmessern in Relation, hieraus ist ersichtlich, ab welchem Druck die Radsätze

angehoben werden. Des Weiteren ist kurz vor der Druckstufe, bei der es zur Anhebung kommt, die größte Bremsleistung zu erwarten. Dementsprechend kann aus Abbildung (66) entnommen werden, dass der Betriebsdruck des vorgestellten Bremssystems zwischen ca. 8 – 50 bar liegt.

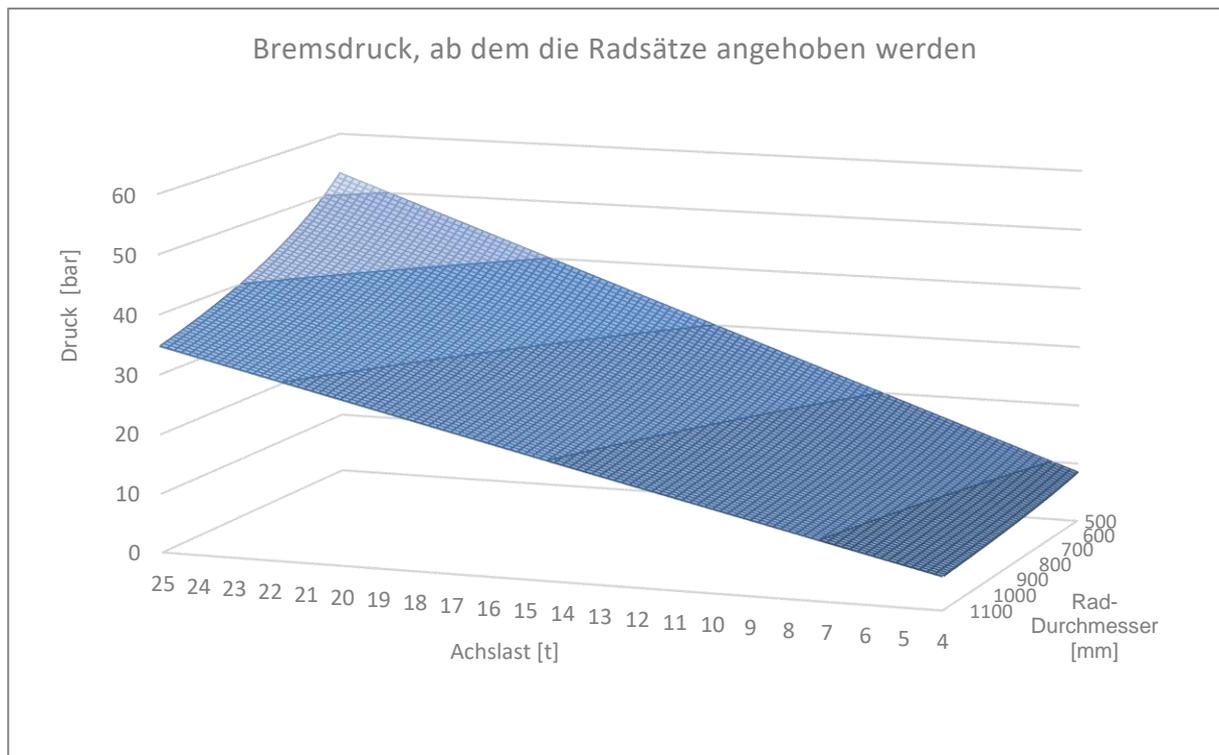


Abbildung 66: Gegenüberstellung der Achslasten zu den Raddurchmessern, ab welchem Druck die Radsätze angehoben werden

6.1.6.2. Unterteilung in Bremssektionen

Bei der Bremsung wird den Güterwagen ein individueller Bremsdruck durch das System bereitgestellt, daraus folgt, dass sich nicht zwei unterschiedliche Wagentypen gleichzeitig am Bremssystem befinden dürfen. Deshalb muss das Bremssystem in Sektionen unterteilt werden, wobei die Länge der Bremse auf den kürzesten Wagenabstand, der im Ablaufprozess auftritt, beschränkt ist. Somit ist sichergestellt, dass der vorlaufende Güterwagen bereits die Bremse verlassen hat, wenn der nachlaufende Güterwagen auf die Bremse auffährt (Kaskadenanordnung). Zudem muss auch die Zeit beachtet werden, die das Bremssystem benötigt, um den Bremsdruck für den nachlaufenden Wagen anzupassen.

6.1.6.3. Druckregelung des Bremssystems

Prinzipiell hängt die Art der Druckregelung vom Medium im Bremssystem ab. In den Experimenten konnte nachgewiesen werden, dass es durch Druckluft bzw. Flüssigkeiten zu keinen Unterschieden bezüglich der Bremsleistung kam. Dadurch bietet sich die pneumatische Variante als ökonomische Lösung an. Jedoch sind Pneumatik-Systeme für die erforderlichen Betriebsdrücke von 8 – 50 bar eher ungeeignet. Ein weiteres Problem könnte dadurch entstehen, dass die Druckluft im Bremssystem eine unzureichende Wärmeabfuhr der Bremsenlemente gewährleistet. Durch die Walkarbeit, die bei der Überrollung des Bremsenlementes erfolgt, ist anzunehmen, dass sich dieses bei einem hohen Wagendurchsatz stark erwärmen wird. Dadurch wird eine Abfuhr der Wärmeenergie benötigt, was sich gut durch Flüssigkeiten realisieren lässt.

Anhand der Randbedingungen scheint ein hydraulisches System wesentlich besser geeignet, dieses wird auch in den anschließenden Überlegungen in Betracht gezogen. In den Experimenten wurde das Bremssystem als Ringleitung konzipiert, prognostiziert war, dass sich ein Flüssigkeitsstrom in der Ringleitung ausbilden wird, da das Rad die Flüssigkeitssäule in Bewegung setzt. Jedoch konnte ein solcher Strom durch das Experiment nicht nachgewiesen werden. Anzunehmen ist, dass die Flüssigkeit im Bremsenlement direkt durch den reduzierten Schlauchquerschnitt, hervorgerufen durch das Wagenrad, in den hinteren Bereich geströmt ist. Demzufolge wird ein Ringleitungssystem bei der Anwendung am Ablaufberg redundant, denn durch den Querschnitt des Bremsenlementes kann ebenfalls ein Druckausgleich realisiert werden.

Im Experiment wurde die Druckregelung mittels eines Ausgleichsbehälters umgesetzt, wo ein Luftpolster auf die Flüssigkeit wirkte. Dieses Luftpolster wurde mittels Kompressor bzw. Fahrradpumpe unter Druck gesetzt, wodurch sich ein identer Druck im gesamten Bremssystem einstellte.

In die Praxis umgesetzt, wird sich dieses System nur mit speziellen Kompressoren bzw. Druckübersetzern realisieren lassen, denn die benötigten Betriebsdrücke erreichen bis zu 50 bar (Abbildung 66). Günstiger erscheint die Druckgenerierung mittels konventionellen Hydraulikpumpen, wobei das Hydrauliksystem an einen Druckspeicher gekoppelt werden kann, damit die Pumpe nicht während des gesamten Ablaufprozesses fördern muss.

Das benötigte Hydrauliksystem, in der einfachsten Ausführung, wird in Abbildung (67) visualisiert, wobei die Bremsenlemente in Form von Schläuchen dargestellt sind. Bei diesem Hydrauliksystem wurde nicht beachtet, dass durch die Güterwagenräder Druckstöße im

Hydrauliksystem entstehen. Können diese Druckstöße nicht von den Bremsen absorbieren, ist ein weiterer Druckspeicher notwendig, der diese Stöße nach dem Steuerventil absorbiert.

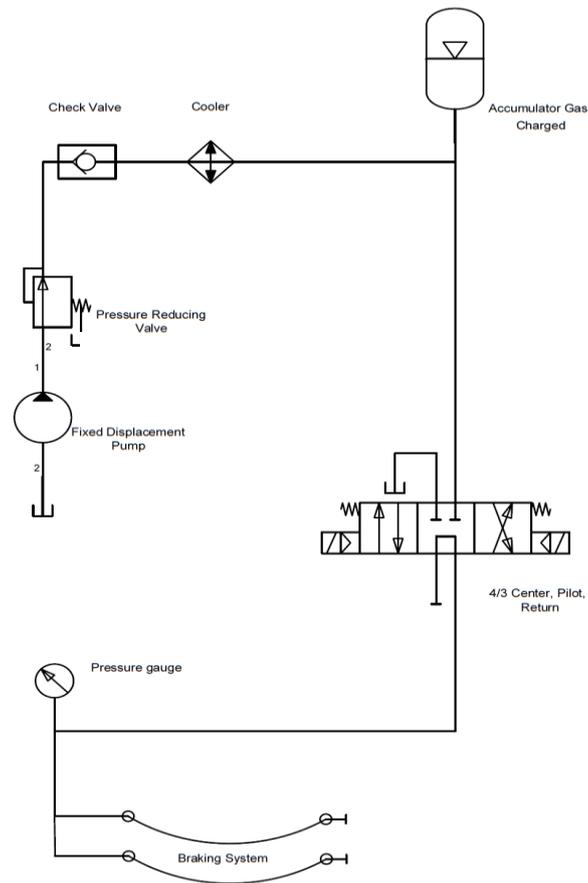


Abbildung 67: Hydraulische Ansteuerung des Bremssystems (eigene Darstellung)

6.1.7. Weiterführende Einflussfaktoren

In diesem Kapitel sollen weitere Faktoren Beachtung finden, die bei der Umsetzung des vorgestellten Bremssystems am Rangierbahnhof von Bedeutung sind. Teilweise müssen auch noch Lösungsansätze für manche Problemstellungen gefunden werden.

6.1.7.1. Verschleiß des Spurkranzes

Ist das Bremssystem inaktiv bzw. es wird keine Bremsung des Güterwagens benötigt, wird die gesamte Achslast über den Spurkranz der Räder abgetragen. Dadurch ist ein entsprechender Verschleiß in Form von Überwälzungen am Spurkranz zu erwarten, wenn

dieser in einem Führungsprofil aus Stahl rollt. Um dem entgegenzuwirken, könnten z.B. Einlagen aus Buntmetallen in den Führungsprofilen Verwendung finden.

6.1.7.2. Verschmutzungen am Bremsselement

Durch Ladungsverluste der Güterwagen kann es zur Verschmutzung der Bremsselemente kommen. Als Beispiel soll angenommen werden, dass Kies auf den Bremsselementen verloren wurde. Erfolgt nun eine Bremsung, wird der Kies zwischen den Wagenrädern und den Bremsselementen eingeklemmt. Da die Bremsdrücke 50 Bar erreichen, hat dies eine Flächenpressung von 500 N/cm^2 zur Folge. Durch diese hohen Kräfte in Verbindung mit kantigen Objekten (z.B. Kies) könnten die Bremsselemente beschädigt werden. Inwiefern sich elastische Bremsselemente mit ausreichend Widerstand gegen diese Einflüsse herstellen lassen, ist fraglich.

6.1.7.3. Füllmedium für das Bremssystem

Die Hydraulikflüssigkeit sollte so gewählt werden, dass bei einem Leck im Hydrauliksystem keine Umweltschäden auftreten. Eine Lösung hierfür könnte der Einsatz von biologisch abbaubaren Hydraulikflüssigkeiten sein. Obwohl diese Hydraulikflüssigkeiten umweltfreundlicher als Mineralöle sind, ist zu beachten, dass bei einem Ölunfall dieselben Maßnahmen zu treffen sind wie bei Mineralölen [16].

6.1.7.4. Wagengruppen im Ablaufprozess

Das Bremssystem erreicht die maximale Bremswirkung, kurz bevor die Achsen der Wagen angehoben werden, dadurch müssen die Drücke den Achslasten angepasst werden. Damit sich nicht zwei unterschiedliche Wagen am Bremssystem befinden, ist eine Kaskade von Bremsabschnitten erforderlich. Eine solche Anordnung wird bei Einzelwagen funktionieren und bei Wagengruppen, die idente Achslasten aufweisen. Probleme ergeben sich bei Wagengruppen mit ungleichen Achslasten (z.B. erster Wagen beladen, zweiter Wagen leer), die sich in der gleichen Bremssektion befinden. Daraus folgt, dass, wird nun der Druck im System für die Bremsung des leichten Wagens angepasst, eine unzureichende Geschwindigkeitsreduktion der gesamten Wagengruppe stattfindet, da der schwere Wagen nicht den erforderlichen Bremsdruck erfährt. Wird jedoch der Druck für den schweren Wagen optimiert, kommt es zum Aushub der Achsen des leichten Güterwagens, wodurch nun der leichtere Wagen unzureichend verzögert wird.

Dementsprechend ist die Summe der Bremsleistung an einer Wagengruppe mit ungleichen Achslasten geringer als bei Einzelwagen, bei denen der Bremsdruck optimal auf die Achslast abgestimmt wird. Ein Lösungsansatz könnte das Verbot von Wagengruppen mit unterschiedlichen Achslasten am Ablaufberg sein, jedoch würde dies einen Mehraufwand bezüglich der Manipulation (Entkuppeln u. Kuppeln) von Züge bedeuten. Ein anderer Ansatz könnte sein, dass die Bremsanlage überdimensioniert wird (höhere Anzahl von Bremssektionen), damit eine ausreichende Bremswirkung für Wagengruppen mit ungleichen Achslasten zu erzielen ist. Da keine der beiden Lösungen wirtschaftlich vertretbar erscheint, muss für dieses spezielle Problem noch eine Antwort gefunden werden.

6.1.8. Zusammenfassung

Im Zuge dieses Teils wurde ein alternatives lärmarmes Bremssystem, welches auf dem Prinzip des variablen Rollwiderstands basiert vorgestellt. Dieses Bremssystem soll gegenwärtigen so wie zukünftigen Umweltauflagen bezüglich Lärmemissionen entsprechen.

Der variable Rollwiderstand wird dadurch umgesetzt, dass im Bereich der Bremsstrecke im Fall einer Bremsung elastische Gummielemente einen Teil der Lastabtragung der Güterwagen übernehmen. Durch das Anschmiegen von elastischen Elementen an die Laufflächen der Räder wird der Rollwiderstand erhöht und der Wagen verzögert. Die Bremsselemente sind hohl ausgeführt, wodurch es ermöglicht ist, diese individuell mittels Hydraulik anzusteuern. Dieses System lässt eine variable Regelung der Bremswirkung durch die hydraulische Ansteuerung zu, somit können die Güterwagen je nach Erfordernissen gebremst werden bzw. ist die Bremswirkung in inaktiver Stellung auf den Rad-Schienenkontakt reduziert. Durch Experimente im Maßstab einer Grubenbahn wurde die Umsetzung eines solchen Systems erprobt und die erzielbaren Bremsenergien bestimmt. Werden die Messergebnisse auf die Normalspur projiziert, so ist zu erwarten, dass ein solches System Bremsenergien von ca. 10 kJ pro Meter und Achse (22,5 t) aufbringt. Für diese Bremsleistung sind Betriebsdrücke in den Bremsselementen von ca. 50 bar nötig. Im Vergleich zur Kleinkolbenbremse sind zur Generierung einer identen Bremsenergie in etwa 10 Kleinkolbenbremsen (1 kJ je Kleinkolben) pro Meter Gleis erforderlich. Demzufolge kann das alternative Bremssystem die Kleinkolbenbremse ersetzen.

Trotz der positiven Ergebnisse, die aus den Experiment gewonnen wurden, kam es auch zu offenen Fragen bezüglich eines solchen Bremssystems. Im Experiment wurden die elastischen Bremsselemente mittels Flachschräume simuliert, wobei bereits

Verschleißerscheinungen durch die moderaten Achslasten des Modellwagens von 105 kg auftraten. Folglich sind enorme Belastungen der Bremsen durch Achslasten von 22,5 t zu erwarten, wodurch erst geeignete Materialien für diese speziellen Einwirkungen zu entwickeln sind. Es ist zu erwarten, dass bei einer Veränderung der Bremsen auch die Bremsleistung beeinflusst wird, wodurch die tatsächliche Bremswirkung ungleich der prognostizierten Bremswirkung anhand des Modells ausfallen wird. Eine weitere Problematik kann durch die Skalierung des Bremssystems auf den Originalmaßstab entstehen, denn möglicherweise treten hierbei Faktoren auf, welche durch die Experimente nicht erkannt wurden.

Abschließend ist anzumerken, dass es unumgänglich ist, ein Modell im Maßstab 1:1 anzufertigen und Versuche durchzuführen, um die unbekannteten Einflussfaktoren erkennen zu können.

6.1.9. Quellenverzeichnis

[1] K.-H. Grote und J. Feldhusen, *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer-Verlag, 2014.

[2] „Technische Mechanik I. Statik|Digital Textbook Library“. [Online]. Verfügbar unter: http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop412A/2011-0054_technische_mechanik_i_statik/ch17s03.html. [Zugegriffen: 14-Mai-2018].

[3] H. Watter, *Hydraulik und Pneumatik: Grundlagen und Übungen - Anwendungen und Simulation*. Springer-Verlag, 2017.

[4] W. Matschinsky, *Radführungen der Straßenfahrzeuge: Kinematik, Elasto-Kinematik und Konstruktion*. Springer-Verlag, 2007.

[5] T. Fischer und H. J. Dorn, *Physikalische Formeln und Daten*. Stuttgart: Klett, 1982.

[6] Bürkle GmbH, Hrsg., „Übersicht Viskosität diverser Stoffe“, 2011.

[7] „Viskosität - Lexikon der Physik“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/viskositaet/15282>. [Zugegriffen: 27-Feb-2018].

- [8] H. Sormann, TU-Graz, Vorlesungsunterlagen numerische Physik, „Kapitel 6 - Numerische Integration“
- [9] C. Lang und N. Stache, Kalsruher Institut für Technologie, „Hydraulik von Rohrsystemen“, April 2010.
- [10] „Webshop für Eisenbahnersatzteile der Waggonwerk Brühl GmbH - Güterwagen Radsatz Bauart 080 UIC“. [Online]. Verfügbar unter:
<http://www.wagonspares.com/Radsaetze-VTG/Gueterwagen-Radsatz-Bauart-080-UIC.html>.
[Zugegriffen: 01-Juli-2018].
- [11] „RIS - Eisenbahnbau- und -betriebsverordnung Anl. 2 - Bundesrecht konsolidiert“. [Online]. Verfügbar unter:
<http://www.ris.bka.gv.at/Dokument.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Dokumentnummer=NOR40102560>. [Zugegriffen: 01-Juli-2018].
- [12] T. Schütz, *Fahrzeugaerodynamik: Basiswissen für das Studium*. Springer, 2016.
- [13] G. Leister, *Fahrzeugreifen und Fahrwerkentwicklung: Strategie, Methoden, Tools*. Springer-Verlag, 2009.
- [14] V. L. Popov, M. Heß, und E. Willert, *Handbuch der Kontaktmechanik: Exakte Lösungen axialsymmetrischer Kontaktprobleme*. Springer-Verlag, 2018.
- [15] A. Böge, *Vieweg Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. Springer-Verlag, 2008.
- [16] „Schmierstofftechnik - Hydraulikflüssigkeiten, Castrol Österreich“. [Online]. Verfügbar unter: https://www.castrol.com/de_at/austria/services/schmierstofftechnik-uebersicht/schmierstofftechnik-hydraulikfluessigkeiten.html. [Zugegriffen: 05-Juli-2018].

6.2. Variante 2 - Variabler Rollwiderstand

Variante 2 – Umsetzung eines variablen Rollwiderstands mittels Einsatz von dielektrischen Elastomere (DE) oder magnetorheologischen Elastomeren (MRE).

6.2.1. Anwendung

Grundsätzlich basiert die Variante 2 auf demselben Wirkprinzip wie Variante 1, jedoch wird anstatt eines pneumatischen bzw. hydraulischen Systems zur Generierung des Rollwiderstandes, „smart materials“ auf dessen Anwendbarkeit überprüft.

6.2.2. Dielektrische Elastomere (DE)

Bei DE handelt es sich um Materialien, die unter Einwirkung von elektrischer Spannung ihre Form reversibel verändern. Ein DE ist im Wesentlichen aufgebaut wie ein Kondensator, dies bedeutet, dass an den Außenseiten des Elastomers Flächenelektrode situiert sind und das Elastomer als Dielektrikum wirkt. Durch diese Bauweise wirkt die Colomb-Kraft auf das Elastomer, die wiederum vom Potenzialunterschied der Elektroden abhängig ist. Werden nun die Elektroden unter Spannung gesetzt erfolgt eine Komprimierung des Elastomers in der Raumachse der Elektroden. Da es sich bei dem Dielektrikum um ein elastisches Bauteil handelt, erfolgt eine Ausdehnung des Elastomers in den restlichen beiden Raumachsen (Abbildung 68).[1]

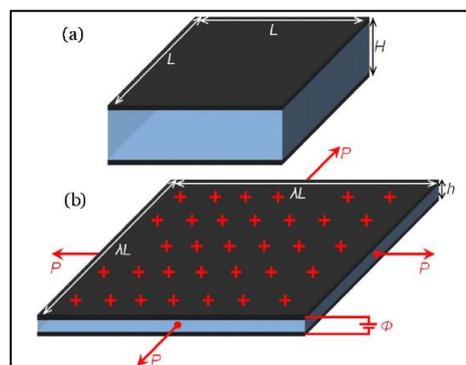


Abbildung 68: Funktion eines dielektrischen Elastomers[2]

6.2.3. Magnetorheologische Elastomere (MRE)

Ein MRE besitzt ähnliche Eigenschaften wie ein DE, wobei sich eine reversible Formänderung durch die Einwirkung eines Magnetfeldes einstellt. Ein MRE besteht aus einem Elastomer in dem sich feine magnetische Partikel befinden. Wird nun diese Matrix von Feldlinien durchströmt ändert sich die Ausrichtung der Partikel und eine Verformung des MRE findet statt.[3] Abbildung (69) zeigt die Funktion des magnetorheologischen Effektes anhand eines Plastomers.

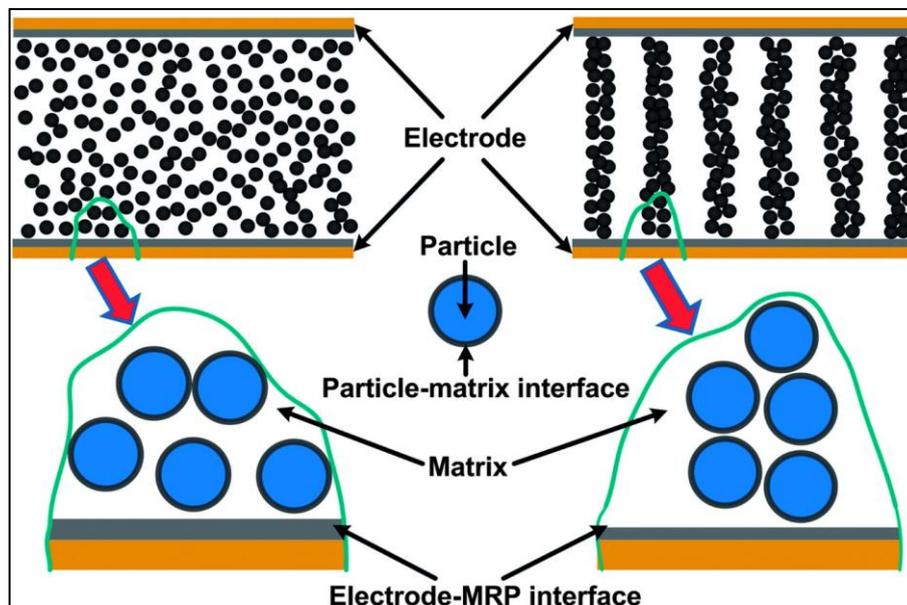


Abbildung 69: Funktionsweise eines magnetorheologischen Plastomers (MRP).[4]

6.2.4. Anordnung der Brems Elemente im Gleis

Angedacht ist, dass sich die DE- bzw. MRE- Brems Elemente wie bei konventionellen Ablaufanlagen zwischen dem Rollberg und dem Richtungsgleis befinden. Außerhalb des Bremsabschnittes laufen die Radsätze der Güterwagen auf regulären Vignolschienen. Im Bremsabschnitt wird die Lastabtragung, so wie die Seitenführung der Radsätze von L-förmigen Schienen übernommen (Abbildung 70 u.71, violette Element). Da nur der Spurkranz bei dieser Anordnung zur Lastabtragung benutzt wird, können nun die Brems Elemente (Abbildung 70 u. 71, rotes Element) auf die gesamte Laufflächenbreite einwirken. Infolgedessen wird die Flächenpressung der Elastomere reduziert, dies wirkt sich wiederum positiv auf die Lebensdauer der elastischen Elemente aus.

6.2.5. Die Bremsung

Bewegt sich der Güterwagen im Ablaufprozess mit einer geringen Geschwindigkeit talwärts und es ist keine Bremsung erforderlich (Abbildung 70), ist das DE bzw. MRE spannungslos. Folglich findet keine Verformung an den Elastomeren statt und die Lauffläche des Rades bewegt sich über die Bremsselemente hinweg. Dementsprechend reduziert sich der Rollwiderstand auf den Kontakt von Spurkranz und Führungsschiene.

Ist eine Bremsung nötig, so wird in den Elastomeren eine Verformung angeregt, dies erfolgt durch eine elektrische Spannung oder einem Magnetfeld, dadurch dehnt sich das Elastomer Richtung der Lauffläche des Rades aus (Abbildung 71, rotes Element). Diese Dehnung ist regelbar, somit kann durch Erhöhung der Dehnung die Bremsleistung steigen bzw. durch Reduktion der Dehnung die Bremsleistung sinken. Die Bremskraft wird durch die Zunahme des Rollwiderstandes erzielt, denn mit der Dehnung des Elastomers verändert sich auch der Kippunkt welcher ausschlaggebend für den Rollwiderstand ist.

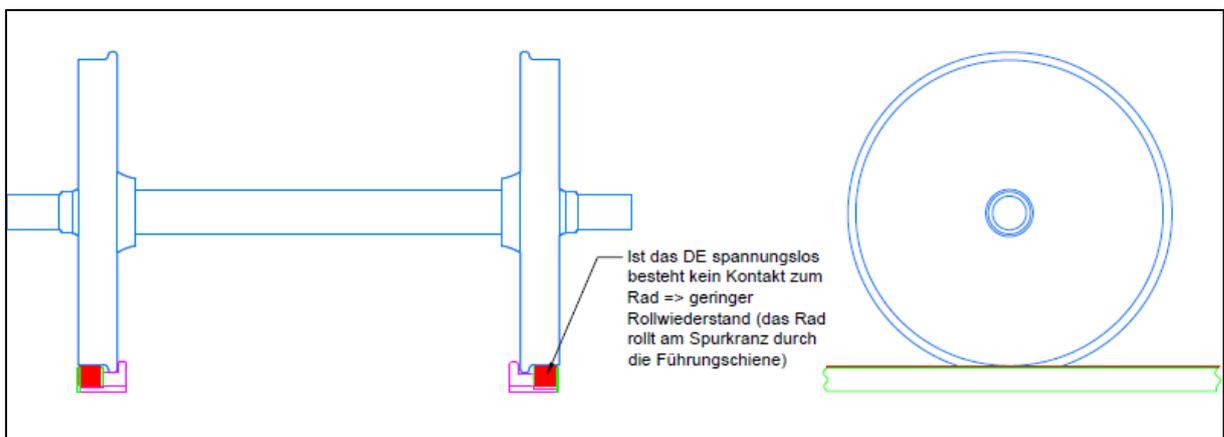


Abbildung 70: Radsatz im Bremsabschnitt, keine Bremsung

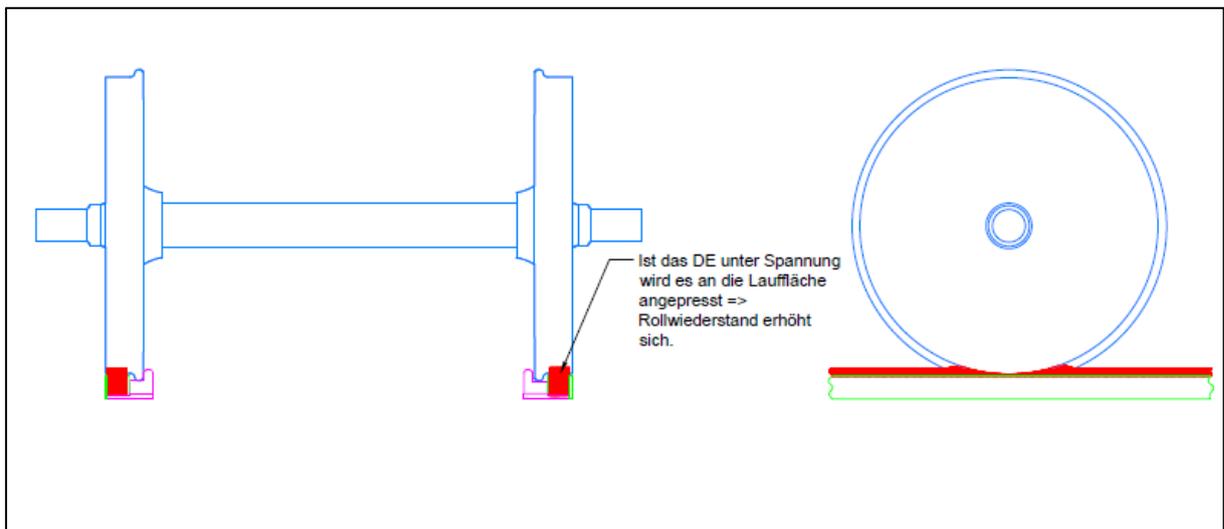


Abbildung 71: Radsatz im Bremsabschnitt, DE bzw. MRE bremst

6.2.6. Erzielbare Bremskraft

Um die Materialparameter der DE bzw. MRE besser zu verstehen wurde mit dem Fraunhofer Institut für Silicatforschung Kontakt aufgenommen. Es wurde mitgeteilt, dass es gegenwärtig nur möglich ist, DE- bzw. MRE- Aktoren mit einer max. mechanischen Spannung von wenigen N/cm^2 zu fertigen. Da bei vollbeladenen Güterwagen eine Gewichtskraft von $112,5 \text{ kN}/\text{Rad}$ auftritt und diese Kräfte auf wenigen cm^2 auf den Oberbau übertragen werden, erscheint es dem Fraunhofer ISC als äußerst unwahrscheinlich einen Güterwagen mit diesen Technologien nennenswert abzubremesen.

Um eine mathematische Abschätzung der erzielbaren Bremswirkung zu erhalten, soll von einem DE bzw. MRE mit einer max. erzielbaren mechanischen Spannung von $7 \text{ N}/\text{cm}^2$ ausgegangen werden. Der Raddurchmesser des abzubremsenden Güterwagens besitzt einen Durchmesser von 90 cm , die Wirkbreite des DE bzw. MRE auf die Lauffläche des Rades beträgt 10 cm . Es soll angenommen werden, dass DE bzw. MRE eine Dehnung von 5 cm besitzt. Dies bedeutet, das Rad „sinkt“ 5 cm in das Elastomer ein, wie auch in Variante 1. Jedoch können die DE bzw. MRE Rechteckig ausgeführt werden, wodurch sich eine Rechteckige Kontaktfläche zwischen Rad und Bremsenteil einstellt, im Gegensatz zu Variante 1, wo die Berührungsfläche elliptisch ist. Demzufolge ist die Kontaktfläche in Variante 2 (412 cm^2) größer als in Variante 1 (324 cm^2), wodurch sich ein solches Bremssystem hinsichtlich der Bremswirkung ungleich der Variante 1 verhalten wird, denn die tatsächliche Lage des Kippunktes ist unbekannt. Des Weiteren gestaltet es sich

durchaus schwierig, die Energiedissipation von „smart materials“ zu bestimmen, da es sich bei diesen Materialien um Einzelanfertigungen handelt. In Variante 1 wurde festgestellt, dass die max. benötigten Betriebsdrücke im Bremssystem in etwa 50 bar betragen, dies entspricht einer mech. Spannung von 500 N/mm². „Smart materials“ hingegen können lediglich Spannungen von max. 7 N/cm² bereitstellen, welches 1/70 der benötigten Spannungen in Variante 1 entspricht. In Variante 1 wurde eine Bremskraft von 10 kJ pro Achse und Meter ermittelt, dementsprechend wird sich durch den geringen Widerstand der DE bzw. MRE eine höhere Bremswirkung von 200 J pro Achse und Meter nicht realisieren lassen.

Durch die geringen Spannungen, die DE bzw. MRE bereitstellen, ist davon auszugehen, dass diese im gegenwärtigen Entwicklungsstadium ungeeignet für die Anwendung als Gleisbremse sind.

6.2.7. Weitere Probleme

Da diese Technologie teils noch in der Entwicklungsphase ist, ergeben sich eine Menge von weiteren Problemen. Ein wesentliches Problem stellt eine stabile und dauerhafte Befestigung des Elastomers an einem starren Träger da, denn ein DE bzw. MRE ändert in allen Raumachsen die Form und kann somit nicht starr verklebt oder verschraubt werden.

Ein weiteres Hemmnis in der Umsetzung einer solchen Bremsanlage ist, dass diese Elastomere gegenwärtig nur unter Laborbedingungen Verwendung finden und kaum Erfahrungen vorliegen bezüglich der Haltbarkeit dieser Materialien unter Einfluss der Witterung. Ein Bremssystem bestehend aus DE bzw. MRE müsste in einem Temperaturbereich von -25°C – 60°C eine konstante Leistung erbringen, jedoch sind die elastischen Eigenschaften von Elastomeren stark temperaturabhängig. Des Weiteren ist auch unklar wie sich die UV-Strahlung auf die Materialalterung auswirkt.

Ein noch gänzlich ungeklärtes Problem ist die Temperaturabführung. Bei einer Bremsanlage basierend auf DE oder MRE wird die erbrachte Bremsleistung in Wärme umgewandelt und dem DE bzw. MRE zugeführt. Deshalb stellt sich die Frage, wie sich diese Energie abführen lässt, denn durch die veränderbaren geometrischen Abmessungen des DE bzw. MRE ist es nicht möglich Wärmetauscher an diesen Materialien anzubringen.

6.2.8. Das Modell

Um diese zahlreichen Unbekannten besser zu verstehen, wäre es notwendig ein Modell 1:32 zu konstruieren. Mit diesem Modell könnte eine Bremsstrecke von ca. 130 m auf 4 m simuliert werden. Dieser Maßstab wird auch bei Modelleisenbahnen verwendet, deshalb sind die Fahrzeuge bzw. das Schienenmaterial relativ günstig zu erwerben. Dieses Modell sollte mehrere Sektionen von DE bzw. MRE beinhalten, wobei jede Bremssektion einzeln ansteuerbar ist. Durch dieses Modell sollte der veränderliche Rollwiderstand besser verstanden werden, so wie auch Versuche mit der elektrischen Steuerung durchgeführt werden.

Die primäre Idee wäre es, die Bremsselemente mittels DE zu realisieren, da diese im Vergleich zu MRE preisgünstiger sind. Diese Elemente könnten über Fraunhofer ISC bezogen werden. Laut Auskunft Fraunhofer ISC ist es aber mit dem heutigen Stand der Technik nicht möglich, die benötigten DE herzustellen. Es ist gegenwärtig nur möglich, die geforderten Materialeigenschaften mittels der MRE Technologie herzustellen. Da bei MRE ein Magnetfeld für die Formänderung zuständig ist und für den jeweiligen Einsatz eine individuelle Berechnung des Magnetfeldes nötig ist, fallen diese Materialien ausgesprochen teuer aus. Infolgedessen wurde entschieden von einem Modelversuch abzusehen, denn wenn auch das MRE im Modell funktionieren würden, ist diese Technologie noch weit entfernt von einem Einsatz im freien Feld.

6.2.9. Zusammenfassung

Bei dielektrischen Elastomeren (DE) und magnetorheologischen Elastomeren (MRE) handelt es sich um interessante Materialien welche in Zukunft breite Anwendung finden werden. Diese Materialien sind jedoch ungeeignet, wenn es sich um die Abbremsung von Güterwagen handelt, da die auftretenden Kräfte durch diese Materialien nicht zu bewältigen sind. Dies wurde von Seiten Fraunhofer ISC mitgeteilt. Des Weiteren gibt es zahlreiche ungelöste Probleme bezüglich DE und MRE, diese sind: Witterungsbeständigkeit, das Verhalten bei unterschiedlichen Temperaturen (Sommer-Winter), eine dauerhafte und stabile Befestigung, so wie die Abführung der Wärmeenergie die durch den Bremsvorgang entsteht.

Um das genaue Verhalten von DE oder MRE zu untersuchen sind Modelversuche notwendig, die jedoch sehr teuer ausfallen würden, da die erforderlichen Materialeigenschaften nur mittels MRE-Technologie realisierbar sind. Der Kostentreiber bei

MRE ist das Magnetfelddesign, dieses muss für jeden Kunden und für jede Anwendung neu berechnet und entwickelt werden. Mit dem derzeitigen Stand der Technik ist die günstigere DE-Technologie gänzlich ungeeignet zum Einsatz als Bremsselement, selbst für einen Modellversuch.

6.2.10. QUELLENVERZEICHNIS

- [1] W. Kaal, „Dielektrische Elastomer-Stapelaktoren mit gelochten Elektroden für strukturdynamische Anwendungen“, tprints, E-Publishing-Service der TU-Darmstadt, 2014.
- [2] S. J. A. Koh, C. Keplinger, T. Li, S. Bauer, und Z. Suo, „Dielectric Elastomer Generators: How Much Energy Can Be Converted“;, *IEEEASME Trans. Mechatron.*, Bd. 16, Nr. 1, S. 33–41, Feb. 2011.
- [3] F. Zschunke, „Aktoren auf Basis des magnetorheologischen Effekts“, Thesis from, 2005.
- [4] „c3sm51072g-ga.jpg (JPEG-Grafik, 1325 x 945 Pixel) - Skaliert (80%)“. [Online]. Verfügbar unter: <http://blogs.rsc.org/sm/files/2013/08/c3sm51072g-ga.jpg>. [Zugegriffen: 02-Okt-2017].

6.3. Gummiradbremse - Friction Drive

6.3.1. Physik des friction drive bei Fahrgeschäften

Bei Fahrgeschäften, speziell bei Achterbahnen gibt es eine Vielzahl an unterschiedlichen Antrieben. Einer dieser Antriebe ist der friction drive. Zu einem findet der friction drive Anwendung um die Achterbahngarnituren auf dem lift hill (Startrampe) zu befördern, zum anderen kommt dieses System auch zur Abbremsung der Achterbahngarnituren zum Einsatz. Dieses System (Abbildung 72) besteht i.d.R. aus zwei Rädern, angetrieben durch einen eigenen Motor bzw. über ein Winkelgetriebe und Kardantrieb. Zwischen den beiden gegenläufigen Rädern (Reibräder) wird das Schwert der Achterbahngarnitur durchgeführt. Bei dem Schwert handelt es sich um eine Metallschiene die am Fahrzeugboden montiert ist. Bewegt sich nun das Schwert durch die beiden Reibräder wird dieses auf die Umfangsgeschwindigkeit der Reibräder beschleunigt, folglich wird auch die Achterbahngarnitur beschleunigt. Im Fall einer Bremsung bewegt sich das Schwert der Achterbahngarnitur schneller als die Umfangsgeschwindigkeit der Reibräder. Bei dieser Anordnung wird das Schwert auf die Umfangsgeschwindigkeit der Reibräder abgebremst, somit verzögert sich auch die Geschwindigkeit der Achterbahngarnitur.

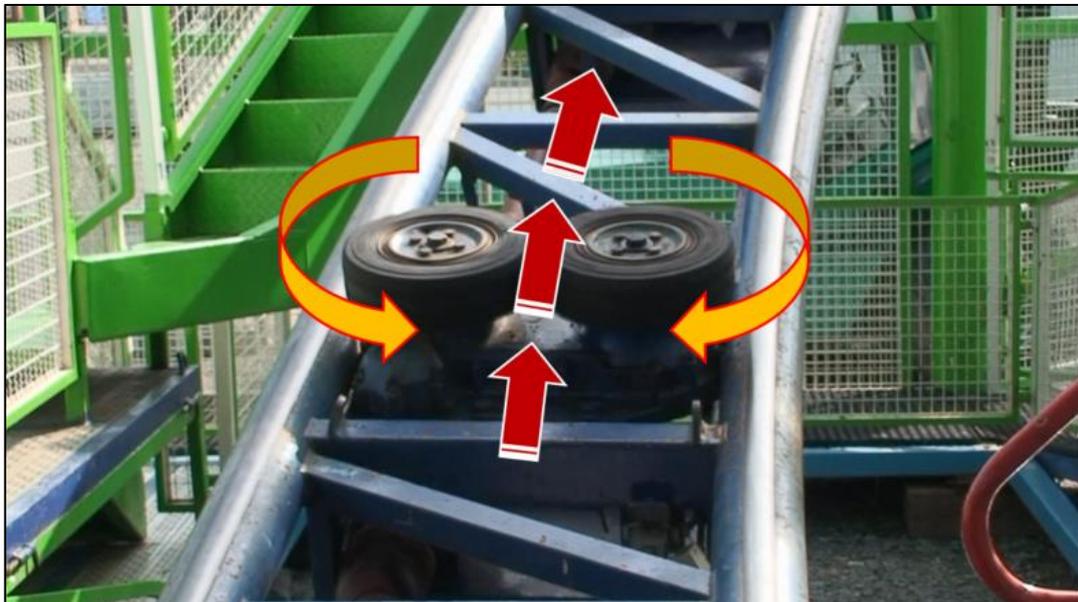


Abbildung 72: Friction drive einer Achterbahn[1]

Diese Reibradmodule werden je nach Bedarf in unterschiedlichen Abständen angebracht, der Abstand ist zum einen von der Fahrzeuglänge, zum anderen von der Gradienten der

Streckensektion abhängig. Bei dem Antriebssystem friction drive handelt es sich lediglich um eine Kraftübertragung die mittels der Haft- bzw. Gleitreibung stattfindet. Deshalb müssen diese Systeme ausreichend dimensioniert werden damit sie unter ungünstigen Witterungseinflüssen zuverlässig funktionieren.

6.3.2. Zusammenwirken des friction drive und dem Radsatz

Würde ein friction drive System als Gleisbremse Verwendung finden, müssten einige essentielle Unterschiede beachtet werden, denn eine solche Verwendung unterscheidet sich deutlich vom Einsatz in einer Achterbahn.

Bei einer Achterbahn übertragen die Reibräder die Antriebskraft über das Schwert, welches sich in Längsrichtung direkt am Chassis der Achterbahngarnitur befindet. Somit findet eine Kraftübertragung von der Umfangsgeschwindigkeit der Reibräder 1:1 auf das Fahrgestell der Achterbahn statt (Abbildung 73).



Abbildung 73: Das Schwert einer Achterbahngarnitur[2]

Güterwagen verfügen über kein Schwert, deshalb können die Reibräder nur an den Rädern der Wagons ihre Kraftübertragung ausüben. Da die Räder von Schienenfahrzeugen nur im Bereich der Lauffläche und des Spurkranzes genormt sind, kann lediglich der Spurkranz zur Kraftübertragung herangezogen werden (Abbildung 74).

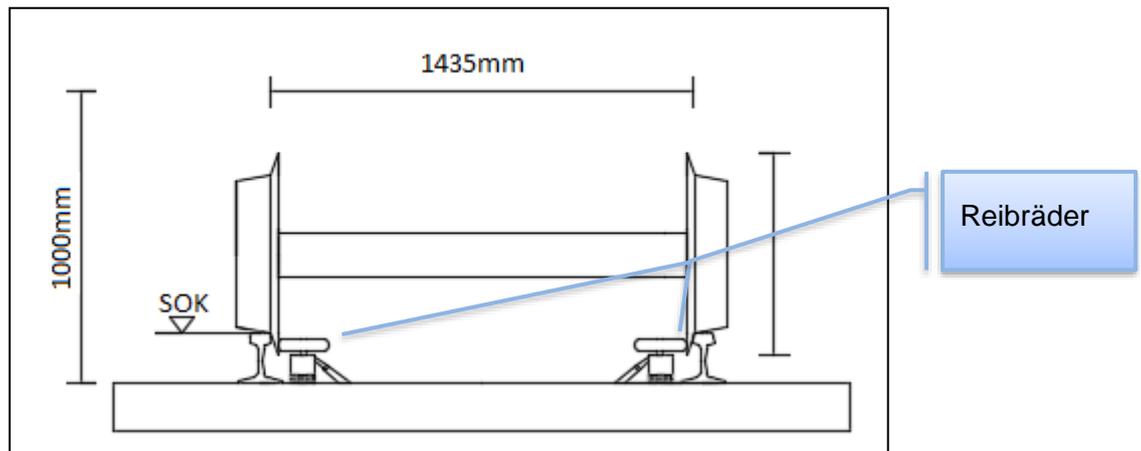


Abbildung 74: Fiction drive an einem Radsatz

Wird eine Kraft in den Spurkranz eingeleitet, kann sich der Radsatz nicht parallel zu dem Gleis verschieben, denn die Haftreibung vom Rad-Schienenkontakt wirkt dagegen. Bei einer Achterbahn hingegen kann sich das Chassis, angetrieben durch die Reibräder parallel zu den Gleisen bewegen, da es zu keinerlei Einschränkungen an den Rädern kommt (Räder bewegen sich frei).

Um zu verdeutlichen welche Probleme durch eine Kräfteinleitung am Spurkranz entstehen, soll ein abrollendes Rad näher betrachtet werden. Für dieses Gedankenexperiment sind drei Stellen am Radkörper von besonderer Bedeutung (Abbildung 75).

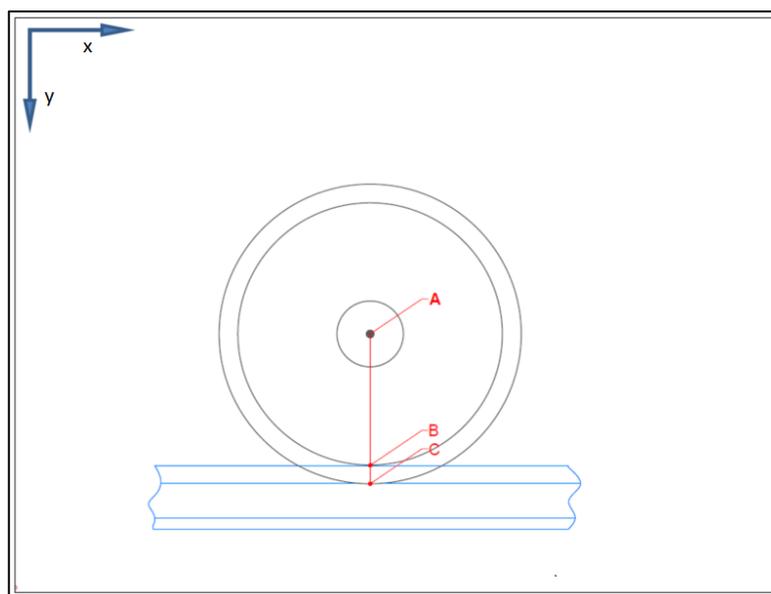


Abbildung 75: Rad-Schienen Kontakt

Punkt A:

Dies ist der Mittelpunkt des Rades und auch der Achse, um diese Achse kann sich das Rad in einem Winkel von 360° frei bewegen.

Punkt B:

Bei diesem Punkt handelt es sich um den Rad-Schienenkontakt, in diesem Bereich besitzt die Umfangsgeschwindigkeit des Rades dieselbe Geschwindigkeit wie die Schiene. Gäbe es eine Differenz zwischen der Umfangsgeschwindigkeit des Rades zur Schiene, wäre dies ein Schleudern bzw. Gleiten.

Punkt C:

Dieser Punkt ist der äußerste Radius am Spurkranz und bewegt sich mit derselben Winkelgeschwindigkeit um den Achsmittelpunkt A wie Punkt B. Würde ein friction drive zur Anwendung kommen, so wäre eine Kraftübertragung mittels Reibräder zwischen den Punkten B und C möglich, denn hier befindet sich der Spurkranz welcher bei allen Schienenfahrzeugen genormt ist.

Würde nun am Spurkranz durch Reibräder eine Kraft eingeleitet um den Güterwagen zu bremsen, unter der Randbedingung, dass sich im Punkt B das Rad zur Schiene nicht verschieben darf, ergibt sich ein Hebel. Die Länge dieses Hebels erfolgt durch den Ort der Krafteinleitung mittels des Reibrades am Radkörper und befindet sich zwischen den beiden Punkten B-C. Um nun den Güterwagen abzubremsen, muss der Mittelpunkt (Punkt A) des Rades verzögert werden, denn hier ist auch die Wagenachse situiert. Infolgedessen ist auch in diesem Bereich ein Hebel anzufinden, die Länge von diesem Hebel entspricht dem Radius der Lauffläche bzw. Punkt B zu Punkt A.

Diese Überlegung hat nun ein Übersetzungsverhältnis zur Folge: Krafteinleitung durch die Reibräder am Spurkranz - hin zur Bremskraft am Wagenkasten. Ausgehend von einer Krafteinleitung am Spurkranz in einer Höhe von 3 cm bei einem Raddurchmesser von 90 cm erfolgt ein Übersetzungsverhältnis von 1:15. Somit müsste eine Kraft von 15 kN am Spurkranz wirken um 1 kN Bremskraft pro Rad zu erzielen. Angenommen der Haftreibungskoeffizienten (Reibrad-Spurkranz) beträgt $\mu = 0,5$, müssten die Reibräder mit einer Kraft von 30 kN an den Spurkranz gepresst werden um 1 kN Bremskraft am Wagen pro Rad zu erzielen.

In dieser Überlegung wurde davon ausgegangen, dass die gesamte Kraftübertragung an einem Punkt stattfindet, dies ist jedoch in der Praxis nicht möglich, da die Flächenpressung des Gummirades zu hoch wäre. Deshalb wird das Übersetzungsverhältnis in der Realität wesentlich schlechter ausfallen.

6.3.3. Fazit

Zum Abbremsen von Güterwagen durch einen friction drive müsste das Wagenmaterial angepasst werden, damit die Reibräder direkt am Fahrgestell einwirken können, ähnlich dem Schwert einer Achterbahngarnitur. Bei einer Achterbahn greifen die Reibräder des friction drive auf das Schwert, welches sich direkt am Fahrgestell befindet, wodurch die Verzögerung/Beschleunigung der Reibräder 1:1 auf die Garnitur wirkt. Wirkt nun der friction drive auf die Räder des Güterwagens, findet eine Kraftübersetzung statt, dadurch wird die tatsächliche Bremskraft am Güterwagen reduziert. Um trotzdem eine ausreichende Bremswirkung zu erzielen sind hohe Anpresskräfte der Reibräder am Spurkranz notwendig. Diese erforderlichen Kräfte würden eine Flächenpressung verursachen, die mittels Gummiräder nicht zu bewältigen sind. Folglich ist dieses Antriebs- /Abbremskonzept (Reibräder wirken auf Spurkranz) nicht sinnvoll umzusetzen.

6.3.4. QUELLENVERZEICHNIS

[1] „Friction Wheels“, Roller Coaster Wiki. [Online]. Verfügbar unter:
http://rollercoaster.wikia.com/wiki/Friction_Wheels. [Zugegriffen: 17-Okt-2017].

[2] „Coastersandmore.de - Achterbahn Magazin: Pegasus - Das geflügelte Pferd im Europa Park“. [Online]. Verfügbar unter:
<http://www.coastersandmore.de/rides/pegasus/pegasus.shtml>. [Zugegriffen: 18-Okt-2017].

6.4. Variante 3 - Umgekehrter Radsatzschubwagen

Der Radsatzschubwagen stellt ein Verschiebesystem dar, welches mittels flachen, zwischen den Gleisen rollenden Wagen Güterwaggons verschieben kann. Für diese Technologie sind zwei innerhalb des Gleis verlaufende Schienen sowie ein mit einem Motor betriebenes Zugseil notwendig. Da der Wagen zwischen den Gleisen rollt kommt er nicht in Berührung mit etwaigen Waggons sodass der Wagen unter die Wagengruppe einfahren kann und sich mittels eines Mechanismus anschieben/ziehen kann.



Abbildung 76: Radsatzschubwagen der Firma Vollert⁴⁹

6.4.1. Ursprünglicher Verwendungszweck

Eingesetzt wird dieses System, um Schienenfahrzeuge ohne Triebfahrzeug zu bewegen wie beispielsweise auf Verschiebebahnhöfen oder auch Waschanlagen und Revisionshallen in denen es häufig keine Oberleitung gibt.

Dabei werden stillstehende Wagen mittels des Wagens beschleunigt, bis zur gewünschten Position geführt und dort wieder abgestellt. Die Wagen erfüllen daher den Zweck einer Verschieb Lokomotive.

⁴⁹ Abbildung entnommen aus: Vollert Anlagenbau GmbH (Hg.): Radsatzschubwagen. URL: <https://www.vollert.de/de/produktbereiche/loesungen-fuer-rangiersysteme/stationaere-rangieranlagen/> [Stand: 16.7.2018].

6.4.2. Funktion

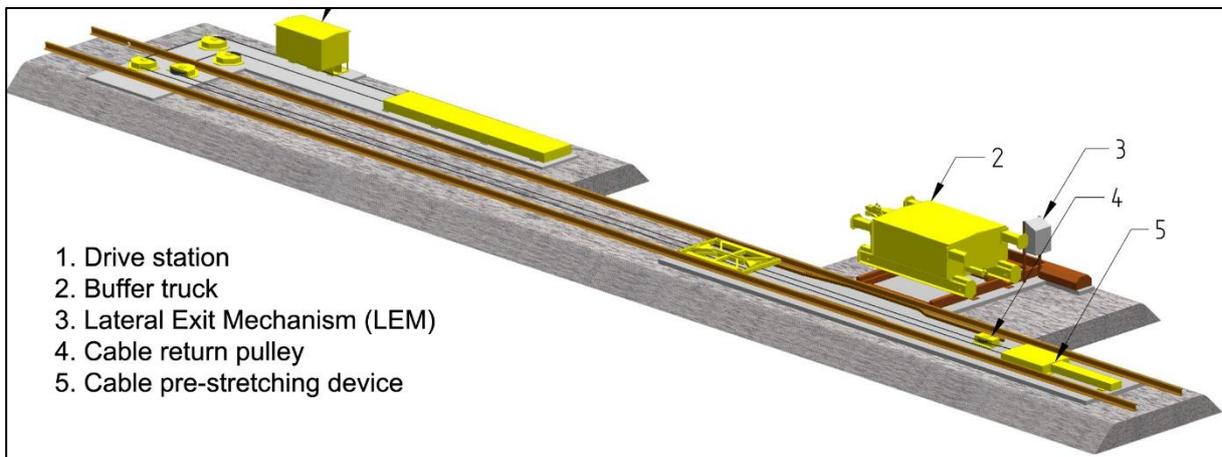


Abbildung 77: Funktion des Radsatzschubwagen⁵⁰

Hierbei wird ein auf Gleisen geführter Schubwagen mittels eines Seiles ähnlich wie eine Seilbahn gezogen und kann dadurch entweder durch Rollen oder Puffer Wagen schieben/ziehen.

6.4.2.1. Leistung

Der Radsatzschubwagen ist für eine Geschwindigkeit von 0,5m/s unter Last ausgelegt. Die Zug- bzw. Bremskraft liegt bei 60 kN.

6.4.3. Nutzen

Der wirtschaftliche Nutzen ergibt sich daraus, dass weniger Verschublokomotiven von Nöten sind. Darüber hinaus wird auch weniger Personal benötigt, da der Mechanismus nahezu vollautomatisch funktioniert. Dazu erhöht dieses Prinzip die Sicherheit, da weniger Personen auf und neben Gleisen stehen.

6.4.4. Einsatzbeispiel

Eingesetzt werden diese Systeme derzeit beispielsweise am Verschiebebahnhof Limmattal in der Schweiz.

⁵⁰ Abbildung entnommen aus; Bemo Rail (Hg.): COUPLER SYSTEMS. URL: <https://www.bemorail.com/portfolio-item/coupler-systems/> [Stand: 16.7.2018].

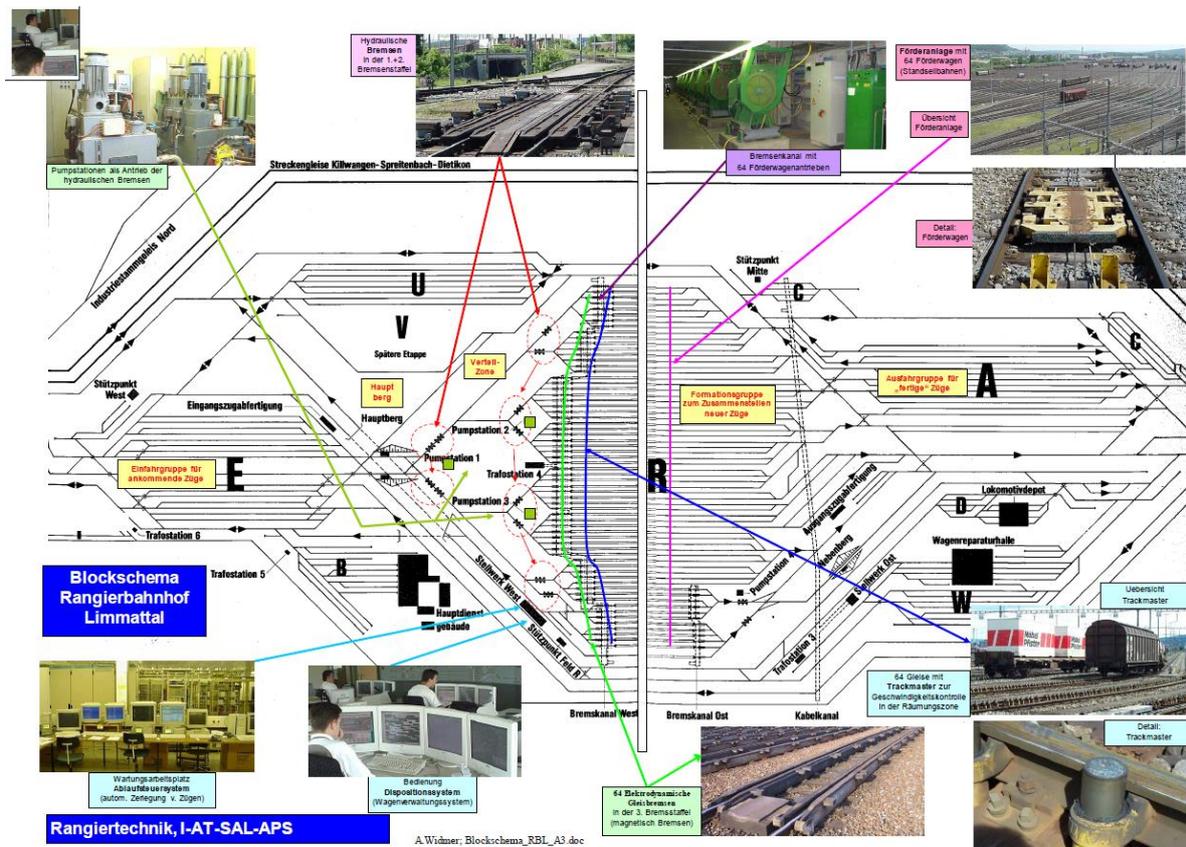


Abbildung 78: Blockschema Verschiebebahnhof Limmattal⁵¹

Hierbei werden die Wagen mittels elektrodynamischer Gleisbremsen und Dowty-Retarder gebremst und anschließend mit Radsatzschubwagen zusammengeschoben und für die Abfahrt bereitgemacht.

6.4.5. Anforderungen für Bremsung

Um den Radsatzschubwagen für die Bremsung von Wagen im Richtungsgleis zu einzusetzen, muss in erster Linie fähig sein, höhere Geschwindigkeiten abzufangen. Ausgegangen wird von einer Geschwindigkeit von 5m/s, die auf 1,5m/s verringert werden sollte. Das maximale Gewicht sollte bei 630t (=Systemgrenze des Verschiebebahnhof Graz) liegen, wobei die Systemlänge möglichst kurzgehalten werden, da jegliche Einschränkung der Nutzlänge für den Betrieb vermieden werden soll.

⁵¹ Abbildung entnommen aus: SBB CFF FFS Infrastruktur Anlagen und Technologie (Hg.): Blockschema_RBL_A3. Limmattal 2017.

6.4.6. Mögliche Problemstellung

Da diese Systeme nicht zur Bremsung von Güterwagen konzipiert wurde, ergeben sich vermutlich einige Probleme in der Umsetzung:

- Der Einsatz in einem Bogen ist mittels Seilzug nicht möglich. Da, wie in der folgenden Abbildung erkennbar, es in einem Verschiebebahnhof bis zum Beginn der Richtungsgleise kein gerades Gleis gibt, könnten Radsatzschubwagen erst arbeiten, wenn Güterwagen eine bereits viel zu hohe Geschwindigkeit erreicht haben. Daher müsste das System mit Zahnstangen adaptiert werden.

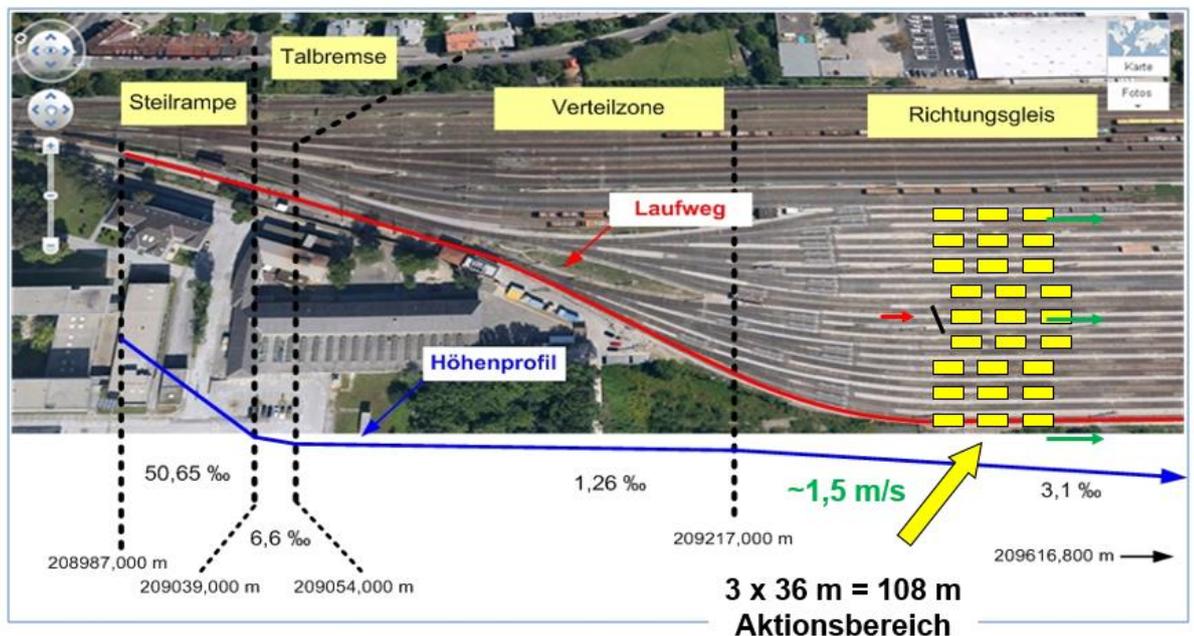


Abbildung 79: Möglicher Anwendungsbereich am Beispiel Verschiebebahnhof Graz⁵²

- Die derzeitige Maximalgeschwindigkeit beträgt 1,4m/s ohne Last bzw. 0,5m/s mit Last. Diese Geschwindigkeit müsste etwa 5m/s betragen, um dem Abbremsen dienen zu können.⁵³
- Das System kann bei keiner stärkeren Steigung eingesetzt werden.

⁵² Abbildung entnommen aus: Barta, Michael: Entwicklung eines Tools zur Simulation eines rollenden Eisenbahnwagens am Abrollberg. St. Pölten 2013, S. 42.

⁵³Vgl.: Vollert Anlagenbau GmbH (Hg.): Radsatzschubwagen. URL: <https://www.vollert.de/de/produktbereiche/loesungen-fuer-rangiersysteme/stationaere-rangieranlagen/> [Stand: 16.7.2018].

6.4.7. Notwendige Energie

Annahmen:

- Beladener Güterwagen der Bauart Eas-y mit 80 t Gesamtgewicht.⁵⁴
- Startgeschwindigkeit: 4,5 m/s
- Endgeschwindigkeit: 1,5 m/s

Ermittlung der kinetischen Energie:⁵⁵

$$E_{Kin,v1} = \frac{m * v_1^2}{2} = \frac{80t * 10^3 * (4,5 \frac{m}{s})^2}{2} = 810 * 10^3 J = 810kJ$$

$$E_{Kin,v2} = \frac{m * v_2^2}{2} = \frac{80t * 10^3 * (1,5 \frac{m}{s})^2}{2} = 90 * 10^3 J = 90kJ$$

Notwendige Energie, welche dem Wagen entzogen werden muss:

$$E_{Entz} = E_{Kin,v1} - E_{Kin,v2} = 810kJ - 90kJ = 720kJ$$

Berechnung der Retarderanzahl (bei 1,25 kJ Bremsarbeit je Retarder):

$$Ret = \frac{E_{Vern}}{B} = \frac{720kJ}{1,25kJ} = 576 \text{ Retarder}$$

Anordnung von zwei Retardern je Schwellenfach (60 cm Schwellenabstand):⁵⁶

$$L = \frac{Ret * A_s}{2} = \frac{576 * 0,6m}{2} = 172,8m = 173m$$

⁵⁴ Vgl.: Wagner, Adrian: Potentiale zur Lärm- und Verschleißreduktion bei Retardern. Adaptierung von konventionellen Retardern bei Verschiebebahnhöfen. St. Pölten 2018, S. 37.

⁵⁵ Vgl. Tipler, A Paul. Mosca, Gene: Physik. Für Wissenschaftler und Ingenieure. 2. Auflage. Elsevier Verlag. München 2004, S.141.

⁵⁶ Vgl. ÖBB Infra (Hg.): Alternative Abroll-Bremstechnik. Ergebnisse TRIZ. Wien 2016, S.4.

$E_{Kin,V1}$Kinetische Energie 4,5 m/s

$E_{Kin,V2}$Kinetische Energie 1,5 m/s

E_{Entz}Zu entziehende Energie

RetAnzahl der Retarder

BBremsarbeit je Retarder

LNotwendige Länge

A_SSchwellenabstand

6.4.8. Möglichkeiten seitens des Herstellers

Seitens des Herstellers wäre es nach derzeitigem Stand möglich die Maximalgeschwindigkeit unter Last auf 1 m/s zu erhöhen, jedoch dabei die Zugkraft um die Hälfte zu reduzieren. Planbar wäre eine Geschwindigkeit von insgesamt 2m/s.

Um jedoch wirklich dieses Prinzip als Bremssystem einzusetzen, muss das Gesamtsystem überarbeitet werden wie beispielsweise wie z.B. das Adaptieren von Zahnstangen sowie die Erhöhung der Betriebsgeschwindigkeit.

6.4.9. Ergebnis

Grundsätzlich wäre ein Einsatz in Richtunggleisen denkbar, müsste jedoch mit dem Hersteller abgesprochen werden, inwiefern dies umzusetzen wäre. Darüber handelt es sich hierbei um eine relativ teure Methode zur Bremsung rollender Güterwagen, wobei die Instandhaltungskosten erst abgeschätzt werden müssten. Ebenso müssen detaillierte Berechnungen unter Berücksichtigung aller Widerstände an einem realen Bahnhof durchgeführt werden, um einen Beweis für die Machbarkeit zu liefern. Dies wird in diesem Projekt nicht weiterverfolgt.

6.4.10. QUELLENVERZEICHNIS

Vollert Anlagenbau GmbH (Hg.): Radsatzschubwagen. URL: <https://www.vollert.de/de/produktbereiche/loesungen-fuer-rangiersysteme/stationaere-rangieranlagen/> [Stand: 16.7.2018].

Bemo Rail (Hg.): COUPLER SYSTEMS. URL: <https://www.bemorail.com/portfolio-item/coupler-systems/> [Stand: 16.7.2018].

SBB CFF FFS Infrastruktur Anlagen und Technologie (Hg.): Blockschema_RBL_A3. Limmattal 2017.

Barta, Michael: Entwicklung eines Tools zur Simulation eines rollenden Eisenbahnwagens am Abrollberg. St. Pölten 2013.

Wagner, Adrian: Potentiale zur Lärm- und Verschleißreduktion bei Retardern. Adaptierung von konventionellen Retardern bei Verschiebebahnhöfen. St. Pölten 2018.

Tipler, A Paul. Mosca, Gene: Physik. Für Wissenschaftler und Ingenieure. 2. Auflage. Elsevier Verlag. München 2004.

ÖBB Infra (Hg.): Alternative Abroll-Bremstechnik. Ergebnisse TRIZ. Wien 2016.

6.5. Variante 4 - Adaptierter Retarder

6.5.1. Anwendung von konventionellen Retardern

Kolbenkleinbremsen, im Weiteren als Retarder bezeichnet, oft auch benannt nach dem ursprünglichen Hersteller Dowty Retarder, sind Bremsen, welche als universelle Gefälleausgleichsbremsen eingesetzt werden können. Sie eignen sich sowohl als Talbremse und als Richtungsgleisbremse, lediglich die Ansprechgeschwindigkeiten sind andere.⁵⁷ Die folgende Abbildung zeigt den Abrollberg am Wiener Zentralverschiebahnhof mit den verbauten Retardern.



Abbildung 80: Abrollberg Wien Zentralverschiebahnhof mit Blick auf die Weichen 200 und 201⁵⁸

Rollt ein Wagen vom Abrollberg ins Richtungsgleis, trifft er auf die im Gleis verbauten Retarder. Diese sind am Schienensteg zwischen den Schwellen montiert. Ist die Geschwindigkeit des Wagens höher als die indirekt voreingestellte Geschwindigkeit des Retarders, bildet dieser einen Widerstand, der durch den Spurkranz überwunden werden muss. Dadurch wird die Energie umgewandelt in Wärme und der Wagen wird abgebremst. Ist die Geschwindigkeit des Wagens geringer als die Ansprechgeschwindigkeit, so bildet der Retarder keinen Widerstand.⁵⁹

⁵⁷ Vgl. Pacht, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 7. Auflage. Braunschweig 2013, S.248.

⁵⁸ Eigene Aufnahme am Zentralverschiebahnhof Wien aufgenommen am 13.07.2017.

⁵⁹ Vgl. ULTR Railway Products (Hg.): DESIGNED, MANUFACTURED & SERVICED BY ULTRA DYNAMICS. High Capacity (HC) Piston Retarders. URL: <http://web.archive.org/web/20111003003227/http://dowties.com/> [Stand 10.01.2018].

Dieses Funktionsprinzip ist bei den verschiedenen Bauformen ident. Typischerweise werden in Österreich die beiden Bauformen Thyssen und Dowty eingesetzt. Die Thyssen Retarder sind durch einen Bügel erkennbar, welcher den Zylinder vor dem unbeabsichtigten Entgleiten schützt. Geplant ist seitens ÖBB-Infrastruktur AG zukünftig nur noch Dowty Retarder einzusetzen. Begründet ist dies dadurch, dass diese durch eine Nachfolgefirma nachgebaut werden können.⁶⁰ Derzeit sind am Wiener Zentralverschiebebahnhof ca. 39.000 Dowty Retarder und ca. 3.000 Thyssen Retarder im Einsatz.⁶¹ Daher werden im Zuge dieses Projekts nur die Retarder der Bauform Dowty näher betrachtet.

Die Kleinkolbengleisbremse kann als quasikontinuierliches System angesehen werden, da über einen bestimmten Bereich eine Abbremsung der Wagen auf eine vorgegebene Geschwindigkeit erfolgt. Zwischen den Bremsselementen befinden sich kurze Bereiche des freien Laufs. Die nachstehende Abbildung soll dies veranschaulichen:

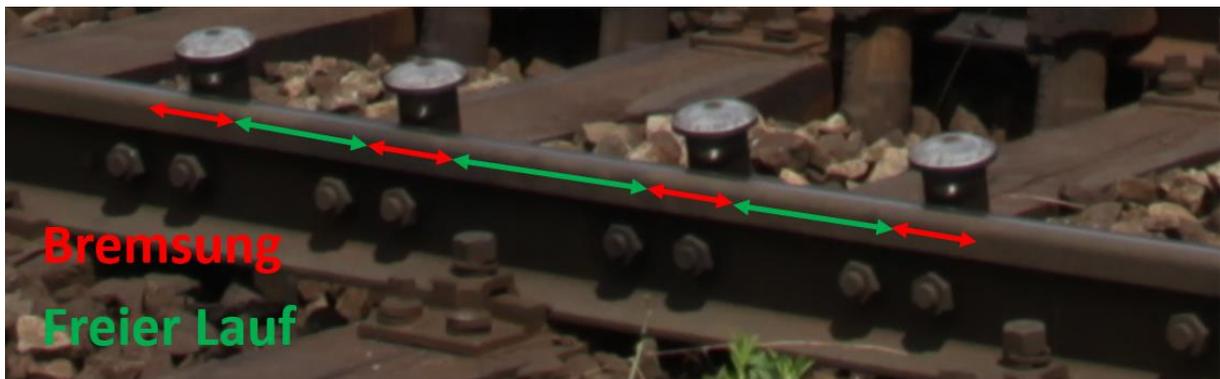


Abbildung 81: Dowty Retarder als quasikontinuierliches Bremssystem⁶²

Einsetzbar sind solche Elemente ein- oder beidseitig in den Schwellenfächern. Wobei in einem Schwellenfach bis zu zwei Retarder je Seite Platz finden. Lediglich im Bereich von beweglichen Fahrwegelementen sind Aussparungen notwendig.⁶³ Eine detailliertere Beschreibung der Situierung erfolgt im Kapitel 6.5.4 Situierung im Gleis.

⁶⁰ Wagner, Adrian: StilvA – Meeting Bewertung. Protokoll Meeting Dezember 17. St. Pölten 2017, S.6.

⁶¹ Vgl. Lehner, Harald. Marchler, Meinrad. Zmaritsch, Josef: Ablaufanlagen. Aufbau, Funktionsweise, Wartung und Inspektion von Balkengleisbremsen und Retarderbremsen (Kolbengleisbremsen). St. Pölten 2015, S.19.

⁶² Eigene Darstellung auf Basis einer Abbildung vom Zentralverschiebebahnhof Wien aufgenommen am 13.07.2017.

⁶³ Eigene Beobachtung am Zentralverschiebebahnhof Wien am 29.04.2017.

6.5.2. Aufbau eines Retarders

Um Optimierungspotential zu erkennen ist es notwendig, die Funktionsweise exakt nachvollziehen zu können. Dazu müssen in erster Linie die Bauteile und deren Aufgaben bekannt sein. Die wesentlichen Bestandteile eines Retarders sind das Gehäuse, welches am Schienensteg befestigt ist, die darin befindliche Kapsel und der Gleitzyylinder. Der Aufbau und die Form der Retarder sind an jeder Position des Verschiebebahnhofes ident. Unterschiedlich sind die Situierung im Gleis und die eingestellte Ansprechgeschwindigkeit in der Kapsel.⁶⁴

Im Jahr 1959, erfolgte bereits eine Patentanmeldung des Dowty Boosters, welcher neben dem Abbremsen der Wagen auch eine Beschleunigung von Schlechtläufern zulässt. Damit ist es möglich, Wagen auf bis zu 3,66 m/s zu beschleunigen. Umsetzbar ist dies durch eine hydraulische Ansteuerung, vergleichbar mit jenem Equipment einer Balkengleisbremse.⁶⁵ Jedoch muss in diesem Fall jeder zu beschleunigende Retarder angesteuert werden. Die Tatsache, dass ein Retarder ein autonomes Bremsselement darstellt, widerspricht der Verwendung als Booster. So sind konventionelle Retarder nicht von einer externen Energieversorgung abhängig und unterliegen keinen Steuerungsmechanismen.⁶⁶

Die nachstehende Abbildung zeigt einen Dowty-Retarder. Dieser fungiert als Demonstrator und ist an einem Schienenstück der UIC - Bauform 49E1 montiert. Deutlich erkennbar sind in dieser Ansicht das gelbe Gehäuse und die darin befindliche Kapsel mit dem Kolben und der pilzförmigen Haube.

⁶⁴ Vgl. Wagner, Adrian: Retardereinsatz auf Verschiebebahnhöfen Diverses. Interview mit Leopold Böttinger. St. Pölten 2018. Zeile 55 - 60.

⁶⁵ Bick, D.E.: A history of the Dowty marshalling yard wagon control system. Cheltenham 1983, S.19-20.

⁶⁶ Vgl. Pacht, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 7 Auflage. Braunschweig 2013, S.248.



Abbildung 82: Demonstrator mit Gehäuse und Gleitzylinder⁶⁷

6.5.2.1. Bauteile Gehäuse

Das Gehäuse eines Retarders wird in einem Gussverfahren hergestellt. Die Montage am Gleis erfolgt am Schienensteg. Dazu werden mittels einer Bohrschablone zwei Löcher am Steg gebohrt.⁶⁸

In der nachfolgenden Aufzählung werden die wesentlichen Bestandteile dieses Bauteils aufgezählt und mit der Nummerierung der anschließenden Abbildung beschriftet:

Gehäuseabstreifring (29 & 30)

Die beiden Gewinde (M28) zur Montage am Steg (31)

Sicherungsmutter M28 (32)

⁶⁷ Eigene Aufnahme aufgenommen am 04.05.2018.

⁶⁸ Vgl. Wagner, Adrian: Retardereinsatz auf Verschiebebahnhöfen Diverses. Interview mit Leopold Böttinger. St. Pölten 2018. Zeile 102 - 107.

- Sicherungsscheibe (33)
- Schmutzdichtung (34)
- Stahlkugel (35)
- Verschlusskappe (37)
- Schmiernippel (38)
- Plastikschutzkappe (39)
- Sicherungsbolzen (41)
- Vorstecker (40)
- Entwässerungsbohrung (X)

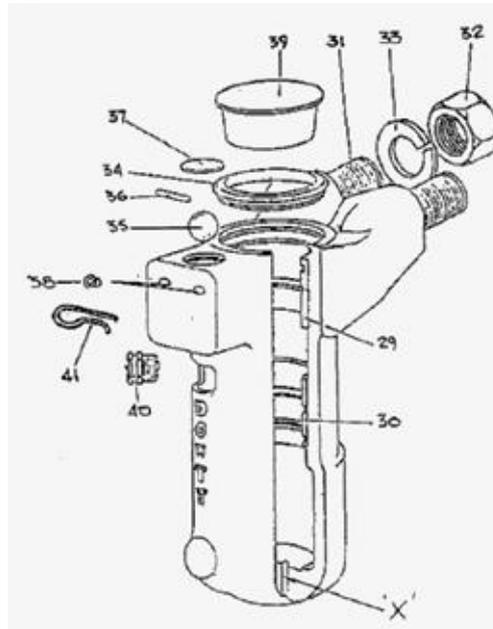


Abbildung 83: Retardergehäuse mit den wesentlichen Bauteilen⁶⁹

Somit wird ersichtlich, dass das Gehäuse keine beweglichen Teile aufweist. Zusätzlich dient es als abstützendes Element für den Gleitzylinder. Da das Gehäuse bündig mit dem Schienensteg abschließt, erfolgt die Kraftübertragung auf die Schiene über diese Fläche, jedoch liegt das Gehäuse nicht am Schienenfuß auf. Kleine Abweichungen bei der Montage verändern den Auftreffpunkt der Haube auf die Spurkranzspitze.⁷⁰

Die nachstehende Abbildung zeigt diese Zusammenhänge zwischen der Schiene und dem Gehäuse.

⁶⁹ Vgl. Lehner, Harald. Marchler, Meinrad. Zmaritsch, Josef: Ablaufanlagen. Aufbau, Funktionsweise, Wartung und Inspektion von Balkengleisbremsen und Retarderbremsen (Kolbengleisbremsen). St. Pölten 2015, S.26.

⁷⁰ Eigene Beobachtungen am Demonstrator am 28.02.2018.

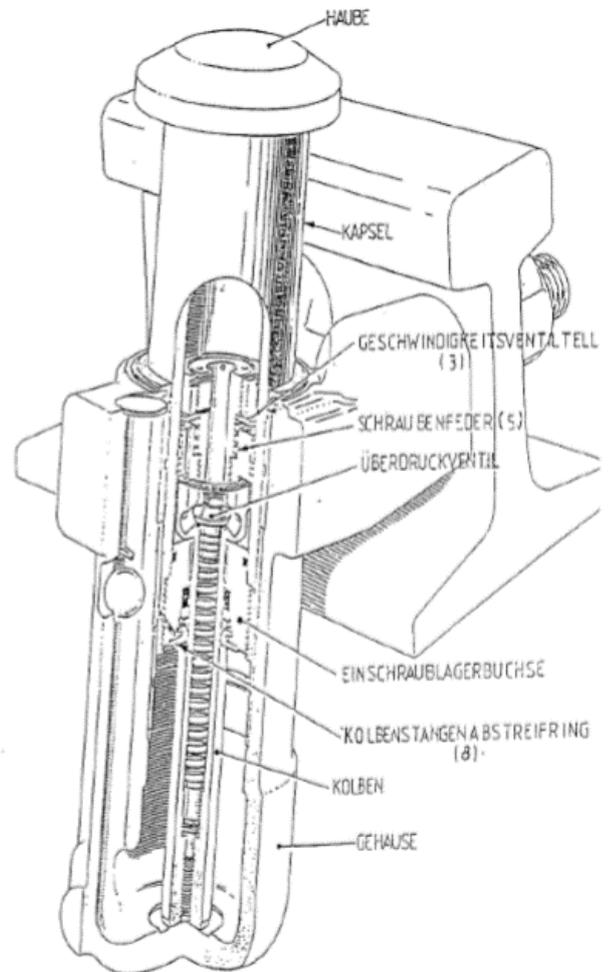


Abbildung 84: Zusammenhang zwischen Schiene und Retarder⁷¹

6.5.2.2. Bauteile Kapsel

Während das Gehäuse ein stabiler Bauteil ohne bewegliche Elemente ist, besteht die Kapsel aus einem beweglichen Gleitzylinder. Dieser wird aus hochfestem Stahl gefertigt und weist eine pilzförmige Haube auf. Dies ist jener Bauteil, welcher mit dem Spurkranz des überrollenden Wagens in Berührung kommt. Daher ist er auch besonders gehärtet. Des Weiteren ist im Zylinder ein beweglicher Kolben mit einem Überdruck- und Geschwindigkeitsventil verbaut. Die Kolbenstange ist in einer Einschraub – Axiallagerbuchse geführt und sitzt auf dem Boden des Gehäuses auf, wie in Abbildung 84 (Zusammenhang zwischen Schiene und Retarder) ersichtlich. Die Kapsel enthält eine Öl- und Stickstofffüllung,

⁷¹ Vgl. Abbildung entnommen aus: Lehner, Harald. Marchler, Meinrad. Zmaritsch, Josef: Ablaufanlagen. Aufbau, Funktionsweise, Wartung und Inspektion von Balkengleisbremsen und Retarderbremsen (Kolbengleisbremsen). St. Pölten 2015, S.20.

auf die in der Funktionsweise noch konkreter eingegangen wird. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die Stickstofffüllung den Einbau einer mechanischen Rückstellfeder überflüssig macht.

Die nachstehende Aufzählung beschreibt die in der nebenstehenden Abbildung der Kapsel bezifferten Bauteile:

- Gleitzyylinder (1)
- Kolben (2)
- Geschwindigkeitsventilteller (3)
- Überdruckventil (4)
- Schraubfeder Geschwindigkeitsventil (5)
- Ventilteller (6)
- Einstellring (7)

Die nachstehende Skizze zeigt eine Skizze einer Kapsel:

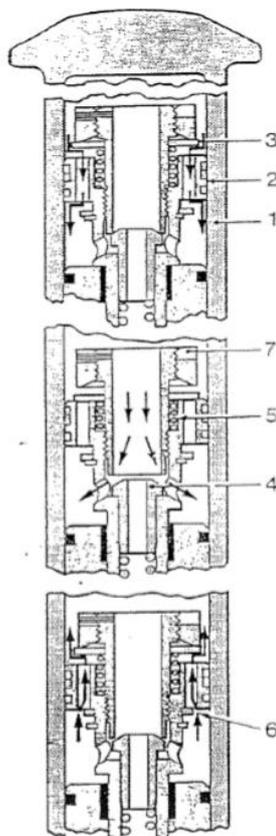


Abbildung 85: Kapsel einer Kolbenkleinbremse⁷²

⁷² Vgl. Abbildung entnommen aus: Lehner, Harald. Marchler, Meinrad. Zmaritsch, Josef: Ablaufanlagen. Aufbau, Funktionsweise, Wartung und Inspektion von Balkengleisbremsen und Retarderbremsen (Kolbengleisbremsen). St. Pölten 2015, S.20.

Wie bereits in der Einleitung dieses Kapitels erwähnt, bleiben die Bestandteile des Retarders ident, auch wenn diese für verschiedene Geschwindigkeitsbereiche ausgelegt sind. Am Zentralverschiebebahnhof Wien werden Gleitzylinder für die Geschwindigkeiten 4,25 / 4 / 2 / 1,75 / 1,5 m/s vorgehalten.⁷³ Erzielt wird diese Veränderung der Ansprechgeschwindigkeit beim Zusammenbau der Kapsel in der Retarderwerkstätte. Hier wird der Einstellring entsprechend der gewünschten Geschwindigkeit zur Schraubenfeder verdreht und gesichert. Äußerlich erkennbar ist dies durch die farbliche Codierung der dynamischen Dichtung, welche innerhalb der Einschraub - Lagerbuchse liegt.⁷⁴ Die Farbcodierungen der Zylinder für 4,25 m/s sind Rot und der Zylinder für 1,5 m/s Grün.⁷⁵

Da ein Gleitzylinder knapp zwanzig Einzelbauteile aufweist, folgt eine Abbildung mit den beschrifteten Bauteilen um die Funktionsweise leichter nachvollziehen zu können:



Abbildung 86: Einzelbauteile Gleitzylinder⁷⁶

⁷³ Eigene Beobachtungen am Zentralverschiebebahnhof Wien am 6.02.2018.

⁷⁴ Vgl. Abbildung entnommen aus: Lehner, Harald. Marchler, Meinrad. Zmaritsch, Josef: Ablaufanlagen. Aufbau, Funktionsweise, Wartung und Inspektion von Balkengleisbremsen und Retarderbremsen (Kolbengleisbremsen). St. Pölten 2015, S.21.

⁷⁵ Eigene Beobachtungen am Zentralverschiebebahnhof Wien am 6.02.2018.

⁷⁶ Eigene Aufnahme am Zentralverschiebebahnhof Wien aufgenommen am 6.02.2018.

6.5.3. Funktionsweise

Die Befahrung eines Retarders kann in zwei Teilprozesse unterteilt werden. Einerseits den Arbeitshub, bei dem die Kapsel durch die Spurkranzspitze in einer Drehbewegung nach unten gedrückt wird und andererseits den Leerhub. Bei diesem verlässt der Spurkranz den Retarder und die Kapsel gelangt in einer Drehbewegung wieder nach oben.⁷⁷

Realisiert wird ein solches Verhalten durch eine Öl- und Stickstofffüllung. Um das Öl im Zylinder zu bewegen, verfügt der Kolben über Durchlässe. In der nachfolgenden Abbildung sind diese beschriftet.

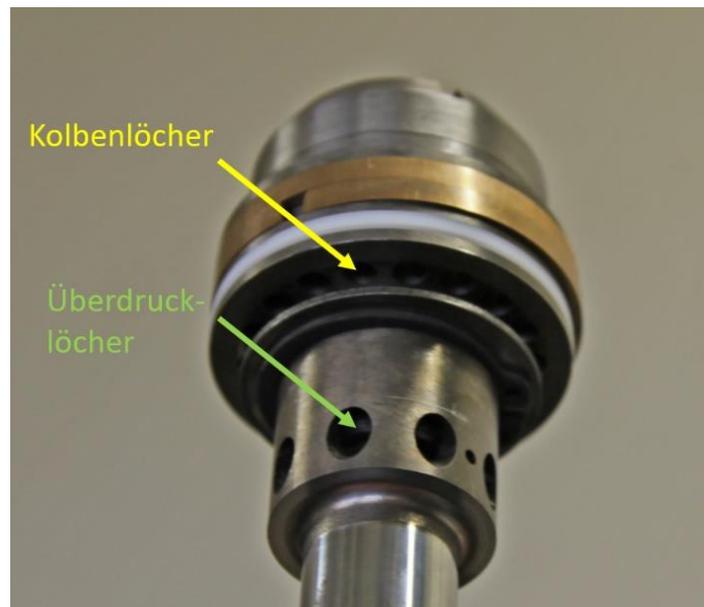


Abbildung 87: Kolbendurchlässe⁷⁸

Wie in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben, weisen Retarder je nach eingestellter Ansprechgeschwindigkeit verschiedene Betriebsverhalten auf, bei welchen das Strömungsverhalten zu unterscheiden ist:

- Geschwindigkeit über der Ansprechgeschwindigkeit
- Geschwindigkeit gleich oder unter der Ansprechgeschwindigkeit
- Rückstellung der Kapsel in die Grundstellung

⁷⁷ Eigene Beobachtung am Zentralverschiebebahnhof Wien am 06.02.2018.

⁷⁸ Eigene Aufnahme mit Anmerkungen am Zentralverschiebebahnhof Wien aufgenommen am 06.02.2018.

6.5.3.1. Verhalten über der Ansprechgeschwindigkeit

Kommt ein Wagen mit einer Geschwindigkeit, welche über der Ansprechgeschwindigkeit liegt, in Berührung mit dem Retarder, dann wirkt dieser als Bremsselement. Hierfür verantwortlich sind der Geschwindigkeitsventilteller, die Schraubenfeder, das Überdruckventil und der Ventilteller.

Die Kapsel befindet sich zu Beginn des Vorganges in Grundstellung. Durch das Auftreffen der Spurkranzspitze an der seitlichen Haube verursacht der Radsatz einen Druck im oberen Teil der Kapsel. Der Gleitzylinder versucht sich nach unten zu bewegen. Um dies zu ermöglichen, muss jedoch erst das Öl, welches sich im oberen Teil der Kapsel befindet, den Kolben passieren. Dadurch entsteht Druck in diesem Bereich des Gleitzylinders. Anschließend wird der Geschwindigkeitsteller auf die Schraubenfeder gedrückt, welche auf den Flansch des Kolbens einwirkt. Damit verschließen sich die Kolbenlöcher. Dadurch kommt es zu einem weiteren raschen Druckanstieg. Dieser Druck baut sich weiter auf bis die Kraft der Überdruckventilschraubfeder überwunden werden kann. Das Überdruckventil wird nach unten gedrückt. Öl kann nun durch die Überdrucklöcher nach unten entweichen. Die kinetische Energie des Wagens wird durch das Öl abgeleitet, welches durch die Überdrucklöcher abgeleitet wird. Am Ende dieses Vorganges befindet sich der Gleitzylinder in abgesenkter Lage, das Öl ist im unteren Bereich des Gleitzylinders. Die Schraubenfeder des Überdruckventils und die Stickstofffüllung sind komprimiert.⁷⁹

Die nachstehende Abbildung zeigt das Strömungsverhalten beim Abwärtshub im Inneren eines Dowty – Retarders:

⁷⁹ Vgl. Lehner, Harald. Marchler, Meinrad. Zmaritsch, Josef: Ablaufanlagen. Aufbau, Funktionsweise, Wartung und Inspektion von Balkengleisbremsen und Retarderbremsen (Kolbengleisbremsen). St. Pölten 2015, S.21.

Eigene Beobachtungen am Zentralverschiebebahnhof Wien am 6.02.2018.



Abbildung 88: Strömungsverhalten über der Ansprechgeschwindigkeit⁸⁰

6.5.3.2. Verhalten gleich oder unter der Ansprechgeschwindigkeit

Kommt ein Wagen mit einer Geschwindigkeit, welche gleich oder unter der Ansprechgeschwindigkeit liegt, in Berührung mit dem Retarder, dann bildet dieser kaum Widerstand. Er kann ohne merklichen Energieverlust nach unten gepresst werden. Hierfür verantwortlich sind der Geschwindigkeitsventilteller, die Schraubenfeder und der Ventilteller.

Die Kapsel befindet sich zu Beginn des Vorganges in Grundstellung. Durch das Auftreffen der Spurkranzspitze an der seitlichen Haube verursacht der Radsatz einen Druck im oberen Teil der Kapsel. Der Gleitzylinder versucht sich nach unten zu bewegen. Um dies zu ermöglichen muss jedoch erst das sich im oberen Teil der Kapsel befindliche Öl den Kolben passieren. Der Druck ist jedoch zu gering um den Geschwindigkeitsteller und die Schraubenfeder zusammenzudrücken. Dadurch kann das Öl über die Kolbenlöcher nach unten abfließen. Der Druck ist auch zu gering um das Überdruckventil zu öffnen. Der Abwärtshub entzieht kaum nennenswerte kinetische Energie. Am Ende dieses Vorganges befindet sich der Gleitzylinder

⁸⁰ Abbildung entnommen aus: Strassmayer, Thomas: Anwendung technischer Systeme im Eisenbahnbetrieb. GLEISBREMSSEN. St. Pölten 2016, S.11.

in abgesenkter Lage, das Öl ist im unteren Bereich des Gleitzylinders. Die Stickstofffüllung ist trotzdem komprimiert.⁸¹

Die nachstehende Abbildung zeigt das Strömungsverhalten beim Abwärtshub im Inneren eines Dowty – Retarders:

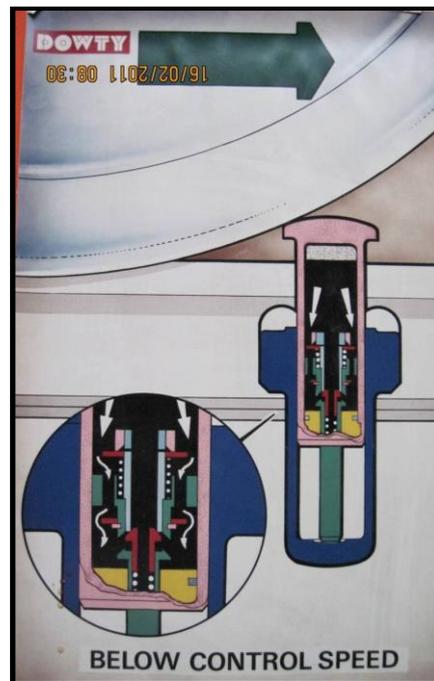


Abbildung 89: Strömungsverhalten gleich oder unter der Ansprechgeschwindigkeit⁸²

6.5.3.3. Rückstellung der Kapsel

Die Kapsel befindet sich bei einer Überföhrung an ihrer tiefsten Stelle. Ob die Ansprechgeschwindigkeit überschritten wurde oder nicht ändert nichts daran wo sich das Öl befindet und daran, dass der Stickstoff komprimiert ist. Stickstoff und Öl sind durch die dynamische Dichtung getrennt. Weitere Betrachtungen über die chemischen Zusammenhänge dieser beiden Substanzen und die unterschiedliche Dichte und Ordnungszahlen werden an dieser Stelle nicht durchgeführt.

⁸¹ Vgl. Lehner, Harald. Marchler, Meinrad. Zmaritsch, Josef: Ablaufanlagen. Aufbau, Funktionsweise, Wartung und Inspektion von Balkengleisbremsen und Retarderbremsen (Kolbengleisbremsen). St. Pölten 2015, S.21.

Eigene Beobachtungen am Zentralverschiebebahnhof Wien am 6.02.2018.

⁸² Abbildung entnommen aus: Strassmayer, Thomas: Anwendung technischer Systeme im Eisenbahnbetrieb. GLEISBREMSSEN. St. Pölten 2016, S.11.

Nach der Überföhrung sinkt der Druck, welcher auf den komprimierten Stickstoff eingewirkt hat und dieser kann sich wieder ausdehnen. Dadurch wird auch das Öl wieder durch die Kolbenlöcher in den oberen Teil der Kapsel gepresst. Der Gleitzyylinder bewegt sich dadurch wieder in die Grundstellung und eine neuerliche Beföhrung ist möglich.⁸³

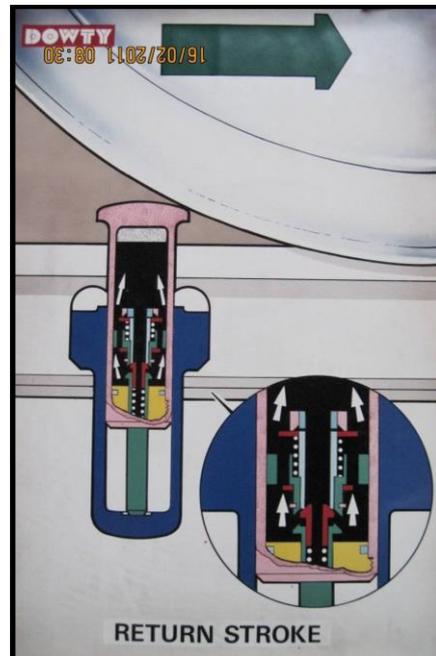


Abbildung 90: Strömungsverhalten bei der Rückstellung⁸⁴

6.5.4. Situierung im Gleis

Ein einzelner Retarder bringt 1,25 kJ Bremsarbeit bei einer Achslast von 22,5 t auf. Daher müssen bei Geschwindigkeiten von 4,25 m/s die Bremsenlemente in sehr kurzen Abständen angeordnet werden. Das kann mitunter in jedem Schwellenfach sein. So werden auf einem Verschiebebahnhof mehrere zehntausend Retarder angewandt.⁸⁵

Das nachfolgende Beispiel soll zeigen, wie viele Retarder für die Bremsung eines Wagens notwendig sind.

⁸³ Vgl. Lehner, Harald. Marchler, Meinrad. Zmaritsch, Josef: Ablaufanlagen. Aufbau, Funktionsweise, Wartung und Inspektion von Balkengleisbremsen und Retarderbremsen (Kolbengleisbremsen). St. Pölten 2015, S.21.

Eigene Beobachtungen am Zentralverschiebebahnhof Wien am 6.02.2018.

⁸⁴ Abbildung entnommen aus: Strassmayer, Thomas: Anwendung technischer Systeme im Eisenbahnbetrieb. GLEISBREMSSEN. St. Pölten 2016, S.11.

⁸⁵ Vgl. Pacht, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 7 Auflage. Braunschweig 2013, S.248.

Annahmen:

Beladener Güterwagen der Bauart Eas-y mit 80 t Gesamtgewicht.

Startgeschwindigkeit: 4,5 m/s

Endgeschwindigkeit: 1,5 m/s

Ermittlung der kinetischen Energie:⁸⁶

$$E_{Kin,V1} = \frac{m * v_1^2}{2} = \frac{80t * 10^3 * (4,5 \frac{m}{s})^2}{2} = 810 * 10^3 J = 810kJ$$

$$E_{Kin,V2} = \frac{m * v_2^2}{2} = \frac{80t * 10^3 * (1,5 \frac{m}{s})^2}{2} = 90 * 10^3 J = 90kJ$$

Notwendige Energie, welche dem Wagen entzogen werden muss:

$$E_{Entz} = E_{Kin,V1} - E_{Kin,V2} = 810kJ - 90kJ = 720kJ$$

Berechnung der Retarderanzahl (bei 1,25 kJ Bremsarbeit je Retarder):

$$Ret = \frac{E_{Vern}}{B} = \frac{720kJ}{1,25kJ} = 576 Retarder$$

⁸⁶ Vgl. Tipler, A Paul. Mosca, Gene: Physik. Für Wissenschaftler und Ingenieure. 2. Auflage. Elsevier Verlag. München 2004, S.141.

Anordnung von zwei Retardern je Schwellenfach (60 cm Schwellenabstand):⁸⁷

$$L = \frac{Ret * A_s}{2} = \frac{576 * 0,6m}{2} = 172,8m = 173m$$

$E_{Kin,V1}$Kinetische Energie 4,5 m/s

$E_{Kin,V2}$Kinetische Energie 1,5 m/s

E_{Entz}Zu entziehende Energie

RetAnzahl der Retarder

BBremsarbeit je Retarder

LNotwendige Länge

A_sSchwellenabstand

Aus diesem Beispiel geht deutlich hervor, dass für einen Verband von mehreren Güterwagen und dem Vorhandensein von mehreren Richtungsgleisen die Anzahl der Retarder in den Bereich von mehreren zehntausenden Stück steigt. Anhand des Zentralverschiebebahnhofs Wien werden typische Retardersituierungen erläutert.

An diesem Bahnhof sind die Retarder in verschiedene Sektoren und Rechnerabschnitte zur Steuerung der Ablaufgeschwindigkeit eingeteilt. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Übersichtsskizze der Sektoren:

⁸⁷ Vgl. ÖBB Infra (Hg.): Alternative Abroll-Bremstechnik. Ergebnisse TRIZ. Wien 2016, S.4.

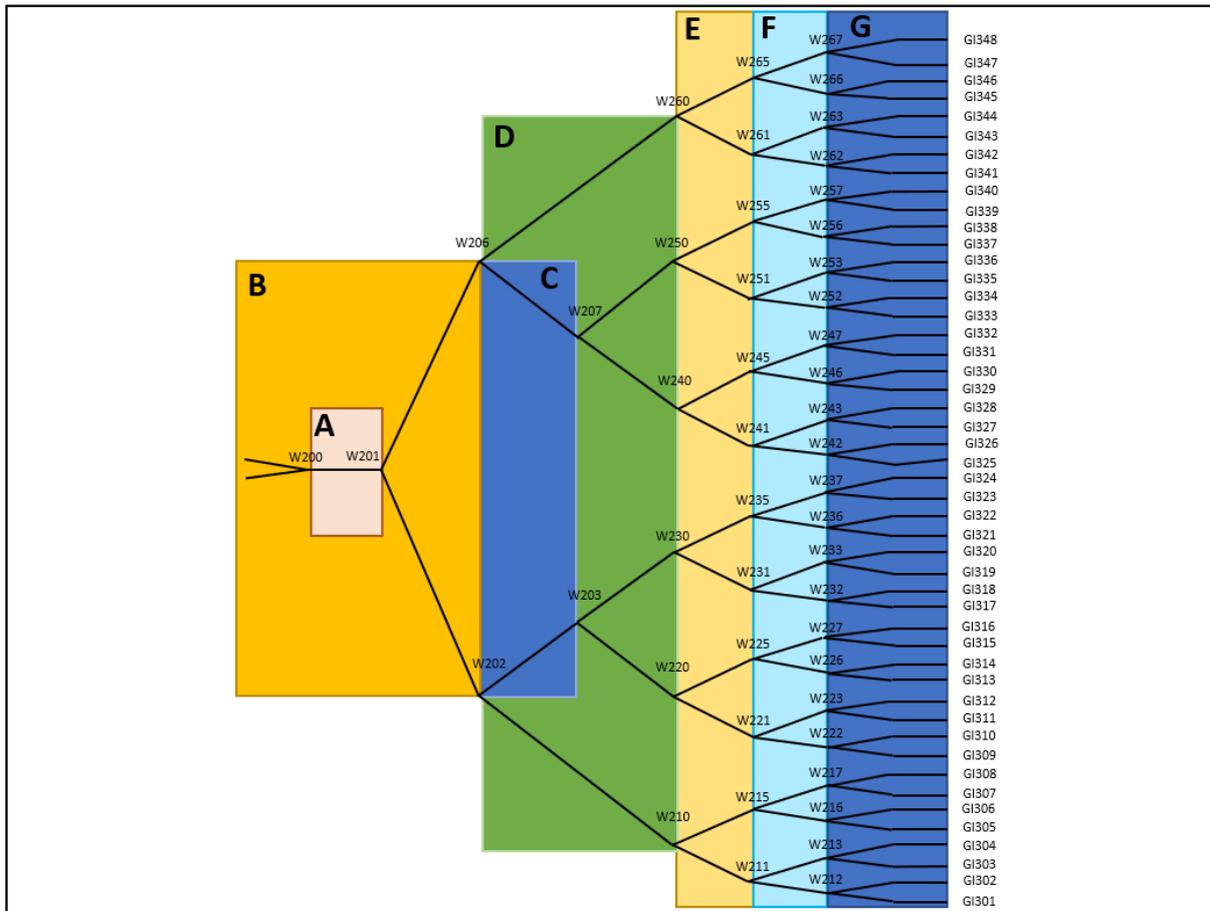


Abbildung 91: Situierung der Retarder am Zentralverschiebebahnhof Wien⁸⁸

Die nachfolgende Tabelle zeigt die Aufteilung der Retarder in den einzelnen Sektoren:⁸⁹

Sektor A	46 Stück
Sektor B	828 Stück
Sektor C	330 Stück
Sektor D	998 Stück
Sektor E	953 Stück
Sektor F	1.284 Stück
Sektor G	37.857 Stück
<u>GESAMT</u>	<u>42.296 Stück</u>

⁸⁸ Vgl. Eigene Darstellung anhand der Abbildung: ÖBB Infra (Hg.): *Wartungsplan Zvbf Wien*. Stand November 1998.

⁸⁹ Vgl. ÖBB Infra (Hg.): *Wartungsplan Zvbf Wien*. Stand November 1998.

Die exakte Positionierung der einzelnen Retarder wurde bei der Errichtung des Verschiebebahnhofs ermittelt. Dazu wurde das notwendige Bremsvermögen ermittelt und um einen Sicherheitszuschlag erweitert. Die Einbaustellen der Retarder wurden seither nicht verändert. Auch nach dem Tausch der Gleise blieb diese Positionierung gleich.⁹⁰

Um die Retarder neu zu positionieren ist eine vorherige Bremsberechnung notwendig.

6.5.5. Verschleiß

Wie in Abbildung 80 (Abrollberg Wien Zentralverschiebebahnhof mit Blick auf die Weichen 200 und 201) ersichtlich ist, gibt es auf Verschiebebahnhöfen hochbelastete Streckenabschnitte, über die der gesamte Wagenverkehr rollen muss. Dies ist am Zentralverschiebebahnhof Wien der Bereich zwischen den Weichen 200 und 201.⁹¹

Dieser Bereich, als Sektor A bezeichnet, ist mit 46 Retardern ausgestattet. Über diesen Bereich rollen alle abgestoßenen Wagen. Geht man von der vollen Leistungsfähigkeit aus, dann sind das 5.500 Wagen pro Tag. Angenommen es handelt sich dabei um 2-achsige Güterwagen, weisen Retarder in einem Monat (26 Betriebstage) 286.000 Überfahrungen auf. Die tatsächlichen Befahrungen variieren je nach Wagenbauarten oder effektiver Tagesleistung. Trotzdem wird bei jeder dieser Befahrungen der Retarder beansprucht. Die beweglich gelagerte Kapsel dreht sich bei jeder Berührung mit der Spurkranzspitze zur Gleismitte. Dadurch kommt es zu einem entsprechenden Abnutzungsmuster an der Oberfläche der Haube. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Abnutzung an der pilzförmigen Haube.

⁹⁰ Vgl. Wagner, Adrian: Retardereinsatz auf Verschiebebahnhöfen Diverses. Interview mit Leopold Böttinger. St. Pölten 2018. Zeile 85 - 96.

⁹¹ Eigene Beobachtung am Zentralverschiebebahnhof Wien am 29.04.2016.



Abbildung 92: Abnutzung an der Pilzhaube⁹²

6.5.5.1. Rad – Retarder Kontaktpunkt

Ähnlich wie bei Retardern ist auch an der Spurkranzspitze ein Verschleiß denkbar. Dies würde vor allem Wagen betreffen, welche gänzlich im Einzelwagenladungsverkehr eingesetzt werden. Um eine Argumentationsgrundlage gegenüber den Wagenhaltern zu haben wurden von ÖBB-Infrastruktur AG Maßnahmen beschlossen. Es wurde einerseits ein wagenseitiges Grenzmaß definiert. Andererseits werden durch den technischen Wagendienst Versuchsabläufe durchgeführt. Bei diesen Versuchen, welche am Verschiebebahnhof Villach durchgeführt werden, sollen Nachweise erbracht werden, wie sehr sich der Spurkranz durch die Retarder abnützt. Abnützungen am Spurkranz führen zu einer Änderung der äquivalenten Konizität, da durch die Abnutzung mitunter eine Änderung der lichten Weite entsteht. Wird dieses Mindestmaß verändert, versetzt dies mitunter andere Oberbauelemente in Schwingung (z.B. Weichenzungen).⁹³

6.5.5.2. Instandhaltungsablauf

Das Inspektionsgrenzmaß der Retarder ist nicht nur zwischen den einzelnen Sektoren unterschiedlich, sondern auch Bauteilabhängig am Einzelretarder. So müssen Maßnahmen am Gehäuse in einem deutlich längeren Intervall als an der Kapsel gesetzt werden.⁹⁴

⁹² Eigene Aufnahme am Zentralverschiebebahnhof Wien aufgenommen am 13.07.2017.

⁹³ Vgl. Wagner, Adrian: StilvA – Meeting Bewertung. Protokoll Meeting Dezember 17. St. Pölten 2017, S.3.

⁹⁴ Vgl. Wagner, Adrian: Retardereinsatz auf Verschiebebahnhöfen Diverses. Interview mit Leopold Böttinger. St. Pölten 2018. Zeile 27 - 35.

Unterschieden wird also zwischen zustandsorientierter und fristenorientierter Instandhaltung, wobei zum Beispiel am Zentralverschiebebahnhof Wien ein bestimmtes Zeitfenster am Vormittag vor dem Abrollstart vorgesehen ist (07:00 – 10:30). In dieser Zeit sind die MitarbeiterInnen damit beschäftigt die Kapseln auszutauschen und die Gehäuse zu inspizieren. Die Aufarbeitung der Kapseln in der Retarderwerkstätte findet unabhängig von diesem Zeitintervall statt.⁹⁵

Zustandsorientierte Instandhaltung

Bei dieser werden eventuelle Mängel bei der Sichtinspektion festgestellt und folgende Maßnahmen gesetzt:

TEIL	FEHLER / SCHADEN	ABHILFE
Schmiernippel	lose fehlt	Loctite 638 auftragen und festziehen Ersetzen und mit Loctite 638 sichern
Gehäuseabstreifring	fehlt oder beschädigt	durch neue ersetzen
Stahlkugel	fehlt oder beschädigt	durch neue ersetzen, mit Vorstecker sichern
Verschlusskappe	fehlt	durch neue ersetzen
Mutter M27	lose oder fehlt	ersetzen, mit LOOC-Sicherungsscheibe sichern und mit 700Nm festziehen
Bolzen	lose oder gebrochen	Gehäuse tauschen
Vorstecker	beschädigt oder fehlt	durch neuen ersetzen
Gehäuseentwässerungsbohrung	verstopft	mit geeignetem Werkzeug freilegen
Gehäuse	bleisschotter liegt am Gehäuse an	Gehäuse freilegen
Fett	Kapsel ist trocken und glänzt	Gehäuse abschmieren Siehe Schmiertabelle 2.2.1
Fett	am Gehäuseboden	Mit geeignetem Werkzeug entfernen
Plastikschutzkappe	fehlt	durch Neue ersetzen
Kapsel	keine Grundstellung	durch Neue ersetzen
Pilzförmige Haube	beschädigt	durch neue Kapsel ersetzen

Tabelle 1: Inspektionsliste aus der Wartungsanleitung für die Dowty Retarderanlage⁹⁶

⁹⁵ Vgl. Lehner, Harald. Marchler, Meinrad. Zmaritsch, Josef: Ablaufanlagen. Aufbau, Funktionsweise, Wartung und Inspektion von Balkengleisbremsen und Retarderbremsen (Kolbengleisbremsen). St. Pölten 2015, S.21.

⁹⁶ Vgl. Tabelle entnommen aus: Ebd. S.22.

Fristenorientierte Instandhaltung

Am Zentralverschiebebahnhof Wien werden je nach Sektor verschiedene fristenorientierte Instandhaltungen durchgeführt. Das Hauptaugenmerk liegt auf dem hochbelasteten Abschnitt zwischen den Weichen 200 und 201. Hier werden die vorhandenen 46 Kapseln vierteljährlich getauscht. Im Winterhalbjahr und im Sommerhalbjahr werden zudem verschiedene Ölgemische verwendet, um die Funktion möglichst witterungsunabhängig sicherzustellen. Die Kapseln bis zu den Verteilzonen werden halbjährlich gewechselt. Auch bei diesen 828 Stück wird im Winter und im Sommer ein unterschiedliches Ölgemisch verwendet.⁹⁷

Die restlichen Sektoren bis zu den Richtungsgleisen werden in einem deutlich längeren Intervall behandelt. Dieses liegt in den Richtungsgleisen bei einer Million Überfahrungen oder spätestens nach drei Jahren. Für die Gehäuse wird im Bereich des Sektors A jährlich eine eingehendere Wartung durchgeführt. In den Richtungsgleisen ist dieses Intervall vierjährlich. Hierbei werden wieder jene Maßnahmen, wie in **Tabelle 1 (Inspektionsliste aus der Wartungsanleitung für die Dowty Retarderanlage)** beschrieben, durchgeführt.⁹⁸

6.5.6. Anforderungen an ein adaptiertes System

Durch eine Systemveränderung dürfen keine Verschlechterungen zum derzeitigen Betrieb entstehen. Um zu definieren was Verschlechterungen sind beziehungsweise welche Rahmenbedingungen erfüllt werden müssen, wurde ein Kriterienkatalog festgelegt, welcher von einem adaptierten System erfüllt werden muss. Diese Anforderungen können in allgemeine Anforderungen und in jene die nur die Adaptierung von Retardern betreffen unterteilt werden.

6.5.6.1. Allgemeine Systemanforderungen

Die oberste Anforderung an das Bremssystem ist, dass das unbegleitete Rollen von Güterwagen ohne und mit Gütern ermöglicht werden muss. Dabei muss es auch möglich sein, gefährliche Güter in entsprechenden Wagen über den Abrollberg laufen zu lassen. Das Risiko von Beschädigungen an Wagen und deren Ladung muss auf ein technisch realisierbares

⁹⁷ Vgl. Wagner, Adrian: Retardereinsatz auf Verschiebebahnhöfen Diverses. Interview mit Leopold Böttinger. St. Pölten 2018. Zeile 37 - 42.

⁹⁸ Vgl. Lehner, Harald. Marchler, Meinrad. Zmaritsch, Josef: Ablaufanlagen. Aufbau, Funktionsweise, Wartung und Inspektion von Balkengleisbremsen und Retarderbremsen (Kolbengleisbremsen). St. Pölten 2015, S.22.

Wagner, Adrian: Retardereinsatz auf Verschiebebahnhöfen Diverses. Interview mit Leopold Böttinger. St. Pölten 2018. Zeile 44 - 47.

Minimum reduziert sein. Dies erfordert einerseits eine hohe Regelungsgenauigkeit und eine ladungsschonende Bremsung.⁹⁹

Gleichermaßen darf der Wagendurchsatz nicht geringer werden. Daher soll auch mit einem adaptierten System die Leistungsfähigkeit nicht sinken. Am Zentralverschiebebahnhof Wien beträgt diese, wie in Kapitel 2.3.2.5 (Leistungsfähigkeit) erläutert, in 24 Stunden bis zu 5.500 Wagen.¹⁰⁰ Dies würde einen Non-Stop-Betrieb voraussetzen und daher eine Anlagenverfügbarkeit von 99,85% erfordern. Die Nutzungsdauer muss bei 25 Jahren liegen.¹⁰¹

Das System muss Wagenzüge mit 630 t Gesamtgewicht abfertigen können. Daher soll es möglich sein, Zugverbände mit sieben Wagen und je 90 t durch den Ablaufberg zu rollen. Dies beruht auf der Systemgrenze der Bestandsanlagen (Verschiebersteig). Die Hauptanforderung der Systementwicklung liegt bei der Lärmsenkung. Daher soll ein adaptiertes System weniger Emissionen als das Bestandssystem aufweisen.¹⁰²

6.5.6.2. Systemspezifische Anforderungen

Retarder müssen für die erforderlichen Betriebsabläufe (Wagenvereinigungen, Verschubfahrten, Wartungen) auch von Triebfahrzeugen überfahrbar sein.¹⁰³ Dies gilt nicht für absenkbare Retarder wie sie am Verschiebebahnhof Graz verbaut sind. Dort werden die Gefälleausgleichsbremsen mittels einer mechanischen Vorrichtung bei eingestelltem Abrollbetrieb abgesenkt.¹⁰⁴

Neben der zu vermeidenden Verschlechterung am Gesamtsystem, darf auch die Bremsleistung an den Retardern, betrachtet am Wagenlaufweg, nicht weniger werden. Abänderungen am Einzelretarder sind zulässig, aber betriebliche Einschränkungen sind hierbei auch unzulässig.¹⁰⁵

⁹⁹ Vgl. ÖBB Infra (Hg.): Anforderungen an Bremsen für Abrollanlagen. Wien 2017, S.2.

¹⁰⁰ Vgl. ÖBB Infrastruktur Betrieb AG (Hg.): Zentralverschiebebahnhof Wien. URL: https://web.archive.org/web/20090323143800/http://www.railnet-austria.at/de/Produkte_und_Services/Zentralverschiebebahnhof_Wien/index.jsp [Stand 12.02.2017].

¹⁰¹ Vgl. ÖBB Infra (Hg.): Anforderungen an Bremsen für Abrollanlagen. Wien 2018, S.2.

¹⁰² Wagner, Adrian: StilvA – Meeting Bewertung. Protokoll Meeting Dezember 17. St. Pölten 2017, S.5.

¹⁰³ Vgl. Ebd., S.2.

¹⁰⁴ Vgl. SIGNAL + DRAHT (Hg). Krims, Verena. Sturm, Peter: Modernisierung Verschiebebahnhof Graz. 105 Ausgabe – 3 / 2013, S.26

¹⁰⁵ Vgl. Kapitel 6.5.5.2 (Instandhaltungsablauf).

6.5.6.3. Instandhaltung

Bezugnehmend auf die Instandhaltung dürfen die Adaptierungen keine Verschlechterung der Bestandssituation darstellen. Anzustreben ist eine Verbesserung der Periodizität von Inspektionen. Eine Verbesserung stellt beispielsweise die Erweiterung der Intervalle auf über sechs Monate dar.¹⁰⁶

6.5.7. Lärmschutzgrundlagen

Als Grundlagen für die nachfolgende Emissionsermittlung werden in diesem Kapitel relevante Begriffe aus der Umweltanalyse dargestellt und erläutert. Noch bevor diese Thematik beleuchtet wird, werden die charakteristischen Einflussparameter der Immissionsbelastung dargelegt. Die Emissionsbelastung setzt sich aus folgenden drei Teilelementen zusammen:¹⁰⁷

- Verkehr
- Meteorologie
- Randbedingungen

6.5.7.1. Verkehr

In diesem Teilelement wird der Verkehr als Emissionsquelle betrachtet. Konkret sind die Schallquellen im vorliegenden Projekt die Rollgeräusche auf der Schiene und dem Rad. Dazu kommen Oberbauemissionen im Bereich des Körperschalls. Durch die Vershubtätigkeiten der Triebfahrzeuge entstehen auch Motorengeräusche.¹⁰⁸ Die im Mittelpunkt stehende Schallquelle ist das Geräusch des Retarders. Daher richtet sich die weitere Betrachtung auf diesen Emissionsproduzenten.¹⁰⁹

Wie die nachfolgende Abbildung zeigt, setzt sich die Emission aus der Luftschall- und der Körperschallausbreitung zusammen:

¹⁰⁶ Vgl. ÖBB Infra (Hg.): Anforderungen an Bremsen für Abrollanlagen. Wien 2018, S.3.

¹⁰⁷ Vgl. Macoun, Thomas: Verkehrs-/Umweltanalyse. Wien 2013, S.5.

¹⁰⁸ Vgl. Macoun, Thomas: Verkehrs-/Umweltanalyse. Wien 2013, S.22.

¹⁰⁹ Vgl. Michelberger, Frank: Inhalt des Angebotes für das Programm VIF2015. 5.Ausschreibung Herbst 2015. Version 1.9.2015. St. Pölten 2015, S. 6.

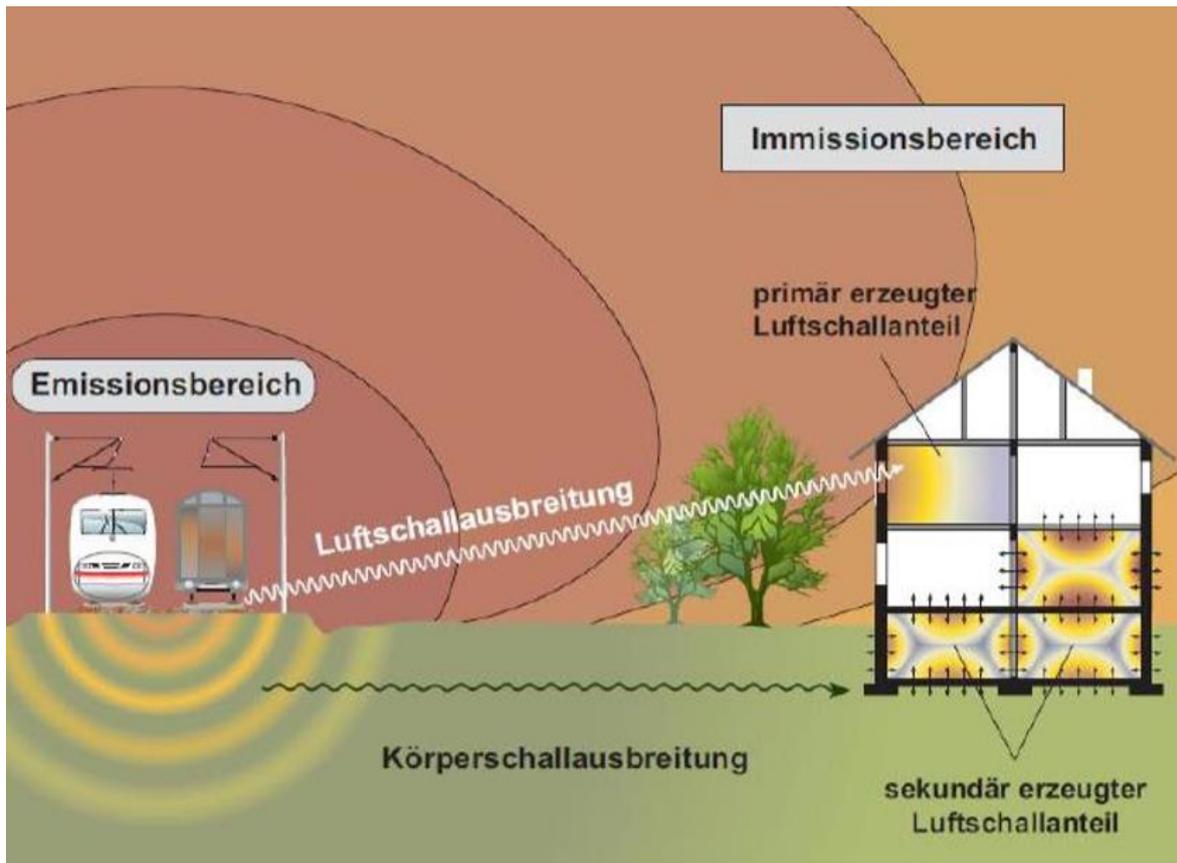


Abbildung 93: Schallausbreitung¹¹⁰

Bei Neubauten und wesentlichen Umbauten müssen bei den entsprechenden Erfordernissen Maßnahmen gegen die Schallimmissionen gesetzt werden. Das können Lärmschutzwände, Lärmschutzwälle, Grünverbauungen oder Kombinationen der genannten Varianten sein. Zudem ist ein passiver Lärmschutz, beispielsweise durch schallhemmende Fenster, unter bestimmten Voraussetzungen möglich.¹¹¹ Am Zentralverschiebebahnhof Wien sind für den aktiven Immissionsschutz Lärmschutzwände aus unterbrochenen Wänden im Bereich zwischen dem Abrollberg und der Weiche 201 verbaut.¹¹²

¹¹⁰ Abbildung entnommen aus: Macoun, Thomas: Verkehrs-/Umweltanalyse. Wien 2013, S.46.

¹¹¹ Vgl. BGBl. II Nr. 415/1993: Verordnung des Bundesministers für öffentliche Wirtschaft und Verkehr über Lärmschutzmaßnahmen bei Haupt-, Neben- und Straßenbahnen (Schienenverkehrslärm – Immissionsschutzverordnung – SchIV). Fassung vom 30.04.2018, §1-3.

¹¹² Eigene Beobachtung: Wien Zentralverschiebebahnhof am 13.07.2018.

6.5.7.2. Meteorologie

Für die Betrachtung der Schallausbreitung sind die Windgeschwindigkeit und auch die Windrichtung relevant. Betrachtet man beispielsweise den Zentralverschiebebahnhof Wien, dann ist dieser der nordwestlichen Strömung ausgesetzt. Das bedeutet, dass die Hauptwindrichtungen in diesem Bereich von Nordwest bis Süd und von Süd bis Ost ist.¹¹³

6.5.7.3. Randbedingungen

Als Randbedingungen werden die Bebauung und der Abstand der Anwohner zur Emissionsquelle angesehen.¹¹⁴ In der nachfolgenden Abbildung wird die Bebauung am Zentralverschiebebahnhof Wien betrachtet. Betrachtet vom Gleisbereich zwischen Weiche 200 und Weiche 201 sind in dieser Abbildung zwei leicht vorstellbare Radien eingezeichnet, wobei die Entfernung vom Projektteam festgelegt wurde. In Rot die Entfernung von 500 m und in Gelb die Entfernung von 1000 m. Im 500 m Radius liegt westlich eine Siedlung, welche jedoch nicht in der Hauptwindrichtung liegt. In der Hauptwindrichtung liegen jedoch bebaute Grundstücke im 1000 m Radius nördlich des Abrollberges.

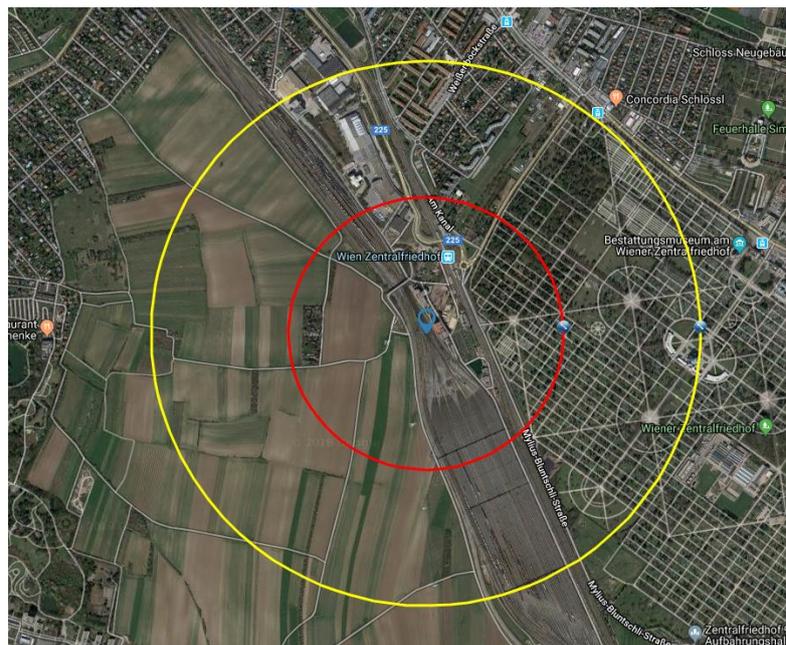


Abbildung 94: Abrollberg Zentralverschiebebahnhof Wien 500m / 100m Radius¹¹⁵

¹¹³ Vgl. Wagner, Adrian: Meteorologie Wien Zentralverschiebebahnhof. Interview mit Thomas Hager. Wien 2018. Zeile 28 - 34.

¹¹⁴ Vgl. Macoun, Thomas: Verkehrs-/Umweltanalyse. Wien 2013, S.4.

¹¹⁵ Abbildung entnommen aus: Free Map Tools (Hg.): Radius Around Point. URL: <https://www.freemaptools.com/radius-around-point.htm> [Stand 28.04.2018].

6.5.8. Schallemissionsermittlung

Um Maßnahmen abzuleiten wie die Schallemissionen von den Retardern geringgehalten werden können, wird in erster Linie ermittelt, welche Bestandteile des Bremseselementes die Emissionen verursachen. Daneben muss nicht nur die Ursache des Lärms ermittelt werden, sondern auch wann er entsteht, ob dies beim Berühren der Spurkranzspitze mit der Haube oder beispielsweise erst beim Arbeits- oder Leerhub ist.

Der Ablauf kann also wie folgt unterteilt werden:

1. Schritt: Ermittlung der Betriebsabläufe als Grundlage
2. Schritt: Erstellung von Hypothesen der Lärmproduktion
3. Schritt: Erstmessung am Abrollberg und an einem Demonstrator
4. Schritt: Auswertung der Messergebnisse
5. Schritt: Ableitung von möglichen Verbesserungsmaßnahmen
6. Schritt: Bewertung der Verbesserungsmaßnahmen (Eventuell Ausscheidung von Maßnahmen)
7. Schritt: Umsetzung dieser Maßnahmen
8. Schritt: Emissionsmessung am Demonstrator
9. Schritt: Verifizierung der gesetzten Maßnahme
10. Schritt: Empfehlungen für weitere Maßnahmen

Gemeinsam mit dem Department Medien und Digitale Technologien der FH St. Pölten führte das Carl Ritter von Ghenga Institut für integrierte Mobilitätsforschung Messungen zur Einschätzung der spektralen Klangkomponenten durch. Diese wurde nach dem oben aufgelisteten Ablauf durchgeführt. Die Messung erfolgte gemeinsam, die Auswertung und die initiale Interpretation erfolgte durch das Department Medien und Digitale Technologien. Die restlichen Ableitungen und Tätigkeiten erfolgten durch das Projektteam.

6.5.8.1. Hypothese vor der Messung

Aus der eigenen Beobachtung und dem Wissen über den Retarderaufbau können bereits ohne Messungen erste Annahmen getroffen werden. Denkbar wäre zum Beispiel, dass der Gleitzylinder in Schwingung gebracht wird und es dadurch zu Emissionen kommt. Weiters könnten auch aufgrund der Kraftübertragung zwischen dem Gehäuse und dem Schienensteg Körperschallemissionen entstehen. Zu erwarten sind auch Unterschiede zwischen den einzelnen Wagentypen. Eine Klanguausbreitung unter dem Fahrzeug ist fraglich und daher im Zuge der Messung zu identifizieren.

6.5.8.2. Anforderungen an eine Emissionsmessung

Folgende Anforderungen sind an die Erstmessung zu stellen:

- Nachweis welche Emissionen entstehen
- Lokalisation der auftretenden Schallquellen
- Ermittlung der Bauteile, welche maßgeblich Schall produzieren
- Ob Unterschiede bei verschiedenen Fahrzeugtypen erkennbar sind

Folgendes soll nicht erfolgen:

- Bestimmung des absoluten Lärmpegels
- Veränderungen an den Fahrzeugen
- Spezielle Fahrzeugkompositionen

6.5.8.3. Durchführung einer Emissionsmessung

Durchgeführt wurde die Messung am Wiener Zentralverschiebebahnhof an einem Werktag mit normalen Betriebsablauf. Die nachfolgende Abbildung zeigt den Messpunkt (mit einem Stern markiert):

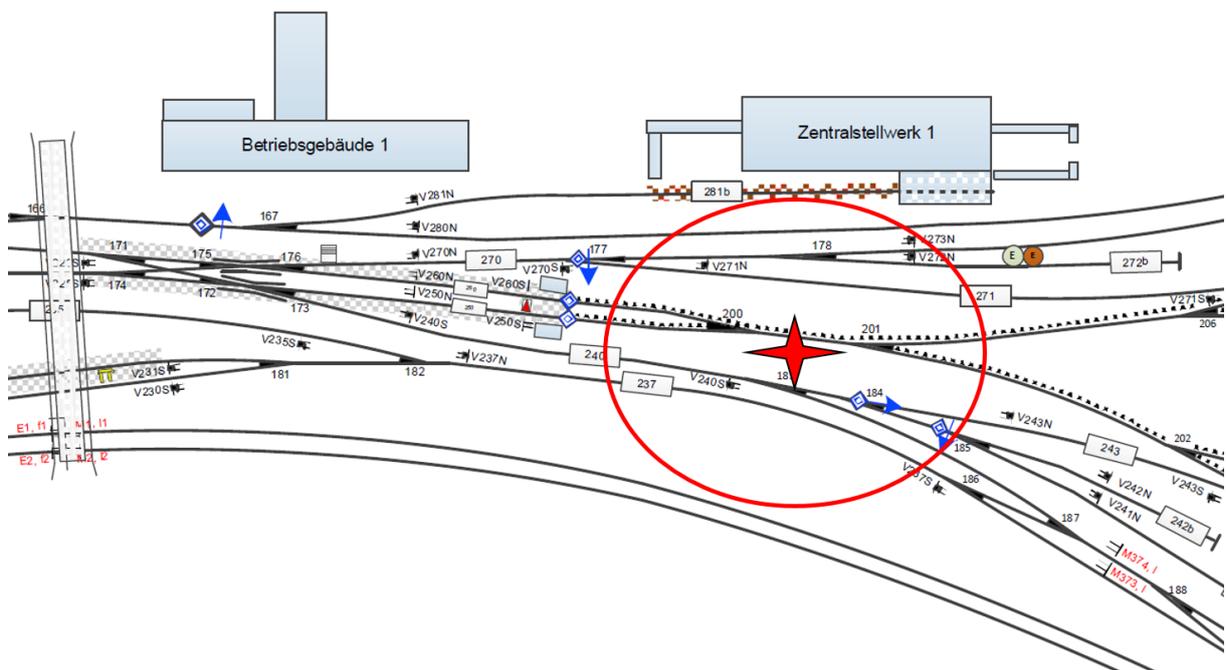


Abbildung 95: Messpunkt am Wiener Zentralverschiebebahnhof¹¹⁶

¹¹⁶ Vgl. Abbildung entnommen aus: ÖBB Infra (Hg.): Wien Zentralverschiebebahnhof (Zur). Lageskizze. Laufende Nummer 005. Wien 2016, S.1.

Örtlichkeit:

Betriebsstelle Wien Zentralverschiebebahnhof
 Hauptabrollberg beim Zentralstellwerk 1
 Zwischen den Weichen 200 und 201

Es wurde für die Messung ein Tag mit trockener Witterung und wenig Wind gewählt um die Messung nicht zu verfälschen:

Datum & Zeit: 12. Juli 2017 von 13:00 – 13:30

Wetter: Sonnig mit relativer Feuchte von 30%

Wind: Unter 30 km/h aus südlicher Richtung

Temperatur: Zwischen 25 und 30° C

Niederschlag: Kein Niederschlag bei der Messung und 24 Stunden davor.

Messmittel:¹¹⁷

Verwendet wurden fünf Mikrofone, zwei davon als Stereopaar.

Mikrofon A (MIC A): 1 Stereopaar (Nierencharakteristik, XY-Mikrofonierung, Zoom H6)

Mikrofon B (MIC B): 1 Richtrohrmikrofon (Superniere, Rhode NTG-2)

Mikrofon C (MIC C): 1 Stereopaar (Nierencharakteristik, XY-Mikrofonierung, Zoom H6)

Positionierung:¹¹⁸

Mikrofon A und B wurden 3 m seitlich der Gleismitte auf einer Höhe von 30 – 40 cm vom Boden befestigt. Neben den Retardern an der gedachten Sichtlinie zwischen Gleismitte und Mikrofon A/B wurde das Mikrofon C im Schwellenfach angebracht.

6.5.8.4. Wagenliste – gemessene Bauarten

Die Erfassung der gemessenen Wagen erfolgt um festzustellen, ob zwischen den Wagentypen Unterschiede erkennbar sind und wie sich diese auf den Schall auswirken. Im Zuge der Messung wurden folgende Wagentypen in der aufgezählten Reihenfolge gemessen:

¹¹⁷ Vgl. FH St. Pölten GmbH (Hg.): Vorstudie zur Einschätzung der spektralen Klangkomponenten der beim Überrollen von Retardern entstehenden Schallemission. St. Pölten 2017, S.1.

¹¹⁸ Vgl. Ebd., S.1

Anzahl	Art	Land	Einsteller	Bauart	Achsen	Drehgestell
1	Offener Güterwagen	CZ	ČDC	Eas-u	4	Ja
2	Offener Güterwagen	CD	ČDC	Eas	8	Ja
1	Offener Güterwagen	CD	ČDC	Eas-u	4	Ja
6	Kesselwagen	NL	Nacco	Zags	24	Ja
2	Kesselwagen	NL	Nacco	Zags	4	Ja
4	Holz Rungenwagen	CZ	ČDC	Laaps	8	Nein
1	Offener Güterwagen	CZ	ČDC	Eas	2	Ja
2	Offener Güterwagen	CZ	ČDC	Eas	8	Ja
1	Offener Güterwagen	CZ	ČDC	Eas	4	Ja
1	Offener Güterwagen	CZ	RCW	Eanos	4	Ja
3	Schwellenwagen	AT	ÖBB	-	6	Nein
1	Rungenwagen leer	AT	ÖBB	Rns-z	4	Nein
2	Rungenwagen leer	AT	ÖBB	Rns-z	8	Ja
1	Kesselwagen	AT	Ersa	Zaes	4	Ja
1	Kesselwagen	DE	PCM	Zagkks	4	Ja
5	Offener Güterwagen	SK	ZSSK-C	Eas	10	Ja
1	Holzwagen Beladen	SK	ZSSK-C	Snps	4	Ja
7	Offener Güterwagen	SK	ZSSK-C	Eas	14	Ja
1	Offener Güterwagen	SK	ZSSK-C	Eas	4	Ja
1	Rungenwagen beladen	SK	ZSSK-C	Sps	4	Ja
2	Offener Güterwagen	SK	ZSSK-C	Eas	4	Ja
2	Offener Güterwagen	SK	ZSSK-C	Eas	4	Ja
2	Offener Güterwagen	SK	ZSSK-C	Eanos	8	Ja

Tabelle 2: Wagenliste - Messung 12.07.2017¹¹⁹

6.5.9. Auswertung und Interpretation

Neben der im vorangegangenen Kapitel erörterten Messung wurde auch an einem Einzelretarder im Schulungszimmer des Wiener Zentralverschiebebahnhofes eine Messung durchgeführt. Dabei wurden die ersten Erkenntnisse der Emissionsmessung im Feld herangezogen um am Einzelobjekt Schlüsse zu ziehen. In diesem Kapitel erfolgt die Auswertung der beiden Messungen.

¹¹⁹ Vgl. Eigene Notizen und Videoaufnahmen vom 12.07.2017.

6.5.9.1. Auswertung und Interpretation der Messung im Außenbereich

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Spektrogramme der Mikrofone A (oben), B (mittig) und C (unten). Die Mikrofone A und B, welche seitlich im Gleisbett positioniert waren, sind aufgrund ihrer unterschiedlichen Bauart nicht direkt zu vergleichen. Es zeigt sich, dass im Gegensatz zu Mikrofon C, welches sich im Schwellenfach befand, mehr Teiltöne erkennbar sind. Die Mikrofone A und C sind also aufgrund ihrer Baugleichheit vergleichbar. Aus dieser Messung kann einerseits abgeleitet werden, dass die Wagenbeladung beziehungsweise das Gewicht eine Veränderung der Klangfarbe darstellt. Somit ist auch die Schallemission unterschiedlich:

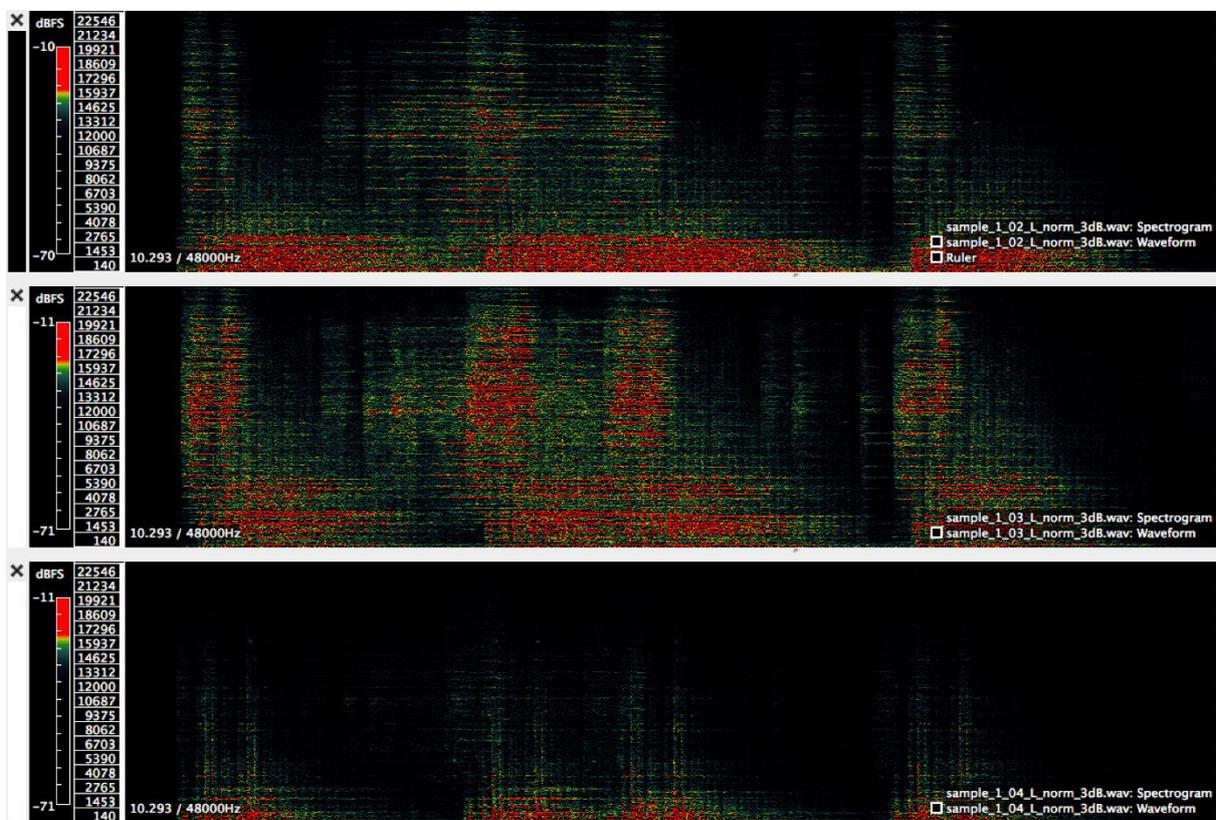


Abbildung 96: Sample MIC A / MIC B / MIC C¹²⁰

Die Mikrofone A und C zeigen aufgrund ihrer Vergleichbarkeit einen deutlichen Unterschied der Klangfarbe. Das würde darauf hindeuten, dass die Geräuschausprägung im

¹²⁰ Abbildung entnommen aus: FH St. Pölten GmbH (Hg.): Vorstudie zur Einschätzung der spektralen Klangkomponenten der beim Überrollen von Retardern entstehenden Schallemission. St. Pölten 2017, S.2.

Schwellenfach geringer ist als neben dem Gleis. Um dies zu verifizieren kann der Verlauf der Spektrallinien dieser Messung herangezogen werden.

In der nachfolgenden Abbildung wird für das Mikrofon A (seitlich im Gleisbett) die Farbe Rot verwendet. Für das Mikrofon B (seitlich im Gleisbett) die Farbe Orange und für das Mikrofon C (Im Schwellenfach) die Farbe Lila. In diesem Messausschnitt wird der spektrale Mittelwert betrachtet, welcher ein Maß für die Schärfe eines Klanges darstellt. Vergleicht man auch hier das Mikrofon A und C fällt auf, dass der Kurvenabstand beider Frequenzen (Hz) über den Betrachtungszeitraum schwankt. Jedoch weist das Mikrofon A zu den meisten Abtastwerten einen höheren Wert als Mikrofon C auf. Ein ähnliches Bild bietet sich auch im dB-Chart. Auch hier weist das Mikrofon C eine niedrigere Wertigkeit auf.

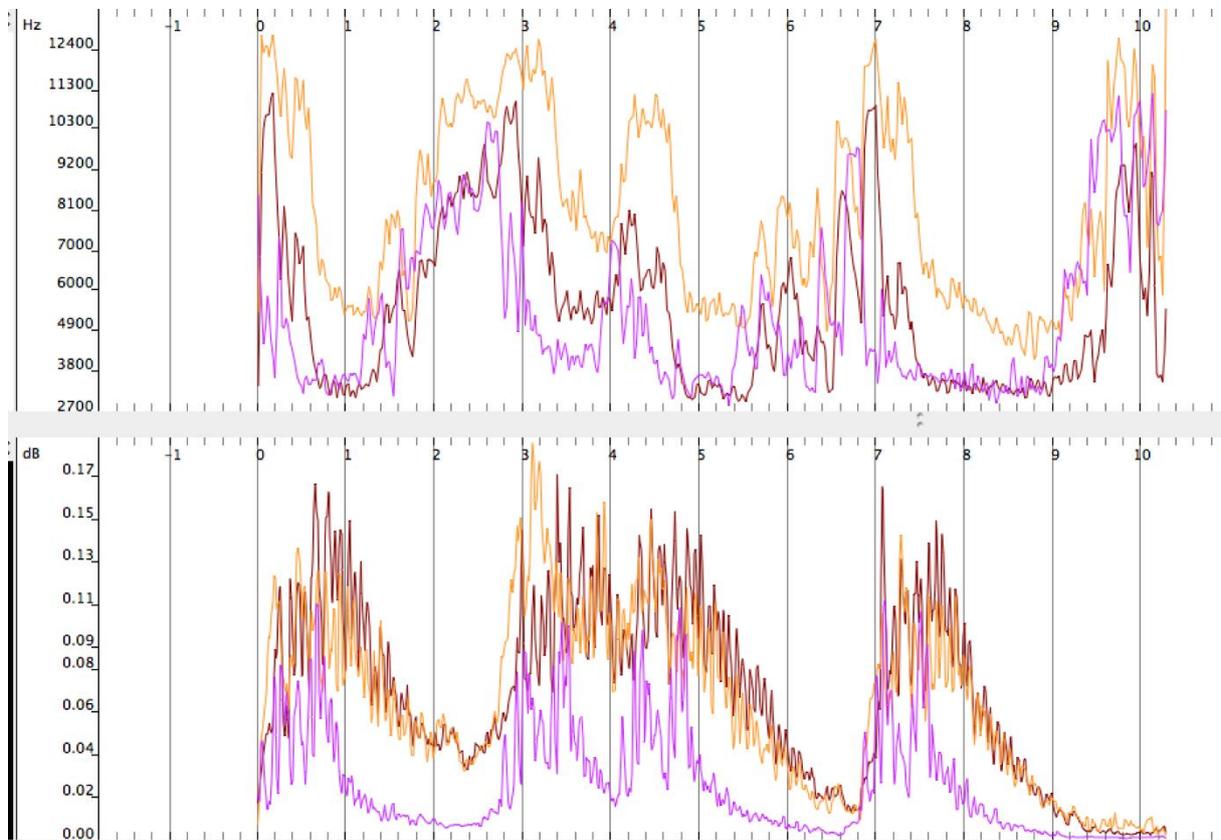


Abbildung 97: Verlauf des Spectral Centroids (Mikrofon A rot, Mikrofon B orange, Mikrofon C lila)¹²¹

¹²¹ Abbildung entnommen aus: FH St. Pölten GmbH (Hg.): Vorstudie zur Einschätzung der spektralen Klangkomponenten der beim Überrollen von Retardern entstehenden Schallemission. St. Pölten 2017, S.3.

Diese Erkenntnis kann auch durch eine Spektral- und Formatanalyse der Hallfahnen bestätigt werden. Es zeigt sich, dass der Unterboden der Wagen und das Gleisbett nicht für die Ausbildung von Resonanzen verantwortlich sind. Weiters kann eine Entstehung von Kammerfiltereffekten bemerkt werden. Das bedeutet in der Praxis, dass sich durch die symmetrische Anordnung von Retardern die Frequenzen additiv verhalten.¹²²

Aus einem 46 Sekunden langen zusammenschnitt des Mikrofons B mit mehreren verschiedenen Wagentypen kann erkannt werden, dass die Teiltöne und die Klangfarbenunterschiede durchwegs verschieden sind. Die nachfolgende Abbildung zeigt diesen Ausschnitt:

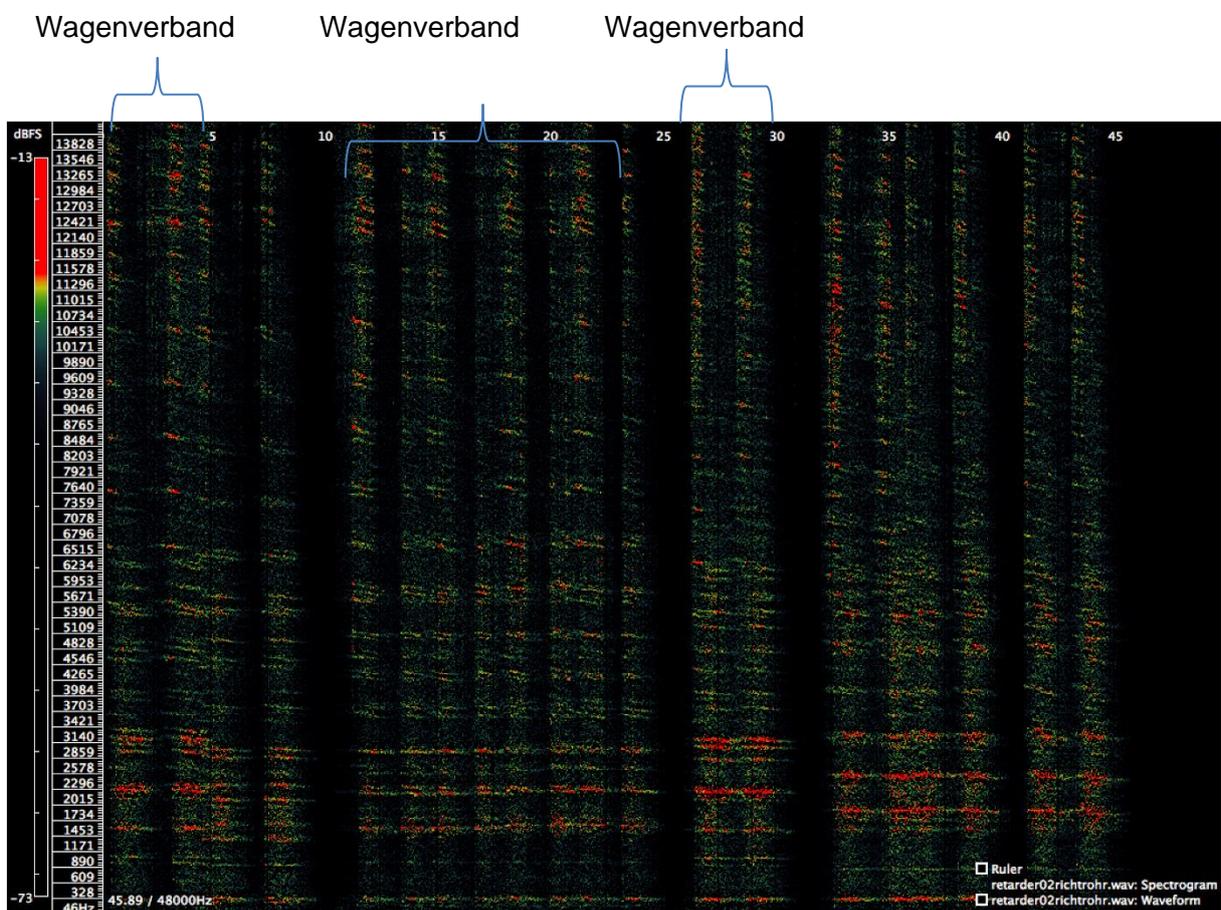


Abbildung 98: Zusammenschnitt Mikrofon B - Klangfarbe¹²³

¹²² Vgl. Ebd., S.4.

¹²³ Abbildung entnommen aus: FH St. Pölten GmbH (Hg.): Vorstudie zur Einschätzung der spektralen Klangkomponenten der beim Überrollen von Retardern entstehenden Schallemission. St. Pölten 2017, S.4.

6.5.9.2. Auswertung und Interpretation der Messung am Einzelretarder

Bei der Messung am Einzelretarder wurde durch ein Beschlagen der Kapsel mit einem Hammer das Verhalten der pilzförmigen Haube betrachtet. Dabei wurden die ersten drei Schläge senkrecht von oben auf die Haube ausgeführt. Die nächsten drei Schläge seitlich an den Rand der Haube. Der Winkel, wie auf die Seite aufgeschlagen wurde, variierte bei den Schlägen.

Messmittel:¹²⁴

Verwendet wurden fünf Mikrofone, zwei davon als Stereopaar.

Mikrofon A (MIC A): 1 Stereopaar (Nierencharakteristik, XY-Mikrofonierung, Zoom H6)

Mikrofon B (MIC B): 1 Richtrohrmikrofon (Superniere, Rhode NTG-2)

Mikrofon D (MIC C): 1 Körperschallwandler (Kondensator, AKG 411)

Positionierung:¹²⁵

Das Mikrofon A und B wurden im 0,5 m Abstand senkrecht zum Retarder auf einer Höhe von 30 – 40cm vom Boden befestigt. Von Mikrofon A wurde nur ein Kanal verwendet. Das Mikrofon D wurde direkt am Gehäuse des Retarders angebracht.

¹²⁴ Vgl. FH St. Pölten GmbH (Hg.): Vorstudie zur Einschätzung der spektralen Klangkomponenten der beim Überrollen von Retardern entstehenden Schallemission. St. Pölten 2017, S.1.

¹²⁵ Vgl. Ebd., S.5

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Auswertung des Richtrohrmikrofons:

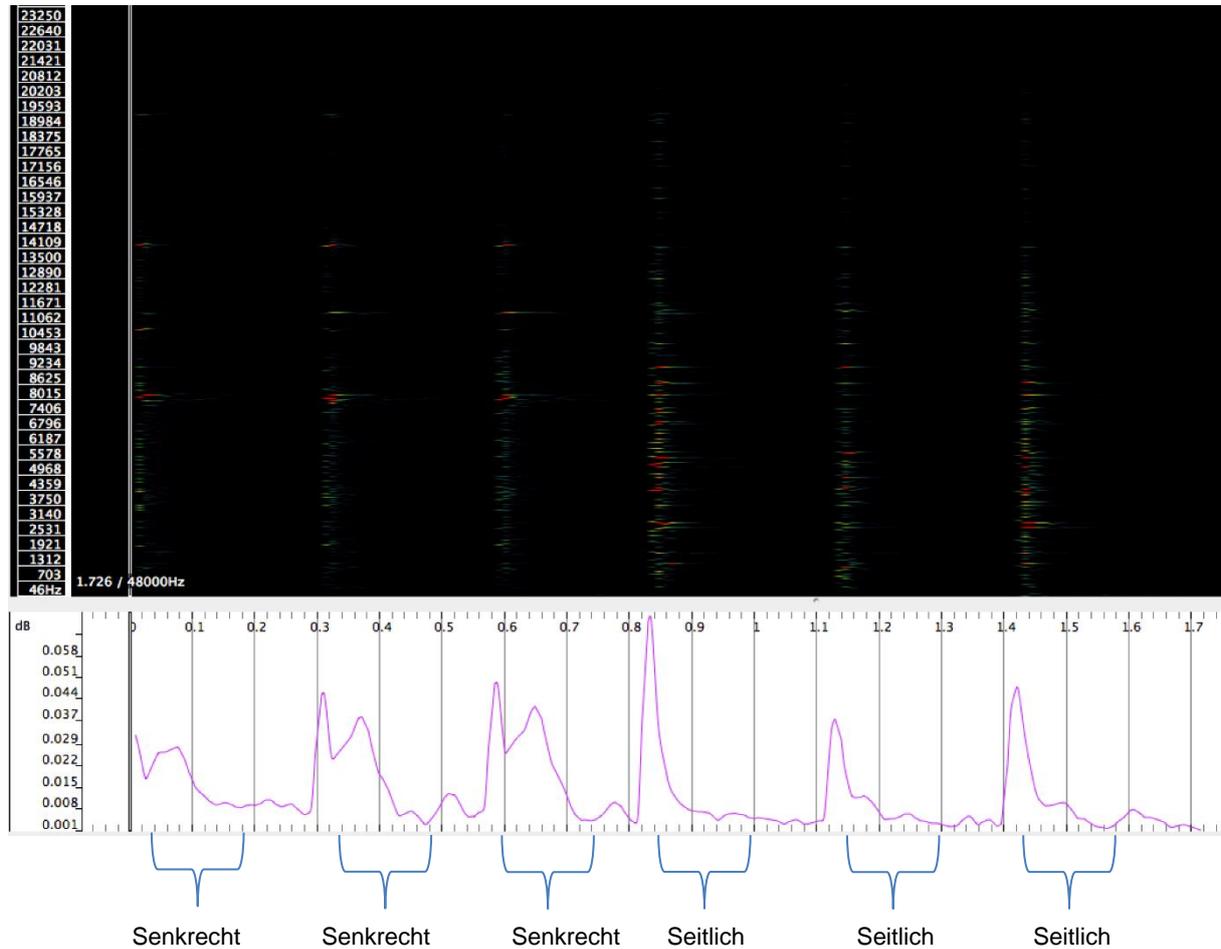


Abbildung 99: Spektrogramm und RMS-Kurve des Richtrohrmikrofons¹²⁶

Der unterschiedliche Auftreffwinkel des Hammers zeigt in der RMS Kurve (root means square – Quadratischer Mittelwert), im unteren Bereich der oben gezeigten Abbildung keine Auswirkung. Im Spektrogramm zeigt sich, dass die seitlichen Schläge mehr Teiltöne aufweisen und resonanter sind.

Bei der Auswertung des Körperschallmikrofons zeigte sich ein ähnliches Bild. Auch hier ist der RMS – Pegel eines seitlichen Schlages im Vergleich zu einem senkrechten Schlag deutlich erhöht. Eine Winkelveränderung würde also die Übertragungsveränderung von Schwingungen vom Kolben auf das Gehäuse bewirken.

¹²⁶ Abbildung entnommen aus: FH St. Pölten GmbH (Hg.): Vorstudie zur Einschätzung der spektralen Klangkomponenten der beim Überrollen von Retardern entstehenden Schallemission. St. Pölten 2017, S.5.

Die nachfolgende Abbildung zeigt das Spektrogramm und die RMS – Kurve des Körperschallmikrofons:

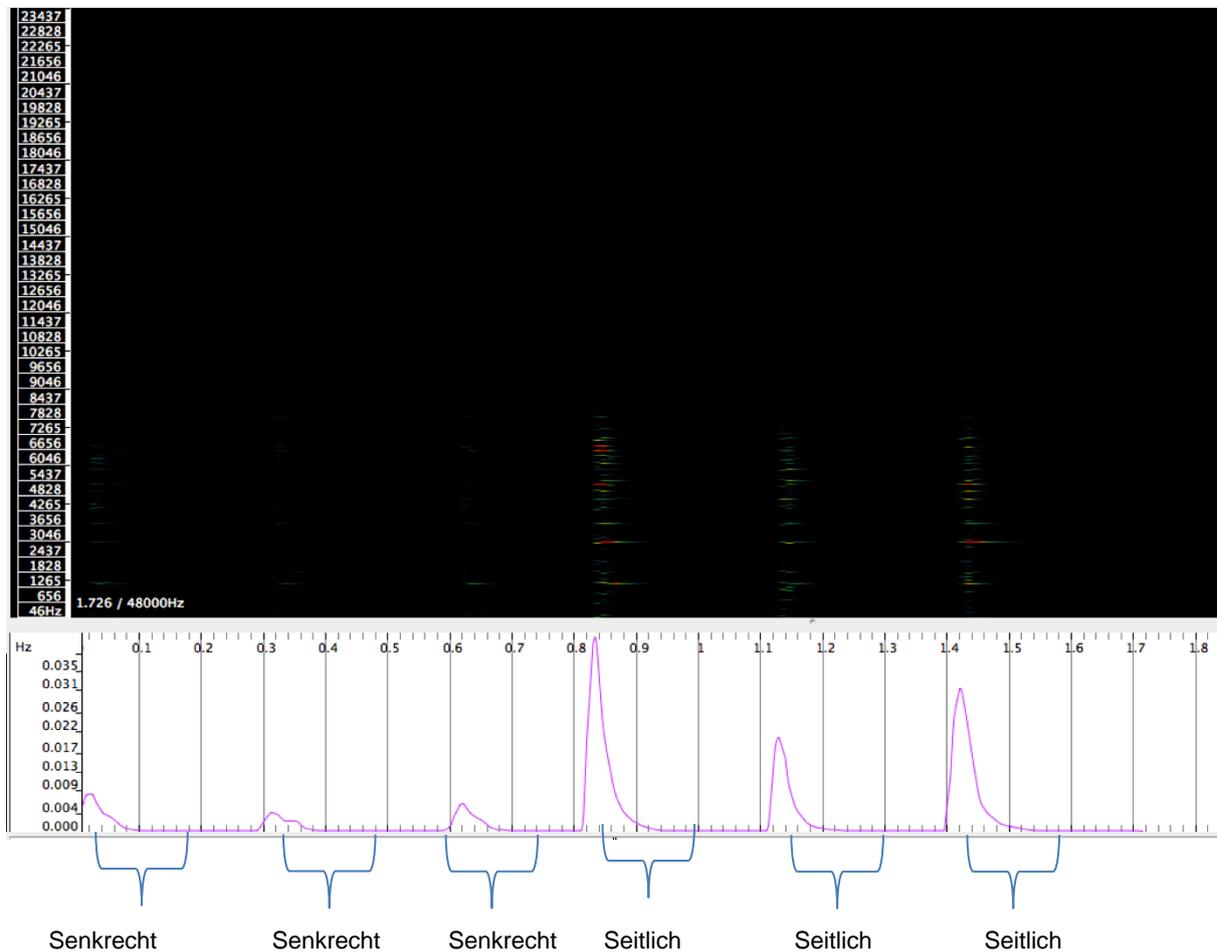


Abbildung 100: Spektrogramm und RMS-Kurve des Richtrohrmikrofons¹²⁷

6.5.10. Rückschlüsse der bisherigen Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die aus den Messungen und dem Projekt möglichen Adaptierungen aufgelistet. Des Weiteren folgt eine Festlegung welche Varianten weiterverfolgt werden und in welcher Form.

¹²⁷ Abbildung entnommen aus: FH St. Pölten GmbH (Hg.): Vorstudie zur Einschätzung der spektralen Klangkomponenten der beim Überrollen von Retardern entstehenden Schallemission. St. Pölten 2017, S.6.

6.5.10.1. Die Ansätze zur Adaptierung können wie folgt zusammengefasst werden:¹²⁸

Änderung des Einbauwinkels

Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit der Haube (Materialbeschaffenheit)

Abänderung der Situierung (Vermeidung der Resonanz)

Einhausung des Retarders

Dämmung zwischen dem Kolben und dem Gehäuse

Entkopplung zwischen der Schiene und dem Retarder

Einsatz von magnetorheologischen Elastomeren

6.5.10.2. Änderung des Einbauwinkels

Durch die Veränderung des Einbauwinkels wäre es möglich, dass die Spurkranzspitze nicht mehr seitlich auf die pilzförmige Haube der Kapsel auftrifft, sondern im Zentrum. Dadurch könnten Schwingungen und die damit verbundenen Resonanzen vermieden werden. Die nachfolgende Abbildung soll versinnbildlichen, wie die Winkelveränderung angedacht wäre. Im konkreten Fall wäre die Anrückseite von rechts.

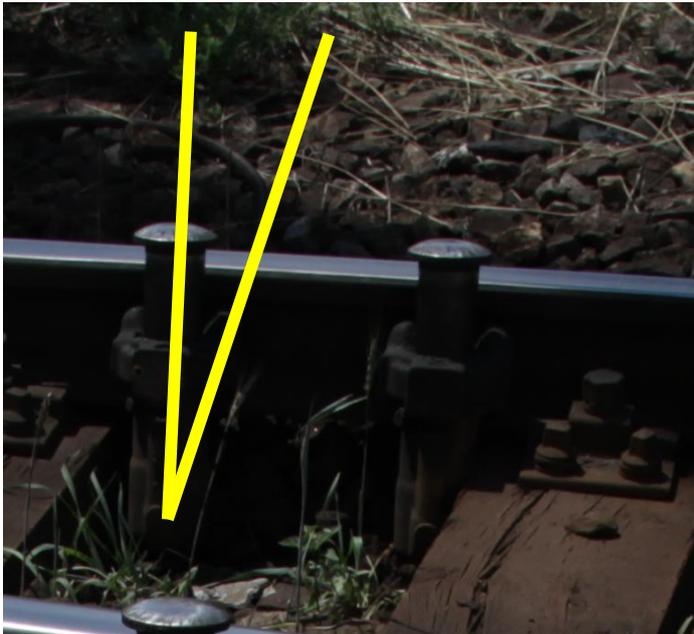


Abbildung 101: Winkelveränderung eines Retardergehäuses¹²⁹

¹²⁹ Eigene Aufnahme am Zentralverschiebebahnhof Wien aufgenommen am 29.04.2016.

Wird eine solche Winkelveränderung durchgeführt, ändern sich jedoch wesentliche Parameter. Durch diese Änderung wird die Nutzrichtung der Gleise eingeschränkt. Bei Verschiebebahnhöfen mit einem Haupt- und Nebenabrollberg könnte also nur noch ein Abrollberg verwendet werden. Gleichmaßen wäre es auch nicht möglich, bei der Zugbildung mit einem Triebfahrzeug die angewinkelten Retarder im Richtungsgleis zu befahren. Bei der Überfahung in die Nutzrichtung würde ein Drehmoment auf den Retarderbauteil wirken, welches genauer untersucht werden müsste. Gleichmaßen schließt ein Retardergehäuse der Bauart Dowty bündig am Steg einer Schiene, TypUIC-49E1, ab.¹³⁰ Daher wäre für diese Variante eine Neukonstruktion des Gehäuses erforderlich. Doch alleine aufgrund der betrieblichen Einschränkungen kann diese Variante für Bestandsanlagen als nicht sinnvoll ausgeschieden werden.

6.5.10.3. Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit der Haube

Die Schallproduktion beim Retarder erfolgt hauptsächlich über das Auftreffen der Spurkranzspitze auf die pilzförmige Haube der Kapsel. Wie im vorangegangenen Kapitel erläutert, stellt das horizontale Auftreffen des Spurkranzes einen schwingungsreicheren Vorgang als das vertikale Auftreffen dar. Daher ist ein Projektansatz, die pilzförmige Haube zu beschichten.

Mit Beschichtungen der Pilzhaube wurde bereits vor einigen Jahren, etwa in den Neunzigern, am Wiener Zentralverschiebebahnhof experimentiert. Damals wurde eine Elastomere Schicht geformt, welche auf der Haube aufgebracht wurde.¹³¹ Die nachfolgende Abbildung zeigt ein Foto dieser Beschichtung:



Abbildung 102: Elastomere Haube - Experimenteller Versuch¹³²

¹³⁰ Eigene Messung an einem Dowty Retarder und einem Schienenstück UIC 49-E1 am 16.03.2018.

¹³¹ Vgl. Wagner, Adrian: Retardereinsatz auf Verschiebebahnhöfen Diverses. Interview mit Leopold Böttinger. St. Pölten 2018. Zeile 62 - 67.

¹³² Eigene Aufnahme am Zentralverschiebebahnhof Wien aufgenommen am 06.02.2018.

Das Material dieses experimentellen Versuchs war ein Elastomer, welches ein weiches, leicht verformbares Material darstellt.¹³³ Dieser Versuch wurde nach wenigen Überrollungen eingestellt, da das aufgetragene Material verschlissen war, wie in der vorangegangenen Abbildung ersichtlich.¹³⁴

Bei dieser Variante muss also ein ähnlicher Ansatz wie bei den experimentellen Versuchen gewählt werden, jedoch muss die Abriebfestigkeit der gewählten Beschichtung deutlich höher sein. Diese stellt die Widerstandsfähigkeit einer festen Oberfläche gegenüber mechanischer Beanspruchung oder Reibung dar. Die Abriebfestigkeit wird von den Oberflächeneigenschaften der verwendeten Reibungskomponenten bestimmt.¹³⁵

Die aufzutragende Schicht muss also durch möglichst wenig Materialauftrag erfolgen und dem Abrieb Stand halten. Zusätzlich soll das verwendete Material schwer entflammbar sein um bei Funkenflug nicht zerstört zu werden. Zudem muss das Material eine Haltbarkeit aufweisen, welche nicht unter der den derzeitigen Instandhaltungsintervallen liegt.

6.5.10.4. Abänderung der Situierung (Vermeidung der Resonanz)

Ziel dieser Variante ist es, durch Versetzung der Retarder ein Aufsummieren der Resonanzen zu verhindern. Dazu wird ein Verfahren aus der Akustik angewandt, welches auch für Diffusoren angewandt wird.¹³⁶ Im Fall der Retarder wäre das die Anordnung eben dieser in Primzahlenanordnung. Dadurch würden sich die Laufzeitsynchronitäten verringern lassen. Die Situierung der Retarder, wie bereits in Kapitel 6.5.4 Situierung im Gleis erläutert, erfolgt anhand von Bremsberechnungen. Die Retarder sind also so angeordnet, dass sie als quasikontinuierliches Bremsselement wirken können. Zusätzlich sind auch noch weitere Retarder als Sicherheitselemente (in der Bremsberechnung als Sicherheitszuschlag) vorhanden. Versetzt man die Retarder nun im Primzahlenabstand muss eine Neuberechnung der Bremsberechnung auf Grundlage der neuen Positionen erfolgen. Gleichzeitig darf der Abstand im Bergbereich nicht zu groß werden, damit die Wagen nicht an Geschwindigkeit zunehmen können. Bei 42.296 Retardern am Wiener Zentralverschiebebahnhof sind im Bergbereich zwei in einem Schwellenfach je Seite positioniert. Daher lässt sich auch erahnen, dass eine Versetzung ohne Tausch der Schienen nicht möglich ist, da zu viele Bohrlöcher vorhanden sind. Eine Veränderung der Situierung ist daher nur mit einem Schienentausch

¹³³ Eigene Beobachtung am Zentralverschiebebahnhof Wien am 06.02.2018.

¹³⁴ Vgl. Wagner, Adrian: Retardereinsatz auf Verschiebebahnhöfen Diverses. Interview mit Leopold Böttinger. St. Pölten 2018. Zeile 69 - 72.

¹³⁵ Vgl. KRV (Hg.): Abriebverhalten. URL: <http://www.krv.de/wissen/abriebverhalten> [Stand 02.04.2018].

¹³⁶ Vgl. Ulz, Alexander: Akustische Diffusoren. Graz 2011, S.28.

möglich. Daher wird diese Variante für Bestandsanlagen als nicht sinnvoll bewertet. Bei Neubauten könnte diese Variante mitbedacht werden.

6.5.10.5. Einhausung des Retarders

Bei dieser Variante ist es angedacht, die durch den Körperschall vom Kolben ans Gehäuse übertragenen Emissionen durch ein Gehäuse um den Retarder zu mindern.

6.5.10.6. Dämmung zwischen dem Kolben und dem Gehäuse

Der Ansatz ist, die Bewegung des Kolbens zu entkoppeln um somit die Übertragungen auf das Gehäuse zu minimieren. Im Bestandsbauteil ist der Kolben gleitfähig im Gehäuse gelagert und mit einem Schmierstoff benetzt. Das Gehäuse an der Oberseite ist mit einer Vierkantdichtung gegen das Eindringen von Schmutz und Flüssigkeit geschützt. Die nachfolgende Abbildung zeigt eine Draufsicht auf das Retardergehäuse mit der Vierkantdichtung.



Abbildung 103: Dowty-Retardergehäuse mit Vierkantdichtung¹³⁷

¹³⁷ Eigene Aufnahme am Zentralverschiebebahnhof Wien aufgenommen am 13.07.2017.

Eine Änderung an dieser Stelle ist nicht ohne Umkonstruktion des Gehäuses möglich und wird in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

6.5.10.7. Entkopplung zwischen Schiene und Retarder

Im ersten Messablauf konnte nicht ausgeschlossen werden ob eine Entkopplung zwischen der Schiene und dem Gehäuse eine Verbesserung der Schallausbreitung bringen würde. Daher wird für den weiteren Messablauf eine Elastomerplatte zwischen dem Gehäuse und der Schiene aufgebracht um Veränderungen zu messen.

6.5.10.8. Einsatz von magnetorheologischen Flüssigkeiten

Magnetorheologische Flüssigkeiten sind Zusammensetzungen mehrerer Komponenten, welche eine Flüssigkeit darstellen. Sie besitzen die Eigenschaft ihre Viskosität zu verändern. Sie bestehen aus magnetisierbaren Feststoffpartikeln und einer Trägerflüssigkeit.¹³⁸

Die Grundzusammensetzung besteht in der Regel aus zwei Komponenten:¹³⁹

- Öle mit niedriger Viskosität
- Eisenoxid-Pulver

Diese Materialien sind durch die magnetische Feldstärke steuerbar. So steigt der Fließwiderstand durch die höhere magnetische Flussdichte.¹⁴⁰ Die nachfolgende Abbildung zeigt diesen Vorgang.

¹³⁸ Vgl. INNOVENT Technologieentwicklung Jena (Hg.): Magnetorheologische Flüssigkeiten. URL: http://www.innovent-jena.de/de/INNOVENT/Fachbereiche/MOS/Magnetische_Materialien/Magnetorheologische-Fluessigkeiten__4690/ [Stand: 10.11.2017].

¹³⁹ Vgl. Lord Corp. (Hg.): STABILE MAGNETORHEOLOGISCHE FLÜSSIGKEITEN. URL: <http://www.patent-de.com/20041216/DE60008533T2.html> [Stand: 10.11.2017].

¹⁴⁰ Vgl. Zschunke, Florian: Aktoren aus Basis des magnetorheologischen Effekts. Erlangen 2005, S.4.

Im linken Abschnitt des Bildes ist der unangesteuerte Zustand erkennbar, in der Mitte jener Zustand, bei dem bereits eine Veränderung der Viskosität vorhanden ist. Am rechten Bildbereich ist jener Zustand ersichtlich, bei dem alle Partikel entsprechend der Feldlinien ausgerichtet sind.

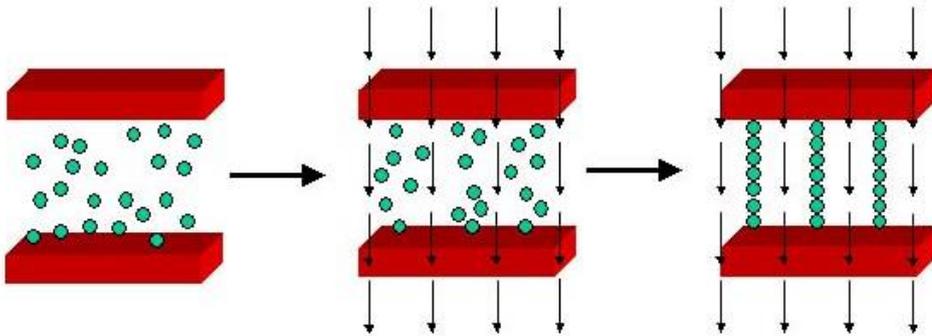


Abbildung 104: Schematische Darstellung des Verhaltens unter Einfluss eines Magnetfeldes¹⁴¹

In der Praxis werden diese Flüssigkeiten in verschiedenen Bauteilkomponenten verwendet, dazu zählen zum Beispiel Ventile oder Kupplungen.¹⁴² Eine neuere Anwendung sind Dämpfungssysteme aus dem Kraftfahrzeugsektor. Hier wird durch eine Ansteuerung des Stoßdämpfers der Härtegrad bestimmt. Da dieses System derzeit noch als hochpreisig gilt, findet es seine Anwendung eher im teureren Fahrzeugsegment.¹⁴³ Die nachfolgende Abbildung zeigt ein Magne - Ride Dämpfungssystem mit zwei Spulen um die Durchlässe.

¹⁴¹ Abbildung entnommen aus: INNOVENT Technologieentwicklung Jena (Hg.): Magnetorheologische Flüssigkeiten. URL: http://www.innovent-jena.de/de/INNOVENT/Fachbereiche/MOS/Magnetische_Materialien/Magnetorheologische-Fluessigkeiten__4690/ [Stand: 10.11.2017].

¹⁴² Vgl. Zschunke, Florian: Aktoren aus Basis des magnetorheologischen Effekts. Erlangen 2005, S.3.

¹⁴³ Vgl. Physik Jorunal. Wley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Ausgabe 11/2012. Weinheim 2012, S.56-57.

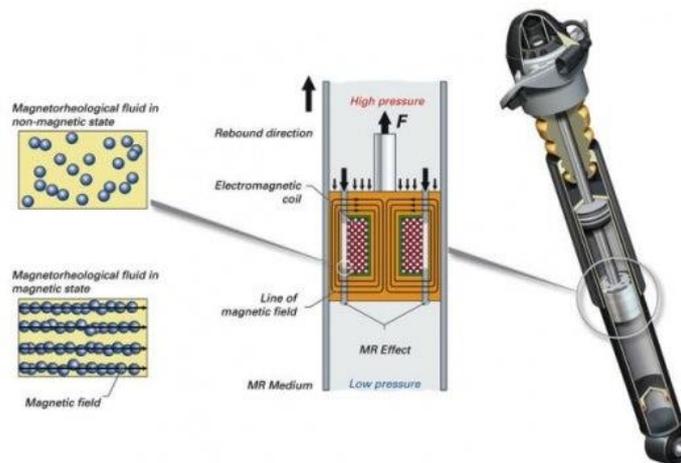


Abbildung 105: Magnetorheologischer Dämpfer¹⁴⁴

An eine Anwendung in Retardern wäre durchwegs zu denken. So kann die Bremsenergie jedes einzelnen Retarders individuell gesteuert werden. Damit muss nur die notwendige Bremsenergie für die jeweilige Tonnage des Wagens aufgebracht werden. Gleichmaßen erfordert ein solches System Bauteilkomponenten, welche nicht ferromagnetisch beeinflussbar sind. Das bedingt eine Neukonstruktion des Retarders. Zudem ist auch der Hauptvorteil des Retarders als Bremsenelement, seine Autarkie, nicht mehr vorhanden, da ein Retarder mit magnetorheologischer Flüssigkeit über eine Ansteuerung verfügen muss. Daher wird diese Variante nicht weiter untersucht.

6.5.10.9. Spurkranzschmierleiste

Spurkranzschmierungen werden sowohl infrastrukturseitig als auch fahrzeugseitig verwendet. Ihren Haupteinsatzbereich finden sie in engen Bögen zur Senkung des Verschleiß und zur Minimierung des Kurvenkreischens, wobei hier zwei Effekten entgegen gewirkt wird. Einerseits dem Verschleiß an der Bogenaußenschiene und andererseits dem sogenannten Stick – Slip Effekt, einem Quietschgeräusch an der Bogeninnenschiene.¹⁴⁵

Nachdem die fahrzeugseitigen Systeme auf Triebfahrzeugen verbaut sind, werden sie für diese Arbeit nicht weiter betrachtet, da dies für Verschiebebahnhöfe nicht relevant ist.

¹⁴⁴ Abbildung entnommen aus: Newatlas(Hg.): Audi's new magnetic semi-active suspension system. URL: <https://newatlas.com/go/5752/#gallery> [Stand: 10.11.2017].

¹⁴⁵ Vgl. LINCOLN, SKF (Hg.): Reibung erfolgreich beherrschen mit automatischen SKF und Lincoln stationären und fahrzeuggebundenen Schmiersystemen. Berlin 2014, S.4.

Die nachfolgende Abbildung zeigt eine stationäre Spurkranzschmierleiste.



Abbildung 106: Einrichtung zur Spurkranzschmierung¹⁴⁶

Die Spurkranzschmierung soll das Kurvenkreischen minimieren, den Verschleiß reduzieren und das Aufklettern des Spurkranzes verhindern. Das System besteht im Wesentlichen aus folgenden Hauptbauteilen:¹⁴⁷

Pumpanlage

Vorratsbehälter

Pumpeinrichtung

Steuerung

Akkus oder Transformator zur Spannungsversorgung

Schmierleisten

Leisten

Zuleitung

Radsensor

¹⁴⁶ Eigene Aufnahme am Bahnhof ARGE KAT2 aufgenommen am 07.10.2017.

¹⁴⁷ Vgl. Prettnner, Lukas: Die Auswirkung von Schienenflankenschmierungen auf den Schienenverschleiß in engen Bogen. Graz 2013, S.52.

Die nachfolgende Abbildung zeigt den schematischen Aufbau einer solchen Anlage:

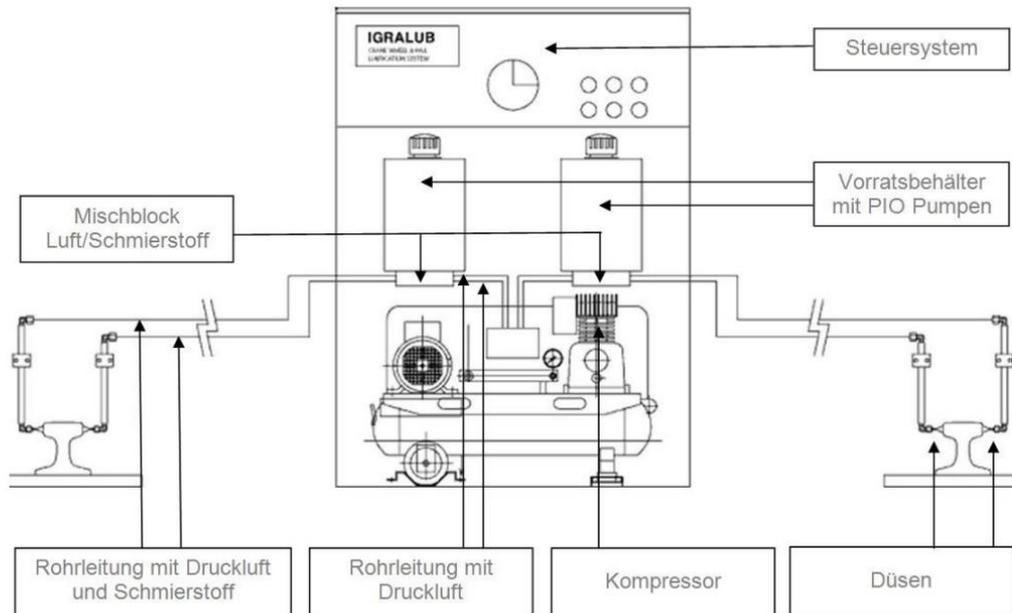


Abbildung 107: Prinzipaufbau Spurkransmierung¹⁴⁸

Als Schmiermittel werden keine Öle, sondern Schmierpasten eingesetzt. Diese enthalten zu einem bestimmten Anteil Festschmierstoffe damit es auch zu einer Verteilung der Paste kommt und ein Schmiereffekt entsteht.¹⁴⁹

Die Reichweite des Schmiermittels wurde in einem Feldversuch durch die SBB Infrastruktur anhand eines Bogens mit einem Radius von 300 m und 25 ‰ analysiert. Die Reichweite wurde in diesem Versuch anhand der Verschleißminderung in Relation zur Schmieranlage betrachtet. Nach 200 m betrug die Verschleißminderung noch 40% und nach 1.000 m noch 15 %.¹⁵⁰

Ein Einsatz dieser Technologie am Verschiebebahnhof wäre also als durchwegs denkbar und wird in weiterer Folge in dieser Arbeit auch betrachtet.

¹⁴⁸ Abbildung entnommen aus: IGRALUB (Hg.): TOTAL SERVICES PROVIDER. Produktliste. Zürich 2018, S.5.

¹⁴⁹ Vgl. Prettnner, Lukas: Die Auswirkung von Schienenflankenschmierungen auf den Schienenverschleiß in engen Bogen. Graz 2013, S.67.

¹⁵⁰ Vgl. Ebd., S.70.

6.5.10.10. Maßnahmenzusammenstellung

Aus dem vorangegangenen Kapitel ergeben sich mehrere Varianten, welche im Rahmen dieser Arbeit weiter untersucht werden. Diese Varianten sind:

- Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit der Haube
- Einhausung des Retarders
- Entkopplung zwischen der Schiene und dem Retarder
- Einsatz einer Spurkranzschmierleiste

Bis auf die Spurkranzschmierleiste werden alle Punkte im Zuge eines Demonstrators getestet. Diese kann in einem Kleinmodell nicht umgesetzt werden. Daher wird für diese Variante der Stand der Technik ermittelt und Erfahrungswerte gesammelt. Damit soll im Zuge des Projekts StilvA ein Feldversuch mit dieser Technologie auf einem Testgleis erprobt werden.

6.5.11. Konstruktion eines Demonstrators

Um das Potential der einzelnen Varianten abschätzen zu können, wurde im Zuge dieser Arbeit ein Demonstrator angefertigt. Mit diesem Modell sollen die erarbeiteten Maßnahmen getestet werden. Hierfür wurde ein Dowty Retarder auf einer Schiene befestigt, welche in einem Größenverhältnis gewählt wurde um die zu adaptierenden Maßnahmen auszutesten. Anzumerken sei hierbei, dass durch den Demonstrator keine absoluten Werte in Bezug auf die akustischen Messungen ermittelt werden sollen. Vielmehr sollen Vergleiche zwischen der Bestandssituation und den adaptierten Maßnahmen gezogen werden.

6.5.11.1. Verwendete Bauteile

- Schiene Bauform UIC-49E1 Länge: circa 300 mm

Die Schiene wurde von der ÖBB-Infrastruktur AG zur Verfügung gestellt, lediglich die Bohrungen mussten noch durchgeführt werden.

Konkret wurden folgende Bohrungen durchgeführt:

- 2 x M27 am Schienensteg gemäß der Positionierung der Bolzen
- 4 x M8 am Schienenfuß zur Montage an Holzblöcken

Die nachfolgende Abbildung zeigt das Schienenstück im nichtmontierten Zustand.



Abbildung 108: UIC - 49E1 Demonstratorschienenstück¹⁵¹

Retarder

Verwendet wurde ein Dowty – Retarder und diverse zugehörige Kapseln. Es wurden insbesondere Kapseln aus verschiedenen Geschwindigkeitsbereichen gewählt (Zum Beispiel Farbkodierung Rot und Grün).

Holzblöcke

Zur Befestigung wurden stabile Holzzuschnitte aus zwei Blöcken mit den Abmessungen 250 mm x 100 mm x 200 mm (Länge x Breite x Höhe) gewählt.

6.5.11.2. Montage des Demonstrators

Die Schiene wurde mit vier M8 Holzschrauben mit einem Sechskantkopf und entsprechenden Beilagscheiben mit den Holzblöcken verbunden. Die Montage des Gehäuses am Gleis erfolgte mit den zum Retarder gehörenden M27 Muttern und den entsprechenden Sprenringen.

¹⁵¹ Eigene Aufnahme aufgenommen am 31.03.2018.

Die nachstehende Abbildung zeigt den zusammengesetzten Demonstrator.

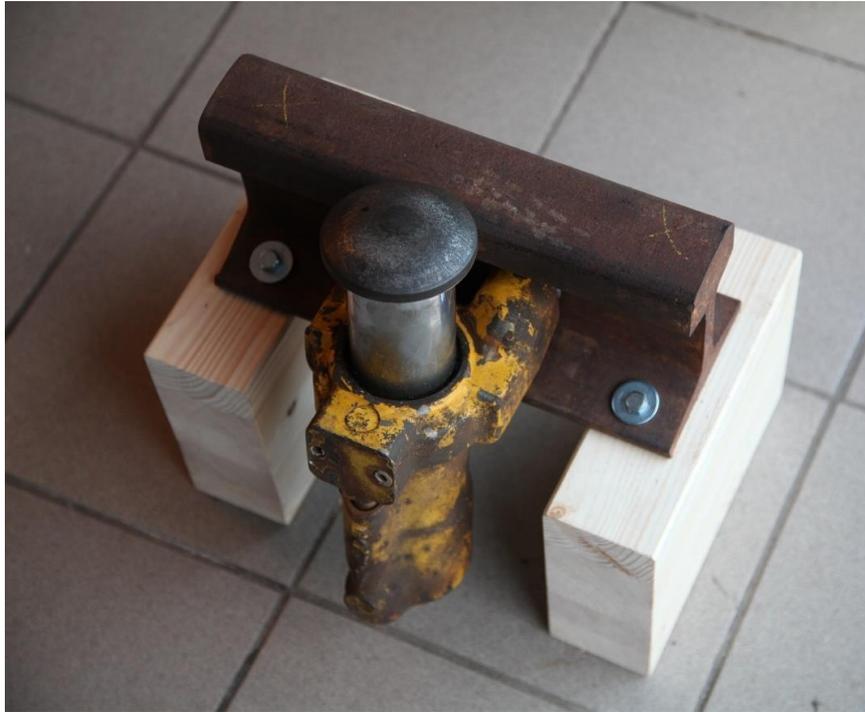


Abbildung 109: Zusammgebauter Demonstrator¹⁵²

6.5.11.3. Gehäuse

Für das Gehäuse wurden verschiedene Varianten erstellt. Einerseits ein Gehäuse das an der Hinterseite geöffnet ist und eines, welches das Retardergehäuse von allen vier Seiten umschließt. Die offene Variante wurde deswegen erstellt, da sich das Gehäuse vom Retarder im eingebauten Zustand im Gleisschotter befindet.

Verwendet wurde für die Bestandteile ein Kieferleimholz, da dieses mit einer Kreis- bzw. Stichsäge leicht zu bearbeiten ist. Zusätzlich wurde im Zuge der Planung dieses Werkstückes der Demonstrator vermessen um Schnittvorlagen herzustellen. Das Gehäuse wurde so geplant, dass es direkt am Retarder anliegt. Damit sind keine zusätzlichen Gleisbohrungen notwendig. Die Funktion des Retarders ist mit dieser Konstruktion nicht eingeschränkt, da durch das direkte Anliegen eine Verschiebung der Deckplatte unter die Haube der Kapsel verhindert wird. Die nachfolgende Abbildung zeigt eine nichtmaßstabsgetreue Skizze der Bauteile.

¹⁵² Eigene Aufnahme aufgenommen am 31.03.2018.

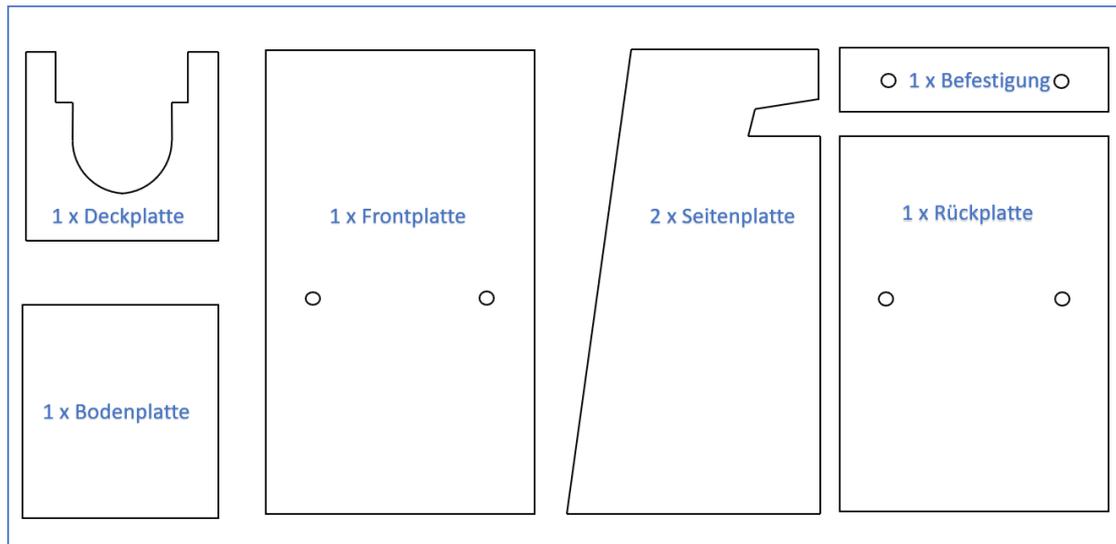


Abbildung 110: Nichtmaßstabsgetreue Skizze der Bauteile¹⁵³

Die Deckplatte, die Frontplatte, die Seitenplatten und die Bodenplatte wurden mit Holzschrauben miteinander fest verbunden. Die Rückplatte und die Befestigung wurden, ebenso wie die Frontplatte, mit zwei M7 Bohrungen vorbereitet. Dies dient dazu um entweder die Befestigung mit der Frontplatte für ein nach hinten offenes Gehäuse oder die Rückplatte für ein geschlossenes Gehäuse verwenden zu können. Die Befestigung dieser beiden Platten erfolgt mit zugeschnittenen M6 Gewindestangen, Beilagscheiben und Flügelmuttern. So kann das Gehäuse rasch auch im Gleisbereich für Messungsvarianten verwendet werden.

¹⁵³ Eigene Darstellung vom 16.03.2018.

Die Außenseite des Gehäuses wurde mit vibrationsdämmendem Material verkleidet. Dies soll dazu dienen Vibrationen nicht vom und an den anliegenden Gleisschotter zu übertragen. Die nachfolgende Abbildung zeigt das am Demonstrator montierte Gehäuse.



Abbildung 111: Demonstrator mit dem Gehäuse¹⁵⁴

6.5.11.4. Entkopplung zwischen Schiene und Retarder

Für die Dämmung zwischen dem Gehäuse und der Schiene eignet sich eine dämmende weichelastische Gummischicht. Diese wirkt vibrations- und schalldämmend. Zusammengesetzt ist diese aus Gummigranulat auf Recyclingbasis, welches mit Polyurethan gebunden ist. Zudem weist das Material eine Dicke von 6 mm auf.¹⁵⁵

Zur Verwendung im konkreten Anwendungsfall wurde ein Ausschnitt von 150 mm x 75 mm (Länge x Breite) angefertigt. In diesem Zwischenstück wurden zwei Löcher mit 27 mm Durchmesser entsprechend den Gehäusebolzen ausgespart.

¹⁵⁴ Eigene Aufnahme aufgenommen am 04.05.2018.

¹⁵⁵ Vgl. KRAITEC (Hg.): KRAITEC top. Bautenschutzmatte. Datenblatt Nr. 9205 – R – 19. Stand Mai 2017. Kraiburg 2017, S.1.

Die nachfolgende Abbildung zeigt eine nichtmaßstäbliche Skizze dieser Dämmschicht:

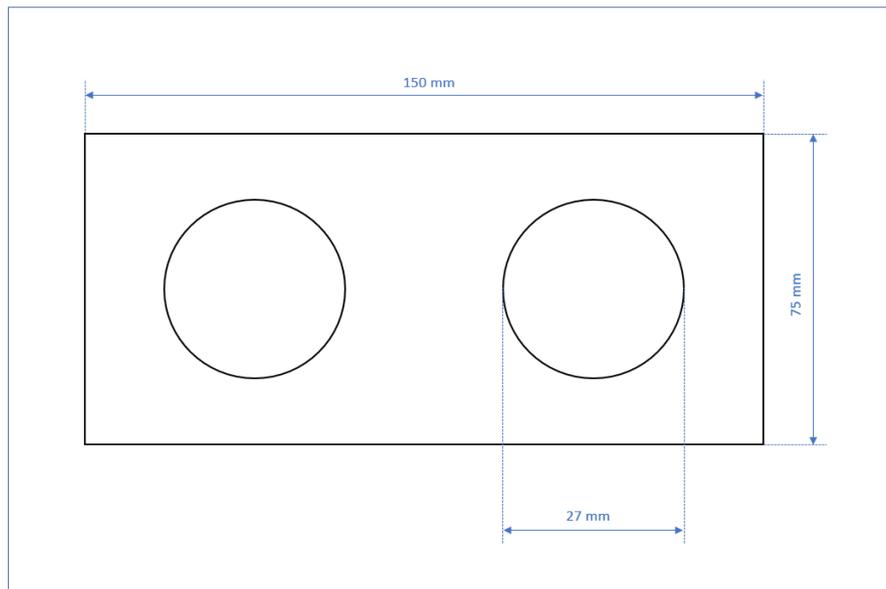


Abbildung 112: Nichtmaßstäbliche Skizze der Dämmschicht¹⁵⁶

6.5.11.5. Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit der Haube

Um die Schallemissionen zu senken wird an der Oberflächenbeschaffenheit der Haube angesetzt. Da sich der Einsatz eines Elastomers in der Vergangenheit nicht als sinnvoll erwiesen hat wird von einer Untersuchung dieses Materials Abstand genommen.¹⁵⁷

Zur Beschichtung der Haube eignet sich vielmehr ein dünnschichtiger Materialauftrag. Im Maschinen- und Fahrzeugbau setzt man Anti – Dröhn Beschichtungen ein. Diese dienen der Geräuschkämpfung, der Körperschallabsorption und der Schwingungsdämpfung. Konkreten Einsatz finden solche Anwendungen auf Maschinenverkleidungen, Rotationstrommeln und Schallschutzhauben.¹⁵⁸

Die Aufbringung solcher Materialien kann über verschiedene Wege erfolgen. Für flüssige, breiige oder pastenförmige Beschichtungen eignen sich mitunter verschiedene Verfahren:¹⁵⁹

- Lackierung
- Galvanische Beschichtung
- Schmelztauchverfahren
- Thermische Spritzverfahren

¹⁵⁶ Eigene Darstellung vom 16.03.2018.

¹⁵⁷ Vgl. Kapitel 6.5.10.3 (Veränderung der Oberflächenbeschaffenheit der Haube).

¹⁵⁸ Vgl. MetaLine (Hg.): Lärmhemmende Anti-Dröhn-Spritzbeschichtung. Ausgabe P440AD-7-DE. Hildrizhausen, S.1.

¹⁵⁹ Vgl. Vaßen, Robert: Beschichtungstechnik. Jülich 2012, S.5.

In der vorliegenden Variante soll in erster Linie festgestellt werden, ob sich das Verfahren einer beschichteten Oberfläche zu einer Lärmreduktion eignet. Die Langlebigkeit steht hier an zweiter Stelle. Daher wird als Beschichtungsverfahren die Lackierung bzw. die Auftragung mittels einer Spachtel verwendet.

Für diese Verarbeitungsart eignet sich die Brax Exvibration – Anti Dröhnpaste. Diese kann auf glatte Metalloberflächen aufgetragen werden, weist einen hohen Glasfaseranteil auf und härtet vollständig aus.¹⁶⁰

Die pilzförmige Haube einer Kapsel wurde in dieser Weise mit zwei Teilanstrichen beschichtet. Die nachfolgende Abbildung zeigt diese bearbeitete Haube:



Abbildung 113: Beschichtete Haube einer Retarderkapsel¹⁶¹

6.5.12. Verifizierung der umgesetzten Maßnahmen

Um zu verifizieren wie und in welcher Form, die im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Maßnahmen in der Praxis eine Lärmreduktion bringen, werden diese Veränderungen einer

¹⁶⁰ just-SOUND CarHifi (Hg.): BRAX EXVIBRATION 1,5KG DOSE. URL: <https://www.just-sound.de/einbau-daemmung/brax-exvibration-1-5kg-dose/a-6265/> [Stand 02.04.2018].

¹⁶¹ Eigene Aufnahme aufgenommen am 03.04.2018.

weiteren Messreihe unterzogen. Diese Messung soll keine Absolutwerte erfassen, sondern einen Vergleich zwischen den einzelnen Adaptierungen und dem Ausgangszustand darstellen.

Der Ablauf dieser Messserie kann wie folgt unterteilt werden:

1. Schritt: Erstellen einer Hypothese
2. Schritt: Festlegen der zu verwendenden Messmittel
3. Schritt: Reihung der Messungen der einzelnen Varianten
4. Schritt: Durchführung der Messung
5. Schritt: Auswertung der Messung
6. Schritt: Bewertung der einzelnen Maßnahmen (Eventuell Ausscheidung von Maßnahmen)
7. Schritt: Empfehlung der weiteren Vorgehensweise
8. Schritt: Einschätzung der Lebensdauer
9. Schritt: Verifizierung der gesetzten Maßnahme
10. Schritt: Empfehlungen für weitere Maßnahmen

Diese zweite Messreihe wurde ebenso gemeinsam mit dem Department Medien und Digitale Technologien der FH St. Pölten durchgeführt. Es wurde nach dem oben aufgelisteten Ablauf vorgegangen. Die Messung erfolgte gemeinsam, die Auswertung und die initiale Interpretation erfolgte durch das Department Medien das Projektteam.

6.5.12.1. Hypothese vor der Messung

Nach der eigenen Einschätzung, welche beim Bau der einzelnen Varianten entstand, kann bereits eine Prognose getroffen werden. Dabei zeigte sich beim beschichteten Retarder eine subjektive Geräuschminimierung. Denkbar ist, dass diese den Gleitzylinder weniger in Schwingung versetzt. Bei den anderen Varianten war eine reine subjektive akustische Einschätzung eher schwierig. Daher wird bei diesen Varianten vielmehr auf das objektive Messergebnis Wert gelegt.

6.5.12.2. Anforderungen an eine Emissionsmessung

Folgende Anforderungen sind an die Erstmessung zu stellen:

- Vergleich der Emissionen
- Ermittlung welche Varianten sich als sinnvoll erweisen
- Feststellung ob Kombinationen denkbar sind

Folgendes soll nicht erfolgen:

Messungen im Gleis

Betrachtung beeinflussender Parameter (verschiedene Wagentypen)

6.5.12.3. Durchführung einer Emissionsmessung

Durchgeführt wurde die Messung in einem Audiolabor an der FH St. Pölten. Die nachfolgende Abbildung zeigt den positionierten Demonstrator im Audiostudio:



Abbildung 114: Messaufbau im Audiostudio¹⁶²

Örtlichkeit:

Department Medien und Digitale Technologien

Audiolabore 3. Stock

Audiostudio C

Die Messung wurde an einer Tagesrandzeit durchgeführt um trotz der entsprechenden Räumlichkeiten möglichst keinen Störungen oder Beeinflussungen ausgesetzt zu sein:¹⁶³

¹⁶² Eigene Aufnahme an der FH St. Pölten aufgenommen am 04.04.2018.

¹⁶³ Vgl. Eigene Aufzeichnungen vom 04.04.2018.

Datum & Zeit: 04. April 2018 von 18:00 – 20:30
Geschlossene Räumlichkeit
Räumlichkeit für akustische Verfahren ausgelegt
Türen und Fenster geschlossen
Temperatur: Circa 25° C

Messmittel:¹⁶⁴

Verwendet wurden fünf Mikrofone, zwei davon als Stereopaar.

Mikrofon A (MIC A - Stereo): 1 Stereomikrofonset (2 Einzelmikrofone)

Mikrofon B (MIC B - Gleis): 1 Kontaktmikrofon

Mikrofon C (MIC C - Retarder): 1 Kontaktmikrofon

Positionierung:¹⁶⁵

Das Mikrofon A auf einem Stativ etwa 50 cm neben dem Retarder auf einer Höhe von 30 – 40cm vom Boden befestigt. Das Mikrofon B wurde mittels einem speziellen Kleber am Gleis befestigt. Das Mikrofon C wurde am Gehäuse des Retarders befestigt. Auf der vorangegangenen Abbildung ist die Positionierung des Mikrofons A erkennbar.

Emissionsbildung innerhalb der Messung:

Es wurde verschiedene Hämmer probiert. Bei den Messreihen selbst wurde mit einem Fäustel / Schlägel (Gewicht: 1,46 kg / Schaftlänge: 22cm) gearbeitet. Damit wurden Schläge auf den Kopf der Haube sowie seitliche Schläge auf den pilzförmig hervorstehenden Teil der Kapsel ausgeübt. Zusätzlich erfolgte eine dem Auftreffen eines Spurkranzes nachempfundene Bewegung. Diese war so ausgeführt, dass in der Gleitbewegung über die Schiene der Gleitzyylinder nach unten gedrückt und rotiert wurde. Danach erfolgten die Entlastung und die Rückstellung der Kapsel.

6.5.12.4. Messreihe – Ablauf der durchgeführten Messungen

Die einzelnen Varianten wurden in jeweils nach den oben ausgeführten Rahmenbedingungen getestet. Die Abfolge der einzelnen Varianten erfolgte folgendermaßen:

¹⁶⁴ Vgl. Ebd.

¹⁶⁵ Vgl. Ebd.

Messung	Objekt	Kapsel Farbcodierung	Abkürzung
1	Retarder konventionell (R – k)	Grün	R-K_Grün
2	Gehäuse (geschlossene Variante) locker am R - k	Grün	Geh_locker
3	Gehäuse (offene Variante) am konventionellen Retarder	Grün	Geh_offen
4	Gehäuse (geschlossene Variante am konventionellen Retarder	Grün	Geh_gesch
5	Retarder konventionell	Rot	R-K_Rot
6	Retarder beschichtet	Rot	Bes_Rot
7	Entkopplung mit konventionellem Retarder	Grün	Entk_Grün
8	Entkopplung mit konventionellem Retarder	Rot	Entk_Rot
9	Entkopplung mit beschichtetem Retarder	Rot	Entk_Bes_Rot

Tabelle 3: Messreihen¹⁶⁶

Wie die vorangegangene Tabelle zeigt, wurden die Messreihen mit unterschiedlichen Kapseln durchgeführt. Daher sind nicht alle Messungen miteinander direkt vergleichbar, sondern jeweils nur Messungen mit derselben Farbkodierung.

¹⁶⁶ Eigene Aufzeichnungen vom 04.04.2018.

6.5.13. Auswertung und Interpretation der adaptierten Maßnahmen

Die Audioaufzeichnungen konnten entsprechend den ausgeführten Schlägen unterteilt werden, so wurde für die in diesem Kapitel beschriebene Interpretation gleitend applizierte Schläge ausgewertet, welche am ehesten einer Überfahung durch ein Rad gleichen. Um möglichst keine Extremwerte zu betrachten, wurden 4 Schläge, je Messreihe, herangezogen und ein Median gebildet. Zudem sind die Daten der Auswertung so festgelegt, dass 0 dB einer Maximalaussteuerung gleichkommt. Das bedeutet, dass bei 0 dB die Maximalamplitude erreicht wurde oder diese übersteuert wurde und das Signal am lautesten ist. Daraus folgt, dass umso höher ein Wert aufscheint, die Messreihe auch entsprechend leiser ist.

Eine Interpretation der Messung über die einzelnen Spektrogramme, wie zum Teil bei der ersten Messung, erscheint in diesem Setting nicht sinnvoll, da Veränderungen nicht leicht erkenntlich sind. Trotzdem soll ein Gesamtspektrogramm angefügt werden. Die nachfolgende Grafik zeigt eben dieses mit jeweils vier dicht aufeinanderfolgenden Schlägen. Die Amplituden der Frequenzanteile wurden hierbei auf einer Skala von Blau über Grün zu Gelb dargestellt:

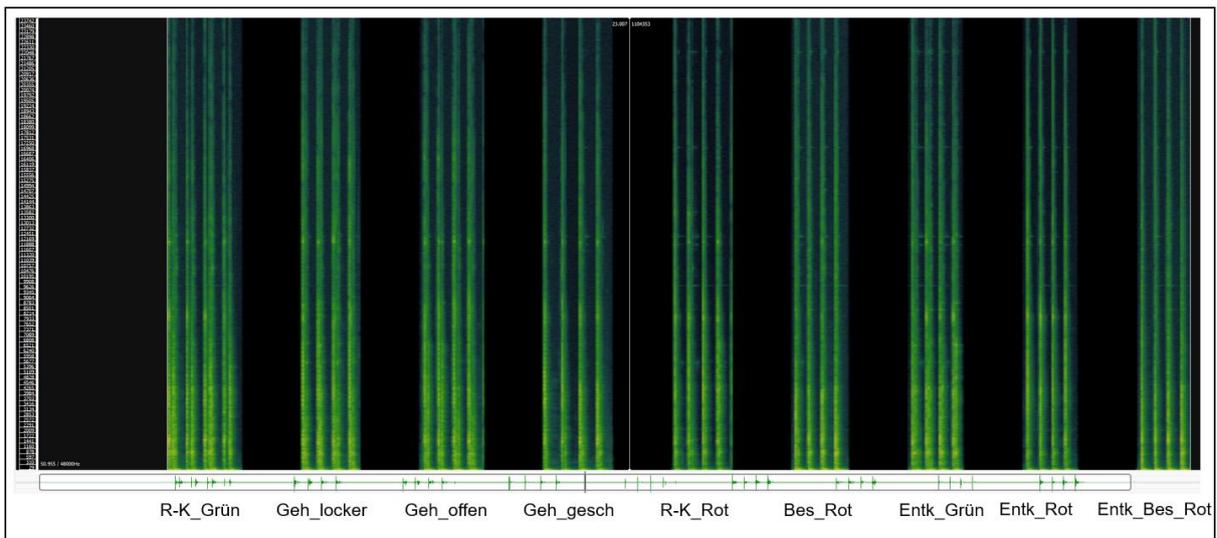


Abbildung 115: Spektrogramm der Messreihen¹⁶⁷

¹⁶⁷ Abbildung entnommen aus: FH St. Pölten (Hg.): Adaptierter Retarder. Messreihen am Demonstrator. St. Pölten 2018, S.1.

Der Vergleich der einzelnen Varianten soll, wie bereits beschrieben, über die Amplituden erfolgen, welche auf 0 dB normalisiert wurden. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Mediane der Messreihen für die einzelnen Varianten und Mikrofone in dB:

Abkürzung	Stereo	Gleis	Retarder
R-K_Grün	10,45	2,64	7,08
Geh_locker	10,37	14,97	8,33
Geh_offen	8,62	11,66	10,41
Geh_gesch	7,87	15,95	14,67
R-K_Rot	0,07	7,77	5,25
Bes_Rot	10,25	12,02	6,41
Entk_Grün	6,31	4,93	9,45
Entk_Rot	1,68	17,45	11,75
Entk_Bes_Rot	10,52	10,45	3,68

Tabelle 4: Mediane der Amplituden von gleitend applizierten Schlägen

Das nachfolgende Diagramm zeigt die einzelnen Varianten mit den drei verschiedenen Mikrofonen, wobei die logarithmischen Dezibel – Werte auf einer linearen Skalierung dargestellt werden:

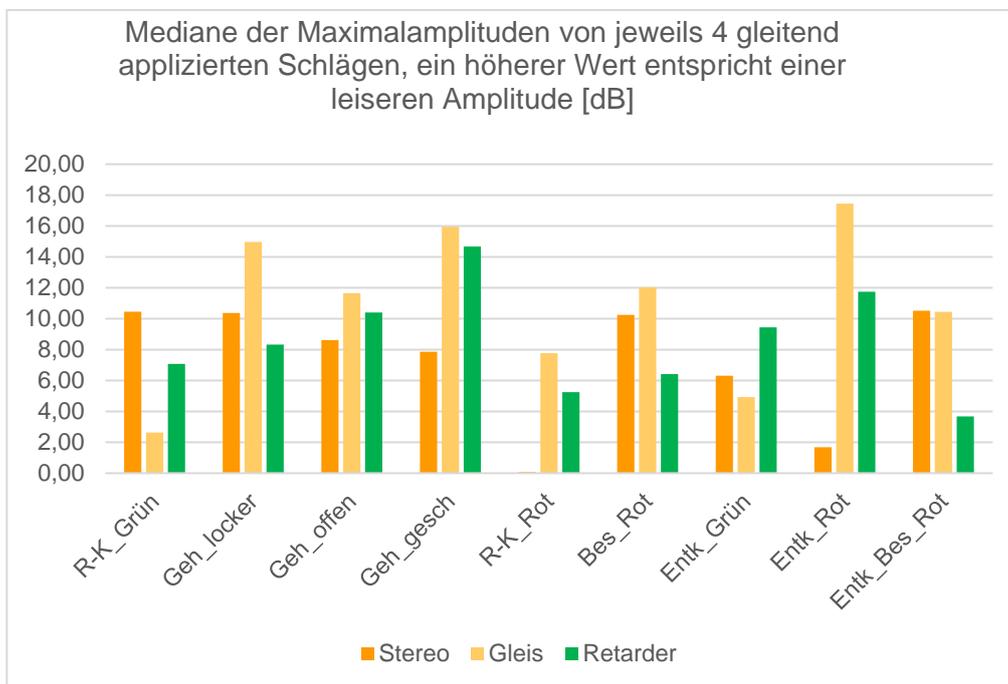


Abbildung 116: Darstellung der medianen Maxima von 4 gleitend applizierten Schlägen¹⁶⁸

¹⁶⁸ Darstellung auf Grundlage von **Tabelle 4: Mediane der Amplituden von gleitend applizierten Schlägen**).

Wie ersichtlich ist, lassen sich die einzelnen Varianten in einer Gesamtansicht nicht sinnvoll betrachten. Daher werden die vergleichbaren Messreihen im Folgenden miteinander analysiert. Diese folgenden Diagramme werden ebenso mit einer linearen Skala dargestellt. Anzumerken sei jedoch, dass ein Amplitudenunterschied von 6 dB einer Verdoppelung beziehungsweise einer Halbierung des Pegels gleichkommt. Zusätzlich muss beim Mikrofon B (Kontaktmikrofon Gleis) beachtet werden, dass beim Messvorgang ein kurzes Schienenstück verwendet wurde und daher die Resonanzen bei einem durchgängigen Gleis divergieren können.¹⁶⁹

6.5.13.1. Vergleich zweier Retarder

Hier wurden zwei unterschiedliche Gleitzylinder untersucht, wobei eine Kapsel aus dem Bergbereich (Farbcodierung Rot für 4,25 m/s) und eine aus dem Richtungsgleis (Farbcodierung Grün für 1,5 m/s) gewählt wurde.¹⁷⁰ Dies soll aufzeigen, dass selbst zwischen diesen Elementen bereits große Unterschiede vorliegen.

Bei den verschiedenen Varianten konnten folgende Werte ermittelt werden:

	Stereo	Retarder
R-K_Grün	10,45	7,08
R-K_Rot	0,07	5,25

Tabelle 5: Amplituden zweier Retarderkapseln¹⁷¹

Stellt man diese Amplituden grafisch dar, wird erkennbar, dass jene Kapsel aus dem Richtungsgleis deutlich weniger Emissionen als die Kapsel des Bergbereichs verursacht. Interessant hierbei ist, dass die am Stereomikrofon gemessene Veränderung nicht proportional zu den Veränderungen am Retarder Kontaktmikrofon ist. Dies lässt sich dadurch erklären, da bei geringerer Emission der Kapsel die Geräusche des Gehäuses in den Vordergrund treten.

¹⁶⁹ Vgl. FH St. Pölten (Hg.): Adaptierter Retarder. Messreihen am Demonstrator. St. Pölten 2018, S.1.

¹⁷⁰ Eigene Beobachtungen am Zentralverschiebebahnhof Wien am 6.02.2018.

¹⁷¹ Darstellung auf Grundlage von **Tabelle 4: Mediane der Amplituden von gleitend applizierten Schlägen**).

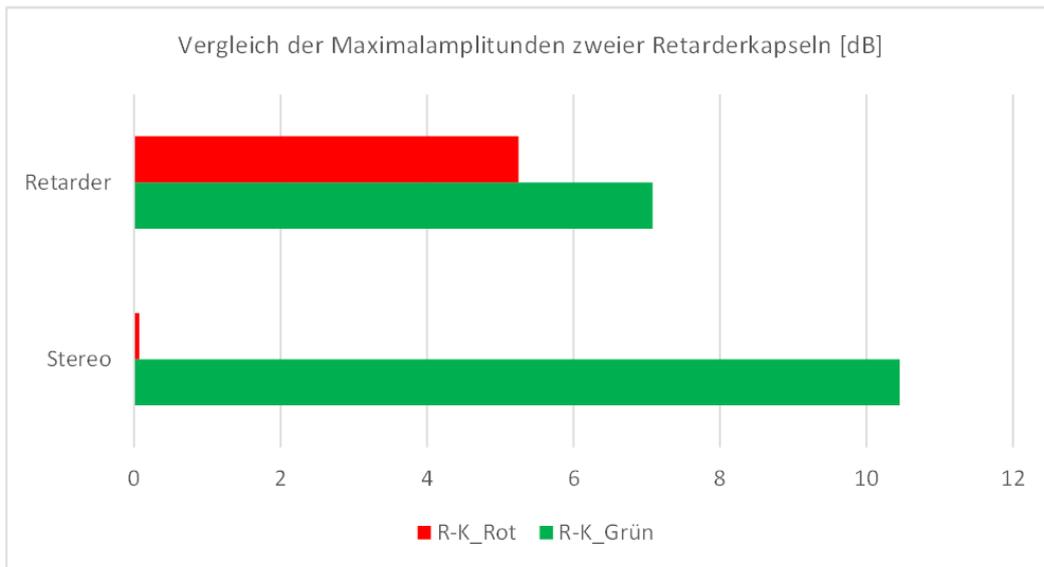


Abbildung 117: Vergleich der Maximalamplituden zweier Retarder kapseln¹⁷²

6.5.13.2. Gehäuse

Zum Vergleich des Gehäuses werden folgende Messreihen verglichen:

Messreihe 1 - Retarder konventionell (Grüne Farbcodierung)

Messreihe 2 - Gehäuse (geschlossene Variante) locker am Retarder konventionell (Grüne Farbcodierung)

Gehäuse (offene Variante) am konventionellen Retarder (Grüne Farbcodierung)

Gehäuse (geschlossene Variante) am konventionellen Retarder (Grüne Farbcodierung)

¹⁷² Eigene Darstellung.

Betrachtet man die einzelnen Varianten vom offenen Retarder bis zum komplett eingehausten Retarder, so stellt man fest, dass die Emissionen außerhalb des Retarders bei den einzelnen Varianten zunehmen. Innerhalb des Retarders wird der Lärm jedoch weniger. Daher ist davon auszugehen, dass diese Variante in der Form nicht den gewünschten Erfolg bringt, da die Hauptlast der Emission vom Gleitzylinder ausgeht. Daher wird diese Variante in der Arbeit nicht weiterverfolgt.

Die nachfolgende Abbildung zeigt diesen beschriebenen Verlauf:

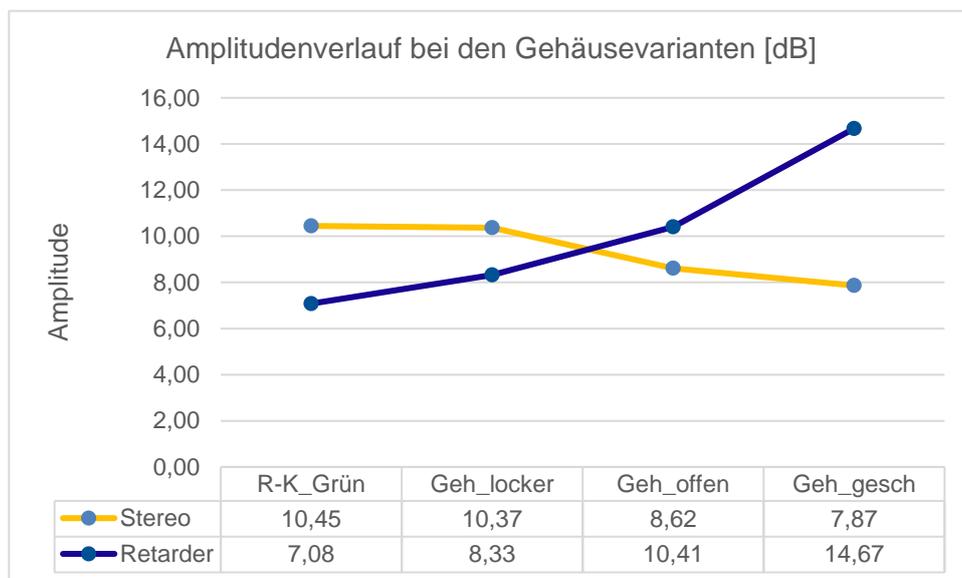


Abbildung 118: Amplitudenverlauf bei den Gehäusevarianten¹⁷³

¹⁷³ Eigene Darstellung.

6.5.13.3. Entkopplung

Beim Vergleich zwischen konventionellen Retardern und den Entkoppelten konnten folgende Werte ermittelt werden:

	Stereo	Gleis	Retarder
R-K_Grün	10,45	2,64	7,08
Entk_Grün	6,31	4,93	9,45
R-K_Rot	0,07	7,77	5,25
Entk_Rot	1,68	17,45	11,75

Tabelle 6: Amplituden zweier Retarder kapseln¹⁷⁴

Das nachfolgende Diagramm zeigt die einzelnen Messwerte dieser Betrachtung, wobei beim Stereomikrofon der konventionelle Retarder (Rote Farbkodierung) nicht aufscheint, da der Wert bei 0,07 dB liegt:

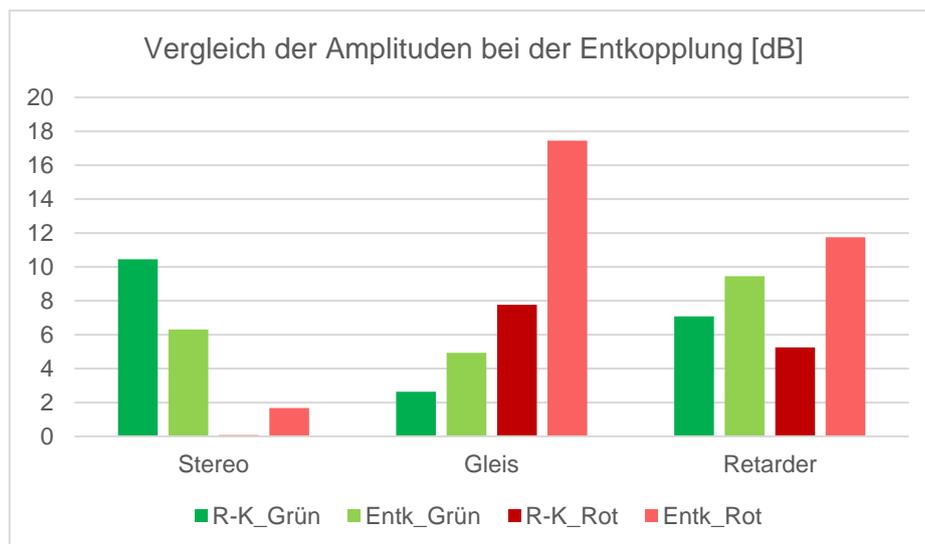


Abbildung 119: Vergleich der Amplituden bei der Entkopplung¹⁷⁵

Aus dieser Messung geht hervor, dass der Körperschall, die Emissionen bei den Kontaktmikrofonen (Gleis und Retarder), durch eine Entkopplung verbessert werden. Beim Stereomikrofon, welches ausschlaggebend für die Gesamtakustik ist, zeigt sich beim Retarder mit der grünen Farbkodierung keine Verbesserung. Lediglich beim Retarder mit der

¹⁷⁴ Darstellung auf Grundlage von **Tabelle 4: Mediane der Amplituden von gleitend applizierten Schlägen**).

¹⁷⁵ Eigene Darstellung.

roten Farbkodierung wäre eine minimale Verbesserung erkennbar. Daher wird diese Variante im weiteren Verlauf dieses Projekts nicht weiter untersucht.

6.5.13.4. Beschichtung

Bereits durch den subjektiven Eindruck im Zuge der Messung war eine Verbesserung durch den Einsatz von beschichteten Kapseln hörbar. Dieser Eindruck konnte durch die Messung untermauert werden. Die Aufzeichnung der Amplituden zeigt sogar eine Verbesserung beim Stereomikrofon von rund 10 dB, was mehr als doppelt so leise ist. In der nachfolgenden Abbildung sind die Messaufzeichnungen des Stereomikrofons und des Retarderkontaktmikrofons aufgeführt:

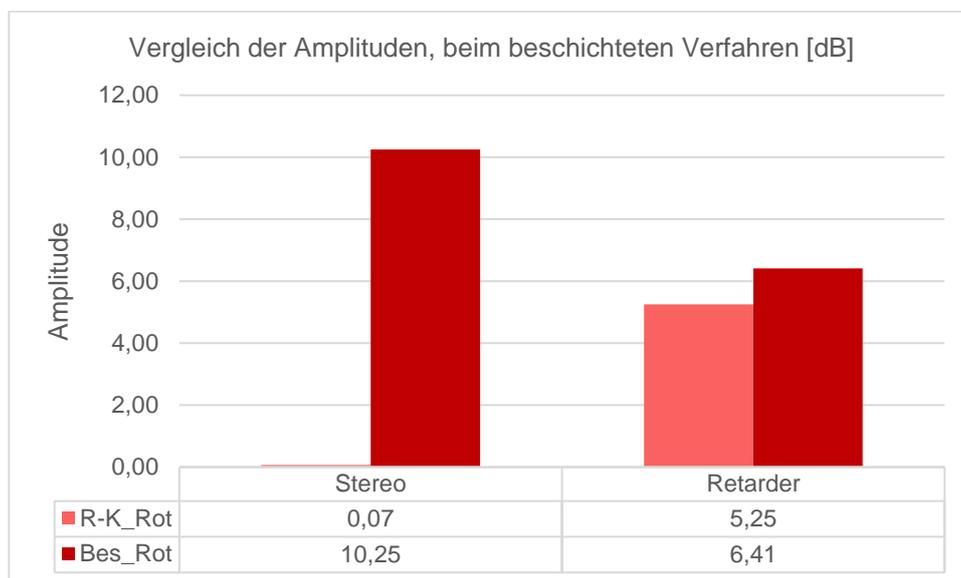


Abbildung 120: Vergleich der Amplituden - Nicht beschichtet und beschichtet¹⁷⁶

Zu untersuchen ist noch, wie sich diese Veränderung bei anderen Farbcodierungen präsentiert. Durch weitere Feldversuche könnte zudem festgestellt werden, wie sich die Veränderung im Vergleich zur Abnutzung der Beschichtung verhält.

¹⁷⁶ Eigene Darstellung.

6.5.13.5. Festlegung der weiteren Vorgehensweise

Aus der Messung geht hervor, dass die Variante des beschichteten Retarders eine deutliche Verbesserung im akustischen Verhalten des Retarders aufweist. Daher wird diese Variante forciert. Die anderen durchgeführten Umbauten werden somit im Zuge dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Zudem wird zur Spurkranzschmierung eine weitere Recherche durchgeführt um das Potential dieser Variante zu ermitteln. Zudem muss bei weiteren Messungen sichergestellt sein, dass eine möglichst gleichmäßige Belastung auf den Retarder ausgeübt wird. Dies lässt sich durch eine mechanische Vorrichtung, welche immer dieselbe Kraft auswirkt oder durch deinen Feldversuch am Gleis sicherstellen.

6.5.14. Einschätzung der Lebensdauer der Beschichtung

Um besser einschätzen zu können welchen Belastungen die derzeitige Beschichtung Stand hält, eignet sich eine Belastungsprobe. Damit kann zwar kein Absolutwert ermittelt werden, aber es kann eine Prognose getroffen werden. Dieser Versuch wird deshalb als geeignet angesehen, um einschätzen zu können, ob Feldversuche im Gleis sinnvoll sind oder eine industrielle Beschichtung bereits vor weiteren Feldversuchen zu verwenden ist.

Folgende Anforderungen werden an diese visuelle Verlaufsmessung gestellt:

- Visuelle Verlaufskontrolle an der Beschichtung einer Hülse
- Versuche die Beschichtung mittels einem Vorschlaghammer / Schlögel zu beeinträchtigen
- Durchführen von Beeinträchtigungsversuchen
- Dokumentation der Veränderungen

Folgendes soll nicht erfolgen:

- Detaillierte Materialprüfung
- Keine Versuche an Retardern im Gleis
- Betrachtung beeinflussender Parameter (keine Verwendung verschiedener Unterlagsmaterialien)

6.5.14.1. Durchführung

Durchgeführt wurde die Messung an verschiedenen Hülsen. Sowohl mit einem zusammengesetzten Zylinder als auch an einer leeren Hülse. Im Zuge dieser Messreihe soll möglichst viel Belastung auf die Haube auftreten.¹⁷⁷

¹⁷⁷ Vgl. Kapitel 6.5.3 Funktionsweise.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die verwendete Hülse:



Abbildung 121: Aufnahmen der leeren Hülse vor der Beschichtung¹⁷⁸

Örtlichkeit:

Werkstattbereich

Verwendetes Bauteil:

Leere Hülse

Gleitzyylinder mit einem Kolben

Beschichtet mit einer oder drei Schichten Brax Exvibration – Anti Dröhnpaste

Aushärtungszeit über 24 Stunden

Die Messung erfolgte im Freien. Dabei konnte das Werkstück in einer Holzkonstruktion eingespannt werden. Somit konnte bei den Abläufen annähernd derselbe Standort und die Auftreffrichtung eingehalten werden. Folgende Rahmenbedingungen lagen bei dem Versuch vor:¹⁷⁹

Datum & Zeit: 08. Mai 2018 von 09:00 – 12:00

Im Freien

Temperatur: Circa 20° C

Kein Niederschlag

Feste Einspannung des Werkstücks

¹⁷⁸ Eigene Aufnahme aufgenommen am 04.05.2018.

¹⁷⁹ Eigene Aufzeichnungen vom 08.05.2018.

Verwendetes Werkzeug:¹⁸⁰

Vorschlaghammer: 5 kg Kopfgewicht, 5,8 kg Gesamtgewicht, 83 cm Stiellänge

Fäustel / Schlägel: 1,46 kg Gewicht, 22 cm Stiellänge

Durchführung:

Bei jedem einzelnen Schlag auf die Haube wurde mit möglichst großem Aufprall versucht Schläge auf das Zentrum der Haube auszuführen.

6.5.14.2. Veränderungen der Beschichtung

Bei dem Retarder mit einer einer Schicht Dröhpaste zeigte sich die Abnutzung insbesondere durch Abrieb. So konnte bereits nach 50 Schlägen eine glatte Oberfläche an den Auftreffpunkten festgestellt werden. Eine Beeinträchtigung beziehungsweise ein Ablösen bis zu den metallischen Teilen der Haube war auch nach über 200 Schlägen nicht der Fall.

Die nachfolgende Abbildung zeigt die Haube mit einer Einzelbeschichtung nach 200 Schlägen:



Abbildung 122: Retarderhaube nach 200 Schlägen mit einfacher Beschichtung

Bei der Hülse mit dreifacher Beschichtung zeigte sich nach 50 Schlägen, dass besonders das Auftreffen auf den seitlichen Rand Schäden an der Beschichtung hervorrief. Gleichermäßen zeigte die Haube mit der dreifachen Beschichtung bereits nach 50 Schlägen eine ähnliche

¹⁸⁰ Eigene Erhebungen vom 08.05.2018.

Abnutzung wie die einfache Beschichtung nach etwa 150 Schlägen. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Haube mit der dreifachen Beschichtung nach 50 Schlägen:



Abbildung 123: Retarderhaube nach 50 Schlägen mit dreifacher Beschichtung¹⁸¹

Aus dieser subjektiven Einschätzung geht hervor, dass die Beschichtung nur in einem bestimmten Maße aufgetragen werden darf. Es zeigt sich, dass eine zu dicke Beschichtung eher abgerieben werden kann als eine dünne Beschichtung. Eignen würde sich daher eine industriell aufgetragene Beschichtung, welche eine möglichst gleichmäßige Oberfläche aufweist.

6.5.15. Mögliche Beschichtungsmethoden

Um eine Antidröhpastenbeschichtung professionell und vor allem in Serie durchführen zu können sind industrielle Verarbeitungsmethoden notwendig. Im Folgenden werden jene Beschichtungsmethoden, die für das Auftragen einer Antidröhpaste auf einen Retarder in Frage kommen, sowie entsprechende Unternehmen, welche eine solche Methode anbieten, beschrieben.

¹⁸¹ Eigene Aufnahme vom 05.05.2018.

6.5.15.1. Thermisches Spritzen

Unter thermischen Spritzen versteht man das Auftragen eines angeschmolzenen Stoffes auf die die Oberfläche des Werkstücks mittels hoher kinetischer Energie. Hierbei werden die Teilchen regelrecht auf zu beschichteten Flächen geschleudert. Hierbei gibt es mehrere Methoden die allesamt von der österreichischen Firma Proweld angeboten werden:¹⁸²

Drahtflamm

Bei diesem Verfahren wird das Beschichtungsmaterial in Form eines Drahtes thermisch geschmolzen und mittels Druckluft aufgetragen. Mögliche Werkstoffe hierfür sind:¹⁸³

- FeCrNi-Legierungen
- reine Metalle wie z.B. Zink, Aluminium, Kupfer, etc.
- Fe-Basis-Legierungen
- Weißmetall
- reines Molybdän

Pulverflamm

Dieses Verfahren funktioniert ähnlich wie jenes des Drahtflamms mit dem Unterschied, dass anstatt eines Drahtes das Beschichtungsmittel in pulverisierter Form aufgetragen wird. Mögliche Werkstoffe hierfür sind:¹⁸⁴

- Ni-, Fe-, Cr-Basis; auch mit Hartstoffen wie Wc, Co, Cermets
- selbstfließende Legierungen NiCrBSI + Hartstoffe: Karbide, Cermets, etc.
- rostfreier Stahl
- reine Metalle z.B. Aluminium, Kupfer, etc.
- Keramiken (Oxyde): Aluminium, Titan, Chrom, Zirkon, etc.

¹⁸² Vgl.: PRO-WELD Schweißtechnik GmbH (Hg.): Thermisches Spritzen. URL: <https://www.proweld.at/thermisch-spritzen/> [Stand: 3.7.2018].

¹⁸³ Vgl.: PRO-WELD Schweißtechnik GmbH (Hg.): Beschichtungsverfahren. URL: <https://www.proweld.at/thermisch-spritzen/verfahren/#c241> [Stand: 3.7.2018].

¹⁸⁴ Vgl.: PRO-WELD Schweißtechnik GmbH (Hg.): Beschichtungsverfahren. URL: <https://www.proweld.at/thermisch-spritzen/verfahren/#c241> [Stand: 3.7.2018].

Lichtbogenmethode

Bei der Lichtbogenmethode wird wie bei Drahtflammmethode das Beschichtungsmaterial in Form eines Drahtes verarbeitet. Jedoch wird der Draht nicht einfach geschmolzen und verdüst, sondern immer so viel Draht nachgeführt wie geschmolzen wird. Dadurch entsteht ein konstanter Lichtbogen. Mittels eines Zerstäubergasstrom wird dann das geschmolzene Material auf die entsprechende Oberfläche aufgetragen. Mögliche Werkstoffe dafür sind: ¹⁸⁵

- reine Metalle wie z.B. Zink, Aluminium, Kupfer, etc.
- Fe-Basis-Legierungen
- Fe-Basis mit hohem Cr-Anteil
- rostfreier Stahl
- Co-Basis Werkstoffe wie z.B. Stellite, Triballoy, etc.
- Ni-Basis Werkstoffe wie z.B. Inconel, Hastelloy, SF-Legierungen, etc.

HVOF – Hochgeschwindigkeits-Flammspritzverfahren

Diese Methode ähnelt dem Flammspritzen, nur dass die Teilchen mit Überschallgeschwindigkeit auf das Werkstück geschossen werden, was letztendlich bessere Schichteigenschaften schafft. Technisch unterscheidet sich diese Methode vom Flammspritzen an der Düse am Brennerende. Zur Verwendung kommen folgende Stoffe: ¹⁸⁶

- Karbide, Cermets wie z.B. WC-Co, WC-CrCo, Cr₂O₃-NiCr
- reine Metalle wie z.B. Aluminium, Kupfer, etc.
- rostfreier Stahl
- Co-Basis Werkstoffe wie z.B. Stellite, Triballoy, etc.
- Ni-Basis Werkstoffe wie z.B. Inconel, Hastelloy, SF-Legierungen, etc.
- hochtemperatur- und korrosionsbeständiger Werkstoff MCrAlY

¹⁸⁵ Vgl.: PRO-WELD Schweißtechnik GmbH (Hg.): Beschichtungsverfahren. URL: <https://www.proweld.at/thermisch-spritzen/verfahren/#c241> [Stand: 3.7.2018].

¹⁸⁶ Vgl.: PRO-WELD Schweißtechnik GmbH (Hg.): Beschichtungsverfahren. URL: <https://www.proweld.at/thermisch-spritzen/verfahren/#c241> [Stand: 3.7.2018].

Plasmamethode

Bei der Plasmamethode strömt ein Gas zwischen zwei Elektroden durch und wird dabei ionisiert wodurch ein zentimeterlanger Plasmastrahl mit einer Temperatur von bis zu 16000° K entsteht. Der Spritzwerkstoff wird in Form eines Pulvers erst außerhalb der Düse in das Plasmagas eingespritzt und dadurch auf das Werkstück geschleudert.

Als Werkstoffe werden hierbei folgende Verbindungen verwendet: ¹⁸⁷

- AluTitanOxyd
- ChromOxyd
- AluOxyd
- TitanOxyd

6.5.15.2. Wirbelsintern

Wirbelsintern ist eine Beschichtungstechnik bei der das Werkstück vorgewärmt in ein Pulverbad getaucht wird. Durch einen porösen Boden wird Luft in das Bad eingeblasen, wodurch das Pulver aufgewirbelt wird und sich dabei ähnlich wie eine Flüssigkeit verhält. Dadurch gelangen die Teilchen bis in die engsten Winkel des Bauteils und verschmelzen dort auf der vorgewärmten Oberfläche. Dabei entsteht eine bis zu 400µm dicke poredichte Schicht. ¹⁸⁸



¹⁸⁷ Vgl.: PRO-WELD Schweißtechnik GmbH (Hg.): Beschichtungsverfahren. URL: <https://www.proweld.at/thermisch-spritzen/verfahren/#c241> [Stand: 3.7.2018].

¹⁸⁸ Vgl.: Kersten Kunststoffcoating GmbH (Hg.): Wirbelsintern. Poredichte Schutzschicht. URL: <https://www.kersten-gmbh.de/unsere-dienstleistung/wirbelsintern/> [Stand: 3.7.2018].

Abbildung 124: Wirbelstromsintern¹⁸⁹**6.5.15.3. Pulverbeschichtung**

Bei dieser Art der Beschichtung wird der Bauteil zuerst chemisch vorbehandelt, anschließend mit einer elektrostatischen Spritzpistole besprüht und anschließend in einem Ofen gebrannt, um den Pulverlack zu vernetzen. Angeboten wird dieses Verfahren vom Unternehmen WK Pulverbeschichtung Ges.m.b.H.¹⁹⁰

6.5.15.4. Schmelztauchen

Dabei handelt es sich um eine Beschichtungsmethode bei der das Werkstück in eine Schmelze getaucht wird. Wichtig dabei ist, dass der Schmelzpunkt des zu beschichtenden Teils weit höher liegt als jener des Schichtmaterials.¹⁹¹

6.5.15.5. Schmelzexperiment

Um die Schmelzeigenschaften der Antidröhpaste herauszufinden, wurde ein Experiment an einem mechanisch beschichteten Dowty-Retarder durchgeführt.

Dabei wurden folgende Materialien verwendet:

- Mit einer Antidröhpaste beschichteter Dowty-Retarder
- Butangasbrenner

Dabei wurde festgestellt, dass es bei der Bearbeitung mit einem Butangasbrenner zu keinen Veränderungen an der beschichteten Oberfläche kommt.

¹⁸⁹ Abbildung entnommen aus (Hg.): Kersten Kunststoffcoating GmbH: Wirbelsintern. Porendichte Schutzschicht. URL: <https://www.kersten-gmbh.de/unsere-dienstleistung/wirbelsintern/> [Stand: 3.7.2018].

¹⁹⁰ Vgl.: WK Pulverbeschichtung Ges.m.b.H (Hg.): Der Beschichtungsprozess. URL: http://www.pulverbeschichtung.at/1_37_Technologie.html [Stand: 3.7.2018]

¹⁹¹ Vgl.: Metalltechnik Lexikon (Hg.): Schmelztauchen. URL: <http://www.metalltechnik-lexikon.de/schmelztauchen/> [Stand: 3.7.2018].



Abbildung 125: Experiment – Verwendetes Equipment

6.5.15.6. Zusammenfassung

Nach ausführlicher Recherche über die verschiedensten Beschichtungsmethoden stellt sich vor allem das Problem der Durchführung mit der speziellen Antidröhpaste. Inwiefern sich diese Paste schmelzen und sprühen lässt ist fraglich. Auch in welchen Ausgangszustand sie sich versetzen lässt, sprich sie pulverisieren oder zu einem Draht komprimieren, ist fraglich und entscheidend dafür welches Verfahren angewandt werden kann.

Um eine möglichst höchste Festigkeit zu erzielen, ist vermutlich die HVOF-Methode am geeignetsten. Die Umsetzung hierbei ist aber äußerst fraglich, da hierbei die Antidröhpaste zu Verstopfungen führen könnte. Darüber hinaus ist derzeit nicht erprobt ob sich die ausgehärtete Paste pulverisieren lässt.

Die für die Antidröhpaste wahrscheinlich am sichersten Umzusetzung ist das Schmelztauchen, da hierbei das Beschichtungsmaterial lediglich geschmolzen werden muss. Hierbei zu hinterfragen ist jedoch, ob eine ausreichende Haltbarkeit gegeben ist sowie ob ein simples Aufspachteln der feuchten Paste nicht dasselbe Ergebnis liefern würde.

Die wohl beste Methode um einen Dowty-Retarder mit einer Antidröhpaste zu beschichten ist vermutlich eine Kombination aus mehreren Varianten. Da die Paste im Lieferzustand zähflüssig ist und erst nach Auftragen aushärtet, wäre ein Aufbringen dessen mittels Sprühdüse und Druckluft durchaus denkbar. Womöglich müsste die Paste zuvor leicht verdünnt werden und mehrmals hintereinander beschichtet werden. Um mit dieser Problematik besser umgehen zu können sind weitere Versuche mit den zu beschichtenden Elementen und der Beschichtungsmasse erforderlich.

6.5.15.7. Evaluierung der maßgeblichen Werkstoffeigenschaften

Werkstoff	Dichte	Schmelzp.	Entzündungst.
<i>Acrylat</i> ¹⁹²			
<i>Vinylacetat</i> ¹⁹³	0,93g/cm ³	-100°C	385°C
<i>Styrol</i> ¹⁹⁴		-31°C	490°C
<i>Butadien</i> ¹⁹⁵		-108,92°C	415°C
<i>Ethylen</i> ¹⁹⁶		-169,18°C	440°C
<i>Glasfaser</i> ¹⁹⁷		>1200°C	unentzündbar
<i>Wasser</i> ¹⁹⁸		0,0°C	Verdunstet: 100°C
<i>Calciumcarbonat</i> ¹⁹⁹		825°C	Zersetzung bei Erhitzen
<i>Talkum</i> ²⁰⁰		>800°C	Zersetzung bei Erhitzen

¹⁹² Vgl.: Pubchem- Open Chemistry Database (Hg.): Methacrylate URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Methacrylate#section=Information-Sources> [Stand: 2018-07-09].

¹⁹³ Vgl.: Institut für Arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung (Hg.): Vinylacetat URL: [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/012720.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/012720.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0) [Stand: 2018-07-09].

¹⁹⁴ Vgl.: Institut für Arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung (Hg.): Styrol URL: [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/012720.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/012720.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0) [Stand:2018-07-09].

¹⁹⁵ Vgl.: Institut für Arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung (Hg.): Butadien URL: [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/012720.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/012720.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0) [Stand:2018-07-09].

¹⁹⁶ Vgl.: Institut für Arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung (Hg.): Ethylen URL: [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/012720.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/012720.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0) [Stand:2018-07-09].

¹⁹⁷ Vgl.: R&G Wiki (Hg.): E- Glas. URL: <https://www.r-g.de/wiki/Glasfasern> [Stand:2018-07-09]

¹⁹⁸ Vgl.: Institut für Arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung (Hg.): Wasser URL: [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/012720.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/012720.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0) [Stand:2018-07-09].

¹⁹⁹ Vgl.: Chemie.de (Hg.): Calciumcarbonat URL: <http://www.chemie.de/lexikon/Calciumcarbonat.html> [Stand:2018-07-09].

²⁰⁰ Vgl.: Chemie.de (Hg.): talk (Mineral) URL: http://www.chemie.de/lexikon/Talk_%28Mineral%29.html [Stand:2018-07-09].

6.5.16. QUELLENVERZEICHNIS

FH St. Pölten (Hg.): Adaptierter Retarder. Messreihen am Demonstrator. St. Pölten 2018.

FH St. Pölten GmbH (Hg.): Vorstudie zur Einschätzung der spektralen Klangkomponenten der beim Überrollen von Retardern entstehenden Schallemission. St. Pölten 2017.

Free Map Tools (Hg.): Radius Around Point. URL: <https://www.freemaptools.com/radius-around-point.htm> [Stand 28.04.2018].

IGRALUB (Hg.): TOTAL SERVICES PROVIDER. Produktliste. Zürich 2018.

INNOVENT Technologieentwicklung Jena (Hg.): Magnetorheologische Flüssigkeiten. URL: http://www.innovent-jena.de/de/INNOVENT/Fachbereiche/MOS/Magnetische_Materialien/Magnetorheologische-Fluessigkeiten__4690/ [Stand: 10.11.2017].

Kersten Kunststoffcoating GmbH (Hg.): Wirbelsintern. Porendichte Schutzschicht. URL: <https://www.kersten-gmbh.de/unsere-dienstleistung/wirbelsintern/>

Macoun, Thomas: Verkehrs-/Umweltanalyse. Wien 2013.

Newatlas (Hg.): Audi's new magnetic semi-active suspension system. URL: <https://newatlas.com/go/5752/#gallery> [Stand: 10.11.2017].

PRO-WELD Schweißtechnik GmbH (Hg.): URL: <https://www.proweld.at/thermisch-spritzen/> [Stand: 3.7.2018]

Strassmayer, Thomas: Anwendung technischer Systeme im Eisenbahnbetrieb. GLEISBREMSSEN. St. Pölten 2016.

Bick, D.E.: A history of the Dowty marshalling yard wagon control system. Cheltenham 1983.

Lehner, Harald. Marchler, Meinrad. Zmaritsch, Josef: Ablaufanlagen. Aufbau, Funktionsweise, Wartung und Inspektion von Balkengleisbremsen und Retarderbremsen (Kolbengleisbremsen). St. Pölten 2015.

ÖBB Infra (Hg.): Wien Zentralverschiebahnhof (Zur). Lageskizze. Laufende Nummer 005. Wien 2016.

BGBl. II Nr. 415/1993: Verordnung des Bundesministers für öffentliche Wirtschaft und Verkehr über Lärmschutzmaßnahmen bei Haupt-, Neben- und Straßenbahnen (Schienenverkehrslärm – Immissionsschutzverordnung – SchIV).

FH St. Pölten (Hg.): Adaptierter Retarder. Messreihen am Demonstrator. St. Pölten 2018.

FH St. Pölten GmbH (Hg.): Vorstudie zur Einschätzung der spektralen Klangkomponenten der beim Überrollen von Retardern entstehenden Schallemission. St. Pölten 2017.

Institut für Arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung

INNOVENT Technologieentwicklung Jena (Hg.): Magnetorheologische Flüssigkeiten. URL: http://www.innovent-jena.de/de/INNOVENT/Fachbereiche/MOS/Magnetische_Materialien/Magnetorheologische-Fluessigkeiten__4690/ [Stand: 10.11.2017].

KRAITEC (Hg.): KRAITEC top. Bautenschutzmatte. Datenblatt Nr. 9205 – R – 19. Stand Mai 2017. Kraiburg 2017.

KRV (Hg.): Abriebverhalten. URL: <http://www.krv.de/wissen/abriebverhalten> [Stand 02.04.2018].

Lehner, Harald. Marchler, Meinrad. Zmaritsch, Josef: Ablaufanlagen. Aufbau, Funktionsweise, Wartung und Inspektion von Balkengleisbremsen und Retarderbremsen (Kolbengleisbremsen). St. Pölten 2015.

LINCOLN, SKF (Hg.): Reibung erfolgreich beherrschen mit automatischen SKF und Lincoln stationären und fahrzeuggebundenen Schmiersystemen. Berlin 2014.

Lord Corp. (Hg.): STABILE MAGNETORHEOLOGISCHE FLÜSSIGKEITEN. URL: <http://www.patent-de.com/20041216/DE60008533T2.html> [Stand: 10.11.2017].

Macoun, Thomas: Verkehrs-/Umweltanalyse. Wien 2013.

Meins, Wolfgang: Handbuch Fertigungs- und Betriebstechnik, 3. Auflage. Braunschweig, 2013, S. 211

Metalltechnik Lexikon (Hg.): Schmelztauchen. URL: <http://www.metalltechniklexikon.de/schmelztauchen/> [Stand: 3.7.2018].

MetaLine (Hg.): Lärmhemmende Anti-Dröhn-Spritzbeschichtung. Ausgabe P440AD-7-DE. Hildrizhausen.

ÖBB Infra (Hg.): Alternative Abroll-Bremstechnik. Ergebnisse TRIZ. Wien 2016.

ÖBB Infra (Hg.): Anforderungen an Bremsen für Abrollanlagen. Wien 2017.

ÖBB Infra (Hg.): Wartungsplan Zvbf Wien. Stand November 1998.

ÖBB Infrastruktur Betrieb AG (Hg.): Zentralverschiebebahn Wien. URL: https://web.archive.org/web/20090323143800/http://www.railnetaustria.at/de/Produkte_und_Services/Zentralverschiebebahn_Wien/index.jsp [Stand 12.02.2017].

Pachl, Jörn: Systemtechnik des Schienenverkehrs. Bahnbetrieb planen, steuern und sichern. 7 Auflage. Braunschweig 2013.

Pubchem- Open Chemistry Database (Hg.): Methacrylate URL:
<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Methacrylate#section=Information-Sources>
[Stand: 2018-07-09].

Physik Jorunal. Wiew-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Ausgabe 11/2012. Weinheim 2012.

Prettner, Lukas: Die Auswirkung von Schienenflankenschmierungen auf den Schienenverschleiß in engen Bogen. Graz 2013.

SIGNAL + DRAHT (Hg). Krims, Verena. Sturm, Peter: Modernisierung Verschiebebahnhof Graz. 105 Ausgabe – 3 / 2013.

Tipler, A Paul. Mosca, Gene: Physik. Für Wissenschaftler und Ingenieure. 2. Auflage. Elsevier Verlag. München 2004.

ULTR Railway Products (Hg.): DESIGNED, MANUFACTURED & SERVICED BY ULTRA DYNAMICS. High Capacity (HC) Piston Retarders. URL:
<http://web.archive.org/web/20111003003227/http://downties.com/> [Stand 10.01.2018].

Vaßen, Robert: Beschichtungstechnik. Jülich 2012.

Wikipedia (Hg.): E- Glas URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Glasfaser> [Stand:2018-07-09]

WK Pulverbeschichtung Ges.m.b.H.(Hg.): Der Beschichtungsprozess. URL:
http://www.pulverbeschichtung.at/1_37_Technologie.html [Stand: 3.7.2018]

Zschunke, Florian: Aktoren aus Basis des magnetorheologischen Effekts. Erlangen 2005.

6.6. Variante 5 - Wirbelstrombremse

Eine Wirbelstrombremse ist eine verschleißfreie Bremse, die die Wirbelströme von Magnetfeldern in bewegten Metallscheiben (Rotoren) oder Schwertern zur Bremsung nutzt.

Das Prinzip: Bewegt sich eine Metallplatte in einem inhomogenen äußeren Magnetfeld, so werden in ihr Spannungen und in der Folge Wirbelströme induziert, die ihrerseits eigene, dem äußeren Magnetfeld gemäß der Lenz'schen Regel entgegengesetzte Induktionsspannungen und damit wiederum ein eigenes Magnetfeld erzeugen, das die Platte schlussendlich abbremst (Lorentz-Kraft). Gleiches gilt, wenn umgekehrt die Quelle des äußeren Magnetfelds, z. B. ein Dauer- oder Elektromagnet, über eine elektrisch leitende Fläche, z. B. eine Eisenbahnschiene, bewegt wird – entscheidend ist lediglich die Relativbewegung zwischen Feld und elektrischem Leiter.

Der elektrische Widerstand der Metallplatte bildet dabei für die Wirbelströme einen ohmschen Verbraucher, der die Bewegungsenergie der Platte bzw. des Magneten in Wärme umsetzt. [1]

6.6.1. Bauformen von Wirbelstrombremsen

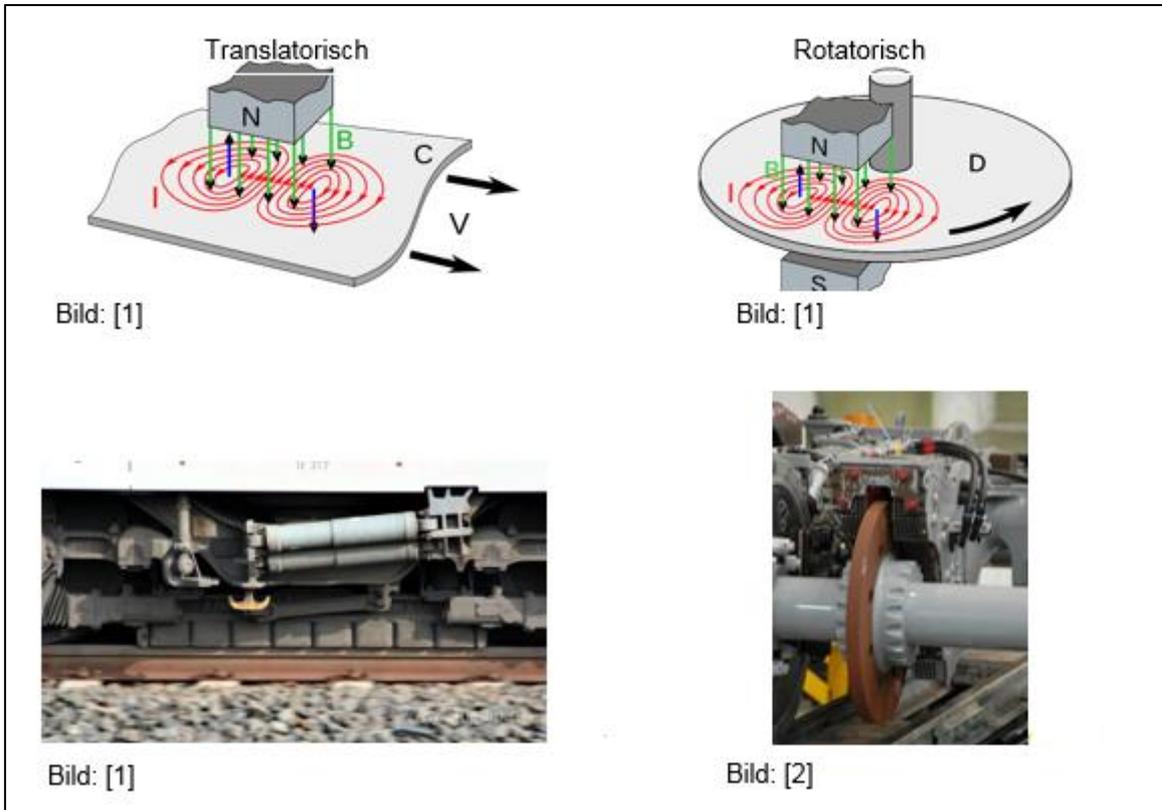


Abbildung 126: Bauformen Wirbelstrombremsen

6.6.2. Aufgabenstellung

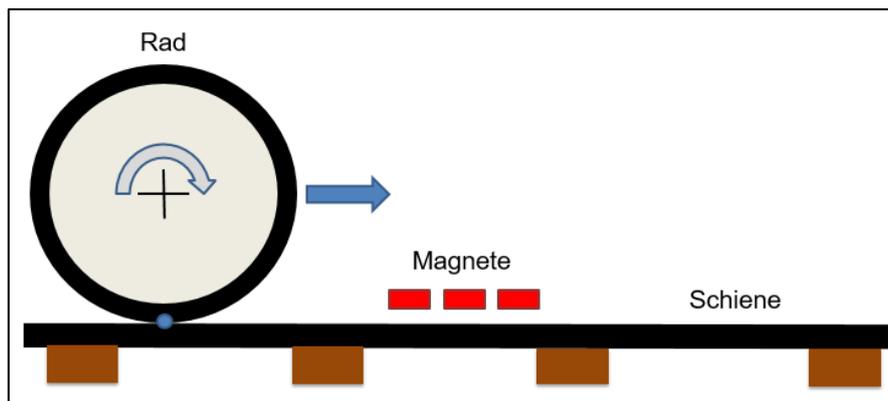


Abbildung 127: Grundschema

6.6.3. Vektor der Magnetposition

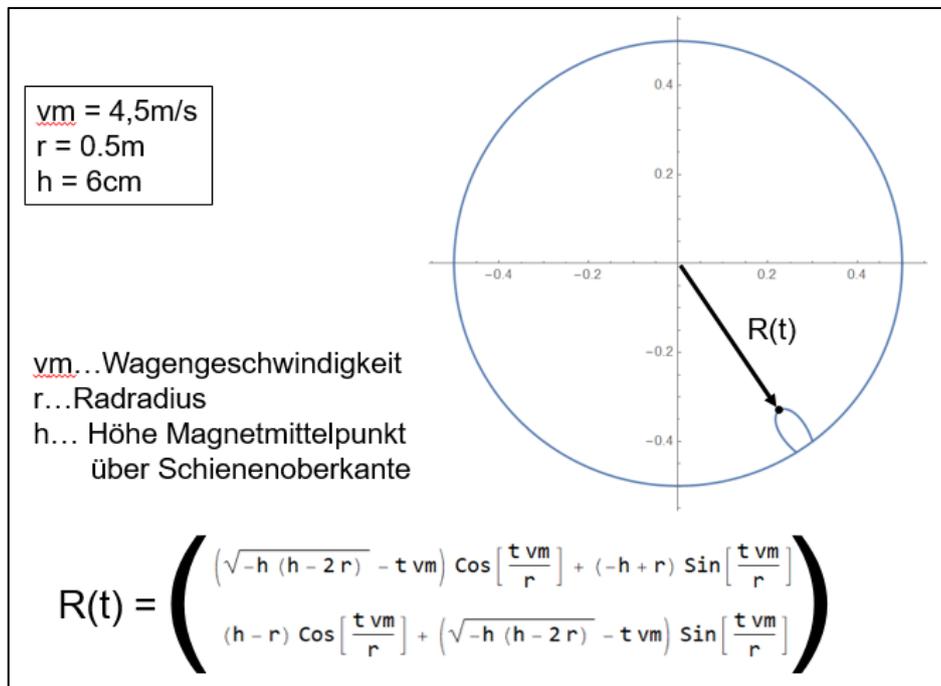


Abbildung 130: Vektordarstellung

6.6.4. Geschwindigkeitsverteilung am Rad

Von einem stehenden Beobachter aus betrachtet ist die Geschwindigkeit in jedem Punkt des rollenden Rades (mit Wagengeschwindigkeit = v_m) unterschiedlich groß und weist eine andere Richtung auf.

Im Berührungspunkt von Schiene und Rad ist die Geschwindigkeit Null, solange das Rad nicht gleitet. Das Rad bewegt sich entlang der roten Linie am Magnet vorbei.

Aufgrund der Magnetposition nahe am Berührungspunkt ist die Differenzgeschwindigkeit zwischen Rad und Magnet sehr gering.

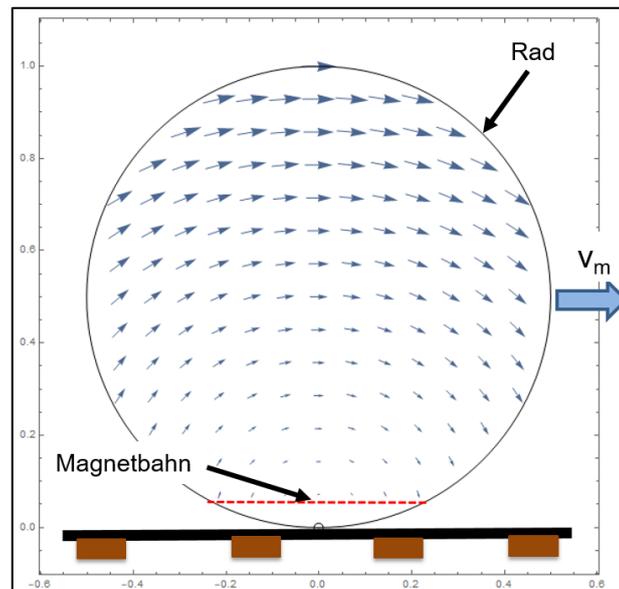


Abbildung 131: Geschwindigkeitsverteilung

6.6.5. Durchgeführte Simulationen mit Comsol Multiphysics

- Auslegung des Bremsmagneten
 - Magnetisierung im Kernmaterial
- 2D-Simulation mit Lorentz-Term
 - Materialabhängigkeit der Bremskraft (Kupfer – Stahl)
 - Frequenzabhängigkeit der Bremskraft
- 2D-Simulation mit Moving-Mesh
 - Verifikation der Berechnung mit Lorentz Term
- 3D-Simulation mit Lorentz-Term
 - Ermittlung der Bremskraft mit realer Geschwindigkeitsverteilung

6.6.6. Auslegung des Bremsmagneten

Für maximale Bremskraft wird ein möglichst starkes Magnetfeld gefordert:

- Maximale Anzahl Windungen auf verfügbarem Volumen (Annahme: 4000)
- Maximal zulässiger Strom (Richtwert: 2,5A /mm²)

- Limitierung der Magnetgröße durch begrenzten Bauraum (120mm über SOK)

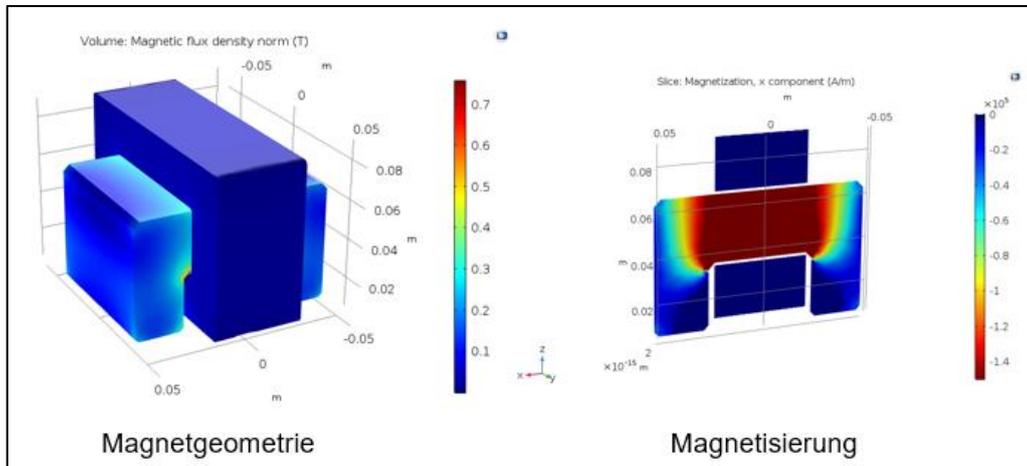


Abbildung 132: Magnetgeometrie und Magnetisierung

Materialdaten: http://elnamagnetics.com/wp-content/uploads/library/Ferroxcube-Materials/3C90_Material_Specification.pdf

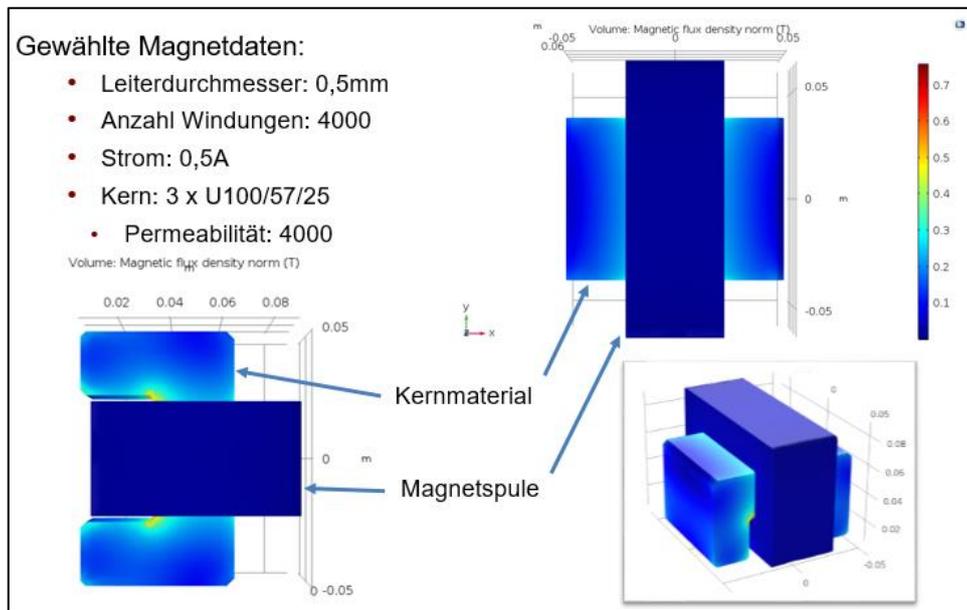


Abbildung 133: Grunddaten

6.6.7. Bestimmung der Magnetisierung

Die Magnetspule wird in Comsol Multiphysics mit dem „Homogenized Multiturn Coil“ Feature simuliert (hoher Rechenaufwand). Um bei den weiteren Berechnungen nicht jedes Mal die Magnetspule neu berechnen zu müssen wird die Magnetisierung im Kernmaterial ermittelt. Bei den folgenden Simulationen wird die ermittelte Magnetisierung als Quelle vorgegeben.

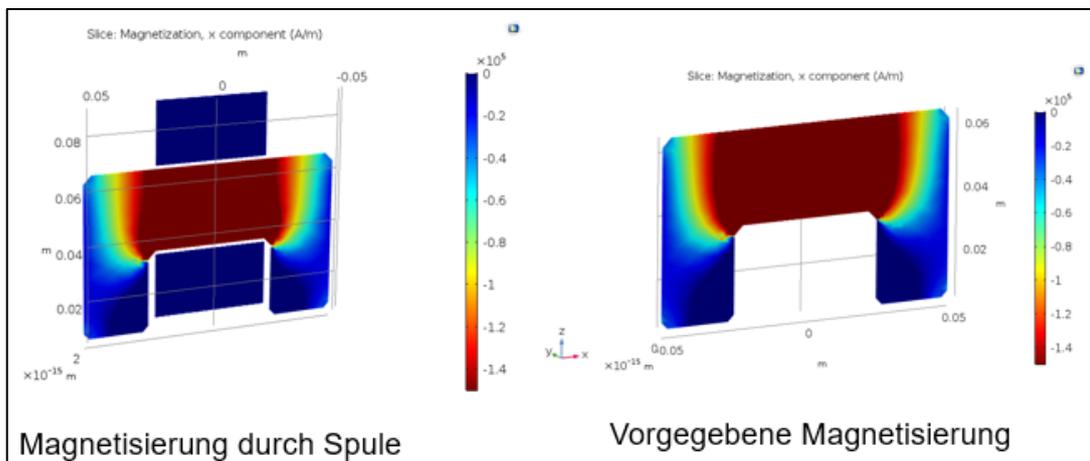


Abbildung 134: Magnetisierung

6.6.8. 2D Simulation mit Lorentz-Term (Kupfer)

Gleichungen im Magnetic Fields - Interface von Comsol Multiphysics:

```

Study 1, Time Dependent
∇ × H = J
B = ∇ × A
J = σE + σv × B + Je
E = - ∂A / ∂t
    
```

Vorgabe der Geschwindigkeit durch Lorentz-Term:

$$J = \sigma(E + \underline{v} \times B)$$

Die induzierte Stromverteilung wird stationär betrachtet wodurch der bewegte Teil keine mitbewegten magnetischen Quellen enthält.

Daher kann zur Berechnung der induzierten Stromdichte das Lorentz-Term Feature von Comsol verwendet werden.

Die Bremskraft wird durch Integration des Maxwell-Stress-Tensors berechnet.

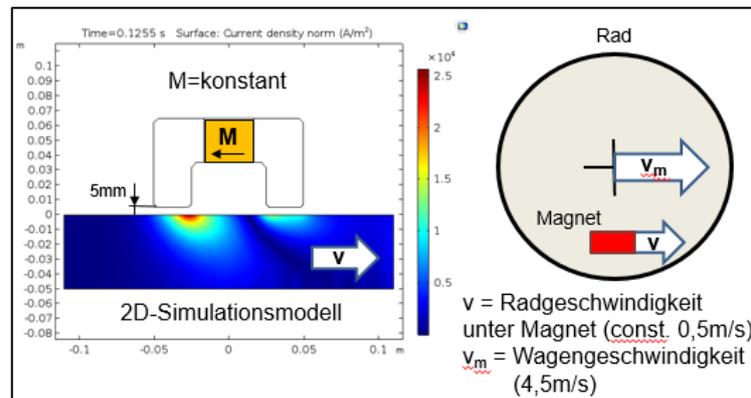


Abbildung 135: Integration des Maxwell-Stress-Tensors

Um die Frequenzabhängigkeit der Bremskraft zu ermitteln wurden drei 2D-Simulationen durchgeführt.

Dabei wurde die Magnetisierung im Magnetjoch einmal als zeitlich konstanter Wert (wie Permanentmagnet), als sinusförmig um die Nulllinie und als sinusförmig um den Mittelwert von maximaler Amplitude und Nulllinie gewählt.

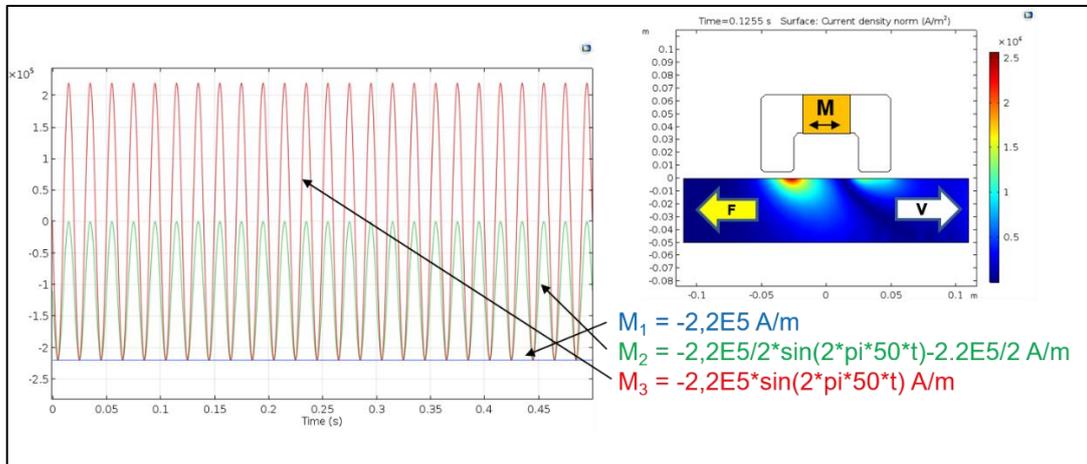


Abbildung 136: 6.6.8. 2D Simulation mit Lorentz-Term

6.6.9. 2D Simulation Magnetisierung (M3, 50 Hz)

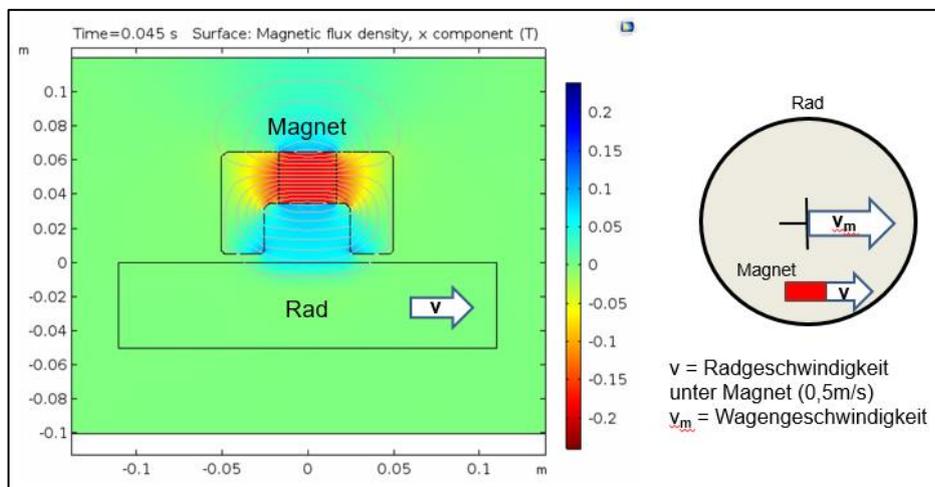


Abbildung 137: 2D Simulation Magnetisierung

6.6.10. 2D Simulation Wirbelströme (M1) / Material: Kupfer

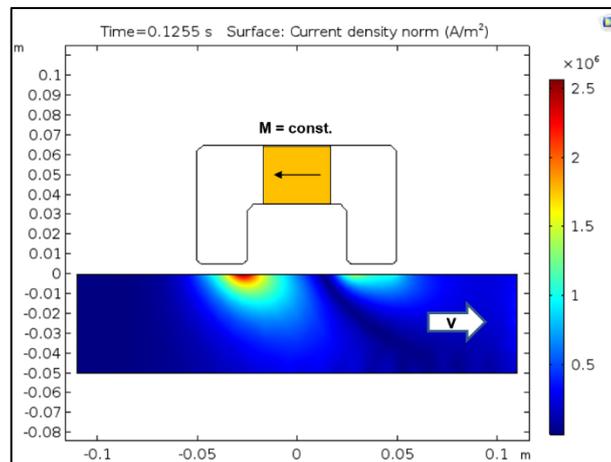


Abbildung 138: 2D Simulation Wirbelströme

6.6.11. Vergleich der Materialeigenschaften:

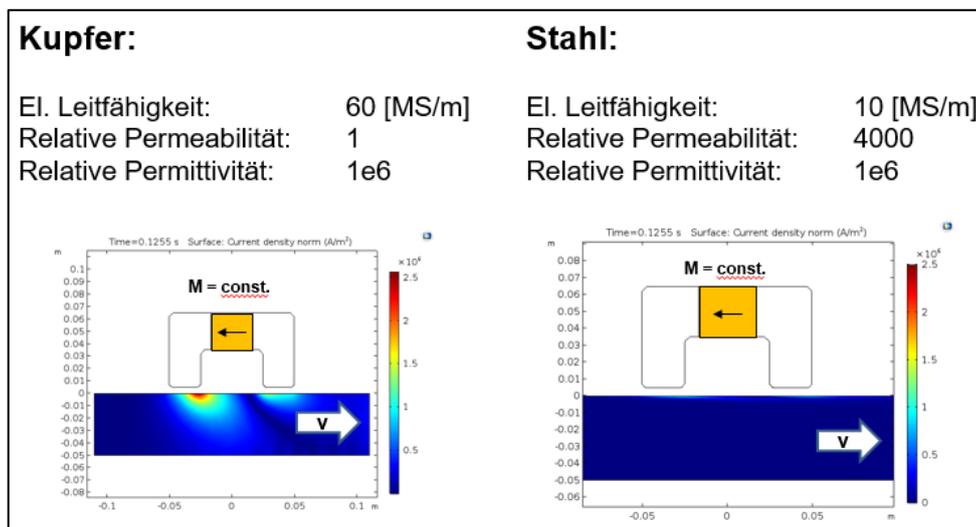


Abbildung 139: Vergleich Kupfer - Stahl

6.6.11.1. Vergleich der Materialeigenschaften (M1 = const.)

Stahl weist eine deutlich höhere Permeabilität und eine viel geringere el. Leitfähigkeit als Kupfer auf. In den folgenden Abbildungen ist ein Vergleich der induzierten Wirbelströme in Kupfer (links) und Stahl (rechts) zu sehen.

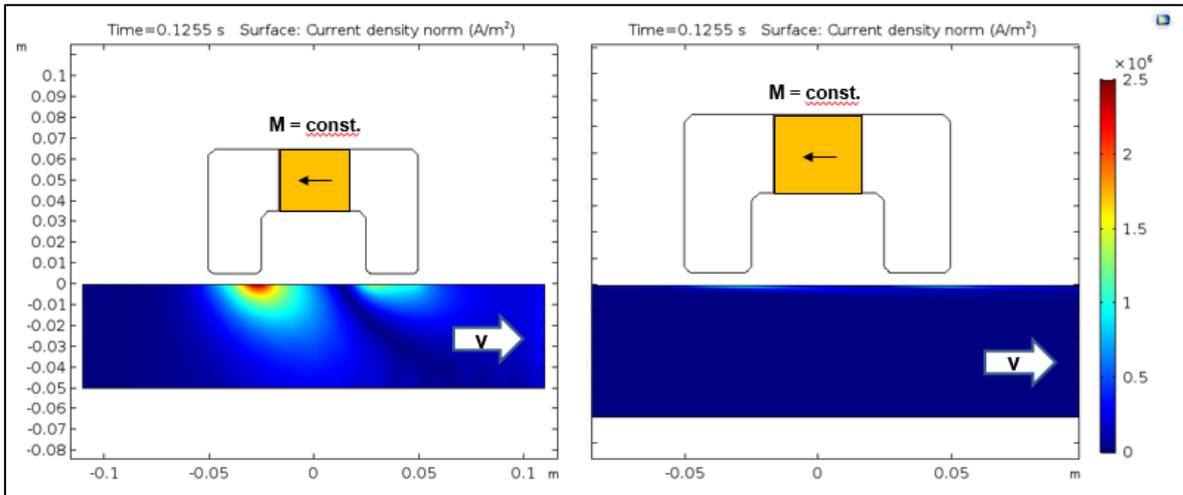


Abbildung 140: Vergleich der induzierten Wirbelströme

6.6.11.2. Vergleich der Materialeigenschaften (M3 = sin(50Hz))

Auch bei Anregung mit einer Frequenz von 50Hz ist die Eindringtiefe sehr gering. Im Vergleich zur vorherigen Folie ist ersichtlich, dass sich auch die Verteilung der Wirbelströme unterhalb des Magneten grundlegend ändert.

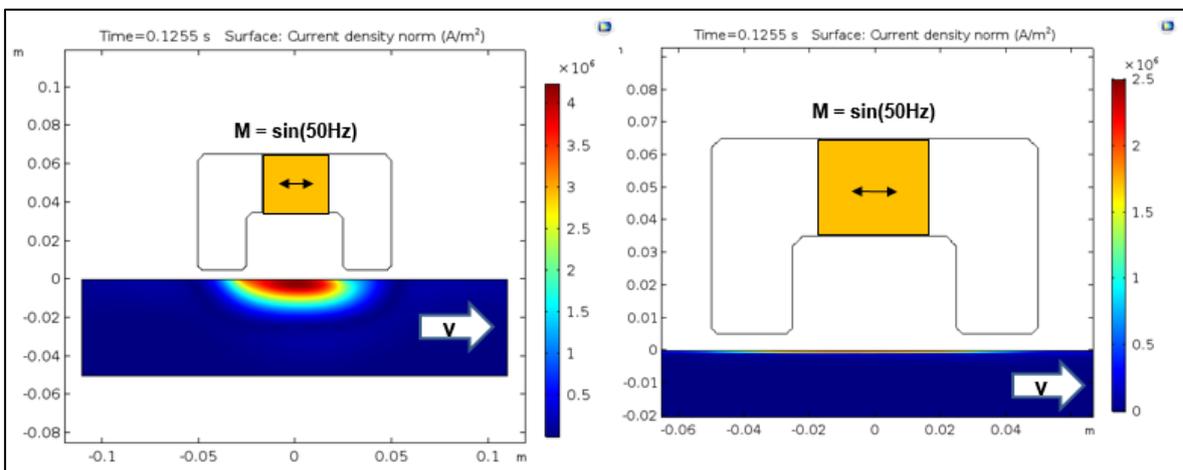


Abbildung 141: Anregung mit einer Frequenz von 50Hz

6.6.11.3. Erkenntnis Materialeigenschaften (Stahl)

Bei Stahl sind die Wirbelströme nur an der Oberfläche vorhanden und dringen nicht tief in das Material ein. Die Stärke der Wirbelströme ist auch deutlich geringer als bei Kupfer.

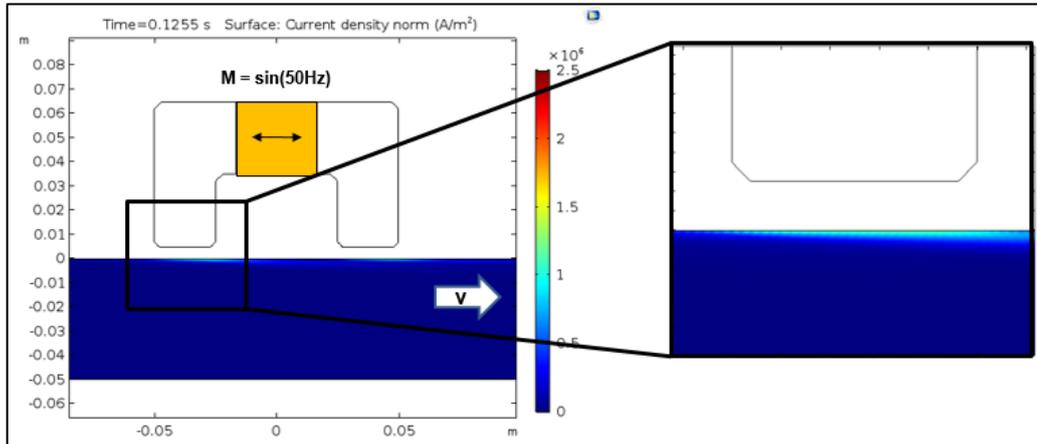


Abbildung 142: Eindringtiefe

6.6.12. Magnetisierungen für 2D Simulation der Bremskraft

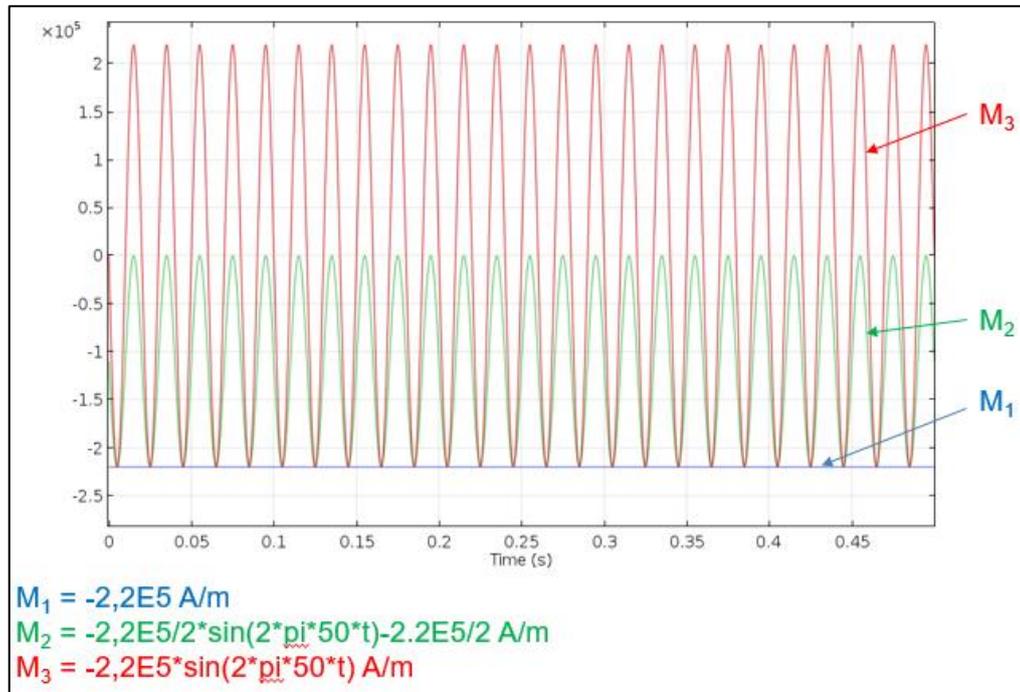


Abbildung 143: Magnetisierungen 2D Simulation der Bremskraft

6.6.13. Auswirkung des Skins-Effekts (Kupfer)

Stromdichte bei sinusförmiger Anregung ohne Bewegung:

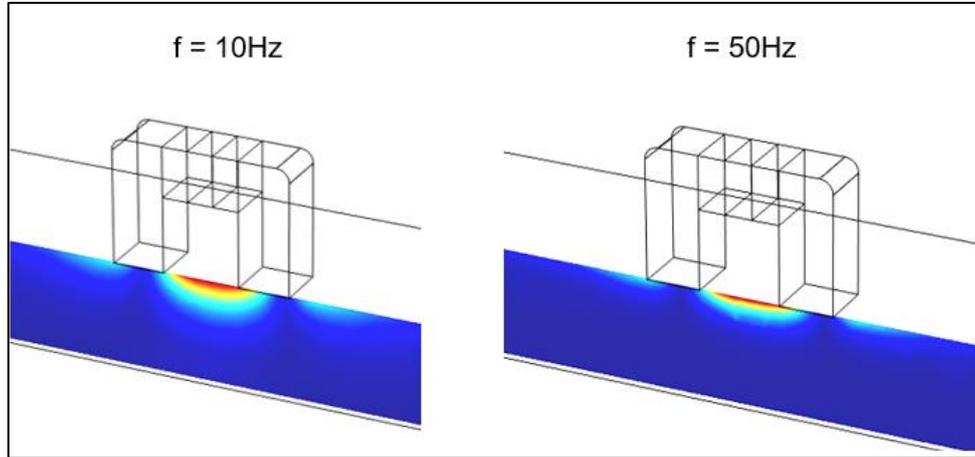


Abbildung 144: Stromdichte Kupfer

Je höher die Frequenz der Magnetisierung ist, umso geringer ist die Eindringtiefe der Wirbelströme in das Radmaterial.

6.6.14. 2D Simulation der Bremskraft (Kupfer) bei $v = 1\text{ m/s}$

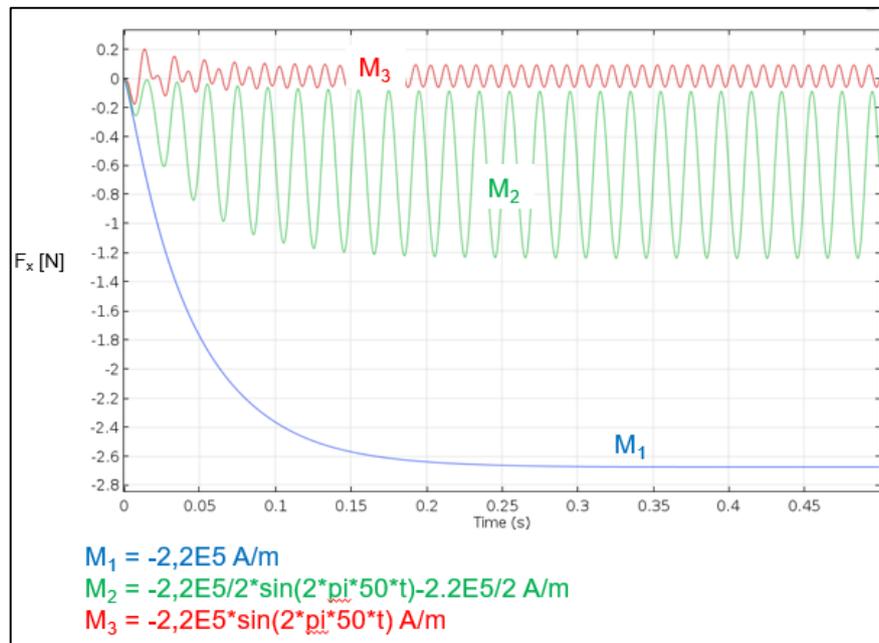


Abbildung 145: Bremskraft Kupfer

6.6.15. 2D Simulation der Bremskraft (Vergleich: Kupfer-Stahl)

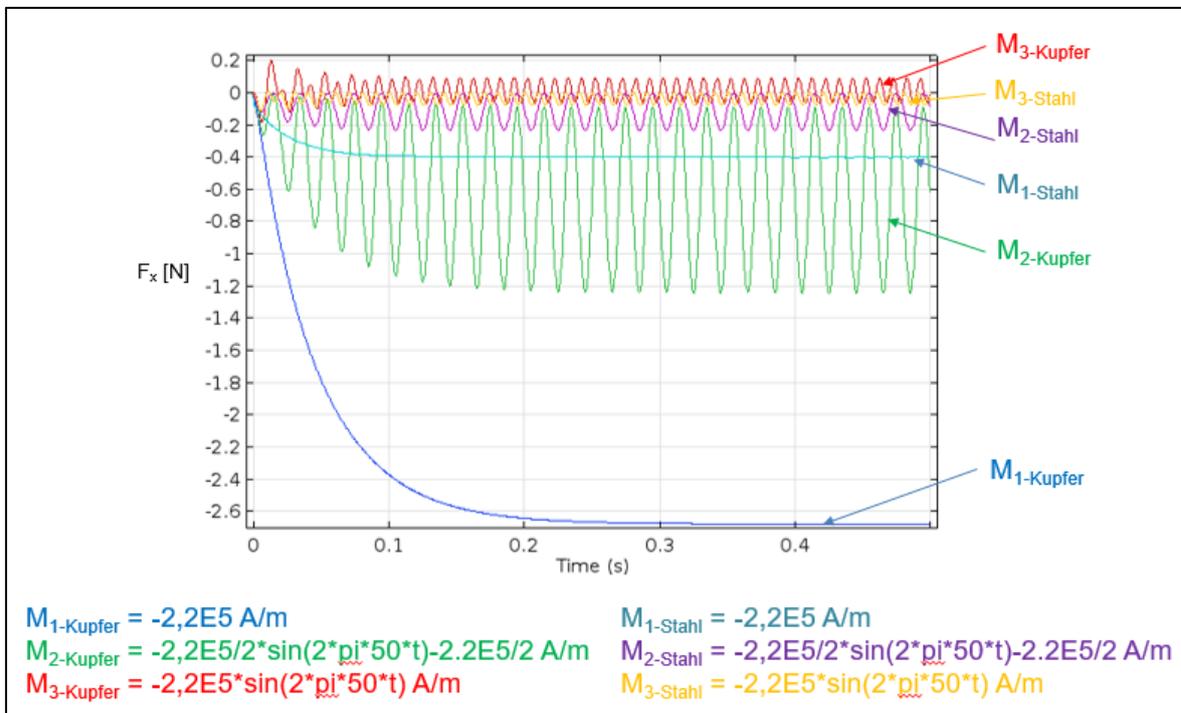


Abbildung 146: Vergleich Bremskraft Kupfer - Stahl

6.6.16. Erkenntnisse der 2D Simulationen

6.6.16.1. Erkenntnis Material:

Wie in der vorherigen Folie ersichtlich ist, sinkt die Bremskraft bei konstanter Magnetisierung (M_1) von $F_x = -2,67\text{N}$ bei Kupfer auf $F_x = -0,4\text{N}$ bei Stahl.

Das entspricht einem Rückgang auf 15% der Bremskraft.

6.6.16.2. Erkenntnis Frequenz:

Die Bremskraft ist bei konstantem Magnetfeld ($f = 0\text{Hz}$) deutlich größer als bei einem Wechselfeld mit 50Hz . Ein Grund dafür ist, dass sich die Verteilung der Wirbelströme unterhalb des Magneten ändert und somit die Wirbelströme nicht mehr vom Magnetfeld durchsetzt werden.

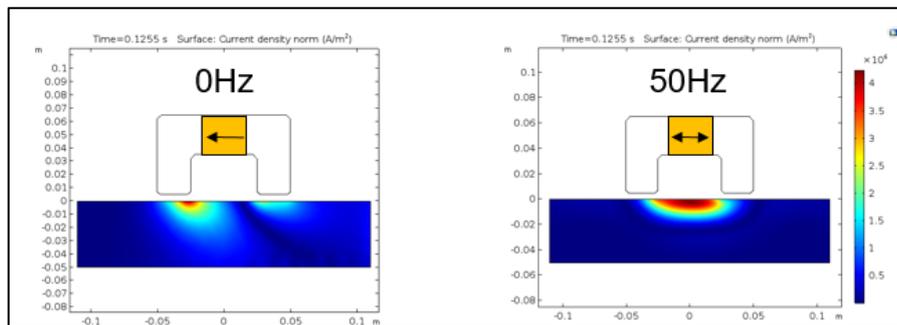


Abbildung 147: Vergleich Frequenzen

6.6.17. 2D Simulation der Wirbelströme – Moving Mesh

Durch die transiente 2D-Simulation mit Moving Mesh wird überprüft ob die vereinfachte Simulation mit Lorentz-Term beim implementierten Simulationsmodell korrekte Werte liefert.

Beim Simulationsmodell mit Lorentz Term wird dem Rad in jedem Zeitschritt ein Geschwindigkeitswert vorgegeben. Der Vorteil dieses Simulationsansatzes ist, dass die Vernetzung der Bauteile während der Simulation nicht geändert werden muss. Dadurch wird die Simulationszeit deutlich verkürzt.

Beim Simulationsmodell mit Moving Mesh wird hingegen die Position des Magneten relativ zum Rad mit der Simulationszeit verändert. Daher muss die Vernetzung bei jedem Zeitschritt angepasst werden. Das ist mit hohem Rechenaufwand verbunden.

Es ist gut ersichtlich das beide Simulationsansätze zu den gleichen Wirbelströmen führen. Somit wird für die weiteren Berechnungen das Simulationsmodell mit Lorentz Term verwendet.

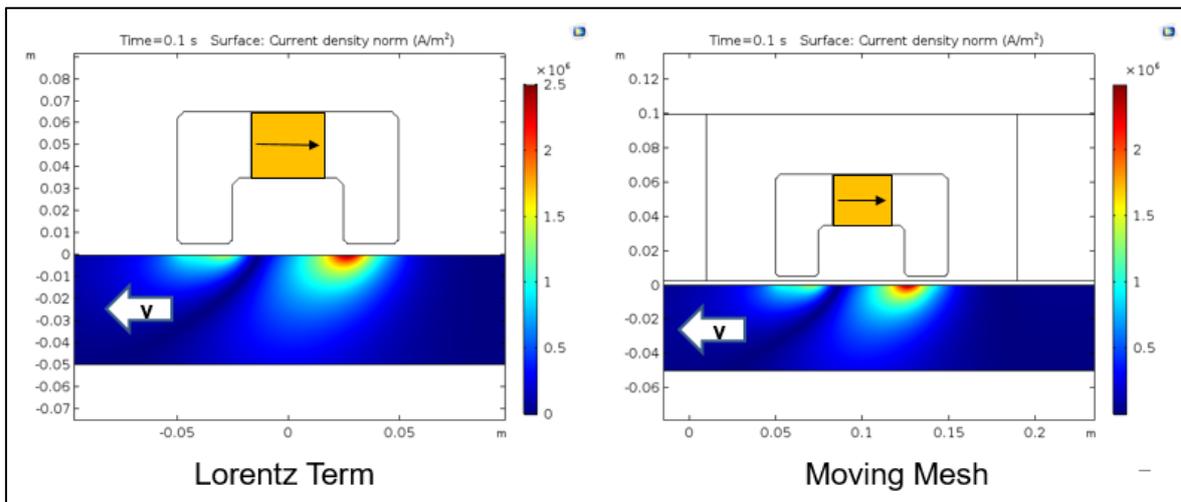


Abbildung 148: Vergleich Lorentz Term – Moving Mesh

6.6.18. 3D Simulation der Wirbelströme - Kupfer

Die Berechnung der Bremskräfte erfolgt anhand eines 3D-Simulations-modells. Als Radmaterial wird dabei zunächst Kupfer eingestellt. Später werden die ermittelten Bremskräfte für ein Rad aus Stahl (tatsächliches Radmaterial) zurückgerechnet. Der Grund dafür ist, dass die Eindringtiefe der Wirbelströme aufgrund der Materialeigenschaften von Stahl nur sehr gering ist und man daher ein sehr feines Netz benötigt um die Wirbelströme an der Oberfläche darzustellen. Dadurch würde der Rechenaufwand extrem ansteigen.

Für die Simulation werden die Geschwindigkeiten in x- und y-Richtung an 20 Zeitpunkten vorgegeben und es wird an jedem dieser Zeitpunkte eine Simulation durchgeführt.

Stromdichte bei Permanentmagnet und translatorischer Bewegung:

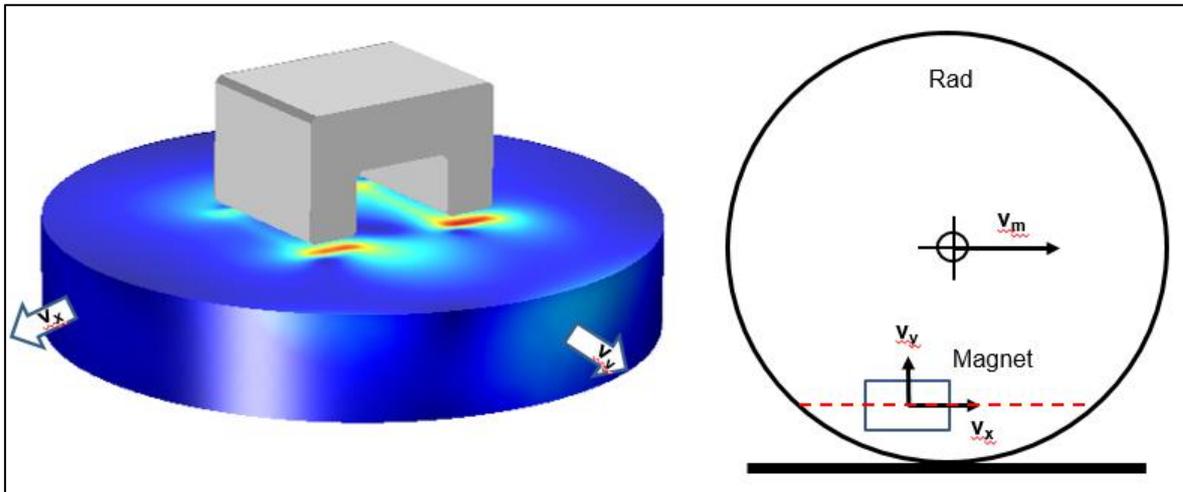


Abbildung 149: Stromdichte bei Permanentmagnet und translatorischer Bewegung

Im Magnet wird gleiche Magnetisierung wie schon zuvor in den 2D-Simulationen vorgegeben. Dadurch wird die Simulation der Spule des Elektromagneten eingespart.

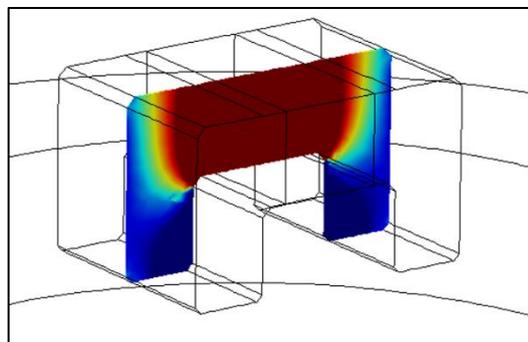


Abbildung 150: Magnetisierung

Da die Wirbelströme hauptsächlich in den oberflächennahen Materialschichten konzentriert sind, ist es wichtig dort ein feines Netz zu verwenden. Im restlichen Radmaterial kann das Netz gröber sein um die Rechenzeit zu verkürzen.

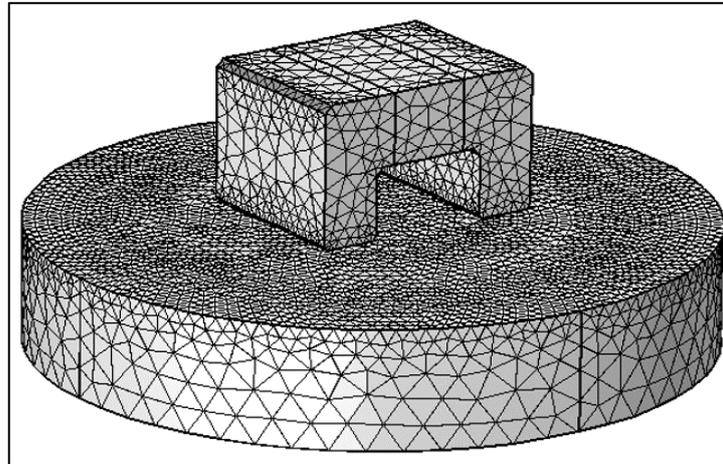


Abbildung 151: Erzeugtes Netz

Der zeitliche Verlauf der Geschwindigkeiten in x- und y-Richtung ist im folgenden Diagramm dargestellt. Dieser Verlauf gilt, wenn sich der Magnetmittelpunkt 6 cm oberhalb der Schiene befindet.

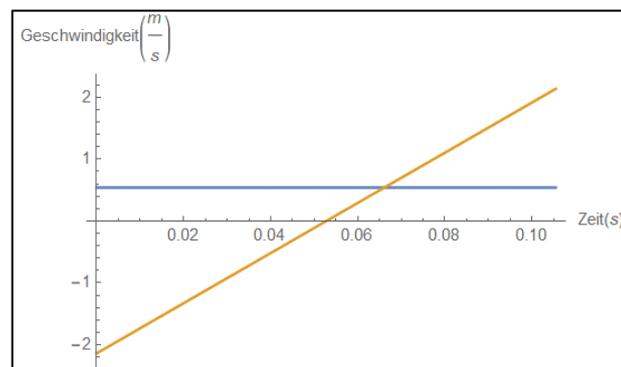


Abbildung 152: Zeitlicher Verlauf Geschwindigkeit

Der zeitliche Verlauf der Bremskräfte in x- und y-Richtung ist im folgenden Diagramm dargestellt. Mit Hilfe dieser Kraftverläufe wird anschließend das Bremsmoment berechnet.

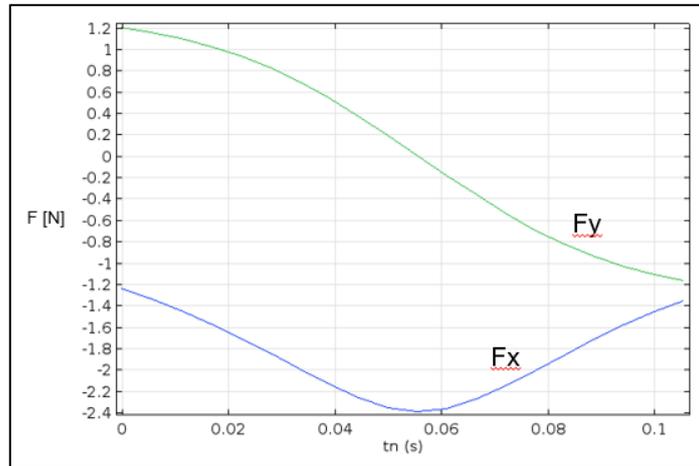


Abbildung 153: Zeitlicher Verlauf Bremskräfte

6.6.19. Berechnung des Bremsmoments mit Matlab

Die Berechnung der Bremsenergie für einen einzelnen Magneten erfolgt mit den oben angegebenen Werten welche auch zur Definition des Simulationsmodells verwendet wurden. Der Radradius (r_w) beträgt 0,5m, der Mittelpunkt des Magneten liegt 6cm über der Schienenoberkante und die Geschwindigkeit des Wagons beträgt 4,5m/s.

Der Wagon soll auf eine Geschwindigkeit von 0,5m/s abgebremst werden.

Aufgrund von simulationstechnischen Schwierigkeiten bei der 3D-Simulation von Wirbelströmen in Stahl wird bei der Simulation Kupfer als Radmaterial festgelegt und die berechneten Bremskraftwerte anschließend mit einem Skalierungsfaktor gewichtet umso die Werte für das Stahlrad zu erhalten.

```
%% Berechnung der Bremsenergie für Wirbelstrombremse
% Abmessungen
rw = 0.5;
hmag = 0.06;
vm = 4.5;
vmin = 0.5;
tn = 0:(0.1055/19):0.1055;
tn = tn';

% Import von fx und fy aus Excel-Datei durch Doppelklick (aus FEM)
fx = [-1.23473315258934;-1.33064769466388;-1.43795170376444;-1.55747607920
fy = [1.20763042920701;1.16335427983088;1.10735463546277;1.03684276032532;
fz = zeros(size(fx));
```

Die in der FEM-Simulation berechneten Bremskräfte in x- und y-Richtung (20 Punkte) werden in Matlab importiert.

Anschließend werden die Ortsvektoren vom Drehpunkt zu den Kraftangriffspunkten sowie die Geschwindigkeitsvektoren in den Punkten berechnet.

```
% Ortsvektor Momentenberechnung
rx = sqrt(rw^2-(rw-hmag)^2)-vm*tn;
ry = hmag*ones(20,1);
rz = zeros(20,1);

% Geschwindigkeitsvektor
vx = rw/vm*hmag*ones(20,1);
vy = -rw/vm*(sqrt(rw^2-(rw-hmag)^2)-vm*tn);
```

Das Bremsmoment ergibt sich aus dem Kreuzprodukt von Kraftvektor und Ortsvektor. Da die Bremskraft mit sinkender Geschwindigkeit immer kleiner wird, nimmt auch das Bremsmoment ab. Für eine erste Abschätzung des Bremsweges wurde angenommen,

dass der Maximalwert des Bremsmoments (bei $v_m=4,5\text{m/s}$) konstant bleibt. Somit ist der errechnete Bremsweg kürzer als der Tatsächliche.

```
% Bremsmomentberechnung
f = [fx';fy';fz']; % Kraftvektoren
r = [rx';ry';rz']; % Ortsvektoren
moment = cross(r,f); % Momentenvektor [Nm]
```

Berechnung des Bremsmoment:

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$$

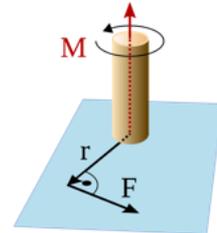


Abbildung 154: Berechnung Bremsmoment allgemein [3]

Bremsmoment:

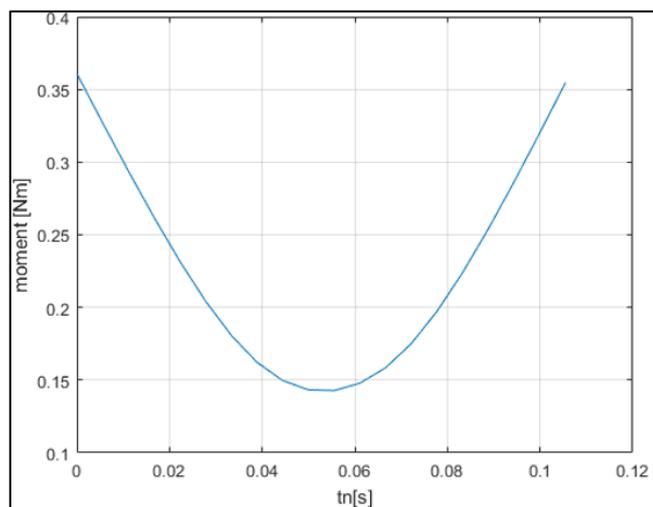


Abbildung 155: Bremsmoment

Die Bremsleistung eines Magneten ergibt sich aus dem Kreuzprodukt von Bremsmoment und Winkelgeschwindigkeit. Die Winkelgeschwindigkeit des rollenden Rades lässt sich mit Hilfe von Radgeometrie und Rollgeschwindigkeit ermitteln.

```
% Bremsleistungsberechnung
omega = [zeros(1,20);zeros(1,20);ones(1,20).*(vm/rw)];
leistung = dot(moment,omega); % Leistung[W]
```

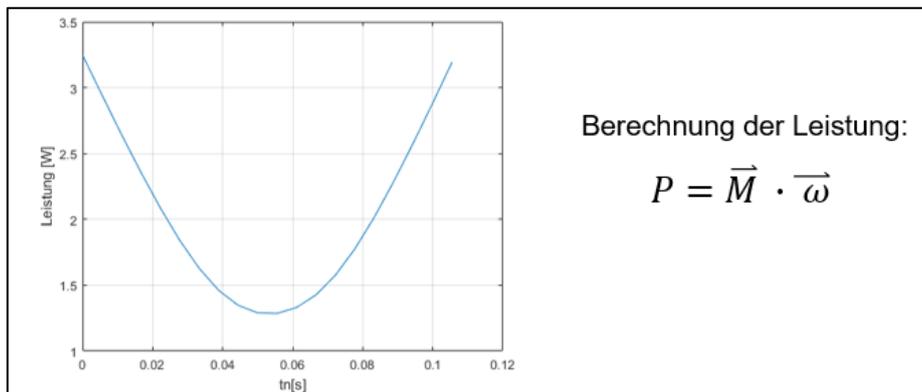


Abbildung 156: Bremsleistung

6.6.20. Berechnung der Bremsarbeit (Energieänderung) eines einzelnen Magneten:

$$W = \int_{t_0}^{t_{end}} P dt$$

Dieses Integral kann näherungsweise durch eine Summe ersetzt werden.

6.6.21. Berechnung der kinetischen Energie:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

```
% Energieberechnung
energie = sum(leistung.*tn(2)); % Bremsenergie pro Magnet und Durchfahrt [J]
```

Die Bremsenergie die bei der Durchfahrt des Rades, am Magneten vorbei, aufgebracht wird ergibt sich aus der Summe der Produkte von Bremsmoment und der Zeitdauer in dem das jeweilige Moment wirkt.

In unserem Fall beträgt die Energie die dem Wagon beim Passieren eines Magneten entzogen wird **0,2287 J**. Die kinetische Energie des Wagons kann mit $\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ berechnet werden. Um von 4,5m/s auf 0,5m/s (bei einer Masse von 100t) abzubremsen muss eine Energie von **1000 kJ** abgebaut werden.

```

%% Berechnung der Energie des Güterzuges
% 1 Wagon
mass = 100000; % Masse eines Wagons [kg]

% Kinetische Energie
energie_wagon_max = 0.5*mass*vm*vm;
energie_wagon_min = 0.5*mass*vmin*vmin;
energie_wagon = energie_wagon_max - energie_wagon_min;

```

```

%% Bremsweg
laenge_magnet = 0.1;
anzahl_magnete_gesamt = energie_wagon/energie;
anzahl_magnete_seite = anzahl_magnete_gesamt/2;
% 4 Magnete (4 Räder) pro Seite bremsen gleichzeitig
bremsweg = (anzahl_magnete_seite/8)*laenge_magnet; % [m]

```

Der berechnete Bremsweg beträgt somit 28 km. Befinden sich die Magnete sowohl auf der Radinnenseite und der Radaußenseite so reduziert sich der Bremsweg auf 14 km. Berücksichtigt man auch, dass die Bremskraft mit sinkender Geschwindigkeit immer geringer wird so kann festgehalten werden, dass ein Abbremsen von rollenden Güterwagons mit diesem Bremssystem nicht zielführend ist.

Alle vorherigen Werte beziehen sich auf ein Rad welches aus Kupfer gefertigt wäre. Da das Rad aber aus Stahl besteht beträgt die Bremskraft nur etwa 15% womit sich der theoretische **Bremsweg** auf **182 km** erhöht.

6.6.22. Mögliche Belastung durch elektromagnetische Strahlung (EMV)

Aufgrund des Betriebs mit Gleichstrom (Frequenz = 0Hz) um eine möglichst große Bremskraft zu erhalten und wegen des geringen Abstands des Magneten vom Radmaterial (Magnetfeld fast vollständig in Magnet bzw. Radmaterial) ist von keiner EMV-Belastung auszugehen.

6.6.23. Gründe für das geringe Bremsmoment

Geringe Differenzgeschwindigkeit zwischen Magnet und Rad aufgrund der Position des Magneten nah am Drehpunkt des Rades. Wirbelstrombremsen sind erst bei höheren Geschwindigkeiten sinnvoll einsetzbar.

- Nur kleine Elektromagnete sind einsetzbar da die Bauhöhe auf 12cm oberhalb der Schiene limitiert ist. Die Bremskraft ist abhängig von der Magnetfeldstärke.
- Radmaterial aus Stahl ist nur schlecht leitfähig und weist hohe Permeabilität auf => wenig Wirbelströme und geringe Eindringtiefe.
- Geringe Wirkdauer eines einzelnen Magneten. Das Rad passiert den Magneten in ca. 0,1s. Es werden sehr viele Magnete benötigt um eine entsprechende Bremsleistung zu erhalten => hohe Investitionskosten

6.6.24. Fazit

Aufgrund der geringen Bremsleistung sind Wirbelstrombremsen für den gegebenen Einsatzzweck nicht geeignet.

6.6.25. QUELLENVERZEICHNIS

Adriaan H. Zomeren, A. H., & Brouwer, W. H. (1994). Clinical Neuropsychology of Attention. Oxford University Press.

Åkerstedt, T. (1988). Sleepiness as a consequence of shift work. Sleep, 11(1), 17-34.

„Betriebsführungszentralen in Österreich“, Bachelorarbeit Zeitler S. 2 u. 3, 2011

Thales: Verband der Bahnindustrie; <http://www.bahnindustrie.at/b16m243/pressefotos>; abgerufen am 10.08.2016

http://www.psychologie.uniheidelberg.de/ae/allg/lehre/wct/w/w9_aufmerksamkeit/w910_einleitung.htm; abgerufen 11.08.2016

Wirbelstrombremse:

- [1] <https://de.wikipedia.org/wiki/Wirbelstrombremse>
- [2] <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Uzu-brake.JPG>
- [3] <https://de.wikipedia.org/wiki/Drehmoment#/media/File:Drehmoment.svg>

7. UMSETZUNGSZENARIOEN

7.1. Umsetzungsszenario adaptierter Retarder

Bei der adaptierten Variante wird ein Gleitzylinder herangezogen, bei welchem die Oberfläche mit einer Antidröhnpaste beschichtet wurde. Diese dient als Zwischenlage zwischen der Spurkranzspitze und der pilzförmigen Haube der Kapsel.

Um die adaptierten Retarder einzusetzen ist lediglich die Beschichtung des Gleitzylinders erforderlich. An allen anderen Einrichtungen des Retarders werden keine Veränderungen vorgenommen. Daher ist eine Implementierung dieser Variante durch einen simplen Tausch der Gleitzylinder realisierbar.

Aus betrieblicher Sicht ergeben sich keine Änderungen oder Anpassungen.

Für den Einsatz der adaptierten Retarder am Abrollberg gelten dieselben rechtlichen Rahmenbedingungen wie für die konventionellen Retarder. Daher ist auch aus rechtlicher Sicht kein Handlungsbedarf erkennbar. Hingegen ist es möglich, dass sich organisatorische Änderungen, entsprechend veränderter Instandhaltungsintervalle ergeben können.

Vor dem Einsatz der beschichteten Retarder im Bahnbetrieb kann eine Abnahme, bzw. eine Überprüfung der technischen Überwachung erfolgen um eventuelle Betriebsgefahren auszuschließen.

Zusammengefasst lässt sich folgendes sagen. Eine Umsetzung dieser Variante ist durch den simplen Tausch des Gleitzylinders möglich. Hierzu ist lediglich je nach Ausführung der Beschichtung eine Erneuerung ebendieser erforderlich. Diese Erneuerung könnte beispielsweise in die bestehenden Instandhaltungsintervalle eingeplant werden. Trotz allem ist bei der erstmaligen Verwendung der beschichteten Gleitzylinder eine Beiziehung der technischen Überwachung empfehlenswert um zu bestätigen, dass die Betriebssicherheit weiterhin gegeben ist.

7.2. Umsetzungszenario variabler Rollwiderstand

7.2.1. Definition der Schnittstellen

Die Schnittstellen zum Bestandsystem definieren sich zu einem durch die vorhandene Gleisinfrastruktur, den Rollmaterial welches die Bremsanlage passiert, so wie den wagenspezifischen Informationen die an einem Rangierbahnhof aufliegen.

Schnittstelle Gleiskörper:

Das Bremssystem muss zuverlässig mit den Bestandsanlagen an der Ablauframpe verbunden werden, dadurch ist es nötig Übergangsbereiche zu schaffen, da das eigentliche Bremssystem nicht an den konventionellen Schienen zu befestigen ist. Festlegen lassen sich diese Bereiche im Wesentlichen durch die:

- Schienen- bzw. Weichenverbindungen

Die Führungsschienen des Bremssystems müssen mit dem Schienenstrang verbunden werden, deshalb sind Übergangselemente zwischen den Bestandsgleisen und dem Bremssystem nötig.

- Schwellenverbindungen

Die Befestigung des Bremssystems soll auf Standardschwellen erfolgen, hierzu ist es nötig, Kenntnis über die verwendeten Schwellen zu besitzen (Montagepunkte, Statik und Geometrie)

- Schotterbettstärke

Es ist zu erwarten, dass zwischen dem Bestandgleis und dem Bremssystem ein Niveauunterschied auftreten wird, deshalb ist die Schotterbettstärke den Umständen anzupassen.

Schnittstelle Rollmaterial:

Im Bremsbereich werden die Güterwagen auf ihren Spurkränzen durch Führungsschienen geleitet (ähnlich der Gummigleisbremse). Folglich sind die geometrischen Abmessungen der Laufflächen, so wie die der Spurkränze für das gesamte Rollmaterial zu erheben, welches die Bremse befahren wird.

Schnittstelle Dateninput:

Damit die Bremsanlage ihre optimale Wirkung erzielen kann, sind Informationen bezüglich den Achslasten der abzubremsenden Güterwagen erforderlich. Des Weiteren wirken sich auch die Laufkreisdurchmesser der Wagenräder auf die Bremswirkung aus. Die Achslasten der Güterwagen werden i.d.R. durch eine Waage vor der Ablauframpe erhoben, diese Informationen müssen zur Bremsanlage übermittelt werden.

Die benötigten Daten umfassen im Wesentlichen:

Wagengewicht, Achszahl, Raddurchmesser, Anfangsgeschwindigkeit, Endgeschwindigkeit

7.2.2. Notwendige Infrastruktur

Stromversorgung

Das vorgestellte Bremssystem benötigt zum Betrieb der Hydraulikpumpen Strom, dementsprechend muss im Bereich der Druckgenerierung ein Dreiphasenwechselstromanschluss vorhanden sein. Des Weiteren ist eine Stromversorgung für die Mess-, Steuerungs- und Regeltechnik erforderlich.

Hydraulische Druckgenerierung und Druckversorgung der Bremsen

Das Bremssystem ist in Abschnitte aufgeteilt, welche den kürzesten Wagenabständen im Ablaufprozess entsprechen. Dementsprechend muss jede Sektion individuell mit Hydraulikflüssigkeit angesteuert werden. Grundsätzlich kann das auf drei verschiedene Arten erfolgen:

- Eine zentrale Pumpeneinheit versorgt alle Bremssektionen, die individuelle Druckregelung findet an der Bremssektion statt.
- Gruppen von Bremssektionen werden zusammengefasst (z.B. Gleisbezogen), die hydraulische Versorgung dieser Gruppen übernehmen mehrere Pumpeneinheiten (z.B. jedes Gleis besitzt eine eigene Pumpeneinheit). Die Druckregelung erfolgt ebenfalls an den Bremssektionen.

- Jede Bremssektion besitzt ihre eigene Pumpeneinheit, die Druckregelung kann direkt an dieser Einheit erfolgen.

Je nach Systemlayout ist eine Infrastruktur aus Pumpeneinheiten und Hydraulikleitungen am Ablaufberg herzustellen.

7.2.3. Beschreibung der geometrischen Abmessungen

Die Führungsschienen, so wie die Bremsselemente welche auf die Güterwagen wirken, befinden sich direkt im Gleis und ersetzen die konventionellen Vignolschienen. Es ist davon auszugehen, dass der Platzbedarf dieser Elemente in etwa dem doppelten einer Vignolschiene entspricht und deshalb problemlos an den Schwellen zu befestigen sind.

Die Abmessungen der Pumpeneinheiten und deren Einhausungen variieren je nach den erforderlichen hydraulischen Volumenströmen, diese sind wiederum abhängig von der Anzahl der Bremssektionen bzw. deren Längen. Die Hydraulikleitungen von den Pumpeneinheiten zu den Bremssektionen können entweder im Gleis, oder auch im Untergrund situiert werden. Die Durchmesser dieser Leitungen sind ebenfalls von der Durchflussmenge abhängig.

7.2.4. Beschreibung der notwendigen Komponenten

Grundsätzlich erfordert das vorgestellte Bremssystem folgende Komponenten:

- Hydraulikreservoir zur Speicherung der Hydraulikflüssigkeit
- Hydraulikpumpe inkl. Motor zur Druckerzeugung
- Zahlreiche Hydraulikkomponenten, wie z.B. Überdruckventile, Steuerventile, Wärmetauscher, Druckspeicher, Drucksensoren, etc.
- Hydraulikleitungen
- Bremsselemente aus flexiblen Elastomeren für die Erbringung der Bremswirkung
- Führungsschiene zur Spurführung des Wagenmaterials
- Übergangssektionen von den Vignolschienen zum Bremssystem
- Befestigungselemente zur Montage der Führungsschiene an den Bestandschwellen

- Elektrische Komponenten, wie z.B. Ansteuerung des Pumpenmotors, Regelkreise für die Steuerventile, Recheneinheit zur Kalkulation der Bremsdrücke, Überwachungssysteme, etc.
- Schnittstelle zu den Wagenspezifikationen
- Schnittstelle zur Gleiswagen
- Schnittstelle zum Betriebspersonal (HMI)

7.2.5. Abschätzung des Installationsaufwandes

Im Bereich der Bremsanlage sind die Vignolschienen durch die benötigten Führungsschienen zu ersetzen. An diesen Führungsschienen können die Bremsen im Vorhinein montiert werden, wodurch es zu kürzeren Sperrzeiten kommt. Ebenfalls sind im Gleisbereich die Hydraulikleitungen zu installieren, je nach Situierung (unterirdisch bzw. an den Schwellen) ist ein ungleicher Arbeitsaufwand erforderlich. In Abhängigkeit der Systemkonzeption wird eine unterschiedliche Anzahl von Pumpeneinheiten benötigt, die entweder in stationären Einhausungen, oder in Containern untergebracht sind.

7.2.6. Integration in bestehende Anlagen

Prinzipiell handelt es sich bei der Bremsung mit variablem Rollwiderstand um ein eigenständiges System, welches lediglich die Wagenspezifikation der Bestandanlage benötigt. Da jedoch Rangierbahnhöfe stark untereinander abweichen (Betrieb, Steuerung, Gefälle, Gleislängen, etc.), ist es nötig, ein solches System auf die vorhandenen Rahmenbedingungen abzustimmen.

7.2.7. Abschätzung des Verschleißes und der Lärm- bzw. Umweltverträglichkeit

Verschleiß:

Der höchste Verschleiß ist im Bereich der Bremsen zu erwarten, da diese durch die Güterwagenräder, so wie den Betriebsdruck von ca. 50 bar einer starken Belastung ausgesetzt sind. Des Weiteren sind diese Elemente elastisch auszuführen um den Anforderungen gerecht zu werden (aktive und inaktive Bremse). Gegenwärtig sind keine geeigneten Materialien bekannt, die diese Belastungen über einen längeren Zeitraum

standhalten. Folglich müssen geeignete Materialien entwickelt werden, welche den Anforderungen hinsichtlich des Verschleißes entsprechen.

Da die restliche Anlage aus Bauteilen besteht, die bereits seit Jahren im Maschinenbau Verwendung finden, sind hier keine übermäßigen Verschleißerscheinungen zu erwarten.

Lärm

Im Bereich der Bremsabschnitte werden die Lärmemission geringer ausfallen, als jene Lärmemissionen die durch den konventionellen Rad-Schienenkontakt entstehen, denn durch die elastischen Bremsselemente kommt es zu einer Schwingungsdämpfung der Wagenräder und der Gleisanlage. Eine solche Reduktion konnte bereits im Experiment subjektiv festgestellt werden.

Im Bereich der Hydraulikpumpen ist von einem erhöhten auszugehen, die sich jedoch relativ einfach mit Lärmschutz-Einhausungen beherrschen lassen.

Umweltverträglichkeit

Je nach verwendeter Hydraulikflüssigkeit ist bei Unfällen (z.B. Entgleisung und Beschädigung des Hydrauliksystems) mit unterschiedlich schweren Umweltbelastungen zu rechnen. Dementsprechend sind Hydraulikflüssigkeiten zu wählen, die geringe Umweltschäden verursachen.

8. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Demonstrator Variabler Rollwiderstand.....	14
Abbildung 2: Gegenüberstellung der Achslasten zu den Raddurchmessern, ab welchen Druck es zur Anhebung der Güterwagen kommt.	15
Abbildung 3: Demonstrator Einhausung	16
Abbildung 4: Beschichtete Haube einer Retarder kapsel.....	16
Abbildung 5: Messaufbau im Audiostudio	16
Abbildung 6: Übersicht Abrollberg (A - Einfahrgruppe, B – Abrollberg, C – Verteilzone, D – Richtungsgleise).....	19
Abbildung 7: Ausschnitt eines Radsatzes	20
Abbildung 8: Ausnutzung von Synergien im Einzelwagenverkehr	21
Abbildung 9: Schematische Darstellung eines Verschiebebahnhofes	22
Abbildung 10: Aufbau Abrollberg	23
Abbildung 11: Neigungsverhältnisse Abrollberg	24
Abbildung 12: Blockschema Verschiebebahnhof Limmattal	27
Abbildung 13: Büssingleisbremse mit Bestandteilbeschreibung	29
Abbildung 14: Balkengleisbremse Wien Zentralverschiebebahnhof	31
Abbildung 15: Gesamtübersicht Innovationsprozess	40
Abbildung 16: Skizze zu Intelligenter Stupser	40
Abbildung 17: Tafeln die zur Ideenentwicklung verwendet wurden	41
Abbildung 18: Beispiel für eine Anwendung der Methode Imagery Modeling.....	41
Abbildung 19: Flipchart mit gesammelten Ideen	42
Abbildung 20: Prinzipskizze energieumwandelnde Schiene	43
Abbildung 21: Prinzipskizze federnde Elemente	45
Abbildung 22: Prinzipskizze Wasserbremse	46
Abbildung 23: Wirbelstrombremse	48
Abbildung 24: Prinzipskizze anhebbarer Bremshügel.....	49
Abbildung 25: Skizze Mobiler Prellbock	51
Abbildung 26: Skizze Trägheitsmodul	52
Abbildung 27: Skizze Vakuumbremse	53

Abbildung 28: Prinzipskizze intelligenter Stupser	54
Abbildung 29: Prinzipskizze Brems Schuh 4.0	55
Abbildung 30: Einhaxsystem	56
Abbildung 31: Prinzipskizze Prellbock mit langem Bremsweg	57
Abbildung 32: Skizze Magnetorheologischer Retarder	59
Abbildung 33: Pufferbremse mit Seilzug Rotationsprinzip	60
Abbildung 34	61
Abbildung 35: Bremswagen mit Flüssigkeitszylinder	62
Abbildung 36: Bewertungsmatrix	65
Abbildung 37: Übersicht Bewertung der Varianten	66
Abbildung 38: Bestbewertete Varianten	67
Abbildung 39: Bewertung der Varianten nach Kriterien	68
Abbildung 40: Bewertung der Varianten nach Kriterien in %	69
Abbildung 41: Geometrische Zusammenhänge des Rollwiderstandes [1, S. B15]	72
Abbildung 42: Bremse inaktiv (eigene Darstellung)	75
Abbildung 43: Bremse aktiv (eigene Darstellung)	75
Abbildung 44: Modelle des Rollwiderstandes [2]	78
Abbildung 45: Modellwagen	80
Abbildung 46: Beladung des Modellwagens während den Versuchsdurchgängen	80
Abbildung 47: Herstellung der Bremse	81
Abbildung 48: Abrollversuche bei 4 bar Schlauchdruck (Rad wird angehoben)	83
Abbildung 49: Wagen auf schiefer Ebene	83
Abbildung 50: Messung der Rampenneigung mittels Messschieber	84
Abbildung 51: Ermittlung des Rollwiderstandskoeffizienten [2]	84
Abbildung 52: Ermittlung des Rollwiderstandskoeffizienten anhand der schiefen Ebene	86
Abbildung 53: Versuchsaufbau Experiment 2	88
Abbildung 54: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus	91
Abbildung 55: Aufgezeichnete Beschleunigung nach Zeit	91
Abbildung 56: Erstes Integral der Beschleunigung nach Zeit	92
Abbildung 57: Zweites Integral der Beschleunigung nach Zeit	92
Abbildung 58: Bremsabschnitt an der Ablauframpe	94

Abbildung 59: Druckausgleichsbehälter mit Ventil zur Bremsdrucksteuerung, montiert an der Ablauftrampe	94
Abbildung 60: Bremsschlitten an der Ablauftrampe	95
Abbildung 61: Rad-Schlauch-Schienenkontakt am Bremssystem	95
Abbildung 62: Aufzeichnung der Beschleunigung des Wagens mittels der APP Physics Toolbox Suite	96
Abbildung 63: Erbrachte Bremsenergie der Abrollversuche	98
Abbildung 64: Verschleißerscheinungen am Flachschauch.....	103
Abbildung 65: Projektion des Druckes auf das Wagenrad (eigene Darstellung).....	105
Abbildung 66: Gegenüberstellung der Achslasten zu den Raddurchmessern, ab welchem Druck die Radsätze angehoben werden	107
Abbildung 67: Hydraulische Ansteuerung des Bremssystems (eigene Darstellung)	109
Abbildung 68: Funktion eines dielektrischen Elastomers[2].....	114
Abbildung 69: Funktionsweise eines magnetorheologischen Plastomers (MRP).[4]	115
Abbildung 70: Radsatz im Bremsabschnitt, keine Bremsung.....	116
Abbildung 71: Radsatz im Bremsabschnitt, DE bzw. MRE bremsst	117
Abbildung 72: Friction drive einer Achterbahn[1]	121
Abbildung 73: Das Schwert einer Achterbahngarnitur[2]	122
Abbildung 74: Fiction drive an einem Radsatz	123
Abbildung 75: Rad-Schienen Kontakt	123
Abbildung 76: Radsatzschubwagen der Firma Vollert	126
Abbildung 77: Funktion des Radsatzschubwagen	127
Abbildung 78: Blockschema Verschiebebahnhof Limmattal	128
Abbildung 79: Möglicher Anwendungsbereich am Beispiel Verschiebebahnhof Grazf.....	129
Abbildung 80: Abrollberg Wien Zentralverschiebebahnhof mit Blick auf die Weichen 200 und 201	133
Abbildung 81: Dowty Retarder als quasikontinuierliches Bremssystem.....	134
Abbildung 82: Demonstrator mit Gehäuse und Gleitzylinder	136
Abbildung 83: Retardergehäuse mit den wesentlichen Bauteilen	137
Abbildung 84: Zusammenhang zwischen Schiene und Retarder.....	138
Abbildung 85: Kapsel einer Kolbenkleinbremse	139
Abbildung 86: Einzelbauteile Gleitzylinder	140

Abbildung 87: Kolbendurchlässe	141
Abbildung 88: Strömungsverhalten über der Ansprechgeschwindigkeit	143
Abbildung 89: Strömungsverhalten gleich oder unter der Ansprechgeschwindigkeit.....	144
Abbildung 90: Strömungsverhalten bei der Rückstellung	145
Abbildung 91: Situierung der Retarder am Zentralverschiebebahnhof Wien	148
Abbildung 92: Abnutzung an der Pilzhaube	150
Abbildung 93: Schallausbreitung.....	155
Abbildung 94: Abrollberg Zentralverschiebebahnhof Wien 500m / 100m Radius	156
Abbildung 95: Messpunkt am Wiener Zentralverschiebebahnhof	158
Abbildung 96: Sample MIC A / MIC B / MIC C	161
Abbildung 97: Verlauf des Spectral Centroids (Mikrofon A rot, Mikrofon B orange, Mikrofon C lila	162
Abbildung 98: Zusammenschnitt Mikrofon B - Klangfarbe	163
Abbildung 99: Spektrogramm und RMS-Kurve des Richtrohrmikrofons	165
Abbildung 100: Spektrogramm und RMS-Kurve des Richtrohrmikrofons	166
Abbildung 101: Winkelveränderung eines Retardergehäuses	167
Abbildung 102: Elastomere Haube - Experimenteller Versuch	168
Abbildung 103: Dowty-Retardergehäuse mit Vierkantdichtung.....	170
Abbildung 104: Schematische Darstellung des Verhaltens unter Einfluss eines Magnetfeldes	172
Abbildung 105: Magnetorheologischer Dämpfer	173
Abbildung 106: Einrichtung zur Spurkransschmierung	174
Abbildung 107: Prinzipaufbau Spurkransschmierung	175
Abbildung 108: UIC - 49E1 Demonstratorschienenstück.....	177
Abbildung 109: Zusammengebauter Demonstrator	178
Abbildung 110: Nichtmaßstabsgetreue Skizze der Bauteile	179
Abbildung 111: Demonstrator mit dem Gehäuse	180
Abbildung 112: Nichtmaßstäbliche Skizze der Dämmschicht	181
Abbildung 113: Beschichtete Haube einer Retarderkapsel.....	182
Abbildung 114: Messaufbau im Audiostudio	184
Abbildung 115: Spektrogramm der Messreihen	187

Abbildung 116: Darstellung der medianen Maxima von 4 gleitend applizierten Schlägen..	188
Abbildung 117: Vergleich der Maximalamplituden zweier Retarder kapseln	190
Abbildung 118: Amplitudenverlauf bei den Gehäusevarianten	191
Abbildung 119: Vergleich der Amplituden bei der Entkopplung	192
Abbildung 120: Vergleich der Amplituden - Nicht beschichtet und beschichtet	193
Abbildung 121: Aufnahmen der leeren Hülse vor der Beschichtung	195
Abbildung 122: Retarderhaube nach 200 Schlägen mit einfacher Beschichtung	196
Abbildung 123: Retarderhaube nach 50 Schlägen mit dreifacher Beschichtung	197
Abbildung 124: Wirbelstromsintern	201
Abbildung 125: Experiment – Verwendetes Equipment	202
Abbildung 126: Bauformen Wirbelstrombremsen	209
Abbildung 127: Grundschemata	209
Abbildung 128: Bremskurve	210
Abbildung 129: Bremskurve überlagert	210
Abbildung 130: Vektordarstellung	211
Abbildung 131: Geschwindigkeitsverteilung	212
Abbildung 132: Magnetgeometrie und Magnetisierung	213
Abbildung 133: Grunddaten	214
Abbildung 134: Magnetisierung	214
Abbildung 135: Integration des Maxwell-Stress-Tensors	215
Abbildung 136: 6.6.8. 2D Simulation mit Lorentz-Term	216
Abbildung 137: 2D Simulation Magnetisierung	216
Abbildung 138: 2D Simulation Wirbelströme	217
Abbildung 139: Vergleich Kupfer - Stahl	217
Abbildung 140: Vergleich der induzierten Wirbelströme	218
Abbildung 141: Anregung mit einer Frequenz von 50Hz	218
Abbildung 142: Eindringtiefe	219
Abbildung 143: Magnetisierungen 2D Simulation der Bremskraft	219
Abbildung 144: Stromdichte Kupfer	220
Abbildung 145: Bremskraft Kupfer	220
Abbildung 146: Vergleich Bremskraft Kupfer - Stahl	221

Abbildung 147: Vergleich Frequenzen	222
Abbildung 148: Vergleich Lorentz Term – Moving Mesh.....	223
Abbildung 149: Stromdichte bei Permanentmagnet und translatorischer Bewegung	224
Abbildung 150: Magnetisierung.....	224
Abbildung 151: Erzeugtes Netz.....	225
Abbildung 152: Zeitlicher Verlauf Geschwindigkeit	225
Abbildung 153: Zeitlicher Verlauf Bremskräfte	226
Abbildung 154: Berechnung Bremsmoment allgemein [3]	228
Abbildung 155: Bremsmoment.....	228
Abbildung 156: Bremsleistung	229

9. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Inspektionsliste aus der Wartungsanleitung für die Dowty Retarderanlage	151
Tabelle 2: Wagenliste - Messung 12.07.2017	160
Tabelle 3: Messreihen	186
Tabelle 4: Mediane der Amplituden von gleitend applizierten Schlägen	188
Tabelle 5: Amplituden zweier Retarder kapseln	189
Tabelle 6: Amplituden zweier Retarder kapseln	192