

# SYSTEME ZUM ABFANGEN VON ENTROLLTEN SCHIENENFAHZEUGEN

Im Projekt NotHalt wurden fahrdynamische Einflussfaktoren zur Initiierung des Entrollvorgangs erhoben und zwei neue infrastrukturseitige Einrichtungen zur Aufhaltung von entrollten Wagen konzipiert. Diese wurden mit aktuell eingesetzten Maßnahmen im ÖBB-Netz in einer Kosten-Nutzen-Analyse verglichen.

In einer fahrdynamischen Modellierung wurden als Einwirkungen, die ein Entrollen verursachen können, Wind, Fahrzeuganprall und die Längsneigung des Gleises identifiziert. Die Simulation der Geschwindigkeitszunahme während dem Entrollvorgang zeigte, dass Aufhaltungsmaßnahmen möglichst nahe an den gefährdeten Bereichen situiert sein müssen.

Da trotz hohen Sicherheitsniveaus vereinzelt Entrollvorgänge auftreten, wurde festgelegt, dass die zu untersuchenden und zu entwickelnden infrastrukturseitigen Maßnahmen zur Aufhaltung entrollter Wagen unabhängig von den bisherigen Sicherungsmaßnahmen funktionieren müssen. Das bedeutet, dass das Wirkprinzip entweder „aktiv“ – die Maßnahme ist permanent aktiv, außer sie wird bei der Stellung einer Fahrstraße deaktiviert – oder „passiv“ – die Einrichtung ist immer aktiv, nicht steuerbar und im normalen Betrieb überfahrbar – sein muss. Das hat zur Folge, dass kein System zur Detektion von entrollten Wagen angeordnet werden muss. Zwei neue Ideen wurden zu Konzepten weiterentwickelt – ein klappbarer Hemmschuh und fixe überfahrbare elastische Elemente. Ersteres wurde als machbar eingeschätzt, während die Machbarkeit von letzterem nicht rein in der Theorie bewiesen werden konnte. In einem Systemvergleich mittels Kosten-Nutzen-Analyse stellte sich heraus, dass eine generelle Aussage über eine Maßnahme mit dem besten Kosten-Nutzen-Verhältnis nicht möglich ist, da eine starke Abhängigkeit zu den Randbedingungen der Betriebsstelle – vorwiegend Gleisanzahl, Gleislänge und Gleiskonfiguration – besteht.

## Facts:

- Laufzeit: 09/2018-11/2019

- Forschungskonsortium:

Technische Universität Wien –  
Institut für Verkehrswissenschaften –  
Forschungsbereich für Eisenbahnwesen

Thales Austria GmbH

Zierl Engineering Services GmbH



ABB 1. Eine der bisherigen Absicherungsmethoden mittels Hemmschuh

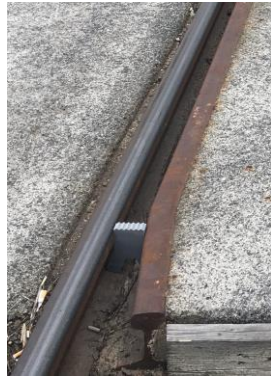


ABB 2. neu entwickeltes Konzept – Aufhaltung mittels fixen überfahrbaren elastischen Elementen

## Kurzzusammenfassung

### Problem

Die ÖBB sind zum sicheren Eisenbahnbetrieb verpflichtet. Trotz aller derzeit getroffenen Vorkehrungen und Sicherheitsmaßnahmen kann es vorkommen, dass einzelne Fahrzeuge oder Fahrzeuggruppen entrollen und so eine Gefährdung darstellen.

### Gewählte Methodik

Mit Hilfe von internationaler Literatur und Expertenwissen wurden die fahrdynamischen Zusammenhänge zur Initiierung des Entrollens dargestellt. Auf Basis von am Markt verfügbaren Produkten, Patenten und Herstellerkontakt wurden einerseits bisher im Eisenbahnbetrieb verwendete Elemente und andererseits neue Ideen auf die Einsatzfähigkeit zur Aufhaltung von entrollten Wagen geprüft, untereinander verglichen und bewertet.

### Ergebnisse

Hauptverantwortlich für die Initiierung von Entrollen sind Wind, Anprall und die Längsneigung des Gleises. Die Geschwindigkeitszunahme während dem Entrollvorgang ist so hoch, dass eine Maßnahme zur schadensarmen Aufhaltung möglichst nahe nach dem Entrollpunkt situiert sein muss. Ein Bewertungsverfahren zur Auswahl einer Maßnahme wurde im Rahmen des Projekts erarbeitet, in dem ihre Abhängigkeit zu den Gegebenheiten der Betriebsstellen berücksichtigt wird.

### Schlussfolgerungen

Es zeigte sich, dass die teilweise auftretenden Schäden bei Vorfällen mit entrollten Wagen die Kosten für eine Einrichtung zur Aufhaltung rechtfertigen. Als nächste Schritte werden die praktische Erprobung der konzeptionierten Systeme und die Prüfung von Betriebsstellen auf die Anordnung von Maßnahmen empfohlen.

### English Abstract

An investigation of the driving dynamics of stationary vehicles showed that the main forcing factors to initiate the roll off process are wind, vehicle impact and the longitudinal slope of the track. In addition to the existing measures to stop rolled off vehicles, two new measures were developed. A cost-benefit analysis pointed out that a general statement of the best measure is not possible due to dependencies on the boundary conditions of each station – mainly track length, track configuration and track quantity.

## Impressum:

### Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

DI Dr. Johann Horvatits  
Abt. IV/ST 2 Technik und  
Verkehrssicherheit  
[johann.horvatits@bmvit.gv.at](mailto:johann.horvatits@bmvit.gv.at)

DI (FH) Andreas Blust  
Abt. III/4 Mobilitäts- und  
Verkehrstechnologien  
[andreas.blust@bmvit.gv.at](mailto:andreas.blust@bmvit.gv.at)  
[www.bmvit.gv.at](http://www.bmvit.gv.at)

### ÖBB-Infrastruktur AG

Dr. Thomas Petraschek, UE  
Stab Unternehmensentwicklung  
Leiter Forschung & Entwicklung  
[thomas.petraschek@oebb.at](mailto:thomas.petraschek@oebb.at)

DI Florian Saliger, UE  
Stab Unternehmensentwicklung  
Projektleitung  
[florian.saliger@oebb.at](mailto:florian.saliger@oebb.at)

Peter Traussenegger, BE  
Geschäftsbereich Betrieb  
Anforderungen und Innovation  
[peter.traussenegger@oebb.at](mailto:peter.traussenegger@oebb.at)  
[www.oebb.at](http://www.oebb.at)

### Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH

DI Dr. Christian Pecharda  
Programmleitung Mobilität  
Sensengasse 1, 1090 Wien  
[christian.pecharda@ffg.at](mailto:christian.pecharda@ffg.at)  
[www.ffg.at](http://www.ffg.at)

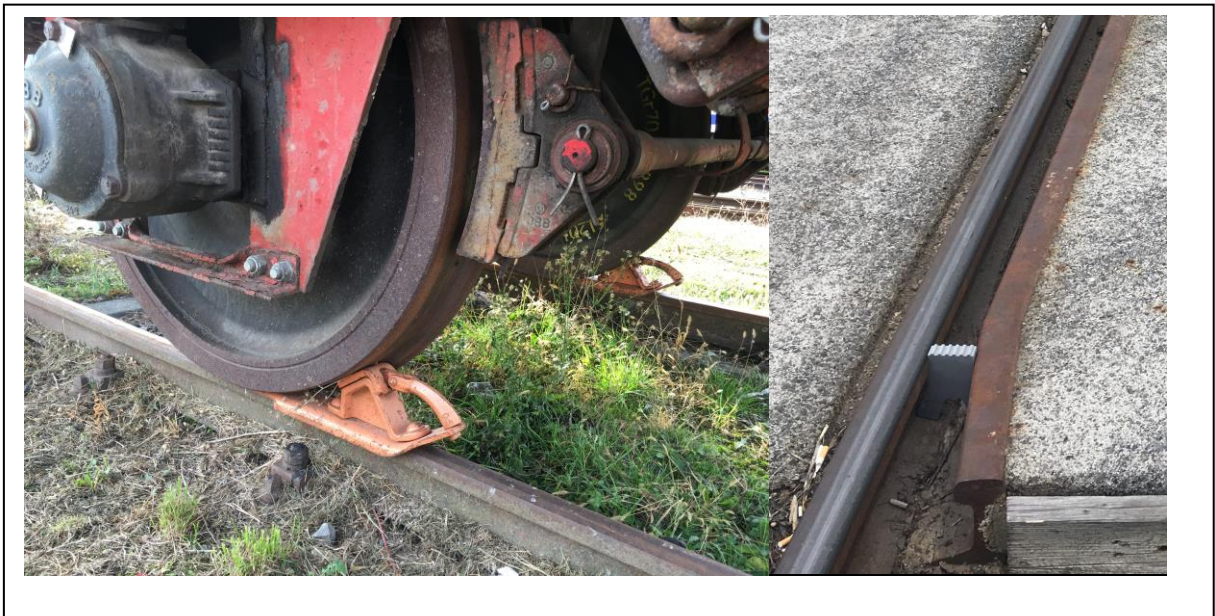
November, 2019

# Systeme zum Abfangen von entrollten Schienenfahrzeugen

## NotHalt

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2017  
(VIF2017)

November 2019



## Impressum:

### Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie  
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien  
Radetzkystraße 2  
A – 1030 Wien

 Bundesministerium  
Verkehr, Innovation  
und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG  
Nordbahnstraße 50  
A - 1020 Wien

 **ÖBB**  
INFRA

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs  
Aktiengesellschaft  
Rotenturmstraße 5-9  
A - 1010 Wien

 **ASFiNAG**

### Für den Inhalt verantwortlich:

Technische Universität Wien  
Institut für Verkehrswissenschaften  
Karlsplatz 13/230-2  
A-1040 Wien

 **IEW**

THALES Austria GmbH  
Handelskai 92  
1200 Wien

 **THALES**

Zierl Engineering Services GmbH  
Ingenieurbüro (Beratende Ingenieure)  
Steigenteschgasse 154/4/1  
1220 Wien

### Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH  
Thematische Programme  
Sensengasse 1  
A – 1090 Wien

 **FFG**  
Forschung wirkt.

# **Systeme zum Abfangen entrollter Schienenfahrzeuge NotHalt**

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung  
(VIF2017)

**AutorInnen:**

**Dipl.-Ing. Michael Ostermann**

**Dipl.-Ing. Benjamin Schmutz**

**Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Ostermann**

**Dipl.-Ing. Walter Fuß**

**Ing. August Zierl**

**Ansprechpartner ÖBB:**

**Dipl.-Ing. Florian Saliger**

**Peter Traussenegger**

**Auftraggeber:**

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

**Auftragnehmer:**

Technische Universität Wien, Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich für  
Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen



## INHALTSVERZEICHNIS

<b>0. EXECUTIVE SUMMARY .....</b>	<b>6</b>
0.1. DEUTSCH.....	6
0.2. ENGLISCH.....	7
<b>1. EINLEITUNG .....</b>	<b>9</b>
<b>2. GRUNDLAGENRECHERCHE .....</b>	<b>10</b>
2.1. DETEKTION .....	10
2.2. AUFHALTUNG .....	17
<b>3. ANALYSE BISHERIGER VORFÄLLE .....</b>	<b>28</b>
3.1. ALLGEMEINES .....	28
3.2. KONKRETE BEISPIELE .....	33
3.3. MELDEKETTE .....	38
<b>4. FAHRDYNAMISCHE MODELLIERUNG.....</b>	<b>42</b>
4.1. WIE IST ENTROLLEN MÖGLICH? .....	42
4.2. GESCHWINDIGKEITZUNAHME ENTROLLTER WAGEN.....	84
<b>5. KRITERIENKATALOG FÜR RISIKOBEWERTUNG IM ÖEBB-NETZ.....</b>	<b>95</b>
5.1. NETZANALYSE.....	95
5.2. MÖGLICHE KRITERIEN FÜR EINE RISIKOBEWERTUNG.....	102
5.3. KATEGORISIERUNG.....	106
5.4. ZUSAMMENFASSUNG .....	109
<b>6. MASSNAHMEN ZUR DETEKTION VON ENTROLLTEN SCHIENENFAHRZEUGEN .....</b>	<b>111</b>
6.1. IDEENSAMMLUNG .....	111
6.2. BEWERTUNGSMATRIX ZUR VORSELEKTION.....	113
6.3. ENDERGEBNIS DER BEWERTUNG.....	115
<b>7. MASSNAHMEN ZUR AUFHALTUNG VON ENTROLLTEN SCHIENENFAHRZEUGEN .....</b>	<b>117</b>
7.1. IDEENSAMMLUNG .....	117
7.2. BEWERTUNGSMATRIX ZUR VORSELEKTION.....	123
7.3. ENDERGEBNIS DER BEWERTUNG.....	130
7.4. MACHBARKEITSTUDIE .....	131
7.5. KOSTEN-NUTZEN-ANALYSE.....	142

7.6. ZUSAMMENFASSUNG .....	152
<b>8. ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>153</b>
<b>9. LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>156</b>
<b>ANHANG A BREMSKRAFT THEORIE .....</b>	<b>160</b>
<b>ANHANG B EINGANGSPARAMETER FÜR DEN ÄUßEREN LUFTWIDERSTAND .....</b>	<b>167</b>

## 0. EXECUTIVE SUMMARY

### 0.1. Deutsch

Trotz aller derzeit getroffenen Sicherheitsmaßnahmen und Vorkehrungen im Eisenbahnbetrieb, kann es passieren, dass einzelne Fahrzeuge oder Fahrzeuggruppen bei Verschubvorgängen unbeabsichtigt entrollen und eine große Gefährdung darstellen. Ebenso können auch abgestellte Wagen oder Wagengruppen entrollen. Der Fokus des gegenständlichen Projekts liegt einerseits auf der Recherche von bestehenden infrastrukturseitigen Maßnahmen zur Aufhaltung und Detektion von entrollten Wagen und andererseits auf der Konzeption von neuen infrastrukturseitigen Einrichtungen, die für diesen Zweck potentiell anwendbar erscheinen. Das Ziel ist eine möglichst schadensarme Aufhaltung mit geringem Gefährdungspotential für den umliegenden Eisenbahnbetrieb zu erreichen.

In einer fahrdynamischen Modellierung werden Grenzfälle untersucht, unter welchen Bedingungen Entrollen stattfinden kann. Dabei stellt sich heraus, dass Wind, Anprall und die Längsneigung des Gleises verantwortlich sein können. Der Widerstand gegen Entrollen ergibt sich aus dem Anfahrwiderstand und dem Bremswiderstand (erzielt durch Absicherungsmaßnahmen, wie z.B. Handbremse oder Hemmschuh). Beim Absichern mit Handbremse ist der Bremswiderstand von der aufgebrachten Anziehungskraft abhängig. Anprall stellt aufgrund der hohen Massen eine große Gefahr für eine unbeabsichtigte Bewegung des abgestellten Wagens dar. Speziell bei Absicherung mit Hemmschuhen kann Anprall das Übersteigen des Hemmschuhs verursachen und so bei dem normalerweise ungebremsten Wagen zu Entrollen führen. Bei ungebremsten Wagen reicht bereits eine sehr geringe Längsneigung von unter 3 ‰ oder eine Windgeschwindigkeit von unter 25 km/h aus, um eine hohe Wahrscheinlichkeit für Entrollen zu verursachen. In einer fahrdynamischen Simulation des Geschwindigkeitsverlaufs beim Entrollen wird ersichtlich, dass eine Aufhaltung möglichst nahe stattfinden muss.

In einer Netzanalyse im ÖBB-Netz werden Verschubstandorte und Verschubknoten untersucht, um neuralgische Punkte zu identifizieren. Dabei werden verschiedene Kriterien, die in einer möglichen zukünftigen Risikoanalyse verwendet werden können, zu drei Kategorien zusammengefasst, welche die Wahrscheinlichkeit eines Vorfalles von entrollten Fahrzeugen widerspiegeln.

Für die Detektion von entrollten Wagen zeigt sich, dass bisher angewandte Systeme zur Gleisfreimeldung (z.B. Achszähler) am besten geeignet sind. In einer internationalen



Literaturrecherche wird herausgefunden, dass viele Maßnahmen zur Aufhaltung – teilweise in Form von Patenten, aber auch als bestehende Produkte am Markt – existieren. Für weitere Auswertungen und Gegenüberstellungen werden nur Einrichtungen ausgewählt, welche „aktiv“ – das System kann als Fahrstraßenelement in die Sicherungstechnik einbezogen werden und wirkt immer, außer es wird durch Einstellung einer Fahrstraße deaktiviert – oder „passiv“ – das System ist immer aktiv und überfahrbar – wirken. Dies schließt sowohl den Faktor Mensch, als auch das Erfordernis einer Einrichtung zur Detektion des Entrollvorgangs aus. Zusätzlich zu den bestehenden Systemen werden zwei neue Einrichtungen konzipiert – ein ansteuerbarer klappbarer Hemmschuh und fixe überfahrbare elastische Elemente. In einer Gegenüberstellung mittels einer Bewertungsmatrix stellen sich die Maßnahmen klappbarer Hemmschuh, klappbarer Bremsschuh und fixe überfahrbare elastische Elemente als am besten geeignet heraus. Das Ergebnis einer Kosten-Nutzen-Analyse mit den bisher angewandten Einrichtungen – Sperrschuh und Auffangweiche – zeigt, dass die Eignung der einzelnen Maßnahmen stark von den Randbedingungen der Betriebsstelle abhängt. Dabei sind vor allem Gleisanzahl, Gleislänge und Gleiskonfiguration relevant. Da die Entscheidung für das geeignetste System nicht pauschal getroffen werden kann, wird eine MS Excel-Tabelle zur Verfügung gestellt, mit der es möglich ist für jede Betriebsstelle zu entscheiden, welche Maßnahme beim Kosten-Nutzen-Vergleich das beste Ereignis liefert.

## **0.2. Englisch**

Despite all safety measures nowadays, it can happen that due to shunting processes single rail cars or a group of cars accidentally roll off and cause high danger. That could also happen with stabled cars. The focus of the current project lies on the one hand on an international literature review about measures on the infrastructure side to stop or detect rolled-off wagons and on the other hand on designing new measures. The scope is to achieve a stopping with preferably no damage and little danger for the surrounding railway operation.

With a driving dynamics model, limit states regarding the initialization of the roll-off process are investigated. It turns out that wind, vehicle collision and the longitudinal gradient of track are the main impact factors. The resistance of a wagon against movement is the sum of rolling resistance in idleness and braking resistance (due to safeguard measures like hand brakes or stop blocks). In the safeguard process of a hand brake, the reached braking resistance depends on the tightening force. Vehicle collision is due to high masses of rail cars very dangerous and can initiate a roll-off quite easily. Especially when stop blocks are

in use, vehicle collision might force an overrun and cause roll-off of the, usually not with other measures safeguarded, car over a long distance. For unbraked vehicles, limit states are achieved with longitudinal gradients of 3 ‰ or wind speeds of 25 km/h. A driving dynamics model of the speed increase over distance during the roll-off process shows that a stopping has to be as fast as possible.

In an analysis of the ÖBB-railway network, stations, where shunting processes happen regularly, and shunting yards are investigated to identify neuralgic points. As outcome different criteria, which could be used in a future risk analysis, are proposed and, built on them, the stations are grouped in three categories, which states the probability of an incident with rolled-off cars.

For the detection of rolled-off vehicles, it turns out that state-of-the-art measures of clear track signaling systems (e.g. axle counter) are most applicable. An international literature review shows that many measures to stop rolled-off cars exist on the market or at least in patent state. To neglect the human factor and the need of a detection measure of the roll-off process, only measures with an “active” – the system can be integrated as an element of the train route in the safety systems and is always active except if it is deactivated to set a train route – or “passive” – the system is always active and can be overrun during regular operation – mechanism are taken into account in further evaluations and comparisons. In addition to systems on the market, two new concepts – a folding stop block and elastic elements that can be overrun – are elaborated. A comparison with a rating matrix shows that the measures folding stop block, elastic elements and folding brake block seem to be most applicable for stopping rolled-off cars. To compare the best evaluated measures with common measures in the ÖBB-network nowadays – track barrier and turnout with a short track and a buffer –, a cost-benefit analysis is carried out. The outcome indicates that a general statement of the most cost-effective measure is not possible due to strong dependencies on the boundary conditions of each station – mainly track quantity, track length and track configuration. To evaluate which measure has the best cost-benefit value for each station individually, a Microsoft Excel file is elaborated. With the input of the boundary conditions of an arbitrary station, the cost-benefit analysis is computed automatically and the outcome is shown in the file.

## 1. EINLEITUNG

Die Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) sind zum sicheren Eisenbahnbetrieb verpflichtet. Trotz aller derzeit getroffenen Sicherheitsmaßnahmen und Vorkehrungen, kann es passieren, dass einzelne Fahrzeuge oder Fahrzeuggruppen bei Verschiebungen unbeabsichtigt entrollen und eine große Gefährdung darstellen. Ebenso können auch abgestellte Wagen oder Wagengruppen entrollen. Die Folgen des Entrollens können von teilweise beträchtlichen Sachschäden am Fahrzeug und an der Infrastruktur bis, im schlimmsten Fall, zu Personenschäden reichen. Um zu verhindern, dass entrollte Fahrzeuge auf Hauptgleise gelangen, gibt es infrastrukturseitige Einrichtungen, die eine Einmündung von Fahrzeugen in Fahrstraßen verhindern – sogenannte Flankenschutzmaßnahmen. Für die Aufhaltung von unabsichtlich entrollenden Fahrzeugen sind Halt gebietende Signale nicht zweckmäßig. Es eignen sich nur direkt wirkende (aktive) Flankenschutzmaßnahmen, die den Fahrweg der entrollenden Wagen weg von dem zu schützenden Fahrweg lenken. Als Stand der Technik werden für diesen Zweck Sperrschuhe oder Auffangweichen eingesetzt.

Die Motivation des gegenständlichen Projekts besteht darin, zu hinterfragen, ob andere effektivere bzw. kostengünstigere Alternativen für diesen Zweck existieren und entsprechende Alternativen in Konzepten zu entwickeln. Bei der Ausarbeitung wird die Priorität auf eine möglichst schadensarme Aufhaltung gelegt.

## 2. GRUNDLAGENRECHERCHE

Das Rangieren und Abstellen von Güterwagen bringt diverse Gefahren mit sich. Durch entsprechende Regelwerke wird den Verantwortlichen vorgeschrieben, wie abgestellte Wagen abzusichern sind. Trotzdem kommt es immer wieder vor, dass Wagen bzw. Wagengruppen unbeabsichtigt entrollen. Im Laufe der Eisenbahngeschichte wurden diverse Einrichtungen zur Detektion und Aufhaltung von Wagen entwickelt. In den folgenden Kapiteln 2.1 und 2.2 werden die entwickelten infrastrukturseitigen Einrichtungen dargestellt. Die folgende Darstellung stellt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.

### 2.1. Detektion

Zurzeit gibt es kein System, welches explizit für die vollautomatische Detektion von entrollten Wagen entwickelt wurde und bereits im Einsatz ist. Aus diesem Grund werden in den folgenden Unterkapiteln Ortungs-/Lokalisierungssysteme beschrieben, die für den Zweck anwendbar erscheinen. Diese sind zumeist für die Lokalisierung von ganzen Zügen im Einsatz.

#### 2.1.1. Mittelbarkeit der Ortung (vgl. [1])

Bei der Ortung von Zügen wird zwischen mittelbarer und unmittelbarer Ortung unterschieden. Die mittelbare Ortung entspricht dem Konzept der indirekten Erkennung. Dabei wird festgestellt, ob ein Objekt in einen zuvor festgelegten Bereich eintritt oder diesen verlässt. Somit kann rückgeschlossen werden, ob der zuvor definierte Bereich belegt oder frei ist.

Die unmittelbare Ortung folgt dem Prinzip der direkten Erkennung. Objekte jeglicher Art können jederzeit eindeutig mithilfe von Messeinrichtungen erkannt werden und sind einer Position zuordenbar.

#### 2.1.2. Wirkungsprinzip (vgl. [1])

Die grundlegende Unterteilung der Wirkungsprinzipien bei der Detektion von Eisenbahnfahrzeugen kann in punktförmige, linienförmige, flächenförmige, räumliche und visuelle Erkennung unterschieden werden.

##### Punktförmig

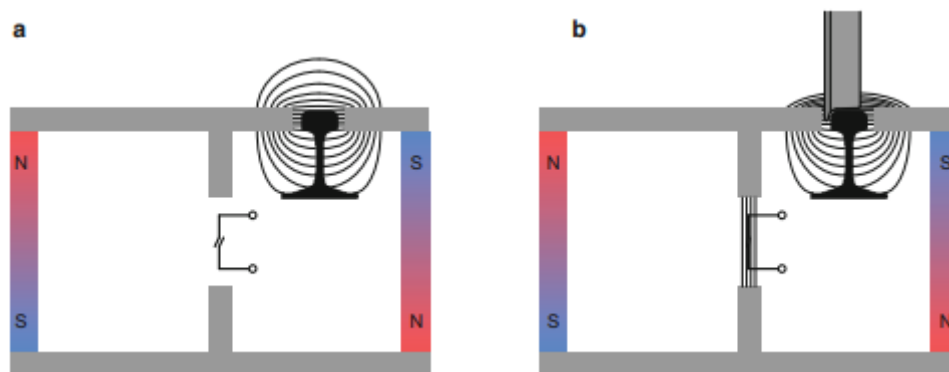
Bei der punktförmigen Detektion wird an einem definierten Punkt eine Messeinrichtung eingebaut. Eine punktförmige Messeinrichtung registriert, unabhängig der Bauart des

Auslösemechanismus, ein Objekt. Mit dieser Information können Rückschlüsse und benötigte Informationen gesammelt werden.

Bei der mechanischen Auslösung des Detektors, wird ein bewegliches Element vom vorbeifahrenden Fahrzeug dahingehend bewegt, dass es einen elektrischen Kontakt auslöst und somit die Erkennung eines Fahrzeuges meldet. Diese Methode wird heute selten verwendet. Dennoch wird sie aufgrund der einfachen Handhabung häufig bei Gleisbaustellen eingesetzt.

Eine weitere Möglichkeit stellt die hydraulische Auslösung dar. Dabei wird am Schienenfuß eine gas- oder flüssigkeitsgefüllte Membran eingebaut. Überfährt ein Zug die Schiene, erzeugt dies eine Durchbiegung und drückt das Medium in der Membran zusammen. Durch die Bewegung des Mediums wird wiederum ein elektrischer Kontakt ausgelöst.

Bei der magnetischen Detektion wird ein magnetischer Kreis dermaßen eingerichtet, dass sich im Ruhezustand eine magnetische Brücke im Gleichgewicht bildet. Ein zusätzlich eingebauter Schalter ist im Ruhezustand offen. Wird die Magnetfeldbrücke durch ein sich in der Nähe befindliches Rad gestört, schließt sich der Schalter und sendet ein Signal.



**Abb. 2-1: Magnetisches Wirkungsprinzip (vgl. [1])**

Die zurzeit am häufigsten eingesetzte punktförmige Detektionsvariante ist die induktive. Bei dieser Methode wird die räumliche Veränderung eines magnetischen Wechselfeldes bei Durchfahrt eines Rades genutzt. Die verwendeten Frequenzen liegen bei einigen Kilohertz. Der Sender und Empfänger sind dermaßen positioniert, dass die Feldlinien auf den Empfänger in einem Winkel  $\alpha > 0$  treffen (siehe Abbildung 2-2). Bei dieser Winkelkonfiguration wird eine Spannung induziert, die eine bestimmte Phasenlage zur Ausgangsspannung aufweist. Die abgeleitete Information lautet, dass der beobachtete Bereich frei ist. Nähert sich ein Rad dem Magnetfeld, ändert sich der Winkel der Feldlinien zu Null und es wird keine Spannung induziert. Die Induktionsspannung hängt dabei von  $\sin \alpha$  ab. Durchfährt das Rad das Magnetfeld, so ist der Auftreffwinkel  $\alpha < 0$  und die

Phasenlage der induzierten Spannung ist gegenüber dem unbeeinflussten Fall negativ. Da nicht die zeitliche Änderung der Spannung, sondern ihr Vorzeichen ausgewertet wird, erreicht das System eine hohe Empfindlichkeit bei gleichzeitiger Störfestigkeit und ist daher sehr gut zur Erkennung einzelner Räder sowohl bei hohen als auch bei geringen Geschwindigkeiten geeignet. Für die Erkennung der Fahrtrichtung werden zwei Sensoren kurz hintereinander angeordnet, sodass bei Überfahrt die Reihenfolge der Impulse die Richtungsinformation ergibt.

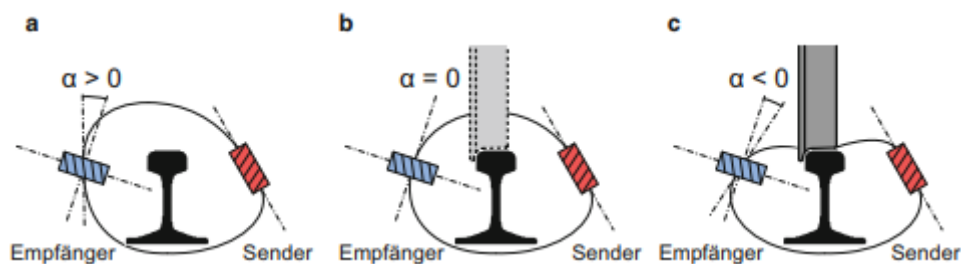


Abb. 2-2: Induktives Wirkungsprinzip (vgl. [1], Seite 42)

Abschließend ist bei der punktförmigen Detektion noch die visuelle Erkennung zu erwähnen. Dabei kommt es zu einer visuellen Prüfung des Zugschlussignales durch einen Mitarbeiter vor Ort. Alternativ kann die Prüfung auch mit einem technischen Hilfsmittel erfolgen.

### Linienförmig

Bei der linienförmigen Detektion erfolgt die Erkennung des Schienenfahrzeuges in einem definierten Bereich entlang des Gleises.

Beim galvanischen Erkennungsprinzip ermöglichen die Räder des durchfahrenden Zuges gemeinsam mit der Radachse die elektrische Verbindung zwischen den Schienen. Somit wird ein elektrischer Fluss zwischen den angebrachten Polen hergestellt, womit die Anwesenheit eines Fahrzeuges festgestellt werden kann.

### Flächenförmig

Bei der flächenförmigen Detektion werden Objekte, die eine durch Sensoren aufgespannte Ebene durchdringen, erkannt. Dabei kann die Erkennung elektromagnetisch oder mechanisch erfolgen.

Beim Wirkungsprinzip der elektromagnetischen Wellen wird mithilfe von zum Beispiel Laser, Radar oder Infrarotquellen eine Fläche permanent oder periodisch abgeprüft. Wird entsprechend dem System eine Abweichung festgestellt, ist der Bereich als besetzt zu melden. Eine Kombination aus mehreren Systemen ist möglich.





**Abb. 2-3: Radarscanner an einem Bahnübergang(vgl. [1], Seite 44)**

Bei der mechanischen Umsetzung der flächenförmigen Detektion wird zum Beispiel ein Netz aus stromdurchflossenen Drähten mit geringer Reißfestigkeit aufgespannt. Wird einer dieser Drähte von einem Objekt getrennt, wird der Stromfluss unterbrochen und meldet die Unterbrechung.



**Abb. 2-4: Detektion mittels Reißdrähte (vgl. [1], Seite 45)**

Eine andere Möglichkeit bilden Kontaktmatten zwischen oder neben den Schienen. Diese erkennen anhand des Gewichts der Gegenstände, ob sich ein solches im beobachteten

Bereich befindet. Kontaktmatten werden zwischen den Gleisen angeordnet. Dieses System findet beim automatisierten Fahren Verwendung.



**Abb. 2-5: Kontaktmatte (vgl. [2])**

### Räumliche Detektoren

Bei der räumlichen Detektion wird ein bestimmter Raum überwacht und stellt etwaig vorhandene Objekte in diesem Raum fest.

Das Funktionsprinzip ist das induktive Wirkungsprinzip. Dabei wird die ferromagnetische Masse von Fahrzeugen genutzt, welche eine Änderung der Induktivität einer Spule hervorruft. Dabei ist eine Induktivität im Fahrweg eingebaut und in Kombination mit einem Kondensator wird ein Schwingkreis gebildet. Dabei stellt sich eine Schwingfrequenz ein. Wird der Abschnitt befahren, so ändert sich die Schwingfrequenz. Zur Vermeidung von Fehlermeldungen wird eine symmetrische Doppelschleife eingebaut. Das System reagiert bei einer entsprechend großen ferromagnetischen Masse und kann somit auch bei Straßenfahrzeugen zum Einsatz kommen.

### Visuelle Beobachtung

Die älteste Methode der Detektion ist die visuelle Beobachtung. Dabei wird der Raum von einem Mitarbeiter beobachtet. Durch technische Entwicklungen wird diese Art der Überwachung entsprechend vereinfacht. Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit der Reaktion bei ungewöhnlichen Situationen. Nachteilig wirken sich der monetäre Aufwand sowie die hohe Fehleranfälligkeit durch Unkonzentriertheit oder Fehlreaktionen aus. Diese menschlichen Einflüsse können zum Beispiel durch die Entwicklung von

Bilderkennungsalgorithmen (vgl. [3]) und entsprechende Adaption des Systems ausgeglichen werden.

### **2.1.3. Konkrete Beispiele zur Detektion**

#### FOS – Faseroptische Sensoren

Faseroptische Sensoren sind eine zusätzliche Nutzung von Lichtwellenleiterkabeln. Die derzeitige Entwicklung beschränkt sich auf Lichtwellenleiter, die bereits verlegt sind und die zurzeit auf unterschiedliche Art und Weise, wie zum Beispiel zur Übertragung von Signalen, genutzt werden. Dabei ist zwischen drei grundlegenden Kabelverlegearten (vgl [4]) zu unterscheiden:

1. Lichtwellenleiter sind in den der Trasse folgenden Betonkabeltrögen geführt.
2. Lichtwellenleiter sind an den entlang der Strecke befindlichen Masten aufgehängt.
3. Lichtwellenleiter sind mit speziellen Klammern am Schienenfuß befestigt.

Grundsätzlich wird mithilfe der „optischen Zielbereichsreflektometrie“ eine Ortung des Zuges in Echtzeit möglich. Die gesendeten Lichtimpulse in einem Lichtwellenleiter werden gemessen. Mithilfe eines Algorithmus werden Veränderungen und Störungen im Signal erkannt und liefern somit Informationen über lokal auftretende akustische Drücke. Die verwendete Technik benötigt auf der Strecke für den Betrieb keine zusätzliche Energieversorgung.

Eine Herausforderung bei der Entwicklung stellt der oft größere Abstand zwischen Lichtwellenleiter und benutztem Gleis dar. Wird dieser Abstand entsprechend zu groß, können die entstehenden Vibrationen des Zuges zu gering für die Detektion werden. Eine weitere Einschränkung bei Feldversuchen stellen gleichzeitig verkehrende Züge dar. Zusätzlich macht das Rangieren von Wagen die Möglichkeit der Detektion von Zügen unmöglich. Es wurde erkannt, dass zurzeit eine Detektion nur ab einer Grenzgeschwindigkeit möglich ist.

Aufgrund der hier beschriebenen Erkenntnisse aus bisherigen Forschungsprojekten erscheint eine Detektion von entrollten Wagen mithilfe von FOS derzeit nicht anwendbar.

#### Achszähler (vgl. [1], S.44ff)

Eine konkrete Ausführung der punktförmigen Überwachung stellt der Achszähler dar. Dabei werden die in einen Bereich ein- und ausfahrenden Achsen erfasst. Ist die Differenz gleich null, so ist der Abschnitt frei. Bei dieser Art der Überwachung wird jeweils ein Rad detektiert und als Achse gezählt.

Der prinzipielle Aufbau eines Achszählers besteht aus dem doppelten Schienenkontakt, der Baugruppe zur Signalaufbereitung und dem Achszählrechner. Der doppelte Schienenkontakt ist ein auf Räder reagierender Detektor im Gleis. Durch die doppelte Anordnung der Einzelerkennungssensoren ist die Erkennung der Fahrrichtung möglich. Der Schienenkontakt funktioniert nach dem induktiven Wirkungsprinzip. Wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, wird die Veränderung eines Magnetfeldes aufgrund der ferromagnetischen Masse des Rades registriert. Die Baugruppe zur Signalaufbereitung wandelt das analoge Signal der Sensorsysteme in ein entsprechend erforderliches digitales Signal um und verstärkt es bei Bedarf. Der Achszählerrechner bekommt die Informationen aus mehreren Zählpunkten und setzt diese zueinander in Relation. Ergibt das Ergebnis null ist der beobachtete Abschnitt frei.

Die Vorteile eines Achszählers im Vergleich zu einem Gleisstromkreis liegen in den nicht vorhandenen Anforderungen an das Gleis und das keine Grenzen bei der Abschnittslänge gegeben sind. Des Weiteren ist der Achszähler sehr zuverlässig und muss nur mindestens einmal pro Jahr befahren werden.

#### 2.1.4. Zusammenfassung

Die in den Kapitel 2.1.1, 2.1.2 und 2.1.3 aufbereiteten Informationen werden in Tab. 2-1 zusammengestellt und nach den Auslösemechanismen und der erforderlichen Energieversorgung gegliedert.

**Tab. 2-1: Detektion nach Auslösemechanismen und erforderlicher Energieversorgung**

	<b>Wirkprinzip</b>	<b>man. Aus.</b>	<b>mech. Aus.</b>	<b>auto. Aus.</b>	<b>En. erf.</b>	<b>En. n. erf.</b>
punktförmig	mechanisch		X		(X)	X
	hydraulisch		X		(X)	X
	magnetisch			X	X	
	induktiv			X	X	
	visuell	X		X	X	X
linienförmig	galvanisch			X	X	
flächenförmig	elektromagnetische Wellen			X	X	
	mechanisch		X		X	
	Kontaktmatten			X	X	
räumlich	induktiv			X	X	
visuell	Beobachtung	X		X	X	X

linienförmig	FOS			X	X	
punktförmig	Achszähler			X	X	

X ... Zutreffend (X) ... teilweise Zutreffend

---

mech. Aus. ... mechanische Auslösung  
 man. Aus. ... manuelle Auslösung      En. erf. ... Energieversorgung erforderlich  
 aut. Aus. ... automatische Auslösung      En. n. erf. ... Energieversorgung nicht erforderlich

## 2.2. Aufhaltung

Die verschiedenen Möglichkeiten zur Detektion der entrollten Wagen wurden in Kapitel 2.1 beschrieben. Wird nun ein ungewolltes Entrollen eines Wagens erkannt, muss es Möglichkeiten zum möglichst schadensarmen Aufhalten dieses Wagens geben. Im Folgenden sind infrastrukturseitige Einrichtungen angeführt, die bereits im Einsatz sind.

### 2.2.1. Gleisbremsen (vgl. [5])

Den Anfang bildet eine Gegenüberstellung diverser Bremssysteme, die zur Geschwindigkeitsregulierung im Einsatz sind und die bei neuer Anordnung und einem neuen Einsatzkonzept zur gezielten Aufhaltung/Fixierung von Wagen eingesetzt werden.

#### Balkenbremse

Bei einer Balkenbremse wird die Bremskraft durch mechanisches Anpressen von Bremsbalken an das Rad erzeugt. Diese Balken sind seitlich der Schiene montiert und sind in gewichtsunabhängige Zweikraftbremsen und gewichtsabhängige Dreikraftbremsen unterscheidbar. Bei der Zweikraftbremse werden die Bremsbalken entsprechend der erforderlichen Bremskraft eingestellt. Früher war dies eine fix eingestellte Bremskraft. Durch neuere Entwicklungen und Möglichkeiten der elektronischen Signalübertragung ist bei modernen Anlagen die aufbringbare Bremskraft der Balken individuell an das Gewicht der zu bremsenden Wagen anpassbar. Um eine dem Bedarf entsprechende Bremskraft aufbringen zu können, wurde früher die Dreikraftbremse eingesetzt. Durch eine mechanische Einrichtung wird die Bremskraft reguliert.

Prinzipiell hängt die Wirkung einer Balkenbremse neben der Anpresskraft auch mit der vorhandenen Wirklänge zusammen.

### Elektrodynamische Gleisbremse

Bei der elektrodynamischen Gleisbremse durchläuft das Rad die Polschuhe eines starken Elektromagneten. Die Bremswirkung entsteht durch die Wirbelstromeffekte und durch das zusätzliche Anpressen der beweglich gelagerten Polschuhe.

### Schraubenbremse

Bei einer Schraubenbremse wird ein walzenförmiger Bremskörper neben dem Gleis angebracht. An der Walze ist ein schraubenförmiger Führungswulst angebracht, an dem das Rad anläuft und die Walze in eine 360° Drehung versetzt. Die Abbremsung der Drehbewegung erfolgt mithilfe eines hydraulischen Widerstandes innerhalb einer entsprechenden Verzögerungseinrichtung. Die erforderliche Ansprechgeschwindigkeit wird beim Einbau festgelegt. Der Bremskörper kann bis zu 1,5 m lang sein und einen Durchmesser von etwa 15 cm aufweisen.

### Kolbenkleinbremse

Die Kolbenkleinbremse ist weitläufig unter dem Firmennamen Dowty-Retarder bekannt. Das Grundprinzip sind kleine, hydraulisch wirkende Stoßdämpfer, deren Bremsstempel bei der Überfahrt des Rades vom Spurkranz gedrückt werden. Ähnlich wie die Schraubenbremsen arbeiten Kolbenkleinbremsen geschwindigkeitsabhängig. Sie benötigen keine zusätzliche Energieversorgung und sind auch nicht gesteuert. Um eine ausreichende Wirkung zu erzielen müssen Kolbenkleinbremsen eng ( $< 1$  m) und in großer Zahl angeordnet werden. Die maximale Überfahrtsgeschwindigkeit beträgt 10 km/h. Werden steuerbare Kolbenkleinbremsen eingesetzt, können diese als beschleunigende Elemente verwendet werden. Diese Art des Einsatzes ist nicht sehr weit verbreitet.

### Gummigleisbremse

Bei einer Gummigleisbremse wird im Bereich der Bremse die Fahrschiene durch einen Gummibalken ersetzt. Die Bremsarbeit wird durch die Walkarbeit bei der Überfahrt des Rades geleistet. Im Bereich der Bremse wird der Spurkranz durch eine Notlaufeinrichtung geführt. Gummigleisbremsen finden vor allem als Richtungsgleisbremsen ihre Anwendung.

### Bremmung mit Hemmschuhen

Die Methode der Bremsung mit Hemmschuhen ist keine Gleisbremse im eigentlichen Sinn. Ein Hemmschuh wird lose vom Rangierpersonal auf die Schienen gelegt und dient zur Abbremsung frei laufender Wagen. Die Bremswirkung wird über die Gleitreibung mit der Hemmschuhkappe, welche mit der Sohle über die Schiene gleitet, erreicht. Bei dieser



Methode ist die Regulierung der Bremswirkung von der visuellen Einschätzung der Geschwindigkeit und des Gewichts des Wagens durch das Rangierpersonals notwendig. Für die Anwendung im Weichenbereich sind spezielle Hemmschuharten erforderlich. Der Einsatz von Hemmschuhen ist durch einen hohen Personaleinsatz und den Arbeitsbedingungen für das Personal gekennzeichnet.

#### Abrollsicherungsbremse (vgl. [6], S.24ff)

Die Aufgaben einer Abrollsicherungsbremse umfassen den Entrollschutz von Wagen aus dem Richtungsgleis, das Festhalten der Wagen im Richtungsgleis und den Abbau der Zugbildungsdynamik. Die Bremsung bei einer Abrollsicherungsbremse erfolgt einseitig bis zum Stillstand. Die erforderliche Bremskraft wird über das Achsgewicht des ersten Wagens abgeleitet, welches am Berg gemessen wird. Durch die Zugbildungsdynamik der nachkommenden Wagen, wird der erste Wagen immer weiter in die Abrollsicherungsbremse gedrückt. Es besteht die Gefahr des Aufkletterns und zusätzlich, dass der erste Wagen aus der Bremse geklopft wird. Zur Auslaufsicherung werden die ersten drei Wagen gekoppelt und eine zusätzliche Auslaufsicherung angewendet.

#### **2.2.2. Flankenschutz (vgl. [5], S.108)**

Flankenschutz beschreibt ein Bündel an Maßnahmen, mit denen das Befahren einer freigegebenen Fahrstraße durch andere Fahrzeuge verhindert werden soll. Bei besonders gefährdeten Bereichen wird durch Infrastrukturmaßnahmen versucht, ein Eindringen eines zum Beispiel entrollen Wagens in eine Fahrstraße zu verhindern. Der unmittelbare Schutz wird durch den Einbau von Schutzweichen oder Gleissperren erreicht.

#### Schutzweiche:

Es gibt diverse Ausführungen einer Schutzweiche. Prinzipiell kann jede Weiche zum Flankenschutz verwendet werden. Soll eine Weiche gezielt zum Flankenschutz gegen feindliche Rangierfahrten oder entrollte Wagen eingesetzt werden, so ist sie so zu positionieren, dass ein Wagen an geeigneter Stelle gestoppt werden oder entgleisen kann. Die Position für eine derartige Schutzweiche ist entsprechend zu wählen, sodass die Hauptgleise einer Strecke vom entgleisten Wagen nicht behindert werden können. Weiter ist auf eine möglichst infrastrukturechonende Stelle zu achten. Weichen sind in der Lage für eine gestellte Fahrstraße Flankenschutz zu bieten. Für entrollende Wagen wird keine Fahrstraße gestellt und somit ist auch die Stellung der Schutzweiche undefiniert. Weichen, welche der Aufhaltung von entrollten Wagen dienen, haben eine fest definierte Grundstellung und werden Auffangweichen genannt. Deshalb wird im weiteren Bericht der

Begriff Auffangweiche verwendet. Bei Auffangweichen führt das Zweiggleis meist zu einem kurzen Stumpfgleis und ist am Gleisende entsprechend der vorgesehenen Art der Aufhaltung der Wagen ausgestattet (siehe Abb. 2-6).



**Abb. 2-6: Auffangweiche mit Stumpfgleis und Gleisabschluss (vgl. [7])**

Die Möglichkeiten der Aufhaltung umfassen laut [8] Prellböcke, sowie Gleisabschlüsse an Kopframpen, Gleisendschuhe und behelfsmäßige Gleisabschlüsse. Ein behelfsmäßiger Gleisabschluss kann zum Beispiel als Schwellenkreuz oder als Sperrbaum ausgeführt sein. Der Sperrbaum besteht aus einer quer auf die Schienen gelegten Schwelle, die auf einer Seite an einem senkrechten Pfosten drehbar befestigt ist, auf der anderen Seite gegen einen senkrechten Pfosten schlägt und mit einem verschließbaren Fangbügel verbunden wird. Diese Art ist nur zur Aufhaltung von Fahrzeugen mit geringer Geschwindigkeit geeignet (vgl. [9]).

Weitere Varianten zum Aufhalten von entrollten Wagen bei einem Stumpfgleis sind ein Erdhügel am Ende des Gleises oder ein Sandgleis. Beim Sandgleis wird das Gleis mit grobkörnigem Sand bedeckt und mithilfe der erhöhten Reibung zwischen Schiene und Rad wird der Wagen zum Stillstand gebracht. Diese Art des Sandgleises wird vorwiegend bei Gefällerrangierbahnhöfen eingesetzt [8]. Die Entgleisung ist bei einem Sandgleis nicht erwünscht. Eine mögliche Ausführungsvariante ist in Abb. 2-7 dargestellt.



**Abb. 2-7: Abstellgleis der Métro Montréal – Ende des Gleises eine Sandgrube als Prellbock-Ersatz (vgl. [10])**

Eine weitere Ausführungsvariante einer Schutzweiche ist die Entgleisungsweiche. Diese soll entrollte Wagen vor der Erreichung des Gefahrenpunktes gezielt zum Entgleisen bringen. Eine Entgleisungsvorrichtung ist mit einer Zungenschiene, einer Backenschiene, dem entsprechenden Antrieb auf einer Seite und einem Gleissperrsignal ausgestattet. Auf der gegenüberliegenden Seite ist im Gleisbett eine Auflaufbohle angeordnet. Eine mögliche Ausführungsvariante einer Entgleisungsvorrichtung ist in Abb. 2-8 dargestellt.



**Abb. 2-8: Entgleisungsvorrichtung mittels Unterbrechung der Schiene (vgl. [11])**

Gleissperre/Sperschuh (vgl. [1], S.65)

Im weiteren Verlauf wird der Begriff der in der Literatur verwendete Begriff „Gleissperre“ durch die bei den ÖBB in Verwendung befindliche Bezeichnung „Sperschuh“ ersetzt.



Ein Sperrschuh dient dem Schutz von Personen oder Gegenständen. Bei einer Aktivierung der Sicherungsfunktion kommt es zu einer gezielten Entgleisung des Schienenfahrzeuges beim Auflaufen auf diesen. Das Schienenfahrzeug wird mithilfe eines in den Lichtraum hineinragenden Gegenstandes zum Entgleisen gebracht. Der Entgleisungsschuh lässt den Spurkranz über den Schienenkopf ansteigen und drückt diesen anschließend, entsprechend der Auswurfsrichtung, vom zu schützen Gleis weg. Zusätzlich ist ein Sperrschuh mit einem Signal zu kennzeichnen. Aufgrund der Entgleisung dürfen Sperrschuhe nicht in Hauptgleise eingesetzt werden. Bei der Bauart kann in klappbare und mobile Sperrschuhe unterschieden werden.

#### *Klappbarer Sperrschuh(vgl. [12])*

Ein klappbarer Sperrschuh kann an der Gleisinnen- oder Gleisaußenseite angebracht sein. Entsprechend der Ausrichtung des Sperrschuhs kann eine Entgleisung rechts oder links der Fahrtrichtung erfolgen. Der Antrieb kann entsprechend der Anforderungen mit oder ohne Schutzkasten und mit oder ohne elektrischen Antrieb ausgestattet sein.



**Abb. 2-9: klappbarer Sperrschuh in Amsterdam, Niederlande (vgl. [12])**

#### *Mobiler Sperrschuh (vgl. [13])*

Von der Art der Funktion ist der mobile Sperrschuh das Gleiche wie der klappbare Sperrschuh. Das nordamerikanische Patent enthält eine Entwicklung, die leicht genug ist um von einer einzelnen Person getragen und versetzt zu werden. Laut Patent funktioniert dieser Sperrschuh effizient unter schweren Lasteinwirkungen und gleitet auch unter Stoßbelastung nicht auf der Schiene. Das Patent wurde am 21. August 1979 angemeldet.

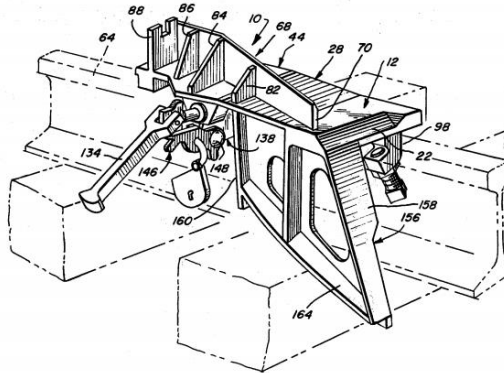


Abb. 2-10: Mobiler Sperrschuh (vgl. [13])

### 2.2.3. Sonstige Möglichkeiten

#### Prellbock (vgl. [14])

Ein Prellbock ist eine Form des Gleisabschlusses und soll das über einen bestimmten Punkt hinausgehende Fahren eines Schienenfahrzeuges verhindern. Es gibt neben dem fest montierten Prellbock diverse Formen des beweglichen Prellbocks.

Eine Ausführungsvariante ist der **klappbare Festprellbock**. Dieser kann mit hydraulischen oder mechanischen Dämpfern oder Elastomer-Stoßdämpfern ausgestattet sein. Die Antriebsart kann manuell oder mithilfe eines hydraulischen Antriebs ausgeführt sein. Der klappbare Festprellbock kann für eine mögliche Befahrung von beiden Richtungen ausgestattet sein. Die Befestigung erfolgt auf dem Unterbau und es kann ein Arbeitsvermögen bis zu 1000 kJ bewältigt werden. Abb. 2-11 zeigt einen hydraulisch klappbaren Prellbock, der in Helsinki bei der Metro im Einsatz ist.



Abb. 2-11: Hydraulisch Klappbarer Prellbock in Helsinki, Finnland (vgl. [15])

Eine weitere Ausführungsvariante ist der **klappbarer Bremsprellbock**. Dieser ist auf parallel zum Gleis situierten Bremsschienen befestigt. Ein klappbarer Bremsprellbock kann

durch Umklappen deaktiviert werden. Dies kann entweder manuell oder mithilfe eines hydraulischen Antriebes erfolgen. Neben der Klappvariante gibt es auch die Möglichkeit diese zu versenken oder überfahrbar auszuführen. Es gibt Bremsprellböcke ohne Stoßdämpfer oder mit mechanischen, hydraulischen oder Elastomer-Stoßdämpfer. Das Arbeitsvermögen beträgt 400 kJ/m. Abb. 2-12 zeigt einen aktivierten klappbaren Bremsprellbock in Dormagen und Abb. 2-13 einen deaktivierten klappbaren Bremsprellbock aus Dormagen.



**Abb. 2-12: Klappbarer Bremsprellbock – aktiviert – Dormagen (vgl. [16])**

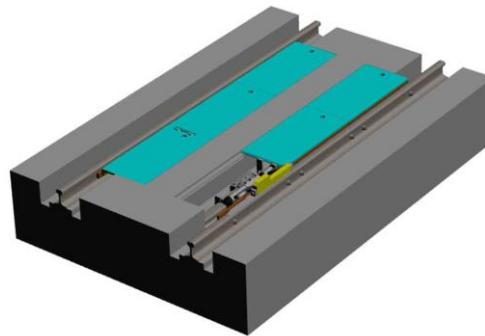


**Abb. 2-13: Klappbarer Bremsprellbock – deaktiviert – Dormagen (vgl. [16])**

### Klappbarer Bremsschuh

Bremsschuhe werden eingesetzt, wenn die Verwendung eines Prellbocksystems bauartbedingt ausgeschlossen ist. Ein Bremsschuh wirkt direkt am Rad und ist auf innen- oder außenliegenden Zusatzschiene befestigt. Ein klappbarer Bremsschuh kann bei Bedarf aktiviert werden und Fahrzeuge mit geringer Geschwindigkeit stoppen. Die Anordnung von Bremsschuhen erfolgt paarweise und das Arbeitsvermögen beträgt 40 kJ.





**Abb. 2-14: Modelldarstellung von klappbaren Bremschuhen – Sangerhausen (vgl. [17])**

Intelligenter Hemmschuh (vgl. [18])

Ein Hemmschuh wird zum Bremsen und Sichern von Schienenfahrzeugen verwendet. Dieser wird zwischen dem Rad und der Schiene platziert und durch die entstehende Reibung die Bremswirkung erzielt. Hemmschuhe werden händisch von Verschubmitarbeitern ausgelegt. Dabei kann es durch Zeitdruck, Unachtsamkeit etc. zu einer unzureichenden Positionierung eines Hemmschuhs kommen. Um solche Fehler zu vermeiden wurde bei der chinesischen Entwicklung eine Echtzeitüberwachung entwickelt. Mithilfe von im Hemmschuh eingebauten Sensoren, einem Signalsender, einer Datenbank und einem Überwachungssystem werden die Hemmschuhe überwacht. Dabei werden die Lage und die Position überwacht ohne die Funktion der Wegrollprävention zu verändern. Beim Test im Bahnhof Sinjia, China, im Jahr 2014 ergaben die intelligenten Hemmschuhe eine Zuverlässigkeit von 100 % bei der Darstellung des Nutzungsstatus.

**2.2.4. Zusammenfassung**

Die in den Unterkapiteln 2.2.1, 2.2.2 und 2.2.3 aufgelisteten Informationen werden in Tab. 2-2 zusammengestellt und nach der Bremswirkung, der erforderlichen Energieversorgung und der Art der Aufhaltung aufgeteilt. Die Bremswirkung ist wiederum in mechanisches oder hydraulisches Wirkprinzip unterteilt, die Energieversorgung – erforderlich oder nicht – und die Art der Aufhaltung nach schadensfrei, Schaden erwartbar und planmäßige Entgleisung.

**Tab. 2-2: Kategorisierung der Aufhaltemöglichkeiten nach Bremswirkung, Energieversorgung und Art der Aufhaltung**

	Bremswirkung		Energieversorgung		Art der Aufhaltung		
	mechanisch	hydraulisch	erforderlich	nicht erforderlich	schadensfrei	Schaden erwartbar	Planmäßige Entgleisung
Balkenbremse - alt	X			X	X		
Balkenbremse - neu	X		X		X		
Elektrodynamische Gleisbremse			X		X		
Schraubenbremse		X		X	X		
Kolbenkleinbremse		X		X	X		
Bremsung mit Hemmschuh	X			X	X		
Abrollsicherungsbremse	X		X		X		
Gummigleisbremse	X			X	X		
Prellbock	X			X		X	
Gleisabschluss an Kopframpen	X			X		X	
Gleisendschuh	X			X		X	
Behelfsmäßiger Gleisabschluss	X			X		X	X
Erdhügel	X			X		X	X
Sandgleis	X			X	X	X	
Entgleisungsweiche	X		X			X	X
Klappbare Gleissperre	X		X	X		X	X
Mobile Gleissperre	X			X		X	X
Klappbarer Festprellbock	X		X	X		X	
Klappbarer Bremsprellbock	X		X	X		X	
Klappbarer Bremsschuh	X		X		X		
Intelligenter Hemmschuh	X			X	X		

In Tab. 2-2 sind die technischen Hilfsmittel zur Aufhaltung von entrollten Fahrzeugen aufgelistet. Die klappbare Gleissperre, der klappbare Festprellbock und der klappbare Bremsprellbock haben jeweils eine Markierung bei „Energieversorgung erforderlich“ und „Energieversorgung nicht erforderlich“. Dies bedeutet, dass es zwei verschiedene Ausführungsarten gibt.

Zur besseren Abschätzung der Kosten der diversen technischen Hilfsmittel wurden Richtpreise für diverse Aufhaltesysteme recherchiert. In Tab. 2-3 sind für manuelle/motorisch klappbare Gleissperren, klappbare Prellböcke, klappbare Bremsprellbock und klappbare Bremsschuhe die Richtpreise eines Anbieters angegeben.

**Tab. 2-3: Richtpreise für ausgewählte Aufhaltesysteme (vgl. [19])**

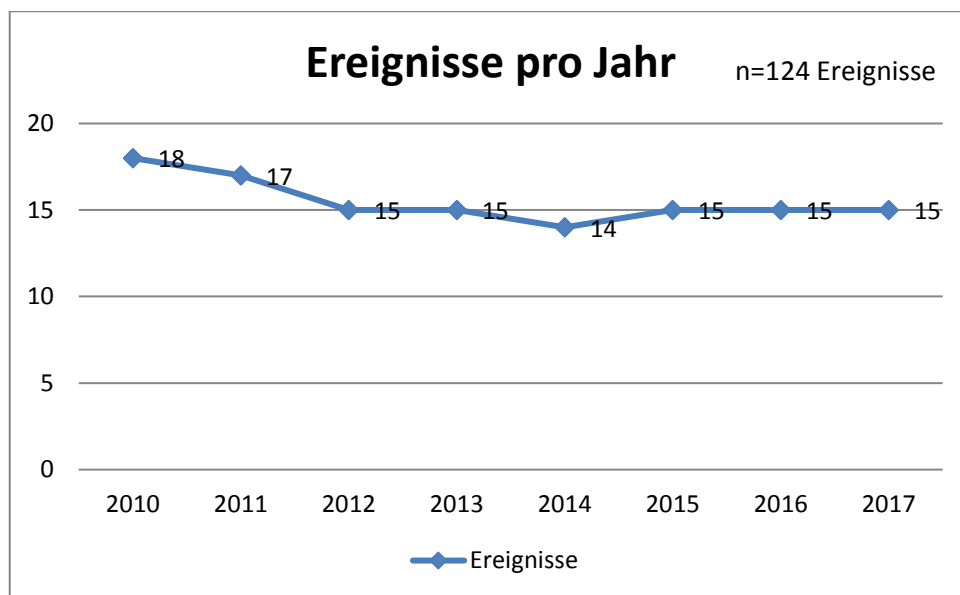
Manuel klappbare Gleissperre	4.000 €
Motorisch klappbare Gleissperre	6.000 €
Klappbarer Festprellbock mit hydraulischem Dämpfer	40.000 – 60.000 €
Klappbarer Bremsprellbock (bis 400 kN, Type 10)	40.000 €
Klappbarer Bremsschuh (inkl. 2 Bremsschienen 6 Meter Länge)	7.000 €

### 3. ANALYSE BISHERIGER VORFÄLLE

Im Abschnitt 3.1 werden Vorfälle mit entrollten Fahrzeugen der Jahre 2010 bis 2017 untersucht. Dazu wurde seitens des Auftraggebers eine Zusammenstellung von Ereignissen zur Verfügung gestellt. Diese beinhaltet entsprechend den Ereignissen Informationen zu den Betriebsstellen, Verursachern und Ursachen laut BUS (Betriebsunfallstatistik). Anschließend an die allgemeine Auswertung, im Abschnitt 3.2, werden Beispiele von Ereignissen mithilfe der veröffentlichten Untersuchungsberichte des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie ergänzt.

#### 3.1. Allgemeines

Die übermittelte Zusammenstellung der ÖBB umfasst den Zeitraum von 2010 bis 2017. In diesem Zeitraum haben sich insgesamt 124 Vorfälle ereignet. Die Verteilung der Ereignisse ist in Abb. 3-1 dargestellt.



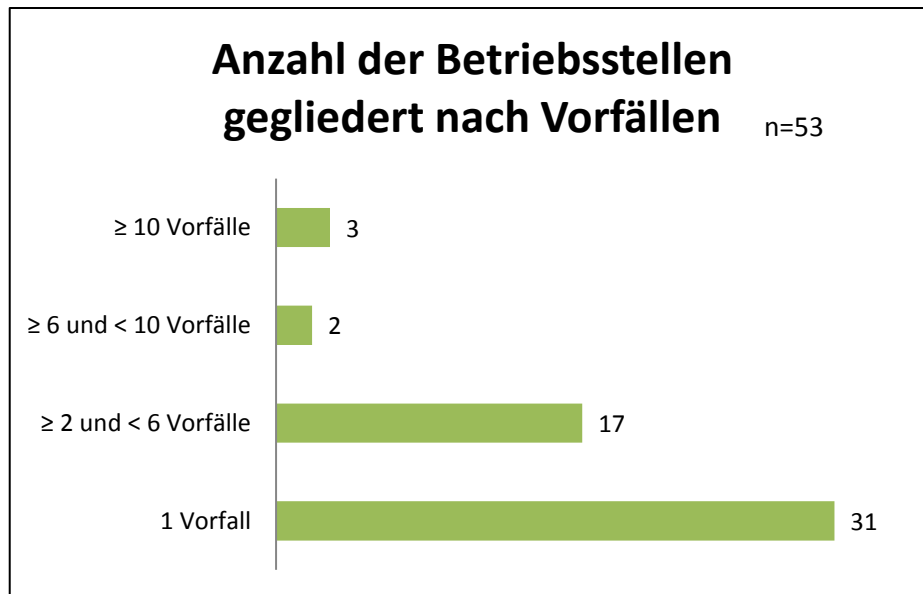
**Abb. 3-1: Anzahl von Ereignissen von entrollten Fahrzeugen der Jahre 2010 bis 2017**

Abb. 3-1 zeigt, dass es 2010 18 Vorfälle von entrollten Fahrzeugen gab, gefolgt von 17 Vorfällen im Jahr 2011. In den Jahren 2012, 2013, 2015, 2016 und 2017 ereigneten sich jeweils 15 Vorfälle. Im Jahr 2014 gab es 14 Vorfälle.

##### 3.1.1. Betriebsstellen

Die 124 Vorfälle ereigneten sich in 53 verschiedenen Betriebsstellen in Österreich. Abb. 3-2 gibt die Anzahl der Betriebsstellen geordnet nach Anzahl der Ereignisse an. In 31 Betriebsstellen ereignete sich jeweils ein Vorfall. In 17 Betriebsstellen ereigneten sich zwei

bis fünf Vorfälle, in zwei Betriebsstellen sechs bis zehn Vorfälle. In drei Betriebsstellen ereigneten sich mehr als zehn Vorfälle im Zeitraum von 2010 bis 2017.

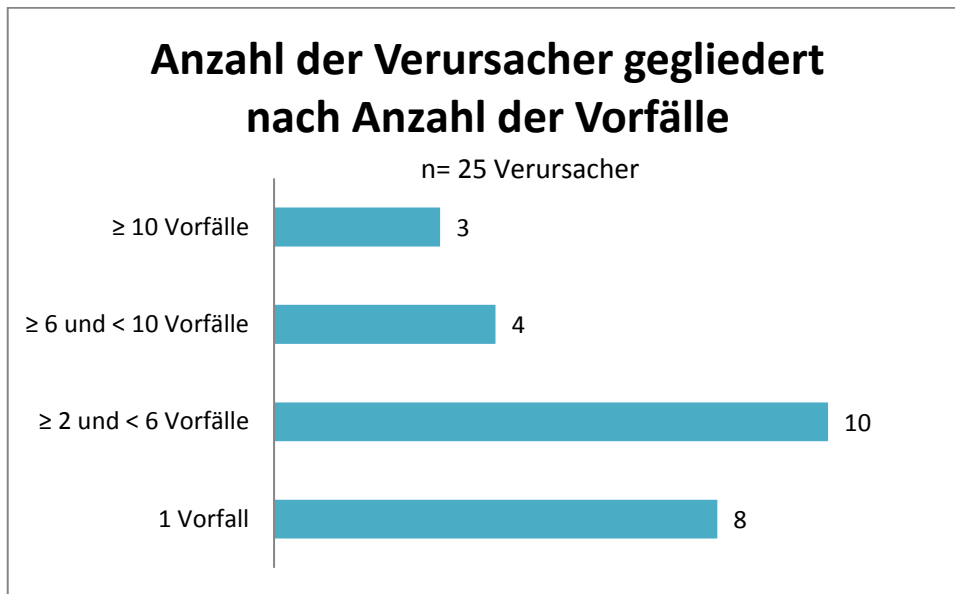


**Abb. 3-2: Anzahl der Betriebsstellen gegliedert nach Ereignissen**

Die Betriebsstellen mit größer gleich zehn Vorfällen sind ausgewiesene Verschubknoten, in denen viele Verschubvorgänge pro Jahr stattfinden.

### 3.1.2. Verursacher

Insgesamt gab es 25 verschiedene verursachende Stellen, die für das Entrollen von Fahrzeugen ausfindig gemacht werden konnten. Abb. 3-3 stellt dar, dass acht Verursacher je ein Entrollen eines Fahrzeuges verursacht haben, zehn Verursacher haben zwischen zwei und fünf Vorfälle hervorgerufen, vier Verursacher haben zwischen sechs und neun Vorfälle zu verantworten und größer gleich zehn Vorfälle wurden von drei Verursachern begangen.



**Abb. 3-3: Anzahl der Verursacher gegliedert nach Anzahl der Vorfälle**

Vergleicht man die Gesamtzahl der Vorfälle den jeweiligen Verursachern entsprechend zugeordnet, so ergibt sich die in Abb. 3-4 dargestellte Verteilung. Es zeigt sich, dass die Verursacher größer gleich zehn Vorfällen für 17 %, 16 % und 11 % der Vorfälle verantwortlich sind. Somit ist ersichtlich, dass diese drei Verursacher für 44 % der Ereignisse verantwortlich sind. Auf der anderen Seite haben acht Verursacher gemeinsam sieben Prozent der Vorfälle verursacht. Die weitere prozentuale Verteilung der Vorfälle mit entrollten Fahrzeugen verteilt sich, wie in Abb. 3-4 dargestellt, auf die jeweilige Anzahl der Verursacher.



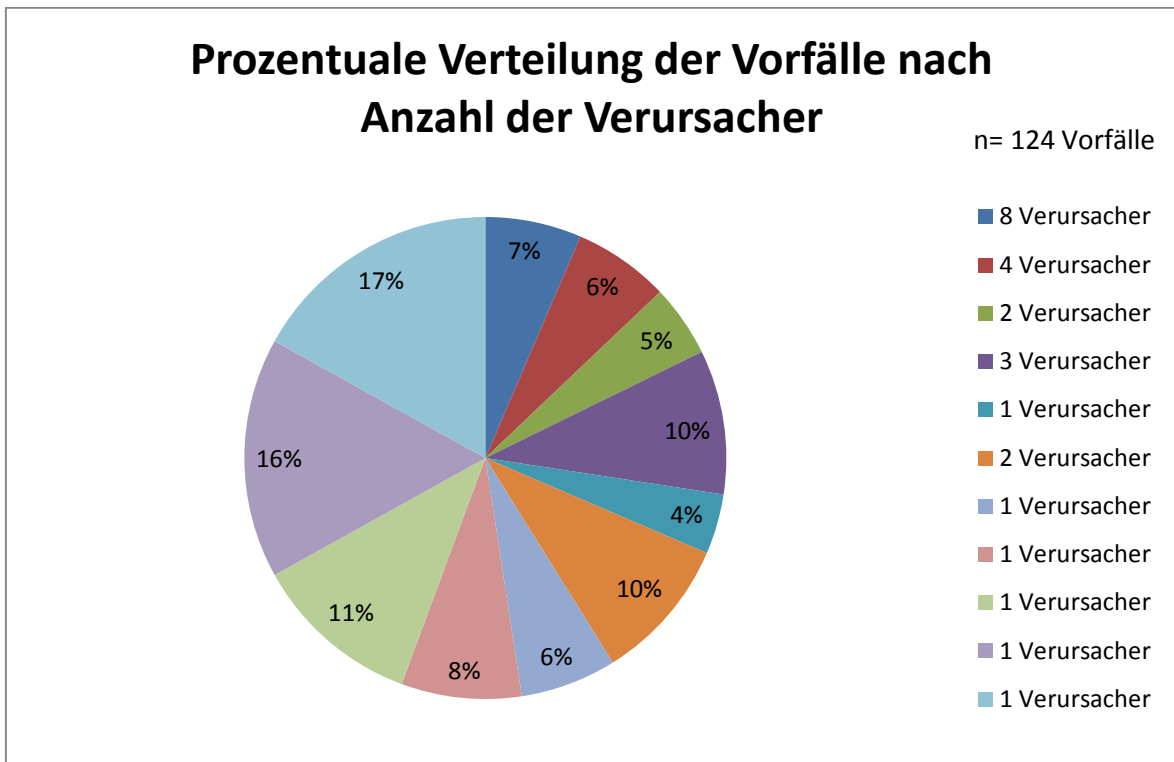
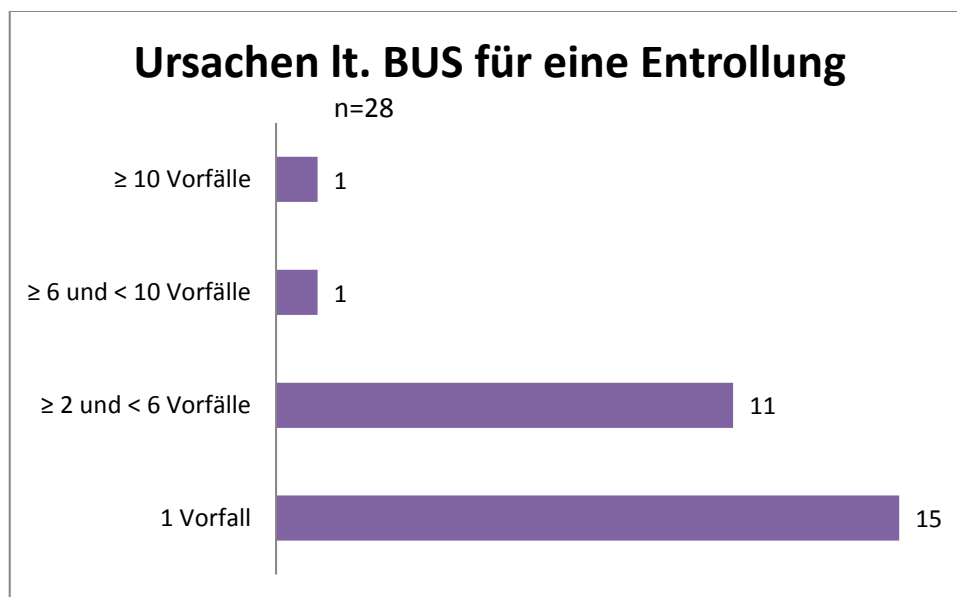


Abb. 3-4: Prozentuale Verteilung der Vorfälle nach Anzahl der Verursacher

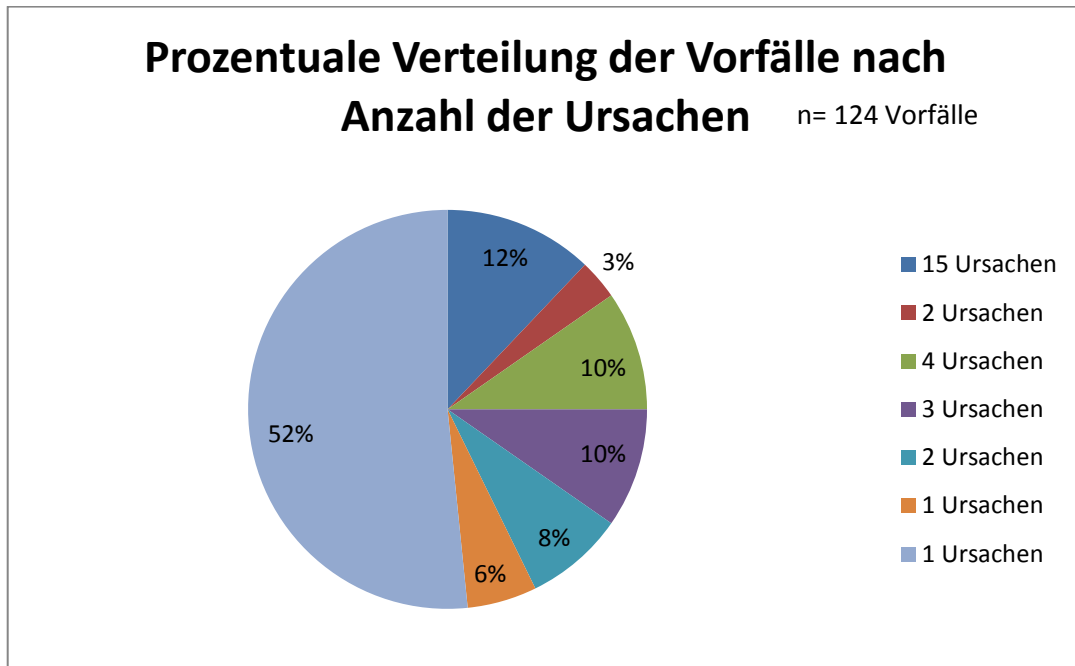
### 3.1.3. Ursachen

Neben den Verursachern und der Anzahl der verursachten Ereignisse ist eine Analyse der Ursachen von Interesse. Aus Abb. 3-5 lässt sich ableiten, dass 15 verschiedene Ursachen nur einmal zum Entrollen von Fahrzeugen geführt haben. Elf Ursachen verursachten zwischen zwei und fünf Vorfälle. Eine Ursache verursachte zwischen sechs und zehn Vorfälle und eine Ursache ist für mehr als zehn Vorfälle, konkret 64, verantwortlich.



**Abb. 3-5: Ursachen lt. BU S für Entrollen**

Vergleicht man wiederum die Gesamtzahl der Vorfälle mit den jeweiligen Ursachen, so zeigt sich in Abb. 3-6, dass eine Ursache für 52 % der Vorfälle verantwortlich ist. Auf der anderen Seite ist ersichtlich, dass 15 verschiedene Ursachen zwölf Prozent der Vorfälle verursacht haben.



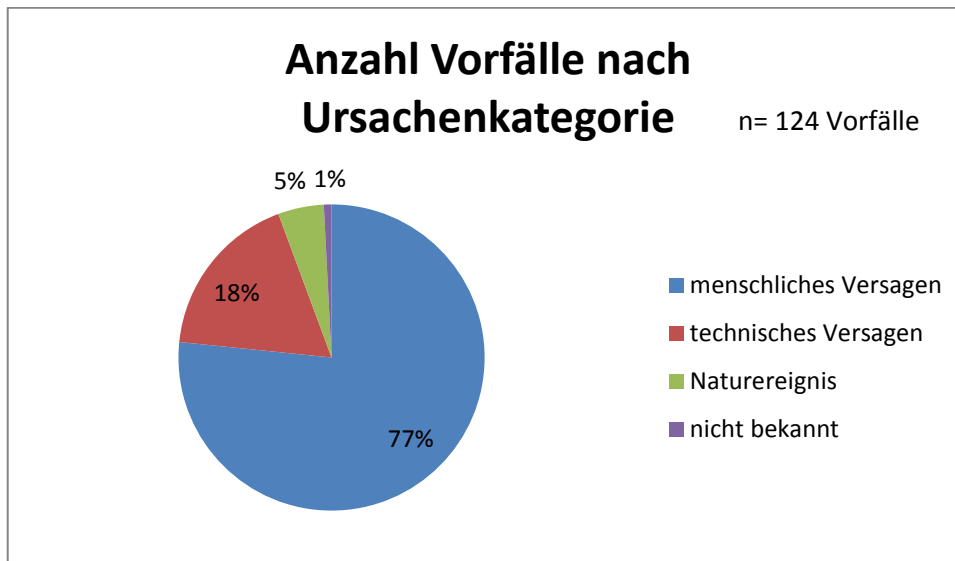
**Abb. 3-6: Prozentuale Verteilung der Vorfälle nach Anzahl der Ursachen**

Die Ursachen sind in Tab. 3-1 aufgegliedert nach „menschliches Versagen“, „technisches Versagen“, „Naturereignis“ und „nicht bekannt“. Zusätzlich ist dargestellt, wieviel Vorfälle aufgrund der jeweiligen Versagenskategorie passiert sind.

**Tab. 3-1: Einteilung der Ursachen und die entsprechende Anzahl an Vorfällen**

	Anzahl Ursachen	Anzahl Vorfälle
menschliches Versagen	15	95
technisches Versagen	10	22
Naturereignis	2	6
nicht bekannt	1	1
<b>Summe</b>		124

Abb. 3-7 stellt die Anzahl der Vorfälle nach Ursachenkategorie dar. Es ist ersichtlich, dass für 77 % der Vorfälle menschliches Versagen für Entrollte Fahrzeuge verantwortlich ist. Technisches Versagen folgt mit 18 %, Naturereignisse sind in fünf Prozent der Fälle sowie für einen Fall ist keine Ursachenkategorie zutreffend.



**Abb. 3-7: Anzahl der Vorfälle nach Ursachenkategorie**

#### 3.1.4. Schlussfolgerungen

Es wurden für die Untersuchung 124 Vorfälle in den Jahren zwischen 2010 und 2017 als Datengrundlage herangezogen. Die Aufbereitung der Daten zeigt, dass es pro Jahr in etwa die gleiche Anzahl an Vorfällen mit entrollten Fahrzeugen gibt. Diese verteilen sich auf 57 Betriebsstellen in Österreich. Bei den Verursachern der 124 Vorfälle lassen sich 25 Verursacher auflisten. Im Zuge der Analyse wurden 28 verschiedene Ursachen festgestellt. Diese wurden in vier Hauptkategorien eingeteilt – technisches Versagen, menschliches Versagen, Naturereignis und nicht bekannt. Insgesamt zeigt sich, dass 77 % der Vorfälle aufgrund menschlichen Versagens hervorgerufen wurden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Großteil der Vorfälle dort aufgetreten ist, wo es eine große Anzahl an Fahrzeugbewegungen gibt, diese maßgeblich von sieben Verursachern verursacht wurden und sich aufgrund von menschlichen Versagen ereignet haben.

### 3.2. Konkrete Beispiele

Im folgenden Abschnitt 3.2 werden konkrete Beispiele von entrollten Fahrzeugen beschrieben. Als Grundlage dienen die vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie veröffentlichten Berichte. Dabei werden Fälle mit entrollten Wagen, sowohl des Güter- wie auch des Personenverkehrs, zur Darstellung herangezogen. Zur übersichtlicheren Darstellung wurde eine Matrix erstellt, in der die vorhandenen Informationen zur besseren Vergleichbarkeit angeführt sind. Leere Felder bedeuten, dass

es dafür keine zugänglichen Informationen gibt. Die Vorfälle sind chronologisch geordnet, beginnend vom frühesten bis zum aktuelleren Fall.

### 3.2.1. Beispiel vom 29. Juli 2013 – Zusammenprall entrollter Wagen und PKW auf einer Eisenbahnkreuzung in Österreich (vgl. [20])

<b>Datum</b>	29.07.2013		
<b>Uhrzeit - Entrollbeginn</b>	09:58		
<b>Uhrzeit - Entrollende</b>			
<b>Betriebsstelle - Entrollbeginn</b>			
<b>Betriebsstelle - Entrollende</b>			
<b>Strecke - Beginn</b>			
<b>Fahrtverlauf - Beginn</b>	13,925	km	
<b>Strecke - Ende</b>			
<b>Fahrtverlauf - Ende</b>	11,852	km	
<b>Länge der zurückgelegten Fahrtstrecke</b>	2,073	km	
<b>Wagenanzahl</b>	1		
<b>Wagengattung</b>	Ks		
<b>Wagengewicht</b>	29,7	t	
<b>Gradiente Entrollbeginn</b>	9	‰	
<b>Gradiente Anschluss Entrollbeginn</b>		‰	
<b>Geschwindigkeit bei Entrollende</b>	33	km/h	bei Kollision
<b>Gesichert?</b>	ja		
wenn gesichert, wie?	zwei sperrbare Klemmkeile am rechten Schienenstrang - nicht versperrt		
<b>Grund für Entrollen</b>	weiterer Wagen sollte angekoppelt werden - Luftbremskopf wurde nicht verwendet - bei Pufferberührung setzte sich Wagen in Bewegung		
<b>Art der Aufhaltung</b>	Zusammenstoß mit einem PKW		
<b>Meldung des Vorfalles</b>			

### 3.2.2. Beispiel vom 19. Oktober 2016 – Kollision entrollter Wagen mit Z 7012 im Bf Wieselburg an der Erlauf (vgl. [21])

<b>Datum</b>	19.10.2016				
<b>Uhrzeit - Entrollbeginn</b>	11:35				
<b>Uhrzeit - Entrollende</b>	12:04				
<b>Betriebsstelle - Entrollbeginn</b>	Randegg				
<b>Betriebsstelle - Entrollende</b>	Wieselburg/Erlauf				
<b>Strecke - Beginn</b>	15801				
<b>Fahrtverlauf - Beginn</b>	19,96	km			
<b>Strecke - Ende</b>	15501				
<b>Fahrtverlauf - Ende</b>	10,7	km			
<b>Länge der zurückgelegten Fahrtstrecke</b>	ca. 20	km			
<b>Wagenanzahl</b>	5				
<b>Wagengattung</b>	Transportwagen	Snns	Rnoos-zu	Rnooss-zu	Rnoos-z
<b>Wagengewicht</b>	200	t			
<b>Gradiente Entrollbeginn</b>	5	‰			
<b>Gradiente Anschluss Entrollbeginn</b>	17	‰			
<b>Geschwindigkeit bei Entrollende</b>		km/h			
<b>Gesichert?</b>					
wenn gesichert, wie?					
<b>Grund für Entrollen</b>	nicht ausreichende Sicherung während Verscharbeiten				
<b>Art der Aufhaltung</b>	Zusammenstoß mit stehenden Personenzug				
<b>Meldung des Vorfalls</b>	keine Meldung an den Fahrdienstleiter				

### 3.2.3. Beispiel vom 29. November 2016 – Kollision Z 25055 mit entrollten Wagen im Bf Wien Hütteldorf (vgl. [22])

<b>Datum</b>	29.11.2016		
<b>Uhrzeit - Entrollbeginn</b>	18:49		
<b>Uhrzeit - Entrollende</b>	18:53		
<b>Betriebsstelle - Entrollbeginn</b>	Hütteldorf		
<b>Betriebsstelle - Entrollende</b>	Hütteldorf		
<b>Strecke - Beginn</b>			
<b>Fahrtverlauf - Beginn</b>			km
<b>Strecke - Ende</b>	12201		
<b>Fahrtverlauf - Ende</b>	0,6	km	
<b>Länge der zurückgelegten Fahrtstrecke</b>		km	
<b>Wagenanzahl</b>	5		
<b>Wagengattung</b>			
<b>Wagengewicht</b>	424	t	
<b>Gradiente Entrollbeginn</b>	zw. 2,5 und 5	‰	
<b>Gradiente Anschluss Entrollbeginn</b>		‰	
<b>Geschwindigkeit bei Entrollende</b>		km/h	
<b>Gesichert?</b>	ja		
wenn gesichert, wie?	Handbremse und sperrbarem Hemmschuh		
<b>Grund für Entrollen</b>			
<b>Art der Aufhaltung</b>	Zusammenstoß mit einem Personenzug 4124		
<b>Meldung des Vorfalls</b>	Fdl meldete eine Rotausleuchtung		

Bei diesem Untersuchungsbericht handelt es sich um den 2. veröffentlichten Zwischen-Untersuchungsbericht.

### 3.2.4. Beispiel vom 9. März 2017 – Entrollen einer Wagengruppe vom Bf Bad Vöslau (vgl. [23])

<b>Datum</b>	09.03.2017		
<b>Uhrzeit - Entrollbeginn</b>	05:09		
<b>Uhrzeit - Entrollende</b>	05:58	Streckensperre bis zu diesem Zeitpunkt	
<b>Betriebsstelle - Entrollbeginn</b>	Bad Vöslau		
<b>Betriebsstelle - Entrollende</b>			
<b>Strecke - Beginn</b>	10501		
<b>Fahrtverlauf - Beginn</b>	30,051	km	
<b>Strecke - Ende</b>	10501		
<b>Fahrtverlauf - Ende</b>	17,051	km	
<b>Länge der zurückgelegten Fahrtstrecke</b>	13	km	
<b>Wagenanzahl</b>	19		
<b>Wagengattung</b>	Easu		
<b>Wagengewicht</b>	1407	t	
<b>Gradiente Entrollbeginn</b>	4,82	‰	
<b>Gradiente Anschluss Entrollbeginn</b>		‰	
<b>Geschwindigkeit bei Entrollende</b>	0	km/h	
<b>Gesichert?</b>	ja		
wenn gesichert, wie?	4 Wagen wurden mit bodenbedienbaren Handbremsen eingebremst und mittels Druckluft gesichert		
<b>Grund für Entrollen</b>	Handbremse		
<b>Art der Aufhaltung</b>	selbsttätiger Stillstand		
<b>Meldung des Vorfalls</b>			

Bei diesem Untersuchungsbericht handelt es sich um einen vorläufig veröffentlichten Zwischen-Untersuchungsbericht.

### 3.2.5. Beispiel vom 30. Oktober 2017 – Kollision Z 5968 mit entrolltem Personenzug im Bf Haiding (vgl. [24])

<b>Datum</b>	30.10.2017	
<b>Uhrzeit - Entrollbeginn</b>	11:15	
<b>Uhrzeit - Entrollende</b>	11:38	
<b>Betriebsstelle - Entrollbeginn</b>	Bf Neumarkt-Kallham	
<b>Betriebsstelle - Entrollende</b>	Bf Haiding	
<b>Strecke - Beginn</b>	20501	
<b>Fahrtverlauf - Beginn</b>	29,7	km
<b>Strecke - Ende</b>	20501	
<b>Fahrtverlauf - Ende</b>	7,422	km
<b>Länge der zurückgelegten Fahrtstrecke</b>	22,30	km
<b>Wagenanzahl</b>	5 + Tfiz	
<b>Wagengattung</b>	Inlandsreisezugwagen + 1144	
<b>Wagengewicht</b>	301	t
<b>Gradiente Entrollbeginn</b>	3,661	‰
<b>Gradiente Anschluss Entrollbeginn</b>		‰
<b>Geschwindigkeit bei Entrollende</b>		km/h
<b>Gesichert?</b>		
wenn gesichert, wie?		
<b>Grund für Entrollen</b>		
<b>Art der Aufhaltung</b>	Kollision mit stehenden Triebwagenzug	
<b>Meldung des Vorfalls</b>		

Bei diesem Untersuchungsbericht handelt es sich um einen vorläufig veröffentlichten Zwischen-Untersuchungsbericht.

### 3.3. Meldekette

Es gibt derzeit keine generellen Handlungsweisen bei Bekanntwerden des Entrollens von Fahrzeugen. In Interviews mit Betriebsmitarbeitern wurde festgestellt, dass individuell im Einzelfall von den beteiligten Mitarbeitern Maßnahmen gesetzt werden.

Grundsätzlich werden entrollte Wagen ähnlich wie eine Zugfahrt behandelt.

Das bedeutet:

- Verständigung der benachbarten Betriebsstellen
- Sicherung von Eisenbahnkreuzungen (Schließauftrag)
- Herstellen des Flankenschutzes (z.B.: Haltstellen von Signalen, Weichen in abweisende Stellung bringen, ...)



- Verständigung von Zügen im Bereich über Zugfunk
- Verständigung von Reisenden auf betroffenen Bahnsteigen
- Verständigung des ÖBB-Notfallkoordinators
- Verständigung von Rettungsdiensten (Feuerwehr, Polizei, Rettung)
- Vereinbarung von möglichen Maßnahmen mit Nachbarbetriebsstellen

Beispiele für mögliche Maßnahmen zur Aufhaltung entrollter Fahrzeuge:

- in Nebengleise lenken
- auf Stumpfgleise mit Prellbock lenken
- auf abgestellte Fahrzeuge auffahren lassen
- auf ein Streckengleis mit Gegensteigung (wenn vorhanden) lenken
- mit Hemmschuhen abbremsen

Diese Maßnahmenfestlegung hängt in hohem Maße von der genauen Kenntnis örtlicher Besonderheiten ab und ob Mitarbeiter vor Ort zur Verfügung stehen (z.B.: um Hemmschuhe aufzulegen).

Bei Eintreten eines Notfalls ist das Ziel die sichere und rasche Herstellung des Regelbetriebes zur Erfüllung der Kundenanforderungen – eine Herausforderung für das Betriebs- und Notfallmanagement.

Im Notfall müssen Informationen über lokale Rahmenbedingungen am Vorfalort aktuell und zentral zur Verfügung stehen. In den Betriebsführungszentralen werden Notfallkoordinatoren eingesetzt. Unterstützt werden die Notfallkoordinatoren dabei durch den in der Verkehrsleitzentrale (VLZ) positionierten Zentralen Informationskoordinator (ZIKO) [25].

### **3.3.1. ÖBB-Notfalleitstelle**

Die ÖBB-Notfalleitstelle ist die regionale Informations-, Koordinations- und Kommunikationsstelle und ist in der jeweiligen Betriebsführungszentrale integriert. Bei Vorfällen nimmt die ÖBB-Notfalleitstelle die Erstmeldungen entgegen und veranlasst Sofortmaßnahmen (bspw. Anhalten von Fahrten). Weiters führt die ÖBB-Notfalleitstelle die erforderlichen Alarmierungen und Verständigungen durch und gibt den örtlich zuständigen Mitarbeiter (ggf. ÖBB-EL) den internen/externen Hilfs-/Einsatzkräften bekannt. Folgende Aufgaben obliegen der ÖBB-Notfalleitstelle:

- Übernahme der Prozessführerschaft Notfallmanagement | Schiene
- Erfassung eingehender Meldungen über Vor-/Notfälle
- Ansprechpartner und erste Anlaufstelle für Hilfs-/Einsatzkräfte

- Veranlassung bzw. Einleitung von Maßnahmen im Rahmen der überörtlichen Notfallkoordination
- Veranlassung erforderliche Schutzmaßnahmen
- Durchführung von Alarmierungen und Verständigungen
- Alarmierung und Entsendung des ÖBB-Einsatzleiters
- Beauftragung zur Einrichtung einer örtlichen Notfallkoordination
- Einsatzfreigabe bzw. eingeschränkte Einsatzfreigabe zum Einsatz im Gleisbereich
- Unterstützung der örtlichen Notfallkoordination
- Setzung von Prioritäten bei multiplen Vorfällen (Gleichzeitigkeit von Vorfällen)
- Dokumentation von Vorfällen, Fehlern und Beanstandungen
- Mitwirkung an der Beweissicherung (bspw. Sprachspeicher bzw. Triebfahrzeugfahrdaten sichern lassen)

Ergänzende Beschreibung (vgl. [26]):

Der Notfallkoordinator ist zuständig für die Bearbeitung der Erstmeldung, also Feststellung des Schadensausmaßes, Klassifizierung des Vorfalls und die genaue Lokalisierung des Vorfalles. Abhängig von diesen Parametern muss der Notfallkoordinator die Alarmierung von Einsatzkräften (Blaulichtorganisationen), Anforderung eines ÖBB-Einsatzleiters und ggf. die Anforderungen interner Hilfskräfte (z.B. Hilfskran zur Bergung von entgleistem Wagenmaterial) durchführen. Der Notfallkoordinator ist auch zuständig für die Feststellung, ob bei einem Vorfall Gefahrgut involviert ist.

Es wurde das Unterstützungssystem Rail Emergency Management (REM) entwickelt, um diese Aufgaben zentral erbringen zu können.

Das System ermöglicht dem Notfallkoordinator, rasch den Vorfallesort und die Zuständigkeiten (welche/r FdI, Feuerwehr, Rettung, Oberbaumitarbeiter, ...) zu bestimmen. Herzstück von REM ist die elektronische Notfall-Arbeits-Checkliste. Die in Kapitel unterteilte Checkliste führt den Notfallkoordinator durch den Notfallmanagementprozess. Jedes Kapitel repräsentiert einen Arbeitsschritt im Prozess und kann entweder durch einen oder mehrere Mitarbeiter gleichzeitig bearbeitet werden.

In jedem Kapitel werden automatisch die zur Bearbeitung notwendigen Informationen bereitgestellt. Für die Verortung von Vorfällen ist ein GIS (Geografisches Informationssystem) integriert, das dem Notfallkoordinator wichtige Daten – z.B.

Infrastrukturdaten, Umgebungsdaten (z.B.: Straßen) – über einen Vorfallsbereich präsentiert.

Auf Knopfdruck können Zuglaufinformationen abgefragt werden, um zum Beispiel zu bestimmen, ob Gefahrgut im Vorfallsbereich zu erwarten ist. In diesem Fall werden automatisch die entsprechenden RID-Gefahrgutdaten ermittelt und dem Notfallkoordinator eine ausführliche Beschreibung (Gefährdungspotenzial, empfohlene Maßnahmen, ...) angezeigt.

Die Alarmierung und Verständigung wird ebenfalls automatisch unterstützt. Das System errechnet anhand des Zeitpunktes, des Vorfalorts und der Vorfallsart automatisch die jeweils zu alarmierenden bzw. zu informierenden Organisationseinheiten und listet die entsprechenden Kontaktinformationen (Name und Kontaktmöglichkeit der jeweils diensthabenden Personen) dem Notfallkoordinator auf. In weiterer Folge kann dieser bestimmen, über welche Kommunikationsart Kontakt aufgenommen werden soll, wobei das System pro Kontakt die verfügbaren Kontaktarten auflistet. Jede Alarmierung bzw. Verständigung wird vom System nicht nur protokolliert, sondern auch überwacht. Über eine leicht ablesbare Farbcodierung wird der Notfallkoordinator über den Alarmierungsstatus (erfolgreich/nicht erfolgreich/Kommunikation noch laufend) jeder Alarmierung/Verständigung informiert. Als Ergänzung kann die Verständigung von ganzen Gruppen auf Knopfdruck ausgelöst werden – zum Beispiel zur Einberufung von Krisenstäben.

## 4. FAHRDYNAMISCHE MODELLIERUNG

Mit Hilfe von fahrdynamischen Überlegungen wird einerseits untersucht, wie ein Entrollen eines Wagens oder einer Wagengruppe überhaupt möglich ist, und andererseits, wie schnell entrollte Wagen unter verschiedenen Bedingungen Geschwindigkeit aufnehmen können.

### 4.1. Wie ist Entrollen möglich?

Grundsätzlich ist ein Entrollen möglich, wenn beim Fahrzeug alle fahrzeugseitigen Widerstände, die beim Stillstand wirken, überwunden werden. In Abb. 4-1 ist ein Überblick über die fahrzeugabhängigen Widerstände dargestellt. Im Stillstand sind die wirkenden fahrzeugseitigen Widerstände der Anfahrwiderstand und der Bremswiderstand, der durch die angezogene Bremse beim Absichern des Wagens oder durch Anbringung von Hemmschuhen verursacht wird. Die Überwindung kann durch die Längsneigung des Gleises, Windeinwirkung – sowohl durch natürliche Windströmungen, als auch durch Luftströmungen durch die Vorbeifahrt eines anderen Fahrzeugs – und Anprall eines anderen Schienenfahrzeugs verursacht werden. Auch eine Kombination dieser Einwirkungen ist möglich. Für die Windeinwirkung ist der fahrzeugabhängige äußere Luftwiderstand relevant. Für die Modellierung wird von einem abgestellten Einzelwagen ausgegangen. Die verwendeten Formeln sind aber zumeist auch für Wagengruppen gültig. Die Widerstände gegen Entrollen gelten sowohl für Triebfahrzeuge, als auch für abgestellte Wagen ohne Antrieb, da der Antriebssystemwiderstand keine Auswirkung darauf im Stillstand besitzt. Der innere Luftwiderstand wird durch den Luftdurchsatz durch das Fahrzeug bestimmt (z.B. durch Verbrennungsvorgänge, Kühlung oder Klimatisierung). Da die abgestellten Wagen meistens nicht mit Strom versorgt sind und daher solche Systeme, wenn überhaupt vorhanden, nicht in Betrieb sind, wird die Auswirkung des inneren Luftwiderstands hinsichtlich der Auftrittswahrscheinlichkeit von Entrollen als sehr gering angenommen und nicht weiter betrachtet [27].

Als vergleichbare Größen zwischen den fahrzeugseitigen Widerständen gegen Entrollen und den Einwirkungen auf das abgestellte Fahrzeug, werden Kraftzahlen verwendet. Diese berechnen sich aus der Division der einwirkenden Längskraft und der vertikalen Zuggewichtskraft (siehe (1)). Die Kraftzahl wird in Gleichungen und Berechnungsmodellen als Maßeinheit 1 eingesetzt. Für die Darstellung in Koeffizientendarstellung ist die Einheit Promille (‰) zu verwenden [27].

$$Kraftzahl = \frac{Tangentialkraft}{Normalkraft} \quad (1)$$

In den folgenden Unterkapiteln werden die Kraftzahlen der einzelnen Widerstände und Einwirkungen berechnet und danach in verschiedenen Szenarien miteinander kombiniert und verglichen. Im ersten Unterkapitel werden die wichtigsten Anforderungen hinsichtlich der Regelungen für das Abstellen und Absichern von Schienenfahrzeugen bei den ÖBB zusammengefasst.

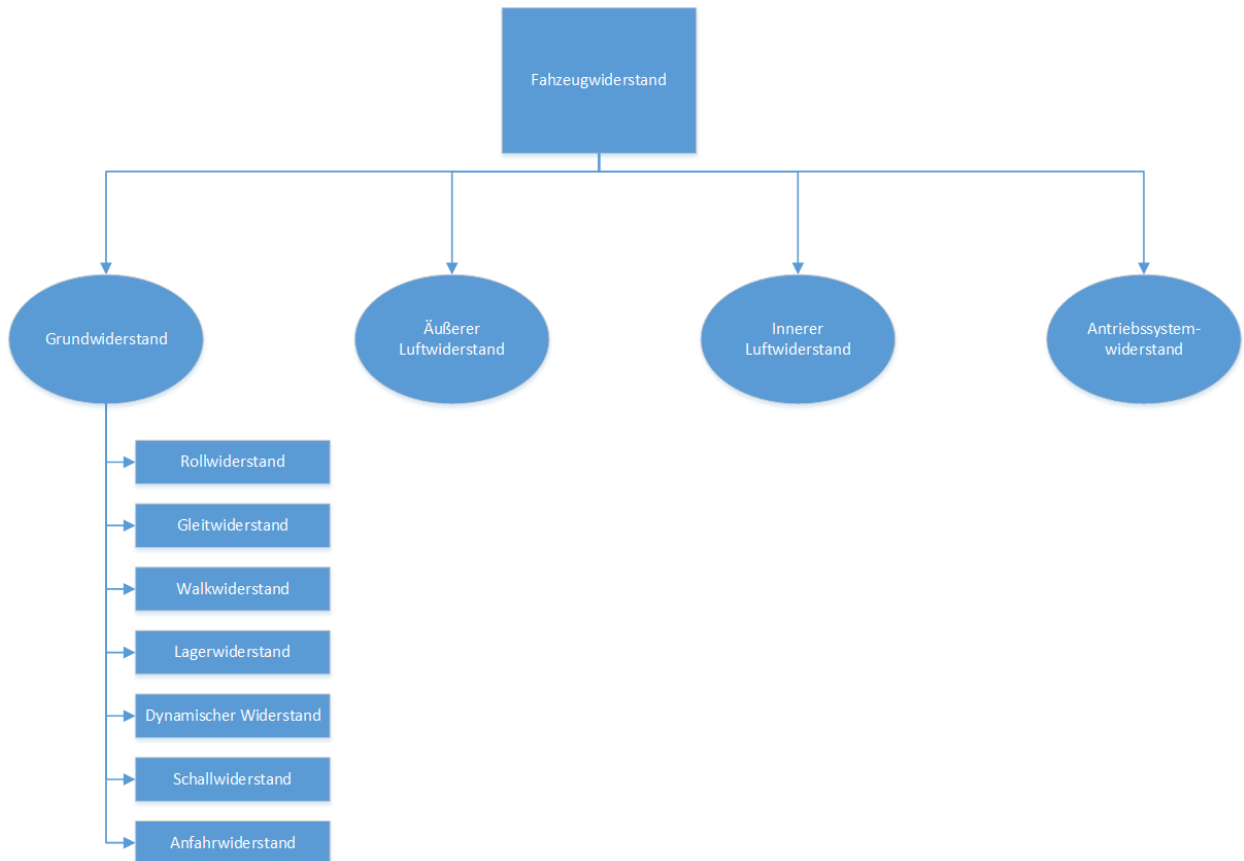


Abb. 4-1: Überblick über fahrzeugeitig wirkende Widerstände (vgl. [27])

#### 4.1.1. Regelungen für das Abstellen und Absichern bei den ÖBB

In der ÖBB-Richtlinie 30 Dienstvorschrift 01 [28] (ehemals Betriebsvorschrift V3) ist im Kapitel Vershubdienst auch das Sichern stillstehender Fahrzeuge geregelt. Allgemein muss für den Vershub die Luftbremse verwendet werden (§17). Aus der Bedingung, dass 1/5 der Wagenachsen gebremst sein müssen und die Achsen des Vershubtriebfahrzeugs auch als gebremste Achsen zählen, müssen die Druckluftleitungen der verschobenen Wagengruppe nicht zwingend verbunden sein.

Das Sichern von stillstehenden Fahrzeugen ist im Paragraf 18 geregelt. Bei einer Wagengruppe, die aus mindestens fünf gebremsten Wagen besteht, darf die

Druckluftbremse für das Abstellen für maximal eine Stunde verwendet werden, sofern die Wagengruppe mit einer Vollbremsung<sup>1</sup> eingebremst wurde. Falls diese Bedingung nicht erfüllt ist, muss der Wagen bzw. die Wagengruppe mit Handbremsen oder Hemmschuhen abgesichert werden. Die Ermittlung der erforderlichen Absicherungsmaßnahmen kann mit einer genauen Berechnung oder nach vereinfachten Regeln erfolgen. Bei der genauen Berechnung werden in Abhängigkeit der Längsneigung eine Mindestanzahl an Festhaltebrems Hundertstel (Fbh) gefordert (siehe Tab. 4-1). Die Fbh ergeben sich nach (2). Das Festhaltebremsgewicht (Fbg) von Hemmschuhen wird gleich dem Achsgewicht angenommen, an der der Hemmschuh angebracht wurde. Das Fbg einer Handbremse muss als Aufschrift am Wagen angeschrieben sein. Die Handbremse wird im Unterkapitel 4.1.3 genauer erläutert. Das vereinfachte Verfahren schreibt vor, dass bei einer Längsneigung bis 5 ‰ für je 300 m Länge der zu sichernden Wagengruppe je zwei Hemmschuhe Richtung Gefälle und Richtung Steigung zu verwenden sind. Ab 2,5 ‰ kann die Sicherung Richtung Steigung entfallen. Alternativ dazu können zwei Handbremsen verwendet werden. Bis 10 ‰ muss je sechs Achsen und bis 15 ‰ muss je vier Achsen ein Hemmschuh (sperrbarer Hemmschuh) Richtung Gefälle verwendet werden. Als zusätzliche Regelung, müssen bei Wagen bzw. Wagengruppen, die ohne Druckluftbremse verschoben werden, Hemmschuhe (sperrbare Hemmschuhe) zur Absicherung verwendet werden. Bei Verwendung der Druckluftbremse während des Verschubs, darf mit Handbremsen gesichert werden, sofern die Wagen mit einer Vollbremsung eingebremst wurden. Nach Anziehen der Handbremse ist die Druckluftbremse zu lösen und der angelegte Zustand der Handbremse zu prüfen.

**Tab. 4-1: benötigte Festhaltebrems Hundertstel in Abhängigkeit der Längsneigung**

von Längsneigung [‰]	bis Längsneigung [‰]	Fbh [%]
0	5	2
5	10	5
10	15	7
15	20	10
20	25	12
25	30	14
30	35	16

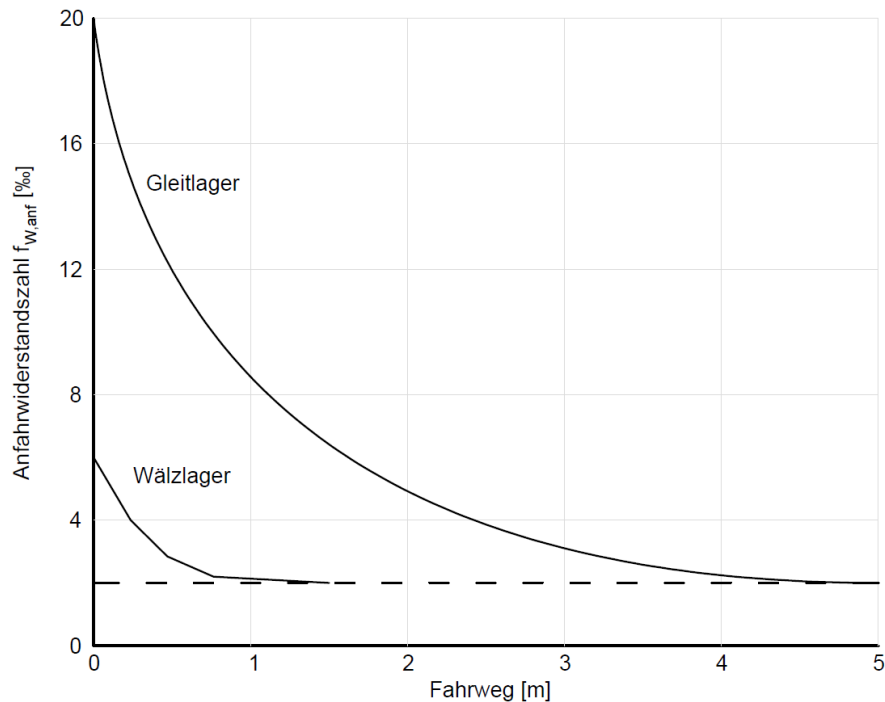
<sup>1</sup> Unter einer Vollbremsung wird das Absenken des Luftdruckes in der Hauptluftleitung auf 3,5 bar verstanden. Dies entspricht einer Druckabsenkung von 1,5 bar. Mit dieser Maßnahme wird die maximale Bremskraft in Abhängigkeit des Beladungszustands erzielt [52].

35	40	19
40	45	21

$$\text{Festhaltebremshundertstel} = \frac{\text{Festhaltebremsgewicht}}{\text{Gesamtgewicht}} \cdot 100 \quad (2)$$

#### 4.1.2. Anfahrwiderstand

Der Anfahrwiderstand ist der Rollwiderstand, der im Moment des Bewegungsbeginns herrscht. Die Werte hängen stark mit der Lagerungsart der Achse zusammen. Es wird zwischen Gleitlagern und Wälzlagern unterschieden. Bei Gleitlagern muss der Widerstand des an der Lagerschale haftenden Achsschenkels überwunden werden. Bei Wälzlagern muss der Widerstand des am Lagerring haftenden Wälzkörpers überwunden werden. Mit der mit der Bewegung einsetzenden Drehbewegung kommt es zu einer Förderung von Schmiermittel in die Kontaktfläche, sodass nach kurzer Fahrstrecke bereits normale Lagerwiderstandswerte, die auch während der Fahrt auftreten, erreicht werden. Gleitlager weisen einen wesentlich höheren Anfahrwiderstand auf als Wälzlager (siehe Abb. 4-2). Eisenbahnfahrzeuge sind fast ausschließlich mit Wälzlagern ausgestattet. Dies begünstigt zwar das Anfahrverhalten von langen Güterzügen im normalen Betrieb, verringert aber auch den Widerstand gegen Entrollen. In der Theorie beträgt somit die Anfahrwiderstandszahl mindestens 6 ‰ [27].



**Abb. 4-2: Verlauf der Anfahrwiderstandszahl auf den ersten zurückgelegten Metern nach dem Stillstand (vgl. [27])**

Neben der Lagerungsart hat auch die Außentemperatur einen großen Einfluss auf den Anfahrwiderstand. Bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt erhöht sich der Anfahrwiderstand beträchtlich. Zusätzlich kann es zu einem Festfrieren der Radsätze am Gleis oder von Bremsklötzen am Radreifen bzw. an den Bremsbelägen kommen. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass bei tiefen Temperaturen (vor allem unterhalb des Gefrierpunkts) die Eintrittswahrscheinlichkeit des Entrollens sehr gering ist.

Der Anfahrwiderstand wird bei den Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) für die Berechnung der Anfahrrenzmasse<sup>2</sup> verwendet. Die Forderung ist, dass sich der Zug an jedem Punkt der Strecke nach einem außerplanmäßigen Halt wieder in Bewegung setzen können muss. Dazu gibt es bei mehreren EVUs unterschiedliche Ansätze und Annahmen. Bei den Berechnungen wird die Längsneigung ( $i$ ) und manchmal die Bogenwiderstandszahl ( $f_{b0}$ ) berücksichtigt. Bei der ehemaligen Deutschen Reichsbahn (DR) wurde die Anfahrwiderstandszahl  $f_{W,anf}$  wie folgt berechnet [27]:

$$f_{W,anf} = f_{W,anf,0} + k_1 \cdot i \quad (3)$$

$f_{W,anf,0}$  ... Anfahrwiderstandszahl des Zuges in der Ebene ( $i = 0\text{‰}$ ),  $f_{W,anf,0} = 0,006$  (6‰)

$k_1$  ... Anstiegsfaktor,  $k_1 = 0,3$

<sup>2</sup> Die Anfahrrenzmasse stellt den Grenzwert der Masse des Zuges dar, bei welcher sich der Zug gerade noch vom Stillstand in Bewegung setzen kann.



Bei der Société nationale des chemins de fer français (SNCF) wird folgende Formel zur Berechnung der Anfahrwiderstandszahl verwendet [27]:

$$(f_{W,anf} + i) = k_2 \cdot (i + f_{W,0}) \quad (4)$$

$k_2$  ... Anstiegsfaktor ( $k_2 = 1,225$ )

$f_{W,0}$  ... Grundwiderstandszahl des Zuges,  $f_{W,0} = 0,0022$  (2,2‰)

Bei der British Rail (BR) wird die Anfahrwiderstandszahl mit 0,0075 (7,5‰) angenommen.

Bei der Deutschen Bahn AG (DB AG) wird der Anfahrwiderstand wie folgt berechnet [27]:

$$f_{W,anf} = \frac{a_{anf}}{g} \cdot \rho \quad (5)$$

$a_{anf}$  ... Anfangsbeschleunigung (Reisezüge:  $a_{anf} = 0,2 \text{ m/s}^2$ , Güterzüge:  $a_{anf} = 0,1 \text{ m/s}^2$ )

$\rho$  ... Massefaktor ( $\rho = 1,06$ )

Bei den ÖBB wird die Anfahrwiderstandszahl mit 0,003 (3 ‰) angenommen [29]. Die Ergebnisse der Berechnungen für die verschiedenen Anfahrwiderstände sind in Tab. 4-2 ersichtlich. Zur Modellierung wird ein „worst case“ Szenario angenommen und somit ein Anfahrwiderstand von 3 ‰ gewählt.

**Tab. 4-2: Anfahrwiderstandszahlen nach den Berechnungsmethoden verschiedener EVUs**

	Theorie	DR	SNCF	BR	DB AG	ÖBB
$f_{W,anf}$ [‰]	6	20	12	7,5	10,8	3

#### 4.1.3. Bremskraft – Handbremse

Eine theoretische Bremskraftberechnung einer Handbremse ist im Anhang A dargestellt. Da in der Praxis bei der Bremsauslegung alle Komponenten so aufeinander abgestimmt werden, dass eine gewisse benötigte Abbremsung erreicht wird, ist der Aufbau der Bremssysteme zwar sehr unterschiedlich, aber die endgültige Bremskraft bei jedem System ähnlich [30]. Deshalb wird eine Modellierung mit Theoriewerten für nicht sinnvoll erachtet. Die Bremskraft einer Handbremse kann, sofern das Schienenfahrzeug eine Handbremse besitzt, anhand der Aufschrift des Festhaltebremsgewichts der Handbremse ermittelt werden. Das Bremsgewicht wird erreicht, wenn die Handbremse mit 0,5 kN Handkraft angezogen wurde. Da durch Widerstände im Bremsgestänge und Kantenpressungen der subjektive Widerstand beim Anziehen sehr hoch werden kann, obwohl die Handbremse noch nicht ausreichend angezogen wurde, wird die Handbremse in der Praxis nicht immer mit der vorgesehenen Kraft angezogen. Dies führt zu einer verringerten Bremswirkung. Deshalb wird in den Auswertungen immer die Bremskraft in Abhängigkeit des Bremsstufenfaktors dargestellt. Insbesondere bei Erschütterungen durch Fahrzeuganprall

oder durch Schienenfahrzeugverkehr in der Umgebung können sich die Zwängungen im Gestänge schlagartig lösen. Dies führt unter Umständen dazu, dass sich die Bremswirkung verringert. Güterwagen weisen meist ein Handbremsgewicht zwischen 10 t und 23 t auf. Ein Zusammenhang zwischen der Höhe des Handbremsgewichts und der Achsanzahl der Güterwagen besteht nicht zwingend [30]. Deshalb wird für die Modellierung des „worst case“ Szenarios ein vierachsiger Güterwagen mit einem Handbremsgewicht von 10 t angenommen.

#### **4.1.4. Bremskraft Praxis – Luftdruckbremse**

Für das Abstellen und Absichern einer Wagengruppe ist, wenn mit Handbremsen gesichert wird, eine Vollbremsung durchzuführen. Die dadurch aufgebrachte Bremskraft ist vom Beladungszustand abhängig. Bei Güterwagen gibt es zwei Varianten den Beladungszustand in der Bremskraftaufbringung zu berücksichtigen. Die erste Variante besteht darin, dass ein Laststellungshebel seitlich am Fahrzeug vorhanden ist, der manuell bedient wird. Dabei wird die Laststellung „leer“ und „beladen“ unterschieden. Bei unbekannter Beladung muss immer die Laststellung „leer“ gewählt werden, da sonst die Bremskraft so hoch wird, dass ein Gleiten des Rades auf der Schiene beim Bremsvorgang verursacht werden könnte. Dieser Zustand ist nicht zulässig und unter allen Umständen zu verhindern [29]. Neben dem Schalter befindet sich eine Aufschrift mit dem sogenannten Umstellgewicht. Wenn dieses durch den Beladungszustand überschritten wird, ist der Laststellungshebel auf „beladen“ umzustellen. Durch die Umstellung kommt es zu einer Änderung der Gestängeübersetzung im Bremsgestänge. Bei der Laststellung „beladen“ wird eine wesentlich höhere Bremskraft aufgebracht, um auch im beladenen Zustand eine ausreichende Abbremsung zu erreichen. Die zweite Variante ist eine automatische Lastabbremse (ALB). Dabei existiert ein Druckventil, welches je nach Beladungszustand den Druck im Bremszylinder regelt. Dies kann beliebig viele Regelungsstufen besitzen [30]. Für das Abstellen mit Druckluftbremse für maximal eine Stunde sind die Verluste, die Druckluftverluste zwischen Vorratsluftbehälter und Bremszylinder auftreten können, relevant. Als Annahmen für den Druckluftverlust werden 0,05 bar/min (im Nachfolgenden als Variante eins bzw. vier bezeichnet), 0,01 bar/min (im Nachfolgenden als Variante zwei bzw. fünf bezeichnet) und 0,005 bar/min (im Nachfolgenden als Variante drei bzw. sechs bezeichnet) betrachtet. Dies entspricht einem Druckverlust nach einer Stunde von 3 bar, 0,6 bar und 0,3 bar. Beim System mit ALB ist der Druckverlust möglicherweise höher, weil das Druckventil zwischen Vorratsluftbehälter und Bremszylinder befindet und somit für

zusätzliche Verluste sorgt. Die lineare Abnahme des Druckverlusts stellt nur eine grobe Näherung dar. Diese erscheint aber zur Veranschaulichung der Thematik ausreichend. Der maximale Druck im Bremszylinder bei Güterwagen ist üblicherweise 3,6 bar [27]. Somit kann unter identen Parametern im Bremssystem über den Druckabfall im Bremszylinder nach einer Stunde eine Aussage über die prozentuale Verringerung der Bremskraft getroffen werden. Der Maximaldruck im Bremszylinder kann allerdings nur bei Güterwagen mit manueller Lastumstellung und bei voll beladenen Güterwagen mit ALB vorausgesetzt werden. Die Bremskraftverluste nach einer Stunde sind in der Tab. 4-3 dargestellt.

**Tab. 4-3: Übersicht über Bremskraftverluste aufgrund von Druckluftverlusten in einer Stunde bei Wagen ohne ALB**

	Variante 1	Variante 2	Variante 3
Bremskraftverlust	83,33%	16,67%	8,33%

Bei leeren Güterwagen mit ALB ist der vorhandene Druck im Bremszylinder wesentlich geringer. Die Werte liegen zwischen 1 bar und 1,8 bar. Als niedrigster Wert in den zu Grunde liegenden Unterlagen über Güterwagen wird 1,06 bar angegeben [30]. Somit wird dieser Wert für die Berechnung verwendet. Die Bremskraftverluste nach einer Stunde sind in Tab. 4-4 ersichtlich.

**Tab. 4-4: Übersicht über Bremskraftverluste aufgrund von Druckluftverlusten in einer Stunde bei Wagen mit ALB**

	Variante 4	Variante 5	Variante 6
Bremskraftverlust, beladen	83,33%	16,67%	8,33%
Bremskraftverlust, leer	283%	56,6%	28,3%

Es ist zu erkennen, dass vor allem bei leeren Güterwagen mit ALB ein deutlicher Bremskraftverlust auftreten kann. Die Auswirkung auf den Widerstand gegen Einwirkungen wird im Unterkapitel 4.1.13 diskutiert.

#### 4.1.5. Bremskraft Praxis – Hemmschuh

Hemmschuhe sind neben Handbremsen die zweite Möglichkeit stillstehende Wagen vor dem Entrollen zu sichern. Zusätzlich dienen diese auch zur Aufhaltung von Wagen, die gezielt abgestoßen oder abgerollt werden. Wenn Hemmschuhe zur Absicherung von stillstehenden Fahrzeugen verwendet werden, sind sie möglichst nahe am Rad zu

platzieren. Der Hemmschuh, welcher von den ÖBB verwendet wird, besteht aus vier geschmiedeten Teilen: Hemmschuhsohle, Hemmschuhbock, Griff und Bremskappe. Beim sperrbaren Hemmschuh wird eine Schraube mit einer Lasche verwendet, die eine Manipulation von unbefugten Personen erschwert. Die generelle Geometrie verändert sich nicht. Eine vereinfachte Darstellung der Geometrie ist in Abb. 4-3 dargestellt. Laut Expertenmeinungen ist es nicht möglich, dass durch Längsneigung oder/und Wind der Hemmschuh – sofern dieser ordnungsgemäß appliziert wurde – durch das Schienenfahrzeug überrollt werden kann. Bei Fahrzeuganprall ist diese Gefahr jedoch gegeben. Dieses Szenario wird im Unterkapitel 4.1.12 diskutiert.

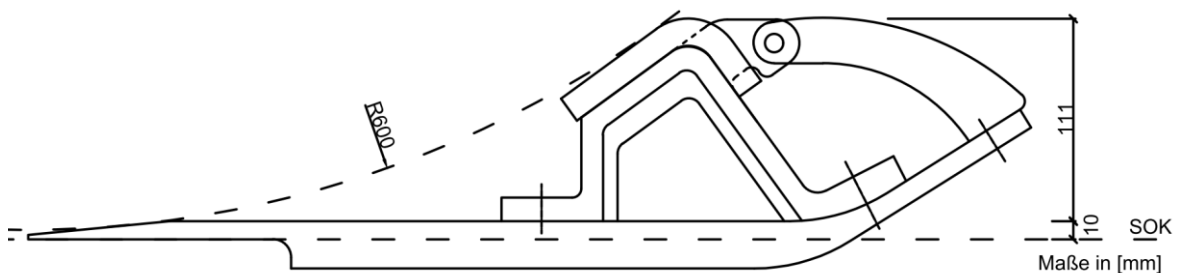


Abb. 4-3: vereinfachte Skizze eines Hemmschuhs der ÖBB (vgl. [31])

#### 4.1.6. Längsneigung

Die Längsneigung kann durch die Neigungskraftzahl  $f_N$  ausgedrückt werden. Die Gewichtskraft eines Wagens auf einer schiefen Ebene wird in zwei Komponenten aufgeteilt. Die Kraft in Längsrichtung  $F_N$  ist der Sinusanteil der Gewichtskraft des Zuges  $G_Z$ , somit ergibt sich die Neigungskraftzahl wie folgt [27]:

$$F_N = G_Z \cdot \sin\alpha \quad (6)$$

$$f_N = \frac{F_N}{G_Z} \quad (7)$$

$$f_N = \sin\alpha \quad (8)$$

Für eine Neigung von maximal 100 ‰, welche im konventionellen Schienenverkehr nicht überschritten wird, besteht Übereinstimmung von  $\sin(\alpha)$  und  $\tan(\alpha)$ :

$$\alpha = \arctan(i) = 0,09997 \quad (9)$$

$$\sin\alpha = 0,0995 \quad (10)$$

$i$  ... Längsneigung des Gleises ( $i=0,1$ )

Somit kann der Zusammenhang von (9) und (10) in (8) eingesetzt werden:

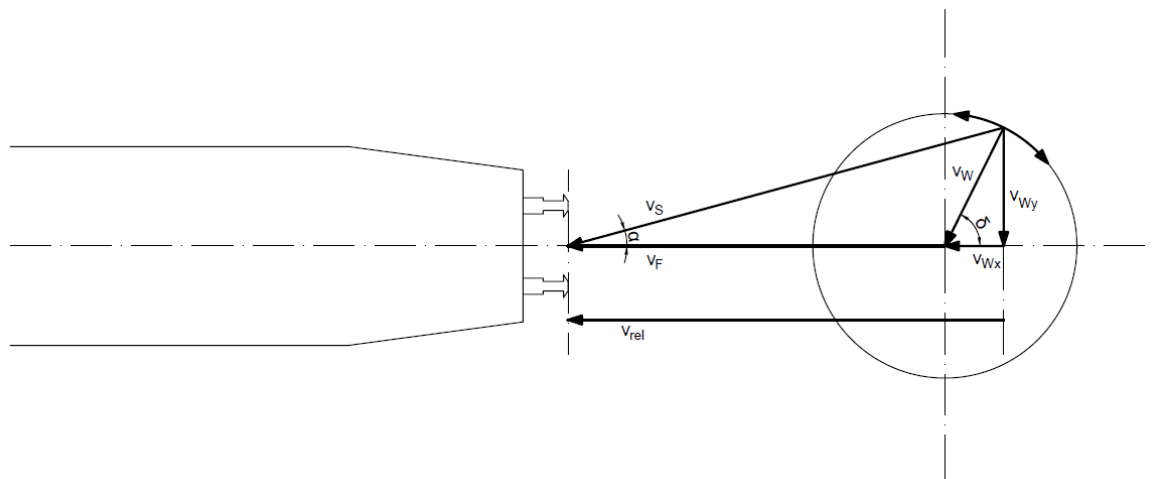
$$f_N = i \quad (11)$$

Die Neigungskraftzahl ist gleich der Längsneigung des Gleises. Für Gefälle ist eine negative Längsneigung anzusetzen.

#### 4.1.7. Äußerer Luftwiderstand

Als nächster Einflussparameter auf ein mögliches Verursachen von Entrollen, wird die Windeinwirkung betrachtet. Die generell wirkenden Vektorkomponenten bei Windeinwirkung auf ein Fahrzeug sind in Abb. 4-4 dargestellt. Bei der Darstellung werden folgende Abkürzungen verwendet [27]:

- $v_F$ : Fahrgeschwindigkeit, ein Freiheitsgrad
- $v_W$ : Windgeschwindigkeit, zwei Freiheitsgrade
- $\delta$ : Windangriffswinkel, von der Fahrtrichtungsachse gegen den Uhrzeigersinn definiert
- $v_{Wx}$ : Windgeschwindigkeit in Fahrtrichtung
- $v_{Wy}$ : Windgeschwindigkeit  $90^\circ$  zur Fahrtrichtung
- $v_{rel}$ : Relativgeschwindigkeit, die in Fahrtrichtung vorhandene Geschwindigkeit (Addition von  $v_F$  mit  $v_{Wx}$ )
- $v_s$ : Anströmgeschwindigkeit, ergibt sich aus der Addition von  $v_F$  mit  $v_W$
- $\alpha$ : Anströmwinkel, Winkel zwischen Fahrtrichtung und der Richtung der Anströmgeschwindigkeit, von der Fahrtrichtungsachse gegen den Uhrzeigersinn definiert



**Abb. 4-4: wirkende Vektorkomponenten bei Windeinwirkung auf ein Fahrzeug in Bewegung (vgl. [27])**

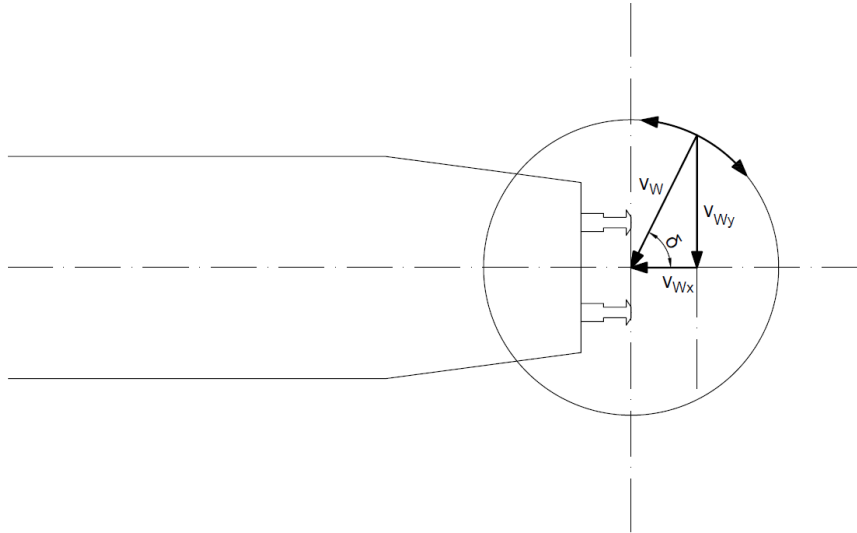
Für die Abschätzung des Einflusses von Wind auf die Erhöhung der Wahrscheinlichkeit eines Entrollvorgangs wird zunächst von einem Einzelfahrzeug, das sich im Stillstand befindet, ausgegangen. Die wirkenden Vektorkomponenten der Windeinwirkung sind in Abb. 4-5 dargestellt. Es ergeben sich dadurch folgende mathematische Beziehungen:

$$v_F = 0$$

$$v_s = v_w$$

$$v_{rel} = v_{wx}$$

$$\alpha = \delta$$



**Abb. 4-5: wirkende Vektorkomponenten bei Windeinwirkung auf ein Fahrzeug im Stillstand (vgl. [27])**

Die Luftwiderstandskraft, die auf ein Fahrzeug wirkt, setzt sich durch folgende Komponenten zusammen [27]:

- Druckkraft an der Fläche, die angeströmt wird
- Sogkraft an der gegenüberliegenden Fläche
- Flächenreibungskraft an der Oberfläche
- Turbulenzkräfte verursacht durch:
  - Untergestell
  - Vorstehende Kanten der Außenwände
  - Dachaufbauten
  - Einbuchtungen
  - Stromabnehmer
  - Offene Wagenkästen (insbesondere leere offene Wagenkästen)
  - Nicht geschlossene Öffnungen

Vollmer führte in seiner Dissertation [32] Modellversuche zur Ermittlung des Luftwiderstandsbeiwerts von Güterwagen durch und entwickelte daraus ein Berechnungsmodell für Einzelwagen und Wagengruppen. Für die Betrachtung hinsichtlich des Einflusses Wind auf das Initiieren von Entrollen, wird ein „worst case“ Szenario betrachtet. Da eine Wagengruppe im Vergleich zur Zunahme des Luftwiderstands einen

deutlich größeren Widerstand gegen Entrollen aufweist, als ein Einzelfahrzeug, wird die Berechnung für einen einzelnen Güterwagen durchgeführt. Eingangparameter in die Berechnung sind die geradzahigen Besselkoeffizienten ( $a_0$  bis  $a_{10}$ ), der Anströmwinkel  $\alpha$ , die Spantquerfläche  $A_{sp}$  in Längsrichtung und die Wagenlänge  $l_w$ . Die Eingangparameter der betrachteten Güterwagen sind im Anhang B in den Tabellen Tab. 9-2, Tab. 9-3, Tab. 9-4 und Tab. 9-5 dargestellt. Die Seitenwindkomponente wird im Luftwiderstand während der Fahrt berücksichtigt, in dem der Druck vom Seitenwind den Spurkranz an die Schienenflanke drückt und so Spurkranzanlauf verursacht. Im Stillstand müsste der Seitenwind so stark sein, um Quergleiten der Lauffläche auf der Schiene zu initiieren, um eine Spurkranzreibung zu erreichen. Selbst wenn dieser Fall eintritt, würde die Reibung als zusätzlicher Anfahrwiderstand wirken. Somit wird der Seitenwindeinfluss im Sinne der „worst case“ Betrachtung nicht berücksichtigt.

Die Luftwiderstandsbeiwerte der Güterwagen in Abhängigkeit vom Anströmwinkel ermitteln sich über die Formeln (12), (13) und (14) [32].

$$c_{Fzg,x} = \sum_i [(l_w \cdot \alpha_{Li} + a_{st/hi}) \cdot \cos(i\alpha)] \quad (12)$$

$$c_{Fzg} = c_{Fzg,x} \quad (13)$$

$$c_w = 10^{-6} \cdot c_{Fzg} \cdot M^2 \cdot \frac{A_{Mod}}{A_{Sp}} \quad (14)$$

$i$  ... Index für die Summe mit den Werten 0,2,4,6,8,10

$\alpha$  ... Anströmwinkel

$l_w$  ... Wagenlänge

$\alpha_L/\alpha_{st/h}$  ... geradzahige Besselkoeffizienten (siehe Anhang)

$c_{Fzg,x}$  ... Modellluftwiderstandsbeiwert des Fahrzeugs in x-Richtung

$c_{Fzg}$  ... Modellluftwiderstandsbeiwert des Fahrzeugs

$\mu_{Sp}$  ... Spurkranzreibwert (wird mit 0,25 angenommen [27])

$c_w$  ... Originalluftwiderstandsbeiwert

$M$  ... Modellfaktor ( $M=32$ )

$A_{Mod}$  ... Spantquerfläche (Schattenrissprojektion) der x-Richtung des Modells

$A_{Sp}$  ... Spantquerfläche (Schattenrissprojektion) der x-Richtung des Originals

Das Ziel der Berechnung ist, den Güterwagen mit dem höchsten Luftwiderstandsbeiwert unter einem bestimmten Anströmwinkel zu finden, da auf diesen bei gleicher Anströmgeschwindigkeit die höchste Luftwiderstandskraft einwirkt. Dazu wird eine Berechnung in MATLAB (The MathWorks®) durchgeführt. Als Winkelauflösung in der Berechnung wird  $\pi/1000$  gewählt. Damit werden 500 Zwischenwerte zwischen null Grad



und 90 Grad berechnet. Für die Berechnung werden 13 verschiedenen Güterwagentypen<sup>3</sup> verwendet (siehe Tabellen Tab. 9-2, Tab. 9-3, Tab. 9-4 und Tab. 9-5 im Anhang). Das Ergebnis der Berechnung ist in Abb. 4-7 dargestellt. Ein Containerwagen des Typs Sgjs 716, der mit 2 äußeren 20'-Containern<sup>4</sup> beladen ist, weist den höchsten Luftwiderstandsbeiwert auf. Der Anströmwinkel ist dabei 19,08°. Der Aufbau des Wagens ist in Abb. 4-6 zu sehen.

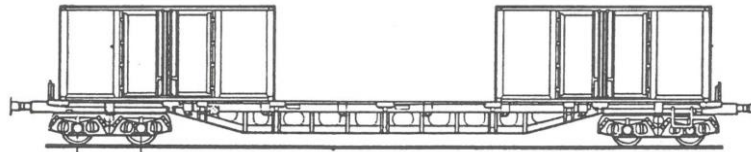


Abb. 4-6: vierachsiger Containertragwagen Sgjs 716 mit 2 20'-Containern [32]

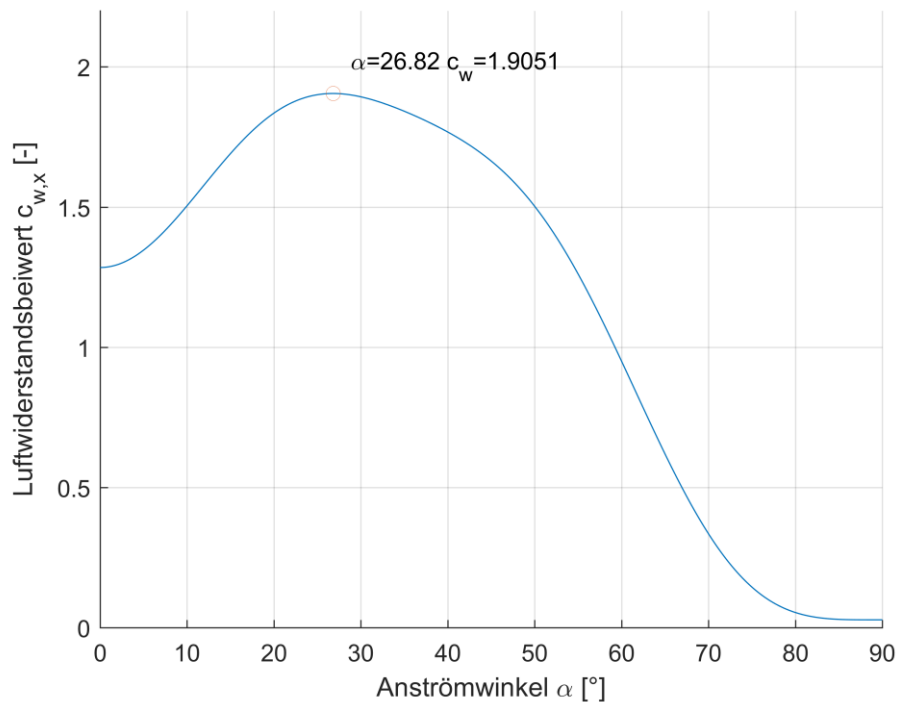


Abb. 4-7: Verlauf des Luftwiderstandsbeiwerts beim Fahrzeug Sgjs 716 mit 2 äußeren 20'-Containern

Die einwirkende äußere Luftwiderstandskraft  $F_{W,L,a}$  wird wie folgt berechnet [27]:

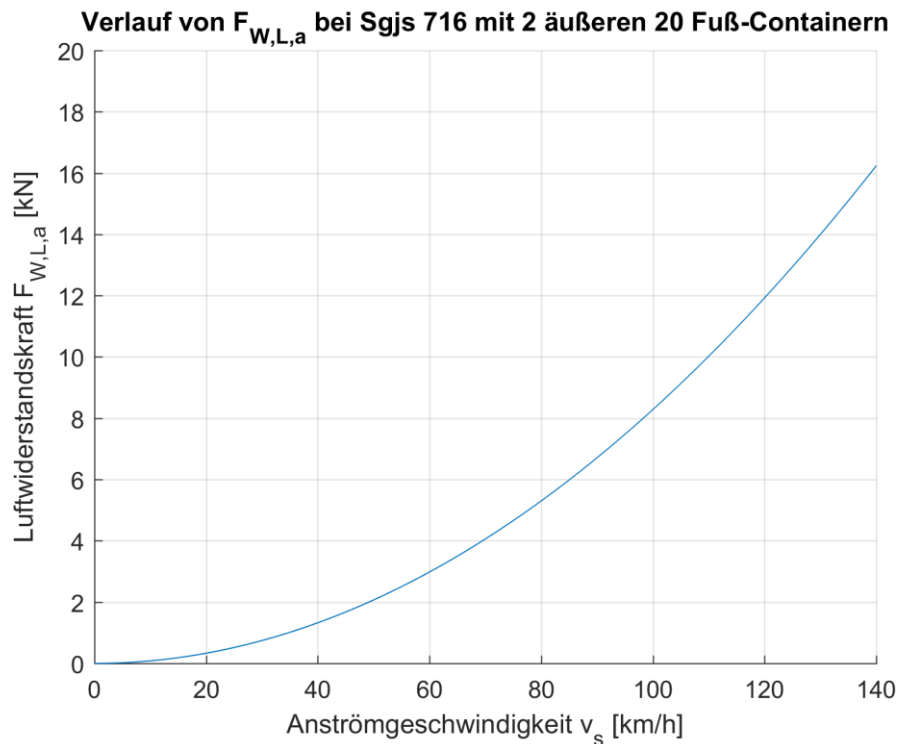
$$F_{W,L,a} = 0,5 \cdot c_W \cdot \rho \cdot A_{Sp} \cdot v_s^2 \quad (15)$$

$\rho$  ... Luftdichte (angenommen 1,2041 kg/m<sup>3</sup> bei T=20°C)

<sup>3</sup> Für detaillierte Informationen über die unterschiedlichen Güterwagen wird auf [32] Anhang III verwiesen.

<sup>4</sup> 20'-Container sind genormte ISO-Container mit einer Länge von 20 Fuß (6,096m) und einer Breite von 8 Fuß (2,4384m) [53].

Die Werte für die Luftwiderstandskraft in Abhängigkeit der Anströmgeschwindigkeit wurden in 0,1m/s-Schritten berechnet. Für die Anströmgeschwindigkeit wird ein Bereich zwischen 0 km/h und 140 km/h betrachtet. Das Ergebnis ist in Abb. 4-8 dargestellt.



**Abb. 4-8: Verlauf der Luftwiderstandskraft beim Fahrzeug Sgjs 716 mit 2 äußeren 20'-Containern**

Um das Ergebnis mit den anderen Einwirkungen und Widerständen gegenüberzustellen, wird die äußere Luftwiderstandskraft in die äußere Luftwiderstandszahl  $f_{W,L,a}$  umgerechnet. Die Berechnung erfolgt mit den zwei Grenzzuständen der Fahrzeugmasse – 16 t (leer) und 90 t (beladen). Bei den Kombinationen der Einwirkungen, wird der Einfluss der Gewichtskraft diskutiert. Der berechnete Verlauf der Luftwiderstandszahl ist in Abb. 4-9 und dargestellt.

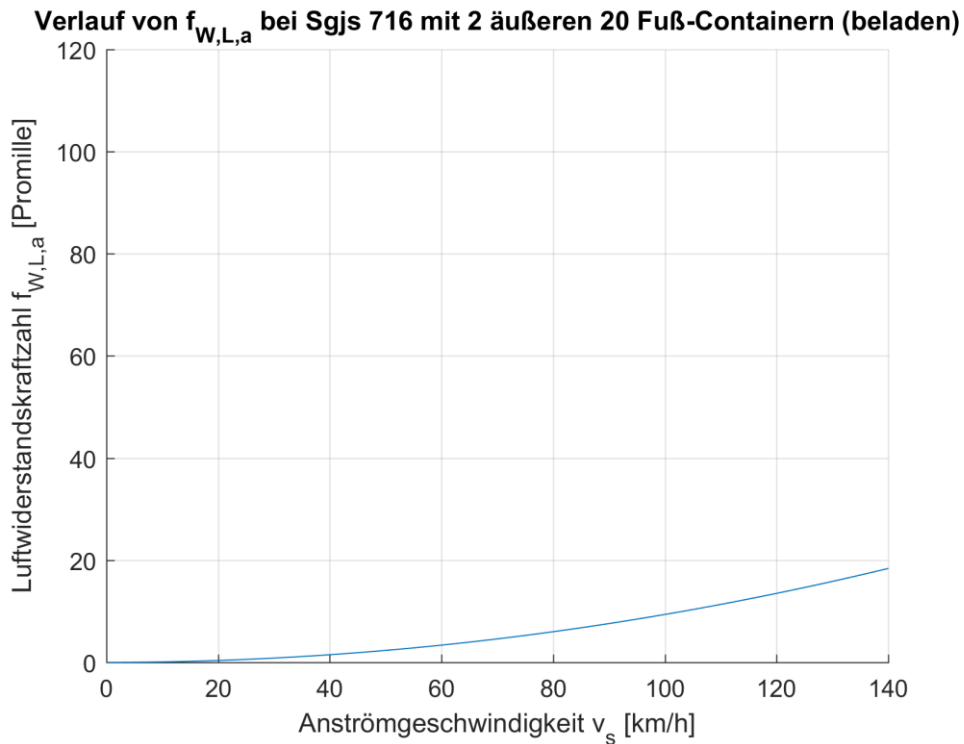


Abb. 4-9: Verlauf der Luftwiderstandskraftzahl beim Fahrzeug Sgjs 716 mit 2 äußeren 20'-Containern für einen beladenen Wagen

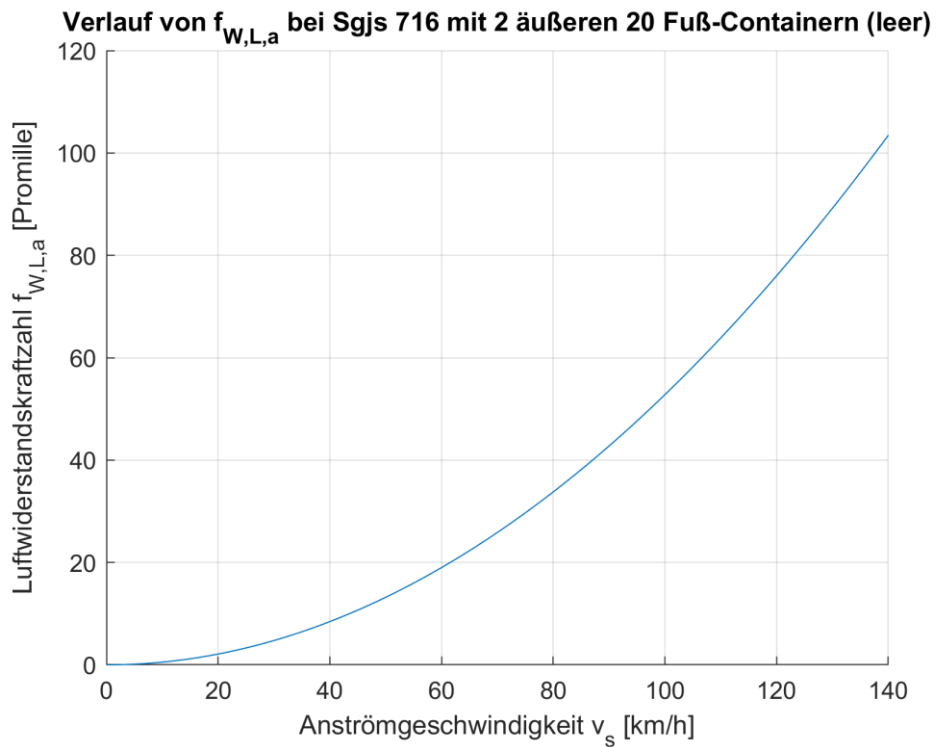


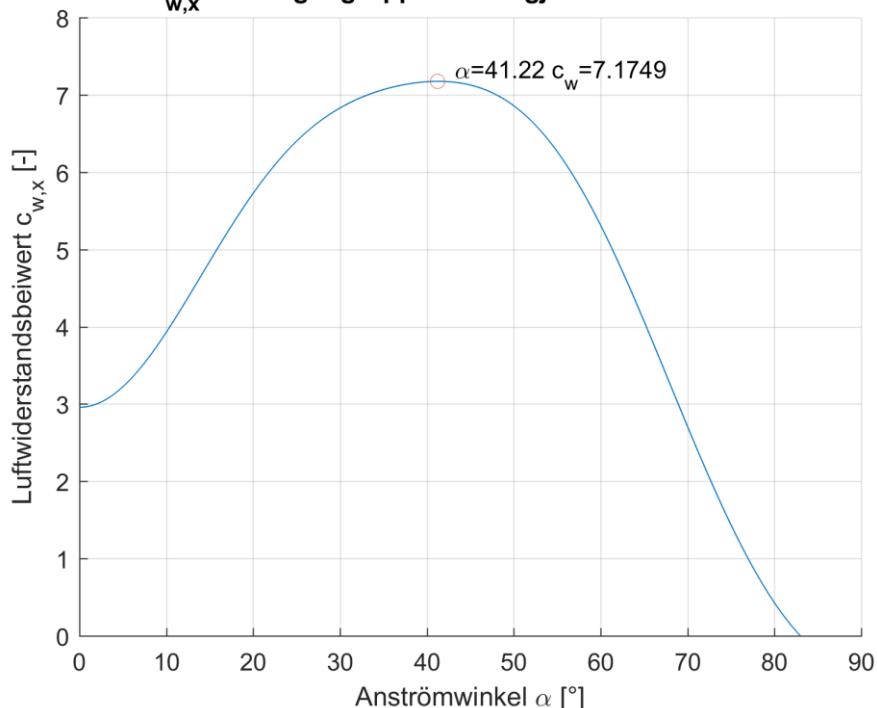
Abb. 4-10: Verlauf der Luftwiderstandskraftzahl beim Fahrzeug Sgjs 716 mit 2 äußeren 20'-Containern für einen leeren Wagen

Für die Berechnung 4 (Unterkapitel 4.1.13) wird eine Wagengruppe von fünf Wagen benötigt. Dabei ergeben sich durch die Wagenzwischenräume zusätzliche Faktoren, die für die Berechnung des Luftwiderstandsbeiwerts zu berücksichtigen sind. Es wird von einer homogenen Wagengruppe ausgegangen. Jeder Wagen ist vom selben Typ und weist dieselbe Beladungsart und dasselbe Gewicht auf. Zur Berechnung des Luftwiderstandsbeiwerts der Wagengruppe werden eine Stirnfläche, vier Wagenzwischenräume und fünf seitliche Flächen mit den entsprechenden Bessel-Koeffizienten nach Vollmer berücksichtigt [32]. Die Formel (12) wird folgendermaßen erweitert.

$$c_{Fzg} = \sum \left[ \left( 4 \cdot a_{zw,i} + 5 \cdot l_W \cdot \alpha_{L,i} + a_{s_{\overline{H},i}} \right) \cdot \cos(i\alpha) \right] \quad (16)$$

Die Vorgehensweise der weiteren Berechnung ist ident mit der eines Einzelwagens. In der Auswertung weist erneut eine homogene Wagengruppe aus fünf Sgjs 716 beladen mit zwei äußeren 20 Fuß-Containern den höchsten Luftwiderstandsbeiwert auf. Der Verlauf des Luftwiderstandsbeiwerts ist in Abb. 4-11 und der Verlauf der Luftwiderstandskraftzahl ist in Abb. 4-12 (beladen) und Abb. 4-13 (leer) dargestellt.

**Verlauf von  $c_{w,x}$  bei Wagengruppe mit 5 Sgjs 716 mit 2 äußeren Containern**



**Abb. 4-11: Verlauf des Luftwiderstandsbeiwerts bei einer Wagengruppe mit 5 Sgjs 716 mit jeweils 2 äußeren 20'-Containern**

Verlauf von  $f_{w,L,a}$  bei Wagengruppe mit 5 Sgjs 716 mit 2 äußeren Containern (beladen)

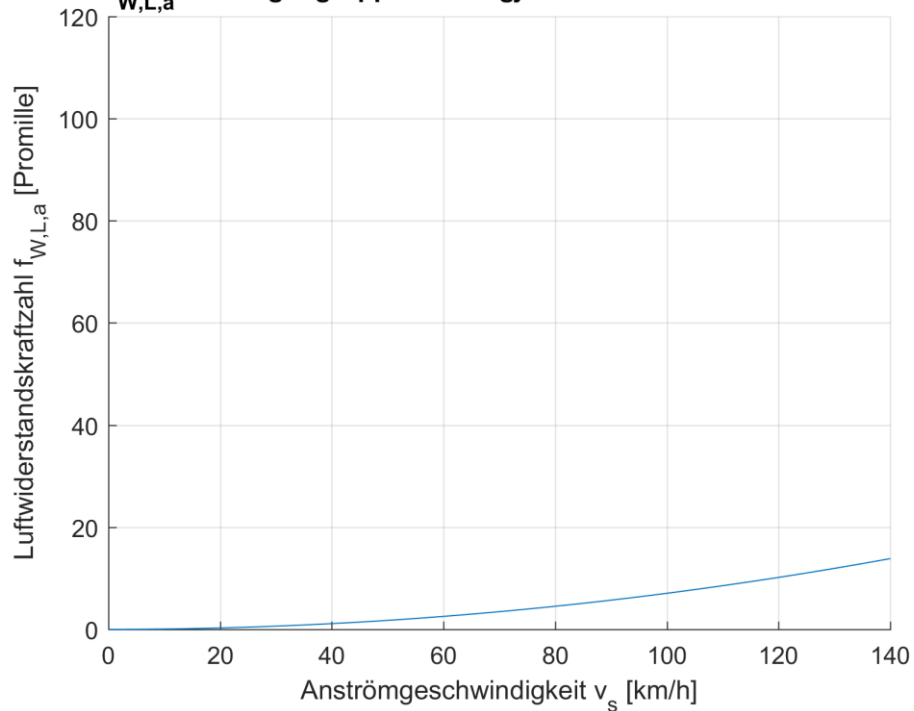


Abb. 4-12: Verlauf der Luftwiderstandskraftzahl bei einer Wagengruppe mit 5 Sgjs 716 mit jeweils 2 äußeren 20'-Containern (beladen)

Verlauf von  $f_{w,L,a}$  bei Wagengruppe mit 5 Sgjs 716 mit 2 äußeren Containern (leer)

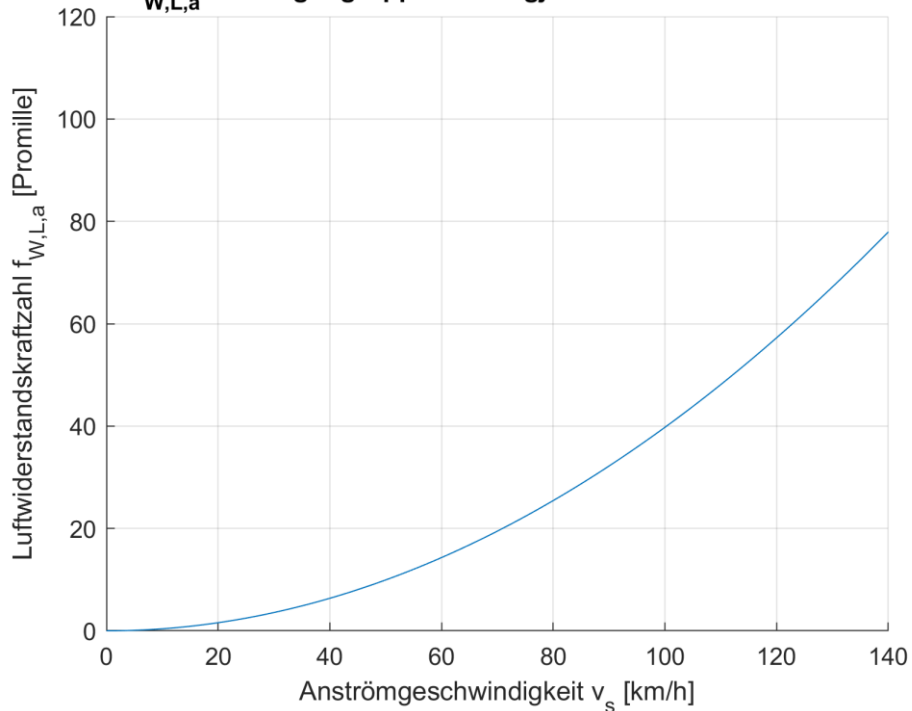


Abb. 4-13: Verlauf der Luftwiderstandskraftzahl bei einer Wagengruppe mit 5 Sgjs 716 mit jeweils 2 äußeren 20'-Containern (leer)

Es ist zu erkennen, dass die Luftwiderstandskraftzahl bei einer Wagengruppe geringer ist, als bei einem Einzelwagen – zumindest bei diesem Beispielfahrzeug.

#### 4.1.8. Anprall

In diesem Unterkapitel wird die Auswirkung von Anprall auf einen abgestellten Wagen untersucht. Anprall kann sowohl im Vershubbetrieb, als auch im Rangierbahnhof nach dem Abrollberg auftreten. Die Anprallkraft wird mittels der Division von Impuls und Kontaktzeit berechnet:

$$F_{imp} = \frac{P_{imp}}{t_{imp}} \quad (17)$$

$$P_{imp} = m_{imp} \cdot v_{imp} \quad (18)$$

$F_{imp}$  ... Anprallkraft auf das abgestellte Fahrzeug

$P_{imp}$  ... Impuls

$t_{imp}$  ... Kontaktzeit

$m_{imp}$  ... Masse des anprallenden Wagens (Annahme  $m_{imp} = 40$  t)

$v_{imp}$  ... Anprallgeschwindigkeit

Die anprallende Masse wird mit 40 t angenommen. Dies entspricht einem Einzelwagen mit durchschnittlicher Beladung bzw. einem Personenwagen. Zur Annahme einer plausiblen Kontaktzeit, wird die Federkraft der Puffer anhand eines Beispiels mit einer Anprallgeschwindigkeit von 5 m/s und einem Federweg der Puffer von 10 cm modelliert. Über das Energiegleichgewicht zwischen der kinetischen Energie des anprallenden Fahrzeugs und der kinetischen Energie der Puffer des stehenden Wagens ergibt sich folgender vereinfachter Zusammenhang:

$$E = \frac{K_{Puffer} \cdot x_{Puffer}^2}{2} = \frac{m_{imp} \cdot v_{imp}^2}{2} \quad (19)$$

$$K_{Puffer} = m_{imp} \cdot \frac{v_{imp}^2}{x_{Puffer}^2} = 10^8 \frac{N}{m} \quad (20)$$

$K_{Puffer}$  ... Federsteifigkeit der Puffer des abgestellten Schienenfahrzeugs [N/m]

$x_{Puffer}$  ... Federweg der Puffer des abgestellten Schienenfahrzeugs [m]

Die ausgelöste Kontaktschwingung kann als harmonische Schwingung modelliert werden, wobei die halbe Periodendauer die Kontaktzeit zu diesem Beispiel liefert:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m_{imp}}{K_{Puffer}}} = 0,126s \quad (21)$$

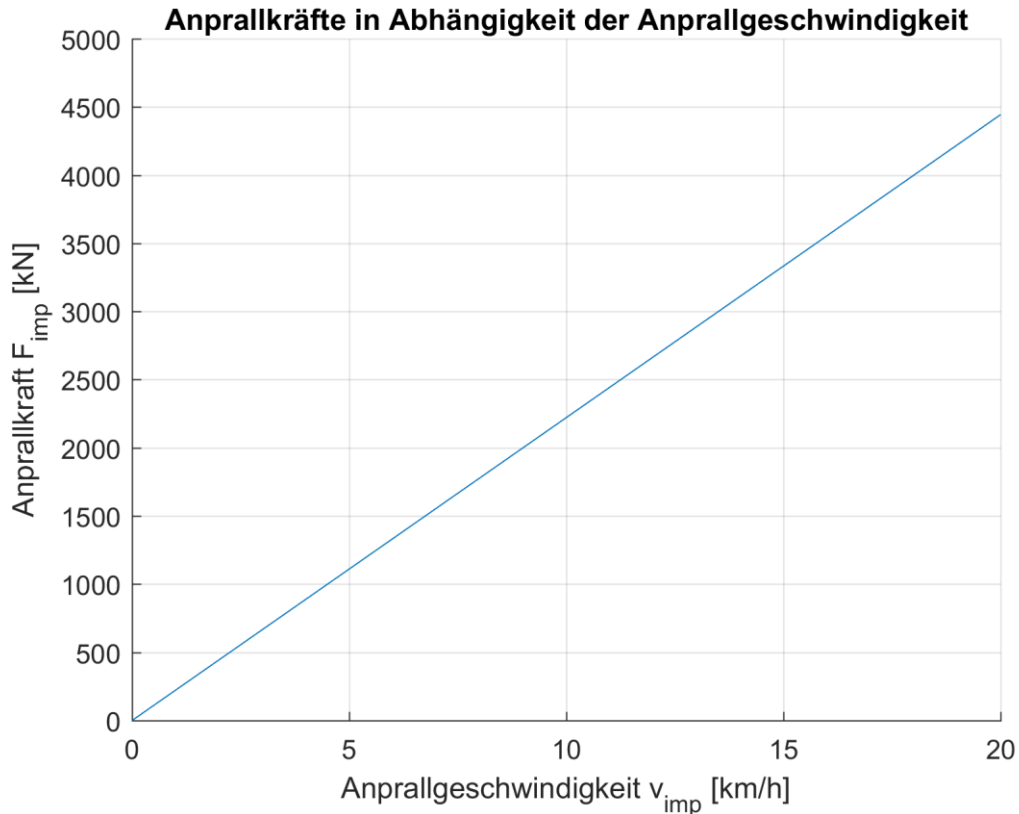
$$t_{imp} = \frac{T}{2} = 0,0628s \quad (22)$$



T ... Periodendauer der harmonischen Schwingung

Je nach Federweg der Puffer und anprallender Masse werden somit Werte für Kontaktzeiten zwischen 0,01 s und 0,1 s erreicht. Deshalb wird ein plausibles Mittelmaß von 0,05 s für die Kontaktzeit in der Modellierung angenommen.

Die Auswertung der Anprallkraft in Abhängigkeit der Anprallgeschwindigkeit ist in Abb. 4-14 dargestellt.



**Abb. 4-14: Verlauf der Anprallkraft in Abhängigkeit der Anprallgeschwindigkeit für eine anprallende Wagenmasse von 40 t**

Die einwirkende Anprallkraft kann über die Gewichtskraft des abgestellten Wagens in die Anprallkraftzahl  $f_{imp}$  umgerechnet werden:

$$f_{imp} = \frac{F_{imp}}{G_W} \quad (23)$$

Die Berechnungen der Anprallkraftzahlen in Abhängigkeit der Anprallgeschwindigkeit für die Fälle eines leeren abgestellten Wagens ( $m = 16$  t) und eines beladenen abgestellten Wagens ( $m = 90$  t) sind in Abb. 4-15 und Abb. 4-16 dargestellt.

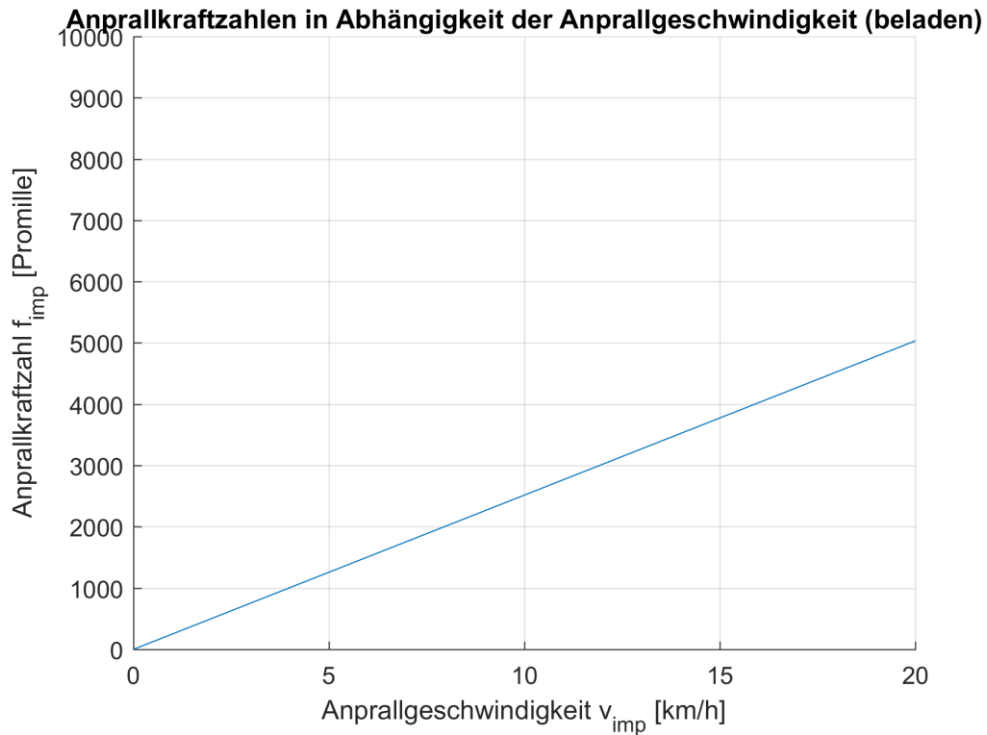


Abb. 4-15: Verlauf der Anprallkraftzahl in Abhängigkeit der Anprallgeschwindigkeit für einen beladenen Güterwagen ( $m = 90 \text{ t}$ )

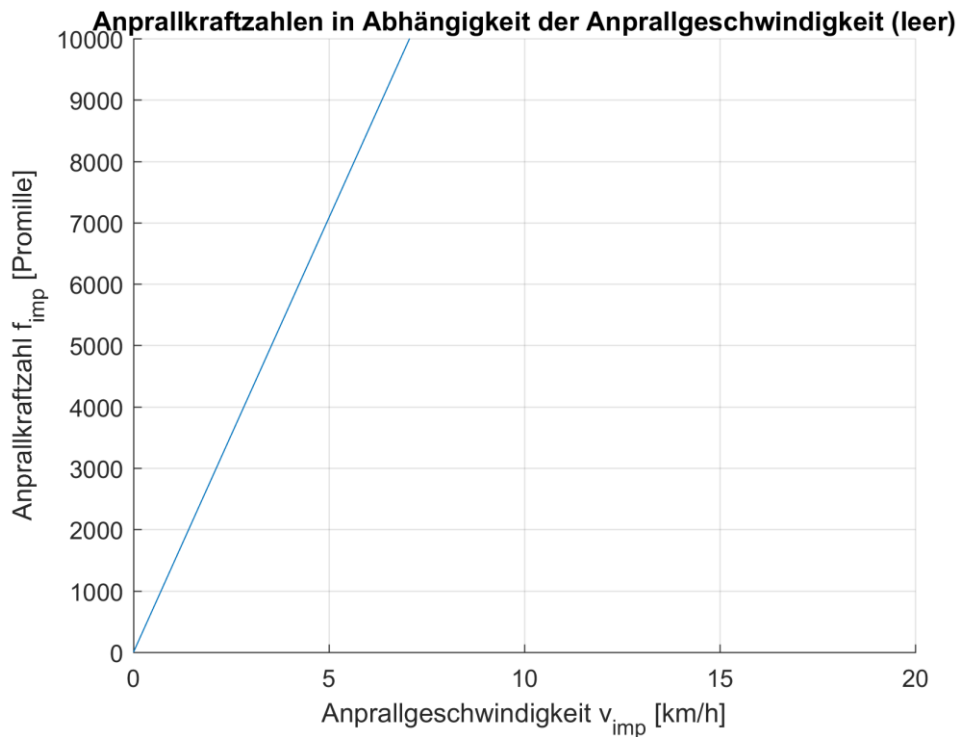


Abb. 4-16: Verlauf der Anprallkraftzahl in Abhängigkeit der Anprallgeschwindigkeit für einen leeren Güterwagen ( $m = 16 \text{ t}$ )

#### 4.1.9. Allgemeines zu den Berechnungen

Das Ziel der nachfolgenden Berechnungen ist die Darstellung von Grenzfällen, bei denen sowohl ungesicherte, als auch ordnungsgemäß abgesicherte Wagen (wie in Unterkapitel 4.1.1 beschrieben) durch die erörterten Einwirkungen hohe Gefahr aufweisen, ungewollt in Bewegung zu geraten. Bei der Ermittlung der Einwirkungen wurden „worst case“ Annahmen getroffen. Somit lässt sich aus den im Folgenden ausgewerteten Grenzfällen nicht ableiten, dass ein Entrollen unter diesen Bedingungen eintreten muss.

Bei der Auswahl der durchgerechneten Beispiele wurde darauf geachtet, dass jeweils der ungünstige Fall bzw. die ungünstigste Wagenkombination ausgewählt wird. Die Berechnungen umfassen folgende Konfigurationen:

- Berechnung 1: ungebremster, abgestellter vierachsiger Güterwagen
- Berechnung 2: mit Handbremse abgesicherter, abgestellter vierachsiger Güterwagen
- Berechnung 3: mit Hemmschuh abgesicherter, abgestellter vierachsiger Güterwagen
- Berechnung 4: Mit Druckluftbremse für eine Stunde abgesicherte Wagengruppe von fünf vierachsigen Güterwagen

Für jede Berechnung können für die Gegenüberstellung der ermittelten Widerstände und Einwirkungen, insgesamt sieben Szenarien ausgewertet. Der Wagenwiderstand setzt sich dabei aus der Summe des Anfahrwiderstands und, falls der Wagen abgesichert ist, aus dem Bremswiderstand zusammen. Die Szenarien bestehen aus folgenden Kombinationen:

- Wagenwiderstand + Längsneigung
- Wagenwiderstand + Windeinwirkung
- Wagenwiderstand + Anpralleinwirkung
- Wagenwiderstand + Längsneigung + Windeinwirkung
- Wagenwiderstand + Längsneigung + Anpralleinwirkung
- Wagenwiderstand + Windeinwirkung + Anpralleinwirkung
- Wagenwiderstand + Längsneigung + Windeinwirkung + Anpralleinwirkung

Im Zuge der ersten Auswertungen wurde herausgefunden, dass bei vorhandener Anpralleinwirkung die Längsneigung und die Windeinwirkung vernachlässigbar sind. Die benötigte Anprallgeschwindigkeit ändert sich dabei nur um wenige Zehntel km/h. Dieser Vergleich wird exemplarisch im Unterkapitel 4.1.13 gezeigt.

Somit werden vier Szenarien pro Berechnung ausgewertet:

- Wagenwiderstand + Längsneigung

- Wagenwiderstand + Windeinwirkung
- Wagenwiderstand + Anpralleinwirkung
- Wagenwiderstand + Längsneigung + Windeinwirkung

Eine weitere Ausnahme im Berechnungsschema tritt bei der Modellierung des Hemmschuhs auf. Da der Hemmschuh nicht durch Längsneigung oder/und Wind überrollt wird, wird bei diesem nur der Lastfall Anprall berücksichtigt (siehe 4.1.5).

Für die Berechnungen 1-3 werden jeweils die Grenzfälle des Beladungszustandes untersucht – ein leerer Güterwagen mit minimaler Radsatzlast von 4 t und ein voll beladener Güterwagen mit maximaler Radsatzlast von 22,5 t [30]. Die Auswertungen werden mit MATLAB (The MathWorks®) und MS Office Excel durchgeführt.

Für die Berechnungen, bei denen ein gebremster Wagen modelliert wird, wird die Wagenwiderstandszahl  $f_W$  eingeführt. Diese ergibt sich aus der Summe der Wagenwiderstände (Anfahrwiderstand und Bremswiderstand), die gegen Entrollen wirken.

$$f_W = f_{W,anf} + f_B \quad (24)$$

Die Längsneigung bzw. Neigungskraftzahl wird in den Berechnungen immer negativ angesetzt (Gefälle).

#### 4.1.10. Berechnung 1: ungebremster 4-achsiger Güterwagen

##### Szenario 1: Anfahrwiderstand + Längsneigung (Wagen ungebremst)

Um ein Entrollen nur durch die Längsneigung des Gleises zu initiieren, muss die Längsneigung größer als der Anfahrwiderstand werden. Somit ist mindestens eine Längsneigung von größer als 3 ‰ erforderlich, sodass ein Entrollen sehr wahrscheinlich ist. Zur Vollständigkeit werden die im Unterkapitel 4.1.2 erwähnten Berechnungsverfahren zur Anfahrgrenzmasse auch ausgewertet. Falls die Längsneigung in der Berechnung bereits berücksichtigt wird (siehe Formeln (3) und (4)), muss ein negativer Anfahrwiderstand erreicht werden. Somit können die unterschiedlichen Berechnungsansätze nach der kritischen Längsneigung ( $i_{crit}$ ), bei der nur durch die Längsneigung ohne zusätzliche Einwirkungen oder Maßnahmen mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Entrollen eintritt, ausgewertet werden. Bei dieser trivialen Gegenüberstellung wird davon ausgegangen, dass beim Wagen keine Bremse angezogen ist und auch keine sonstigen Einwirkungen vorhanden sind. Die Auswertung ist in Tab. 4-5 ersichtlich.

Tab. 4-5: kritische Längsneigungen nach den Berechnungsmethoden verschiedener EVUs

	Theorie	DR	SNCF	BR	DB AG	ÖBB
$i_{crit}$ [‰]	-6	-20	-12	-7,5	-10,8	-3

Szenario 2: Anfahrwiderstand + Windeinwirkung (Wagen ungebremst)

In diesem Szenario wird ermittelt, ab welcher kritischen Windgeschwindigkeit die Wahrscheinlichkeit für das Entrollen eines Wagens hoch ist. Der Wagen wird als ungebremst abgestellt angenommen. Alle Annahmen zur Berechnung der Windeinwirkung sind im Unterkapitel 4.1.7 zu finden. Die Auswertungen von Szenario 2 sind in Abb. 4-17 (beladen) und in Abb. 4-18 (leer) dargestellt. Bei einem beladenen Wagen, der ungebremst ist, kann es ab einer Windgeschwindigkeit von 56 km/h und dem ungünstigsten Anströmwinkel dazu kommen, dass dieser Wagen nur aufgrund der Windeinwirkung entrollt. Bei einem leeren Wagen tritt dieser Fall bereits bei einer Windgeschwindigkeit von ca. 24 km/h ein.

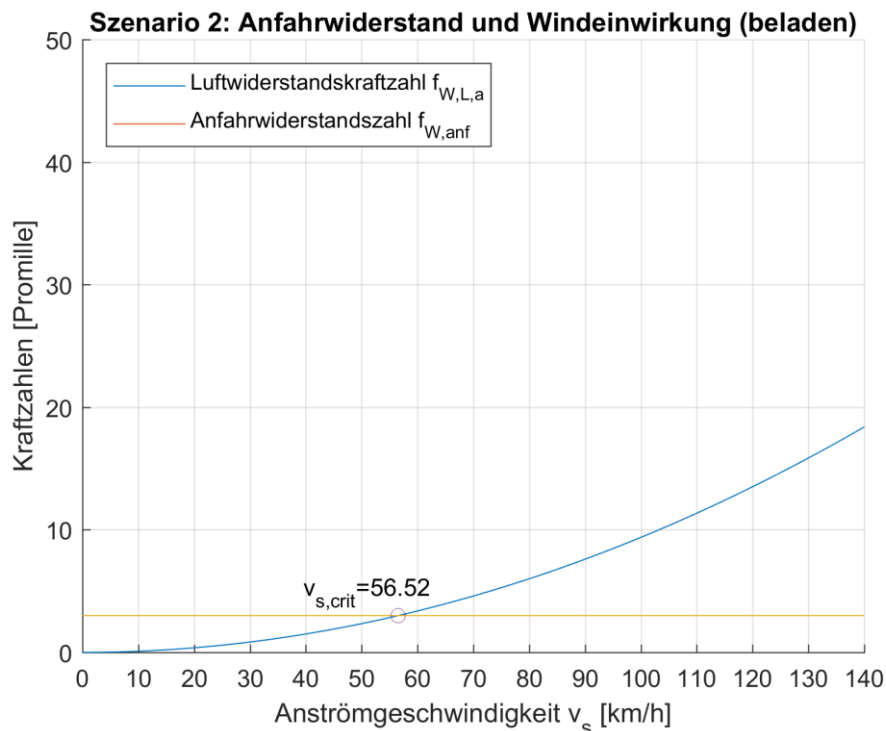
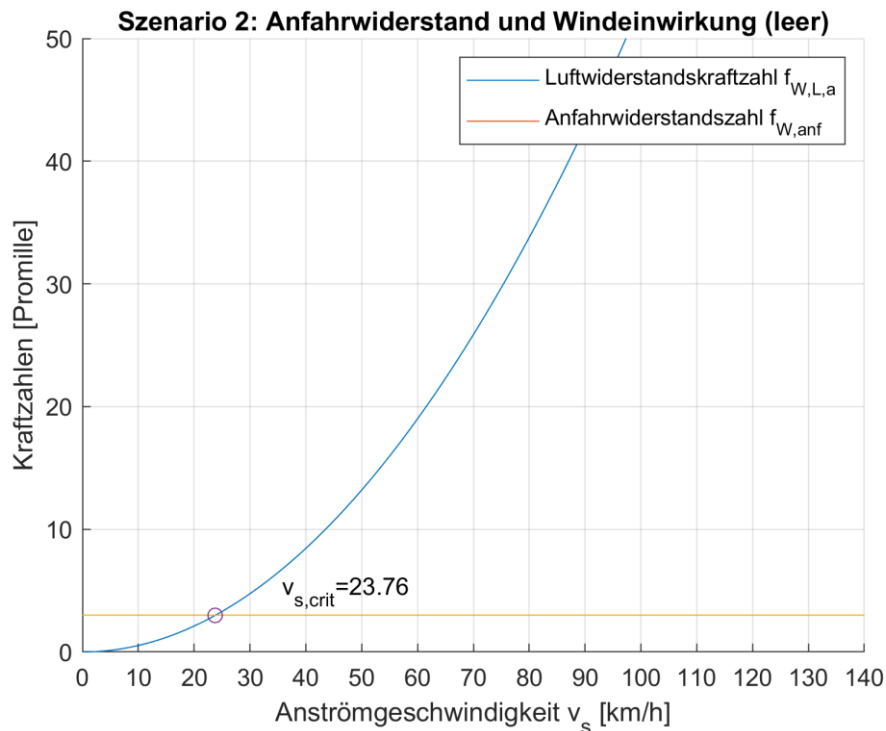


Abb. 4-17: Verlauf der Kraftzahlen in Szenario 2 für einen beladenen Wagen



**Abb. 4-18: Verlauf der Kraftzahlen in Szenario 2 für einen leeren Wagen**

Szenario 3: Anfahrwiderstand + Anpralleinwirkung (Wagen ungebremst)

Im Szenario 3 wird ermittelt, ab welcher Anprallgeschwindigkeit ein ungebremsster abgestellter Wagen zu entrollen beginnt. Für die Modellbildung und die Annahmen bezüglich der Anpralleinwirkung wird auf Unterkapitel 4.1.8 verwiesen. Die Auswertungen sind in Abb. 4-19 (beladen) und Abb. 4-20 (leer) dargestellt. Sowohl bei einem leeren abgestellten Wagen, als auch bei beladenen Wagen ohne angezogene Bremse reicht eine minimale Anprallgeschwindigkeit, dass der Wagen in Bewegung gesetzt wird. Deshalb ist ein Anprall an einen ungebremssten Wagen als sehr gefährlich einzustufen.

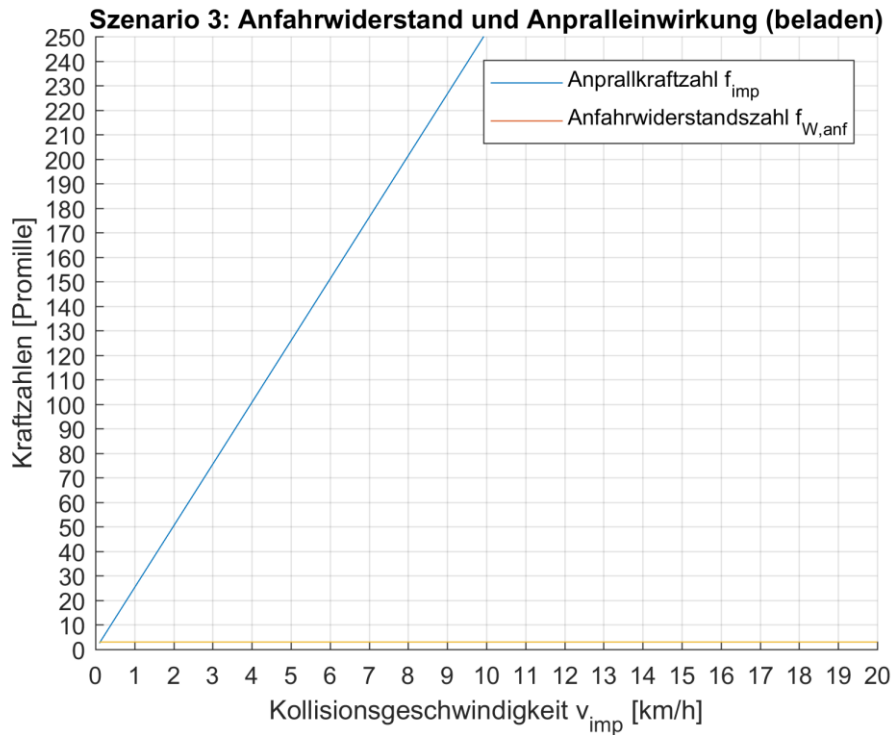


Abb. 4-19: Verlauf der Kraftzahlen in Szenario 3 für einen beladenen Wagen

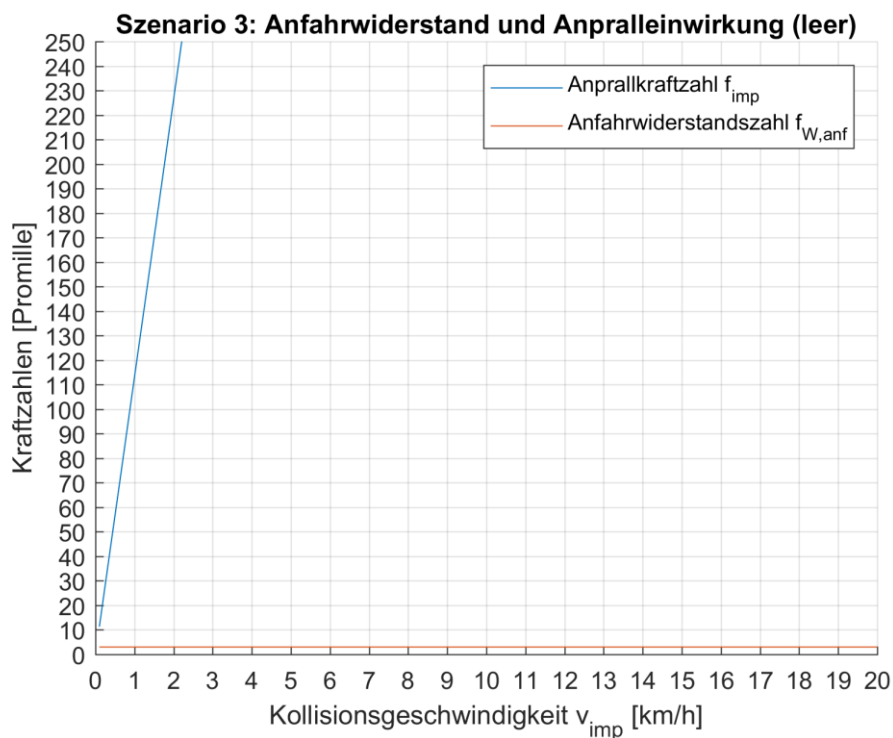


Abb. 4-20: Verlauf der Kraftzahlen in Szenario 3 für einen leeren Wagen



#### Szenario 4: Anfahrwiderstand + Längsneigung + Windeinwirkung (Wagen ungebremst)

Wie in Szenario 1 zu sehen, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass ein ungebremster Wagen bereits ab einer Längsneigung von 3 ‰ zu entrollen beginnt. Szenario 2 liefert das Ergebnis, dass ein leerer Wagen bereits bei geringen Windgeschwindigkeiten unter 25 km/h bei ungünstigem Anströmwinkel und ohne Längsneigung des Gleises zum Entrollen neigt. Wenn die beiden Einwirkungen kombiniert werden, kann es bereits bei sehr geringen Längsneigungen und geringer Windgeschwindigkeit zu Entrollen kommen. Deshalb ist das ungebremste Abstellen bei leicht spürbarem Wind in einer geringen Längsneigung als sehr gefährlich einzustufen.

#### Diskussion

Ungesicherte Wagen bzw. Wagengruppen sind ab einer Längsneigung von 2,5 ‰ als sehr gefährlich mit einem hohen Entrollrisiko einzustufen [29]. Bei ungünstigen Windverhältnissen kann ein ungesicherter voll beladener Wagen in der Ebene bereits ab Windgeschwindigkeiten von 56 km/h in Bewegung gesetzt werden. Bei leeren Wagen liegt die kritische Windgeschwindigkeit bereits bei etwa 24 km/h. Somit ist auch ein Abstellen in der Ebene bei leicht spürbarem Wind gefährlich und weist, vor allem wenn in der Nähe eventuell ein Längsgefälle im weiteren Gleisverlauf besteht, ein hohes Risikopotential auf. Ungesicherte Wagen sind bei minimalen Anprallvorgängen leicht in Bewegung zu setzen und können aufgrund des geringen Reibwerts je nach Anprallgeschwindigkeit auch dementsprechend weit rollen.

#### **4.1.11. Berechnung 2: Mit Handbremse gesicherter 4-achsiger Güterwagen**

Die Festhaltekraft ( $F_{Park}$ ) der Handbremse ergibt sich aus der Multiplikation von Gesamtklotzkraft und statischem Reibwert ( $\mu_{stat}$ ). Der Reibwert bei der Ermittlung der Festhaltekraft bei Handbremsen wird mit 0,2 angenommen (lt. [33] Pkt. 8.3.3). Aus der Rückrechnung vom angenommenen Bremsgewicht ( $B = 10\text{ t}$ ) ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$F_{Park} = \frac{B}{\left(\frac{9}{8}\right) \cdot 0,88} = 10,10\text{kN} \quad (25)$$

Der Faktor 9/8 ist ein Faktor zur Berücksichtigung der dynamischen Einflüsse auf die Bremsklotzkraft während der Fahrt. Beim Bremsgewicht ist dieser Faktor mitgerechnet. Deshalb muss der Faktor für die Berechnung der Bremskraft im Stillstand herausgerechnet werden.

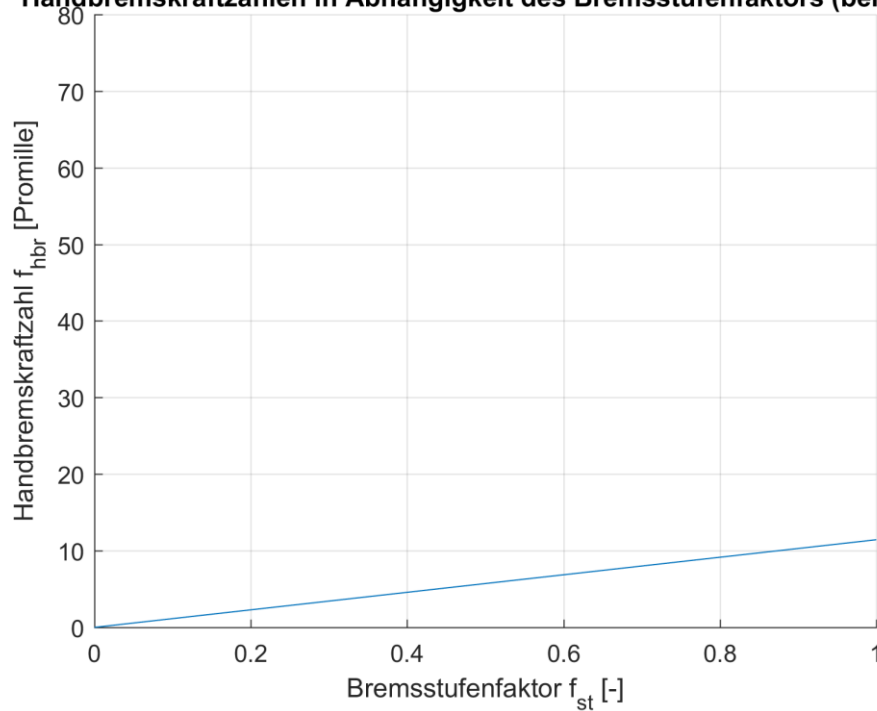
Aus der Festhaltekraft wird die maximale Handbremskraftzahl berechnet:

$$f_{hbr, leer} = \frac{F_{Park}}{m_{leer} \cdot g} = 0,064 \cong 64\text{‰} \quad (26)$$

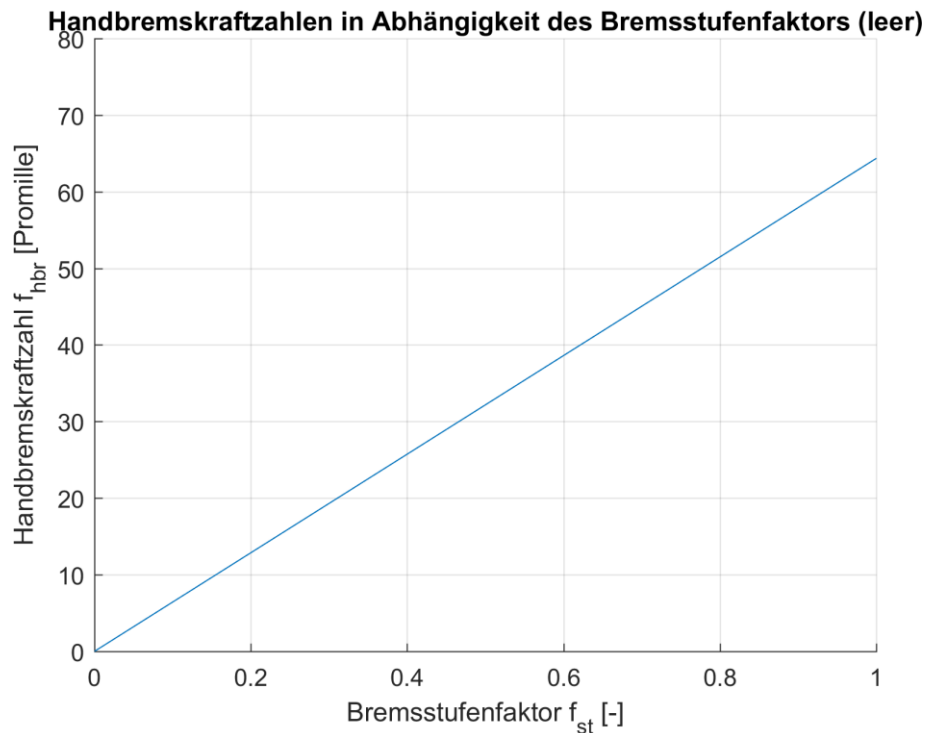
$$f_{hbr, beladen} = \frac{F_{Park}}{m_{beladen} \cdot g} = 0,0114 \cong 11,4\text{‰} \quad (27)$$

Die tatsächlich aufgebrachte Handkraft beim Anziehen wird durch den Bremsstufenfaktor berücksichtigt. Die Handbremskraftzahl in Abhängigkeit des Bremsstufenfaktors ist in Abb. 4-21 (beladen) und Abb. 4-22 (leer) ersichtlich.

**Handbremskraftzahlen in Abhängigkeit des Bremsstufenfaktors (beladen)**



**Abb. 4-21: Verlauf der Handbremskraftzahlen in Abhängigkeit des Bremsstufenfaktors (beladen)**



**Abb. 4-22: Verlauf der Handbremskraftzahlen in Abhängigkeit des Bremsstufenfaktors (leer)**

Szenario 1: Anfahrwiderstand + Bremswiderstand + Längsneigung (Wagen mit Handbremse gebremst)

Sofern die Längsneigung größer ist, als die Wagenwiderstandszahl, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass der Wagen entrollt. Die Wagenwiderstandszahl ergibt sich aus der Addition der in (26) und (27) berechneten Bremskraftzahlen und der Anfahrwiderstandszahl. Die kritische Längsneigung ist gleich der Wagenwiderstandszahl und kann direkt aus Abb. 4-23 bzw. Abb. 4-24 abgelesen werden. Nur aufgrund von Längsneigung ohne andere Einwirkungen, kann ein Einzelwagen bei voll angezogener Handbremse bis ca. 14 ‰ abgesichert werden.

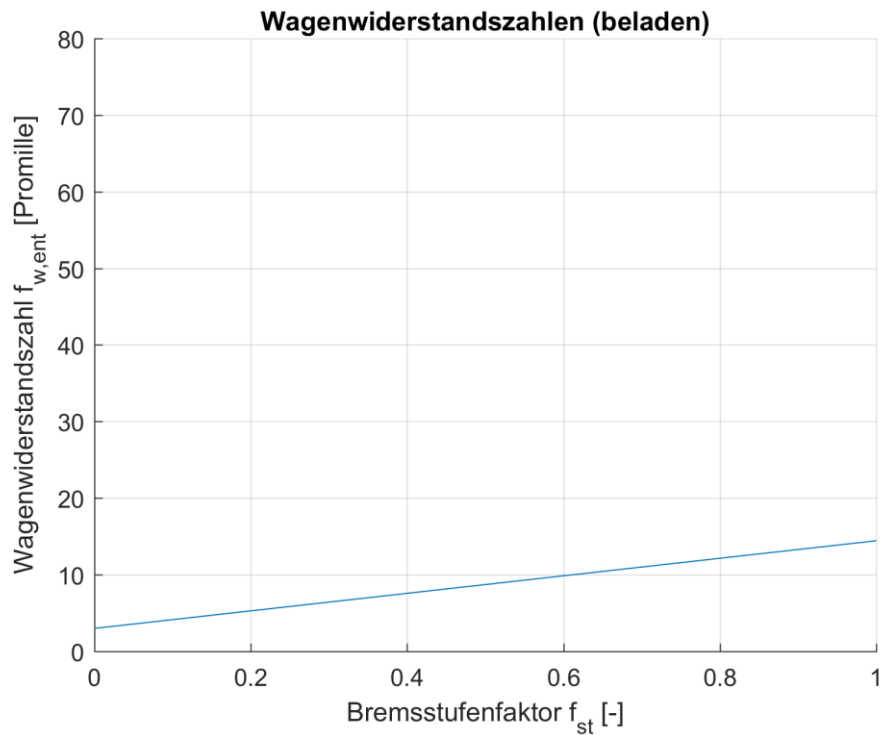


Abb. 4-23: Verlauf der Wagenwiderstandszahlen in Abhängigkeit des Bremsstufenfaktors (beladen)

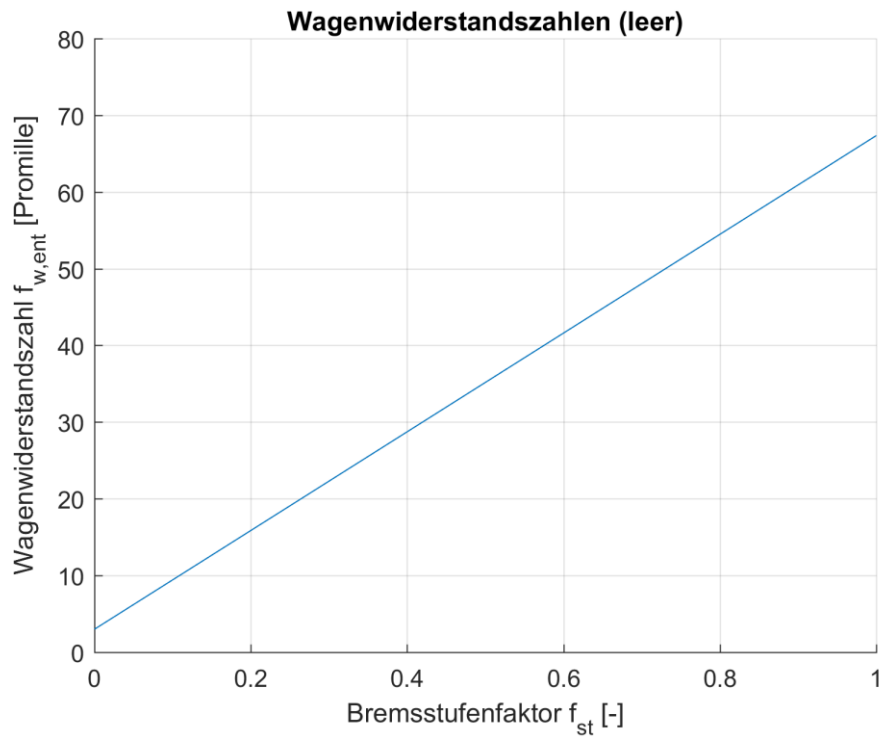


Abb. 4-24: Verlauf der Wagenwiderstandszahlen in Abhängigkeit des Bremsstufenfaktors (leer)

Szenario 2: Anfahrwiderstand + Bremswiderstand + Windeinwirkung (Wagen mit Handbremse gebremst)

In diesem Szenario wird ermittelt, ab welcher Windgeschwindigkeit ein abgestellter gebremster Wagen mit hoher Wahrscheinlichkeit zu entrollen beginnt. Es gilt folgende Beziehung zwischen dem Wagenwiderstand (siehe (24)) und der Einwirkung (Wind):

$$\frac{f_W}{f_{W,L,a}} \geq 1 \rightarrow \text{Entrollen unwahrscheinlich} \quad (28)$$

$$\frac{f_W}{f_{W,L,a}} < 1 \rightarrow \text{Entrollen wahrscheinlich} \quad (29)$$

Somit kann eine kritische Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit der aufgebrauchten Bremskraft berechnet werden, bei der folgender Zusammenhang gilt:

$$\left( \frac{f_W}{f_{W,L,a}} \right)_{crit} = 1 \quad (30)$$

Die Bremskraft wird in 10 %-Stufen ausgewertet. Daraus ergeben sich zehn Zwischenwerte für kritische Windgeschwindigkeiten. Die Auswertungen der kritischen Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der aufgebrauchten Bremskraft sind in Tab. 4-6 und Tab. 4-7 dargestellt.

**Tab. 4-6: Auswertung der kritischen Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Bremsstufenfaktors (beladen)**

$f_{st}$ [%]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$v_{s,crit}$ [km/h]	0	66,6	75,2	82,8	90,0	96,5	102,6	108,4	113,8	119,2	124,2

**Tab. 4-7: Auswertung der kritischen Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Bremsstufenfaktors (leer)**

$f_{st}$ [%]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$v_{s,crit}$ [km/h]	0	42,1	54,7	65,2	73,8	81,7	88,9	95,4	101,5	107,3	113,0

In der Ebene ist die Gefahr hoch, dass ein mit Handbremse abgesicherter Wagen mit Windgeschwindigkeiten über 100 km/h in Bewegung gebracht wird. Bei geringem Anziehen der Handbremse sind Windgeschwindigkeiten ab etwa 40 km/h als gefährlich einzustufen.

Szenario 3: Anfahrwiderstand + Bremswiderstand + Anpralleinwirkung (Wagen mit Handbremse gebremst)

In diesem Szenario wird ermittelt, ab welcher kritischen Anprallgeschwindigkeit ein gebremster Wagen mit hoher Wahrscheinlichkeit in Bewegung gesetzt wird. Der Widerstand gegen Entrollen ist stark abhängig vom Bremssystem des Wagens und der aufgebrauchten Bremskraft bei der Handbremse. Es gilt folgende Beziehung zwischen dem Wagenwiderstand (siehe (24)) und der Einwirkung (Anprall):

$$\frac{f_W}{f_{imp}} \geq 1 \rightarrow \text{Entrollen unwahrscheinlich} \quad (31)$$

$$\frac{f_W}{f_{imp}} < 1 \rightarrow \text{Entrollen wahrscheinlich} \quad (32)$$

Somit kann eine kritische Anprallgeschwindigkeit in Abhängigkeit der aufgebrauchten Bremskraft berechnet werden, bei der folgender Zusammenhang gilt:

$$\left( \frac{f_W}{f_{imp}} \right)_{crit} = 1 \quad (33)$$

Die Bremskraft wird in 10 %-Stufen ausgewertet. Daraus ergeben sich zehn Zwischenwerte für kritische Anprallgeschwindigkeiten pro Bremssystem. Die Auswertungen der kritischen Anprallgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der aufgebrauchten Bremskraft sind in dargestellt.

**Tab. 4-8: Auswertung der kritischen Anprallgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Bremsstufenfaktors (beladen)**

$f_{st}$ [%]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$V_{imp,crit}$ [km/h]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1

**Tab. 4-9: Auswertung der kritischen Anprallgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Bremsstufenfaktors (leer)**

$f_{st}$ [%]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$V_{imp,crit}$ [km/h]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Die Auswertungen zeigen, dass Anprallgeschwindigkeiten im Hundertstel-km/h Bereich bereits ausreichen würden, um den mit Handbremse abgesicherten Wagen in Bewegung zu setzen.

Szenario 4: Anfahrwiderstand + Bremswiderstand + Längsneigung + Windeinwirkung (Wagen mit Handbremse gebremst)

In diesem Szenario werden die möglichen Auswirkungen von Windeinwirkung und Längsneigung auf einen gebremsten Wagen untersucht. Dazu wird die Wagenwiderstandszahl mit der Längsneigungskraftzahl addiert und mit der Luftwiderstandskraftzahl verglichen (siehe (34) bis (36)). Es ergeben sich kritischen Anströmgeschwindigkeiten  $v_{s,crit}$  in Abhängigkeit des Wagengewichts, des Bremssystems, des Bremsstufenfaktors und der modellierten Längsneigung.

$$\frac{f_W + f_N}{f_{W,L,a}} \geq 1 \rightarrow \text{Entrollen unwahrscheinlich} \quad (34)$$

$$\frac{f_W + f_N}{f_{W,L,a}} < 1 \rightarrow \text{Entrollen wahrscheinlich} \quad (35)$$

$$\left( \frac{f_W + f_N}{f_{W,L,a}} \right)_{crit} = 1 \quad (36)$$

Es wurden die Ergebnisse für die Längsneigungen 2,5 ‰, 5 ‰, 10 ‰, 15 ‰ und 20 ‰ ausgewertet. Die Ergebnisse sind in Tab. 4-10 und Tab. 4-11 dargestellt. In den Zellen mit dem Wert null ist die Längsneigung allein schon ausreichend, sodass Entrollen sehr wahrscheinlich ist.

**Tab. 4-10: Auswertung der kritischen Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Bremsstufenfaktors und der Längsneigung (beladen)**

$f_{st}$ [%]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$v_{s,crit}$ [km/h] $i=-2,5\text{‰}$	0	41,8	54,4	64,8	73,4	81,4	88,6	95,4	101,5	107,3	112,7
$v_{s,crit}$ [km/h] $i=-5\text{‰}$	0	0,0	17,6	39,2	52,6	63,0	72,0	79,9	87,5	94,0	100,4
$v_{s,crit}$ [km/h] $i=-10\text{‰}$	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	32,8	47,9	59,4	68,8
$v_{s,crit}$ [km/h] $i=-15\text{‰}$	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0



$V_{s,crit}$ [km/h] $i=-20\text{‰}$	0	0	0	0	0	0	0	0,0	0,0	0,0	0,0
---	---	---	---	---	---	---	---	-----	-----	-----	-----

**Tab. 4-11: Auswertung der kritischen Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Bremsstufenfaktors und der Längsneigung (leer)**

$f_{st}$ [%]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$V_{s,crit}$ [km/h] $i=-2,5\text{‰}$	0	36,4	50,4	61,2	70,6	78,8	86,0	92,9	99,4	105,1	110,9
$V_{s,crit}$ [km/h] $i=-5\text{‰}$	0	29,2	45,4	57,2	67,0	75,6	83,2	90,4	96,8	103,0	108,7
$V_{s,crit}$ [km/h] $i=-10\text{‰}$	0	0,0	33,5	48,2	59,8	69,1	77,4	85,0	91,8	98,3	104,4
$V_{s,crit}$ [km/h] $i=-15\text{‰}$	0	0,0	13,0	37,1	51,1	61,9	70,9	79,2	86,4	93,2	99,7
$V_{s,crit}$ [km/h] $i=-20\text{‰}$	0	0	0,0	20,9	40,7	53,6	64,1	72,7	81,0	88,2	94,7

### Diskussion

Ein mit Handbremse abgesicherter Wagen kann maximal in einem Gefälle von ca. -14 ‰ bei vollem Anziehen der Handbremse abgesichert werden. Die benötigte Windeinwirkung für einen Bewegungsbeginn liegt bei geringer Anziehungskraft bei etwa 40 km/h. Anpralleinwirkungen können bereits bei sehr geringen Geschwindigkeiten den Wagen bewegen, allerdings wird der Wagen nicht automatisch entrollen, da die Bremse noch angezogen ist. Bei der Kombination von Längsneigung und Windeinwirkung wird die benötigte Windeinwirkung noch geringer, sodass bereits leicht fühlbarer Wind ab etwa 20 km/h bei geringem Anziehen schon für eine Bewegung des Wagens ausreicht.

#### 4.1.12. Berechnung 3: Mit Hemmschuh gesicherter 4-achsiger Güterwagen

Die Modellierung des Hemmschuhs wird mittels der Hubarbeit, die geleistet werden muss, um den abgestellten Güterwagen auf die Höhe des Hemmschuhs anzuheben, durchgeführt. Es wird angenommen, dass der Hemmschuh satt an der Lauffläche des Rades anliegt. Dabei werden zunächst das anprallende Schienenfahrzeug und der abgestellte Güterwagen jeweils als Punktmasse modelliert. Ziel der Auswertung ist die kritische Anprallgeschwindigkeit, ab der der Radsatz über den Hemmschuh rollen kann, zu berechnen. In einem zweiten Schritt wird untersucht, wie sich die kritische Anprallgeschwindigkeit verändert, wenn die erforderliche Hubhöhe durch den Federweg der Primärfederung am Rad überwunden wird. Für die erste Modellierung wird die kinetische Energie des anprallenden Wagens (als Punktmasse) der potentiellen Energie, die dem stillstehenden Wagen zugeführt werden muss, gleichgesetzt. Die Berechnungsergebnisse sind in den Formeln (38) (leer) und (39) (beladen) ersichtlich.

$$\frac{m_{imp} \cdot v_{imp,crit}^2}{2} = m_{Fzg} \cdot g \cdot h_{crit} \quad (37)$$

$$v_{imp,crit,leer} = 0,93 \frac{m}{s} \triangleq 3,36 \frac{km}{h} \quad (38)$$

$$v_{imp,crit,beladen} = 2,21 \frac{m}{s} \triangleq 7,96 \frac{km}{h} \quad (39)$$

$m_{imp}$  ... anprallende Masse (Annahme 40 t, siehe Unterkapitel 4.1.8)

$v_{imp,crit}$  ... kritische Anprallgeschwindigkeit

$m_{Fzg}$  ... Masse des abgestellten Wagens (Unterscheidung leer/beladen)

$h_{crit}$  ... kritische Hubhöhe (0,111 m, siehe Abb. 4-3)

In der zweiten Modellierung wird die Primärfederung des Rades, an dem der Hemmschuh angebracht, berücksichtigt. Der Federweg, der zwischen leerem Zustand und voll beladenem Zustand auftritt, wird mit 5 cm angenommen. Die Federkraft ergibt sich aus der Radlast (im vollbeladenen Zustand 11,25 t). Daraus kann die Federkonstante K berechnet werden.

$$K = \frac{F_K}{x_F} = \frac{11250 \cdot 9,81}{0,05} = 2207250 \frac{N}{m} \quad (40)$$

Für die Auswertung der kritischen Anprallgeschwindigkeit wird die kinetische Energie des anprallenden Wagens (als Punktmasse), der benötigten kinetischen Energie zur Überwindung der kritischen Hubhöhe mittels des Federwegs gleichgesetzt. Das Berechnungsergebnis ist in Formel (42) dargestellt.

$$\frac{m_{imp} \cdot v_{imp,crit}^2}{2} = \frac{K \cdot h_{crit}^2}{2} \quad (41)$$

$$v_{imp,crit} = 0,82 \frac{m}{s} \cong 2,97 \frac{km}{h} \quad (42)$$

### Diskussion

Eine Anpralleinwirkung auf einen abgestellten mit einem Hemmschuh abgesicherten Güterwagen kann ab ca. 3 km/h Anprallgeschwindigkeit gefährlich sein. Das Risiko ist, dass je nach Längsgefälle des Gleises der Wagen, wenn er durch den Anprall den Hemmschuh mit einer Achse überfährt, mit den nachfolgenden Achsen mit einer gewissen Geschwindigkeit am Hemmschuh anläuft und dabei eine hohe Wahrscheinlichkeit des Überfahrens ebenfalls gegeben ist. Da ein mit Hemmschuh abgesicherter Wagen normalerweise sonst keinerlei Sicherungsmittel aufweist, stellt das erzwungene Überrollen eines Hemmschuhs durch Anprall eine große Gefahr dar, ein Entrollen auszulösen. Hemmschuhe werden auch zum Abbremsen von abgestoßenen oder abrollenden Fahrzeugen benutzt. Deshalb sind sie so konzipiert, dass die Hemmschuhe durch Gleiten am Schienenkopf kinetische Energie in Wärmeenergie durch Reibung umwandeln und nicht überrollt werden. Durch die plötzliche Kraftaufbringung durch Anprall und das satte Aufliegen des Hemmschuhs an der Lauffläche, ist es wahrscheinlich, dass ein Überrollen des Hemmschuhs trotzdem möglich ist.

#### **4.1.13. Berechnung 4: Mit Druckluft gesicherte Wagengruppe aus 5 gebremsten Wagen**

In dieser Berechnung wird untersucht, welche Grenzeinwirkungen für eine Wagengruppe mit 5 gebremsten Wagen, die mit einer Vollbremsung eingebremst wurden, existieren. Grundsätzlich gibt es für diese Regelung keine Längsneigungsbeschränkung [28]. Somit wird analog zu den vorhergehenden Berechnungen vorgegangen und Fälle für die Längsneigungen 2,5 ‰, 5 ‰, 10 ‰, 15 ‰ und 20 ‰ ausgewertet. Die Annahmen bezüglich des Druckverlusts und die daraus resultierenden Bremskraftverluste wurden im Unterkapitel 4.1.4 dargestellt. Für die Berechnung muss ein Bremsgewicht angenommen werden, welches ein Wagen mit der Druckluftbremse normalerweise erreicht. Das Bremsgewicht wird über die erreichten Bremshundertstel ermittelt. In den zur Verfügung gestellten Unterlagen werden bei Güterwagen im voll beladenen Zustand etwa 65-75 % Bremshundertstel und im leeren Zustand etwa 100-120 % Bremshundertstel erreicht. Um eine „worst case“ Analyse durchzuführen, werden die Minimalwerte als Annahme gewählt. Somit kann das Bremsgewicht und weiterführend auch die wirkende Bremskraft ermittelt werden [30].

$$B_{beladen} = \lambda_{beladen} \cdot G_{beladen} = 0,65 \cdot 90 = 58,5t \quad (43)$$

$$B_{leer} = \lambda_{leer} \cdot G_{leer} = 1,0 \cdot 16 = 16t \quad (44)$$

$$B = \frac{F_{kl,ges}}{9,81} \cdot \frac{10}{7} \cdot \gamma \cdot \frac{9}{8} \quad (45)$$

$$F_{kl,ges} = \frac{B \cdot 9,81}{\left(\frac{10}{7}\right) \cdot \left(\frac{9}{8}\right) \cdot \gamma} \quad (46)$$

B ... Bremsgewicht der Druckluftbremse [t]

$\lambda$  ... Brems Hundertstel [%]

G ... Gewicht des Güterwagens [t]

$F_{kl,ges}$  ... Gesamtklotzkraft des Güterwagens [kN]

$\gamma$  ... Beiwert zur Bremsgewichtsberechnung lt. UIC 544-1-1A, Anlage 2 [33]

9/8 ... Faktor zur Umrechnung der dynamischen Klotzkraft während der Fahrt und der Klotzkraft im Stillstand

Der Beiwert  $\gamma$  variiert je nach Höchstgeschwindigkeit und Gesamtgewicht. Deshalb werden Faktoren gewählt, die anhand der zur Verfügung gestellten Unterlagen als Annahmen sinnvoll erscheinen. Für einen leeren Güterwagen wird  $\gamma = 1,26$  und für einen voll beladenen Güterwagen wird  $\gamma = 0,71$  gewählt. Damit ergeben sich folgende Gesamtklotzkräfte:

$$F_{kl,ges,beladen} = \frac{B_{beladen} \cdot 9,81}{\left(\frac{10}{7}\right) \cdot \left(\frac{9}{8}\right) \cdot \gamma_{beladen}} = 502,9kN \quad (47)$$

$$F_{kl,ges,leer} = \frac{B_{leer} \cdot 9,81}{\left(\frac{10}{7}\right) \cdot \left(\frac{9}{8}\right) \cdot \gamma_{leer}} = 77,5kN \quad (48)$$

Die Gesamtklotzkraft wird aufgrund des Druckluftverlusts nach einer Stunde verringert. Die resultierende Gesamtklotzkraft pro Wagen nach einer Stunde für die Varianten 1-6 (siehe Unterkapitel 4.1.4) sind in Tab. 4-12 dargestellt. Die Varianten 1-3 betreffen Wagen ohne ALB und 4-6 Wagen mit ALB.

**Tab. 4-12: Gesamtklotzkraft nach 1h pro Wagen**

$F_{kl,ges}$ nach 1h [kN]	V.1	V.2	V.3	V.4	V.5	V.6
beladen	83,82	419,11	461,02	83,82	419,11	461,02
leer	12,92	64,59	71,05	0,00	33,64	55,57

Da in dieser Berechnung eine Wagengruppe mit 5 Einzelwagen betrachtet wird, wirkt in der Wagengruppe die fünffache Gesamtklotzkraft (siehe Tab. 4-13). Es wird von einer homogenen Wagengruppe mit fünf leeren vierachsigen Wagen und fünf voll beladenen

vierachsigem Wagen ausgegangen („worst case“). Somit hat die gesamte Wagengruppe eine Masse von 80 t (leer) bzw. 450 t (beladen).

**Tab. 4-13: Gesamtklotzkraft nach 1h pro Wagengruppe**

$F_{kl,ges}$ nach 1h [kN]	V.1	V.2	V.3	V.4	V.5	V.6
beladen	419,11	2095,56	2305,12	419,11	2095,56	2305,12
leer	64,59	322,96	355,26	0,00	168,18	277,87

Um die wirkende Festhaltebremskraft zu ermitteln, muss die Gesamtklotzkraft mit dem Reibwert multipliziert werden. Die Reibwerte können je nach Bremsbelag stark variieren. Da die Ergebnisse aber aus dem Bremsgewicht rückgerechnet sind, wird ebenfalls der in den Unterlagen angegebene Reibwertbereich angenommen. Auf die erzielten Reibwerte hat neben äußeren Witterungseinflüssen, auch die aufgebrachte Klotzkraft einen Einfluss. Je höher die Klotzkraft, desto niedriger ist der erzielte Reibwert. Die Einflüsse auf den Klotzreibwert sind in der Theorie im Anhang A diskutiert. Für die Berechnung wird ein Klotzreibwert von 0,26 (leer) und 0,23 (beladen) angenommen [30].

Mittels des Klotzreibwerts können die Bremskraftzahlen der einzelnen Varianten ausgewertet werden. Die Ergebnisse sind in Tab. 4-14 dargestellt.

**Tab. 4-14: Bremskraftzahlen nach 1h**

$f_{b,pn}$ nach 1h [‰]	V.1	V.2	V.3	V.4	V.5	V.6
beladen	22	109	120	22	109	120
leer	21	107	118	0	56	92

Für die Gegenüberstellung mit den verschiedenen Einwirkungen, wird die Wagenwiderstandszahl benutzt. Diese ergibt sich aus der Addition von Bremskraftzahl und Anfahrwiderstandszahl. Die Wagengruppe weist eine Anfahrwiderstandszahl von 3 ‰ auf. Wie in Tab. 4-15 zu sehen, kann eine Längsneigung ab 3 ‰ bei leeren Wagen mit ALB und ab 24 ‰ bei sonstigen Wagen bei entsprechendem Druckverlust gefährlich sein.

**Tab. 4-15: Wagenwiderstandszahlen nach 1h**

$f_w$ nach 1h [‰]	V.1	V.2	V.3	V.4	V.5	V.6
beladen	25	112	123	25	112	123
leer	24	110	121	3	59	95

In den folgenden Szenarien werden Wind- und Anpralleinwirkung in Kombination mit verschiedenen Längsneigungen diskutiert.

Szenario 1: Wagenwiderstand + Längsneigung + Windeinwirkung (Wagen mit Druckluftbremse gebremst und 1h abgestellt)

In diesem Szenario werden die kritischen Windgeschwindigkeiten im Vergleich zu den verschiedenen betrachteten Längsneigungen und den verschiedenen Wagenwiderstandszahlen ausgewertet. Dabei wird die Formel (36) für die Berechnung verwendet. Die Ergebnisse sind in Tab. 4-16 (beladen) und Tab. 4-17 (leer) dargestellt.

**Tab. 4-16: kritische Windgeschwindigkeiten für jede Variante (beladen)**

$v_{s,crit}$ [km/h]	V.1	V.2	V.3	V.4	V.5	V.6
$i = 0 ‰$	187,6	398,5	417,2	187,6	398,5	417,2
$i = 2,5 ‰$	177,8	393,8	412,9	177,8	393,8	412,9
$i = 5 ‰$	167,4	389,5	408,6	167,4	389,5	408,6
$i = 10 ‰$	144,7	380,2	400,0	144,7	380,2	400,0
$i = 15 ‰$	118,1	370,8	391,0	118,1	370,8	391,0
$i = 20 ‰$	82,8	361,1	382,0	82,8	361,1	382,0

**Tab. 4-17: kritische Windgeschwindigkeiten für jede Variante (leer)**

$v_{s,crit}$ [km/h]	V.1	V.2	V.3	V.4	V.5	V.6
$i = 0 ‰$	78,5	166,3	174,2	27,4	121,7	154,8
$i = 2,5 ‰$	74,2	164,5	172,4	11,2	118,8	152,6
$i = 5 ‰$	69,8	162,4	170,6	0,0	116,3	150,5
$i = 10 ‰$	60,1	158,8	167,0	0,0	110,5	146,2
$i = 15 ‰$	48,6	154,4	163,1	0,0	104,8	141,8
$i = 20 ‰$	33,1	150,5	159,1	0,0	98,6	137,5

Leere Wagen sind deutlich anfälliger gegenüber Windeinwirkung, wenn die Druckluftbremse verwendet wird. Beim höchsten angenommenen Druckluftverlust würde bei Wagen mit ALB je nach Längsneigung eine sehr geringe Windgeschwindigkeit ausreichen, um den Wagen bei ungünstigen Verhältnissen in Bewegung zu setzen. Bei sonstigen Wagen würde beim höchsten angenommenen Druckluftverlust bereits bei 10 ‰ Längsneigung eine Windgeschwindigkeit von 60 km/h ausreichen. Bei beladenen Wagen spielt die Windeinwirkung selbst beim höchsten Druckluftverlust eine geringe Rolle.

Szenario 2: Wagenwiderstand + Längsneigung + Anpralleinwirkung (Wagen mit Druckluftbremse gebremst und 1h abgestellt)

In diesem Szenario wird die kritische Anprallgeschwindigkeit in Abhängigkeit verschiedener Längsneigung und den betrachteten Varianten ausgewertet. Dabei wird folgende Bedingung verwendet.

$$\frac{f_W + f_N}{f_{imp}} \geq 1 \rightarrow \text{Entrollen unwahrscheinlich} \quad (49)$$

$$\frac{f_W + f_N}{f_{imp}} < 1 \rightarrow \text{Entrollen wahrscheinlich} \quad (50)$$

$$\left( \frac{f_W + f_N}{f_{imp}} \right)_{crit} = 1 \quad (51)$$

Die Ergebnisse der Auswertung der kritischen Anprallgeschwindigkeit sind in Tab. 4-18 (leer) und Tab. 4-19 (beladen) dargestellt.

**Tab. 4-18: kritische Anprallgeschwindigkeiten für jede Variante (beladen)**

$V_{imp,crit}$ [km/h]	V.1	V.2	V.3	V.4	V.5	V.6
$i = 0 \text{ ‰}$	0,1	0,4	0,5	0,1	0,4	0,5
$i = 2,5 \text{ ‰}$	0,1	0,4	0,5	0,1	0,4	0,5
$i = 5 \text{ ‰}$	0,1	0,4	0,5	0,1	0,4	0,5
$i = 10 \text{ ‰}$	0,1	0,4	0,4	0,1	0,4	0,4
$i = 15 \text{ ‰}$	0	0,4	0,4	0	0,4	0,4
$i = 20 \text{ ‰}$	0	0,4	0,4	0	0,4	0,4

**Tab. 4-19: kritische Anprallgeschwindigkeiten für jede Variante (leer)**

$V_{imp,crit}$ [km/h]	V.1	V.2	V.3	V.4	V.5	V.6
$i = 0 \text{ ‰}$	0	0,1	0,1	0	0	0,1
$i = 2,5 \text{ ‰}$	0	0,1	0,1	0	0	0,1
$i = 5 \text{ ‰}$	0	0,1	0,1	0	0	0,1
$i = 10 \text{ ‰}$	0	0,1	0,1	0	0	0,1
$i = 15 \text{ ‰}$	0	0,1	0,1	0	0	0,1
$i = 20 \text{ ‰}$	0	0,1	0,1	0	0	0,1

In den Auswertungen ist ersichtlich, dass wenige Zehntel km/h Anprallgeschwindigkeit ausreichen, um den Wagen in Bewegung zu setzen. Die Längsneigung hat eine vernachlässigbare Auswirkung auf die kritische Anprallgeschwindigkeit.



## Diskussion

Das Abstellen mit Druckluftbremse für eine Stunde stellt für fünf leere Güterwagen mit ALB eine große Gefährdung dar. Die Wagengruppe weist unter den maximal angenommenen Druckverlusten nach einer Stunde keinerlei Bremswirkung mehr auf und somit entsteht bereits bei sehr geringen Windgeschwindigkeiten ab etwa 27 km/h eine hohe Entrollwahrscheinlichkeit. Eine solche Wagengruppe könnte ohne andere Einwirkungen analog zum ungebremsten Einzelwagen nur bis zu einer Längsneigung von maximal 3 ‰ abgesichert werden. In Kombination von Längsneigung und geringer Windeinwirkung, entsteht eine hohe Entrollwahrscheinlichkeit aber bereits bei geringeren Längsneigungen. Für sonstige Güterwagengruppen ist die Windeinwirkung im beladenen und im leeren Zustand ohne andere Einwirkungen weitgehend ungefährlich. Beim höchsten angenommenen Druckverlust würden Windgeschwindigkeiten ab etwa 78 km/h eine Gefährdung verursachen. Des Weiteren können diese Wagengruppen bis etwa 24 ‰ Längsneigung ohne andere Einwirkungen eine Stunde abgesichert werden. In Kombination von Längsneigung und Wind ist bei 20 ‰ Längsneigung im „worst case“ etwas über 30 km/h Windgeschwindigkeit ausreichend, um die Wagengruppe in Bewegung zu setzen. Fahrzeuganprall stellt für alle betrachteten Fälle eine große Gefährdung dar. Es reichen wenige Zehntel-km/h Anprallgeschwindigkeit, um die Wagengruppe zu bewegen.

### **4.1.14. Problematik mit Bremsgewicht und Bremshundertstel**

Die vorgeschriebenen Festhaltebremshundertstel für das Absichern abgestellter Wagen ermitteln sich nach (2) durch das Verhältnis von Bremsgewicht zu Gesamtgewicht. Die Grenzwerte können Tab. 4-1 entnommen werden. Die Umrechnung von vorhandener Festhaltebremskraft der Handbremse zu Feststellbremsgewicht erfolgt unter Berücksichtigung eines Reibwerts zwischen Bremsklotz und Rad für Grauguss(GG)-Bremssohlen von 0,19. Der angesetzte Reibwert wurde für eine Fahrgeschwindigkeit von 50 km/h ermittelt. Der statische Reibwert von GG-Bremssohlen beträgt 0,35 [33]. Somit ergibt sich bei GG-Bremssohlen eine Differenz zwischen dem umgerechneten Feststellbremsgewicht, welches für die Ermittlung der erforderlichen Festhaltebremshundertstel relevant ist, und der tatsächlich erreichten Festhaltebremskraft durch die Handbremse. Bei K- oder LL-Bremssohlen liegt sowohl der dynamische Reibwert bei 50 km/h, als auch der statische Reibwert bei etwa 0,2 [33]. Dadurch kommt es zu verschiedenen tatsächlich vorhandenen Festhaltebremskräften je nach Art des Bremssystems. Deshalb wird von der UIC vorgeschlagen, dass anstatt Bremsgewichte für die Wagenaufschrift und für die Bremshundertstel-Berechnung, die Festhaltebremskraft

verwendet wird [34]. Dieser Vorschlag befindet sich seitens der ÖBB bereits in Umsetzung. Eine entsprechende Anpassung der ÖBB-Richtlinie 30 Dienstvorschrift 01 [28] wird gerade erarbeitet. Zur weiteren Diskussion der Problematik wird auf [34] verwiesen.

#### **4.1.15. Zusammenfassung**

Die Regelungen für das Absichern von abgestellten Fahrzeugen sind in Österreich in der ÖBB-Richtlinie 30 Dienstvorschrift 01 [28] (ehemals Betriebsvorschrift V3) festgelegt. Das Absichern eines Wagens oder einer Wagengruppe ist sowohl durch eine Verwendung von den Handbremsen der Wagen – sofern vorhanden –, als auch durch Hemmschuhe erlaubt. Eine Kombination der beiden Sicherungsmittel ist ebenfalls zulässig. Bei einer Wagengruppe von mindestens fünf Wagen ist die Absicherung mittels der Druckluftbremse für maximal eine Stunde erlaubt. Auf die abgestellten Wagen wirken treibende Kräfte durch die Längsneigung des Gleises, durch Wind und durch Anprall von anderen Schienenfahrzeugen. Wenn die treibenden Kräfte, die rückhaltenden fahrzeugseitigen Widerstände (Anfahrwiderstand und Bremswiderstand) übertreffen, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass das abgestellte Fahrzeug in Bewegung gebracht wird. Als Vergleichsgröße zwischen Einwirkungen und Widerständen werden Kraftzahlen gewählt. Diese ergeben sich durch die Division der Tangentialkräfte durch die Normalkräfte (siehe (1)). Um Grenzzustände zu erheben, werden mehrere „worst case“ Berechnungen für Güterwagen berechnet.

In der ersten Berechnung wird ein ungebremster vierachsiger Güterwagen modelliert. Ungebremste Güterwagen weisen bereits ab 3 ‰ Längsneigung ohne andere Einwirkungen eine hohe Wahrscheinlichkeit auf zu entrollen. Reine Windeinwirkung ohne Längsneigung stellt bereits bei geringen Windgeschwindigkeiten von unter 25 km/h eine hohe Gefährdung dar. Längsneigung kombiniert mit geringer Windeinwirkung verursacht somit eine hohe Chance auf einen Bewegungsbeginn bereits bei sehr geringen Längsneigungen unter 2,5 ‰. Anpralleinwirkungen im Bereich von unter einem Zehntel-km/h Anprallgeschwindigkeit verursachen ebenfalls bereits eine Bewegung des abgestellten Wagens.

In der zweiten Berechnung wird ein mit Handbremse abgesicherter 4-achsiger Güterwagen betrachtet. Die Bremswirkung der Handbremse ist stark von der aufgebrauchten Anziehungskraft und somit von der Person, der diese bedient, abhängig. Durch Kantenpressungen und Lagerspiele im Bremsgestänge, kann eine hohe subjektive Anziehungskraft während des Anziehvorgangs entstehen, ohne die Bremskraft tatsächlich zu erreichen. Deshalb birgt die Verwendung der Handbremse eine gewisse Gefahr, dass die angenommene Bremskraft

nicht der tatsächlichen Bremskraft am Wagen entspricht. Bei geringer Anziehungskraft (etwa 20 %) kann der Wagen in einem Längsgefälle von bis zu 5 ‰, bei voller Anziehungskraft bis etwa 14 ‰ ohne die Berücksichtigung anderer Einwirkungen abgesichert werden. Bei 20 % Anziehungskraft stellen Windgeschwindigkeiten ab etwa 50 km/h ohne Längsneigung eine hohe Gefährdung dar. Bei voller Anziehungskraft sind ohne Berücksichtigung von Längsneigung hohe Windgeschwindigkeiten über 110 km/h gefährlich. Bei Kombination von Längsneigung und Windeinwirkung werden die entsprechenden Grenzwerte beider Einwirkungen verringert, sodass bei geringer Anziehungskraft bereits Längsneigungen unter 5 ‰ bei vergleichsweise geringen Windgeschwindigkeiten ab 30 km/h gefährlich sein können. Anpralleinwirkung ist auch in dieser Berechnung für eine Bewegung des abgestellten Wagens eine große Gefahr. Es reicht auch bei voller Anziehungskraft bereits 0,1 km/h Anprallgeschwindigkeit für einen Bewegungsbeginn aus.

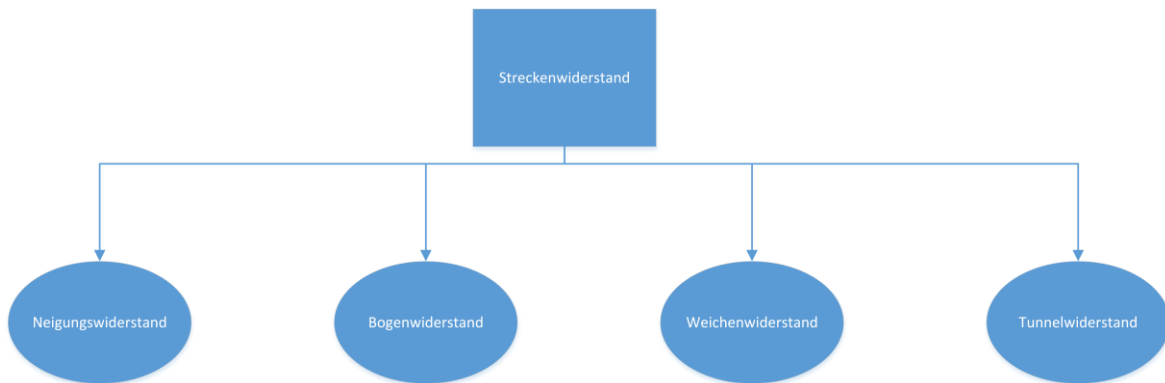
Die dritte Berechnung umfasst einen mit Hemmschuh abgesicherten 4-achsigen Güterwagen. Laut Expertenmeinungen kann es durch Längsneigung und/oder Windeinwirkungen bei sattem Aufliegen des Hemmschuhs an der Lauffläche des Rades zu keinem Überrollen des Hemmschuhs kommen. Schienenfahrzeuganprall kann hingegen bereits ab etwa 3 km/h Anprallgeschwindigkeit ein Überrollen verursachen. Durch das Überrollen des Hemmschuhs durch eine Achse, laufen die weiteren Achsen bereits mit einer gewissen Geschwindigkeit am Hemmschuh an, sodass die Gefahr des Überrollens ebenfalls gegeben ist. Da mit Hemmschuhen abgesicherte Wagen normalerweise keine anderen Sicherungsmittel aufweisen, löst der Überrollvorgang mit hoher Wahrscheinlichkeit ein uneingeschränktes Entrollen des danach ungebremsten Wagens aus.

In der vierten Berechnung wird eine Wagengruppe von fünf Wagen betrachtet. Diese ist mit der Druckluftbremse abgesichert und wird nach einer Zeit von einer Stunde unter verschiedenen Annahmen für Druckluftverluste den Einwirkungen gegenübergestellt. Bei einer Wagengruppe von fünf leeren Wagen mit ALB ist – mit den getroffenen Annahmen der Druckverluste – die komplette Bremswirkung nach einer Stunde nicht mehr vorhanden. Somit ist die Wagengruppe ungebremst und weist bereits bei geringen Längsneigungen von 3 ‰ ohne andere Einwirkungen eine hohe Entrollwahrscheinlichkeit auf. Windeinwirkungen sind bereits ab Windgeschwindigkeiten von 27 km/h ohne Berücksichtigung der Längsneigung gefährlich. In Kombination von Längsneigung und Windeinwirkung sinkt die kritische Längsneigung bei sehr geringen Windgeschwindigkeiten bereits unter 2,5 ‰. Bei sonstigen Güterwagen beträgt die kritische Längsneigung ohne andere Einwirkungen etwa 24 ‰. Windeinwirkungen ohne Längsneigung sind ab

Windgeschwindigkeiten von 78 km/h als gefährlich zu betrachten. In Kombination von Längsneigung und Windeinwirkung sinken die jeweiligen Grenzzustände, sodass bei ca. 20 ‰ Längsneigung beispielsweise eine Windgeschwindigkeit ab etwa 30 km/h eine hohe Gefährdung darstellt. Anprall von Schienenfahrzeugen verursacht bei allen Wagengruppen eine hohe Gefährdung für das in Bewegung setzen. Anprallgeschwindigkeiten von wenigen Zehntel-km/h reichen bereits aus, um die Wagengruppe in Bewegung zu setzen.

## **4.2. Geschwindigkeitszunahme entrollter Wagen**

Um die potentiellen Auswirkungen von entrollten Wagen oder Wagengruppen zu veranschaulichen, wird in diesem Kapitel die mögliche Geschwindigkeitszunahme im Verlauf des Entrollvorgangs dargestellt. Die Geschwindigkeitszunahme kann auch in Form einer Energiezunahme beschrieben werden und ist deshalb von der entrollenden Masse unabhängig. Bei der Abschätzung der Gefährdung bzw. der Folgeschäden an den entrollenden Fahrzeugen und an der Infrastruktur spielt die entrollte Masse eine große Rolle. Es wird in den folgenden Betrachtungen davon ausgegangen, dass der Entrollvorgang bereits initiiert wurde – durch eine beliebige Ursache. Eine mögliche Bremswirkung (z.B. durch eine leicht angezogene Handbremse) wird mit einer Erhöhung des Grundwiderstands berücksichtigt. Der Anfangszustand für die Berechnungen ist, dass ein oder mehrere Wagen sich ungewollt in Bewegung gesetzt haben und die ersten ein bis zwei Meter bereits zurückgelegt haben. Das heißt, dass der verringerte Grundwiderstand, der bei der Fahrt angesetzt wird, bereits wirkt und nicht mehr der höhere Anfahrwiderstand (siehe dazu Abb. 4-2). Zusätzlich zum Grundwiderstand wirkt fahrzeugseitig der äußere Luftwiderstand, der hauptsächlich von der Fahrgeschwindigkeit abhängig ist (siehe Abb. 4-4). Bei der Betrachtung wird von entrollenden Güterwagen ausgegangen, da diese den Großteil an Vorfällen mit entrollten Wagen ausmachen. Deshalb werden der innere Luftwiderstand und der Antriebssystemwiderstand nicht berücksichtigt. Dies ist im Sinne einer „worst case“ Betrachtung auf der sicheren Seite, da die beiden Widerstände die Energiezunahme verringern würden. Die möglichen streckenseitigen Widerstände sind in Abb. 4-25 dargestellt.



**Abb. 4-25: Überblick über streckenseitig wirkende Widerstände (vgl. [27])**

Der Neigungswiderstand wird, wenn ein Gefälle durchfahren wird, in den Berechnungen negativ eingesetzt. Der Tunnelwiderstand berücksichtigt den erhöhten Luftwiderstand während der Fahrt durch einen Tunnel. Da der Tunnelwiderstand eine Verringerung der Energiezunahme verursachen würde, wird in der Berechnung auf der sicheren Seite liegend angenommen, dass kein Tunnel während des Entrollens durchfahren wird. Die wirkenden Widerstände während der Fahrt können zum Fahrwiderstand zusammengefasst werden.

$$w_f = w' + w_v + w_n + w_w + w_b \quad (52)$$

$w_f$  ... Fahrwiderstand [‰]

$w'$  ... Grundwiderstand [‰]

$w_v$  ... Luftwiderstand [‰]

$w_n$  ... Neigungswiderstand [‰]

$w_w$  ... Weichenwiderstand [‰]

$w_b$  ... Bogenwiderstand [‰]

Für die Annahmen der Werte und die Berechnung des Fahrwiderstands wurden übermittelte ÖBB-Schulungsunterlagen verwendet [29]. Die Ansätze werden in der Praxis alltäglich verwendet. Der Grundwiderstand wird mit 2 ‰ angenommen. Die Berechnungsformel für den Bogenwiderstand ist in (53) und (54) dargestellt. Der Bogenwiderstand wird mit der Formel von Röckl berechnet und ist getrennt für enge Bogenradien (<300 m) und größere Bogenradien angegeben. Aufgrund des abnehmenden Bogenwiderstands mit zunehmendem Bogenradius, sind die Bogenwiderstände ab 1000 m vernachlässigbar.

$$R < 300: w_b = \frac{500}{R - 30} \quad (53)$$

$$R \geq 300: w_b = \frac{650}{R - 55} \quad (54)$$

$v$  ... Fahrgeschwindigkeit [m/s]

R ... Bogenradius [m]

Für den Weichenwiderstand sind je nach Gleislage 0,5 ‰ bis 1 ‰ anzusetzen [27].

Da der Bogenwiderstand und der Weichenwiderstand ebenfalls die Energiezunahme verringern würden, wird im Sinne der „worst case“ Berechnung von einer geraden Strecke ohne die Durchfahrung von Weichen ausgegangen. Somit degeneriert der Fahrwiderstand zu folgender Formel (siehe (55)).

$$w_f = w' + w_v + w_n \quad (55)$$

Der Luftwiderstand ergibt sich durch den Luftwiderstandsbeiwert und die angeströmte Querschnittsfläche (siehe Unterkapitel 4.1.7). Grundsätzlich gilt daher folgender Ansatz:

$$w_v \left( \frac{dx(t)}{dt} \right) = a \cdot \left( \frac{dx(t)}{dt} \right)^2 \quad (56)$$

Durch die Fahrgeschwindigkeit wird der resultierende Anströmwinkel nahe 0° liegen (siehe Abb. 4-4). Der Luftwiderstandsbeiwert bei 0° Anströmwinkel ergibt sich beim untersuchten Fahrzeug zu ca. 1,3 (siehe Abb. 4-7). Da es sich hier um das Fahrzeug mit dem höchsten Luftwiderstand unter allen betrachteten Fahrzeugtypen handelt und in der jetzigen Betrachtung ein höherer Widerstand eine geringere Geschwindigkeitszunahme verursachen würde, wird im Sinne der „worst case“ Betrachtung ein Luftwiderstandsbeiwert von 1,0 angesetzt. In Kombination mit der Querschnittsfläche ergibt sich damit ein Faktor a von  $1,8 \cdot 10^{-5}$ .

Zur iterativen Bestimmung des Luftwiderstands in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit wird die Bewegungsgleichung formuliert und der Luftwiderstand in Zeitschritten von 0,01 s iteriert. Die Iteration erfolgt mittels MATLAB (The MathWorks®). Die Formeln zur iterativen Bestimmung sind wie folgt.

$$\frac{d^2x(t + \Delta t)}{dt^2} = g \cdot \left( w_n - w' - w_v \left( \frac{dx(t)}{dt} \right) \right) \quad (57)$$

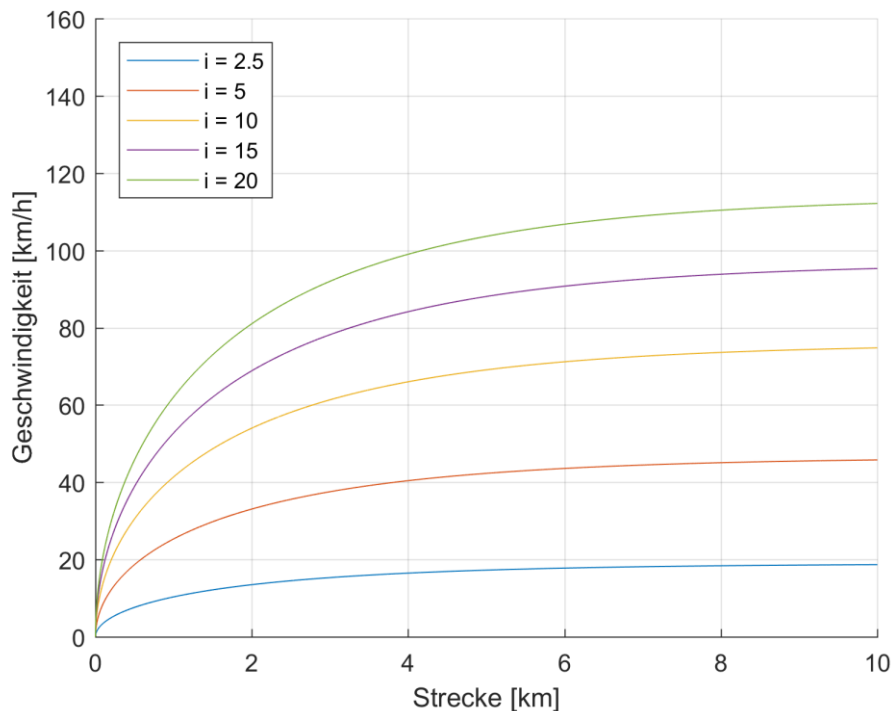
$$\frac{dx(t + \Delta t)}{dt} = \frac{dx(t)}{dt} + \frac{d^2x(t)}{dt^2} \cdot \Delta t \quad (58)$$

$$x(t + \Delta t) = x(t) + \frac{dx(t)}{dt} \cdot \Delta t + \frac{d^2x(t)}{dt^2} \cdot \frac{\Delta t^2}{2} \quad (59)$$

In den folgenden Unterkapiteln wird die Geschwindigkeitszunahme eines ungebremsten und leicht gebremsten Wagens dargestellt. Des Weiteren wird ein in der Realität passierter Vorfall berechnet, um eine Einschätzung der tatsächlich auftretenden kinetischen Energie und Geschwindigkeiten zu erreichen, um diese bei der Planung von Anlagen zur Aufhaltung entrollter Wagen zu berücksichtigen.

#### 4.2.1. Berechnung 1: Entrollen eines ungebremsten Wagens

In der ersten Berechnung wird von einem ungebremsten Wagen ausgegangen und einer konstanten Längsneigung über eine Strecke von 10 km. Als Längsneigungen werden 2,5 ‰, 5 ‰, 10 ‰, 15 ‰ und 20 ‰ betrachtet. Die Geschwindigkeitszunahme über die zurückgelegte Fahrtstrecke ist in Abb. 4-26 dargestellt.



**Abb. 4-26: Verlauf der Geschwindigkeit während dem Entrollvorgang bei konstanter Längsneigung und 2 ‰ Grundwiderstand**

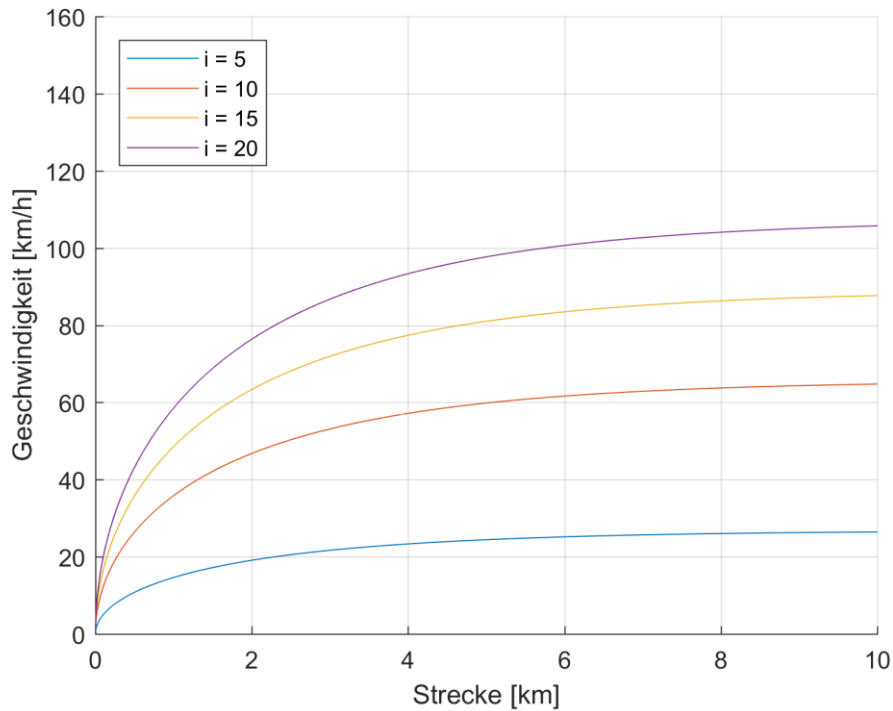
Es ist zu erkennen, dass selbst bei einer geringen Längsneigung von 2,5 ‰ – je nach entrollender Masse – die kinetische Energie der entrollten Wagen nach kurzer Fahrtstrecke bereits sehr hoch sein kann. Bei höheren Längsneigungen ist die Geschwindigkeitszunahme so hoch, dass bereits kurz nach dem Entrollen eine schadensarme Aufhaltung schwierig zu gewährleisten ist.

#### 4.2.2. Berechnung 2: Entrollen eines leicht gebremsten Wagens

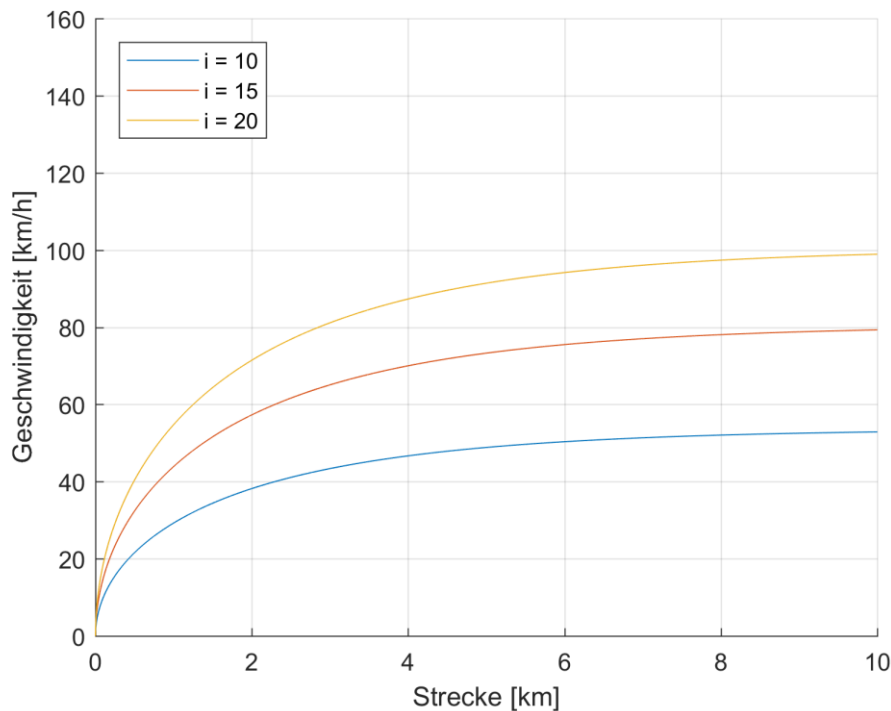
In der zweiten Berechnung wird ein erhöhter Grundwiderstand, aufgrund einer leicht angezogenen Handbremse oder geringen Restbremswirkung der Druckluftbremse angenommen. Der Grundwiderstand wird um 2 ‰ bzw. 4 ‰ auf insgesamt 4 ‰ bzw. 6 ‰ angehoben, was einem Bremsstufenfaktor der Handbremse bei beladenen Wagen von 17 % bzw. 35 % entspricht. Eine Längsneigung von 2,5 ‰ wird nicht mehr betrachtet, da der Wagen aufgrund des erhöhten Grundwiderstands je nach Initiierung der Bewegung



nach kurzer Strecke wieder zum Stillstand kommen wird. Im Fall von 6 ‰ Grundwiderstand wird aus demselben Grund eine Längsneigung von 5 ‰ nicht mehr betrachtet. Die Auswertungen der Geschwindigkeitszunahme über die Fahrtstrecke sind in Abb. 4-27 (4 ‰ Grundwiderstand) und Abb. 4-28 (6 ‰ Grundwiderstand) dargestellt.



**Abb. 4-27: Verlauf der Geschwindigkeit während dem Entrollvorgang bei konstanter Längsneigung und 4 ‰ Grundwiderstand**



**Abb. 4-28: Verlauf der Geschwindigkeit während dem Entrollvorgang bei konstanter Längsneigung und 6 ‰ Grundwiderstand**

Es ist zu erkennen, dass bei hohen Längsneigungen über 10 ‰ der erhöhte Grundwiderstand keine wesentliche Reduktion der Entrollgeschwindigkeit verursacht, da in höheren Geschwindigkeitsbereichen der Luftwiderstand immer mehr dominierend wird. Somit lässt sich schlussfolgern, dass selbst Wagen mit leichter Bremswirkung, wenn sie in Bewegung gebracht werden und entsprechende Längsneigungen vorhanden sind, zum Entrollen über weite Distanzen neigen.

#### 4.2.3. Berechnung 3: Nachrechnung eines in der Realität passierten Vorfalles

In der folgenden Berechnung wird ein tatsächlich passierter Vorfall einer entrollten Wagengruppe modelliert. Wie in Kapitel 2 beschrieben, ist am 19.10.2016 in Randegg eine Wagengruppe von fünf Wagen mit einem Gesamtgewicht von 200 t entrollt. Diese rollte ca. 20 km bis Wieselburg a. d. Erlauf und stieß dort mit einem Personenzug zusammen. Der durchschnittliche Gradientenverlauf (lt. VzG<sup>5</sup> [35]) auf dieser Strecke ist in Abb. 4-29 dargestellt. Die entrollte Wagengruppe hat eine Gesamthöhendifferenz von 156 m überwunden. Das Ziel der Berechnung ist die Geschwindigkeit und die kinetische Energie

<sup>5</sup> Das Verzeichnis zulässiger Geschwindigkeiten (VzG) beinhaltet für jede VzG-Strecke der ÖBB-Infrastruktur Streckendaten (Kilometrierung, wichtige betriebliche Punkte, Längsneigung, Geschwindigkeit, ...)

der Wagengruppe beim Aufprall zu ermitteln. Diese Werte sind im Untersuchungsbericht nicht angegeben und dienen der Abschätzung von Planungen von Anlagen zur Aufhaltung entrollter Wagen.

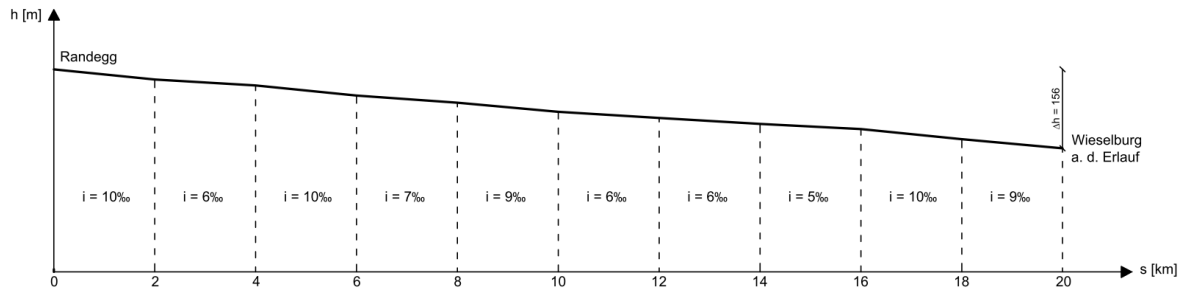


Abb. 4-29: Gradientenverlauf zwischen Randegg und Wieselburg a. d. Erlauf

Die Berechnung wird analog zu Berechnung 1 und 2 durchgeführt. Als Grund für das Entrollen wird im Untersuchungsbericht die nicht ausreichende Sicherung während Verscharbeiten angegeben. Somit könnte die Wagengruppe unter Umständen eine leichte Bremswirkung aufweisen. Deshalb wurde sowohl die Wagengruppe im „worst case“ mit einem Grundwiderstand von 2 ‰ und einem erhöhten Grundwiderstand von 4 ‰ bzw. 6 ‰ berechnet. Der Verlauf der Geschwindigkeit während dem Entrollen der Wagengruppe ist in Abb. 4-30 für alle drei Grundwiderstände dargestellt.

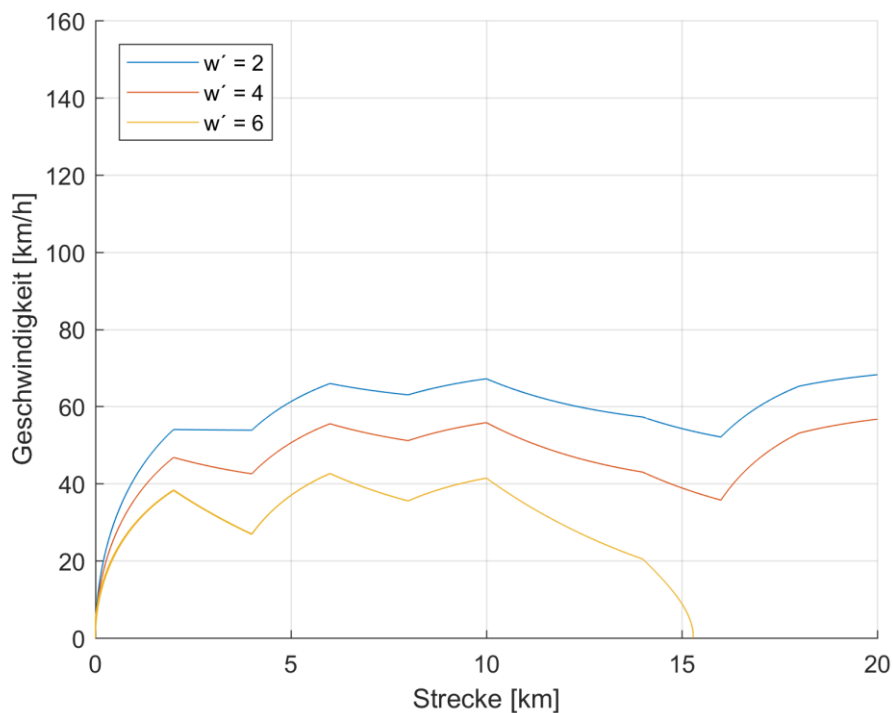


Abb. 4-30: Verlauf der Geschwindigkeit während dem Entrollvorgang Richtung Wieselburg

Es ist zu erkennen, dass die Wagengruppe bei einem Grundwiderstand von 6 ‰ bereits auf der durchfahrenen Strecke vor der Betriebsstelle Wieselburg a. d. Erlauf zum Stehen kommen würde. Deshalb wird dieses Szenario ausgeschlossen. In Abhängigkeit der Annahme des Grundwiderstands liegt die berechnete Kollisionsgeschwindigkeit zwischen 55 und 70 km/h. Im Untersuchungsbericht ist festgehalten, dass der Personenzug durch den Aufprall der entrollten Wagengruppe um 27 m Richtung Pöchlarn verschoben wurde. Die Schadensbilder und Schwere der Verletzungen führen zum Schluss, dass eine derartige Aufprallgeschwindigkeit nicht plausibel ist. Die Expertenmeinung des Konsortiums geht von einer Aufprallgeschwindigkeit von 30-40 km/h aus. Deshalb wird die Nachrechnung im nächsten Schritt vor allem auf dem zurückgelegten Fahrweg in der Betriebsstelle Wieselburg a. d. Erlauf etwas detaillierter betrachtet.

In Abb. 4-31 ist eine Skizze der Betriebsstelle Wieselburg a. d. Erlauf ersichtlich, in der die Gleisbelegung der entrollten Wagengruppe in lila gekennzeichnet ist. Um die Geschwindigkeit der entrollten Wagengruppe zu reduzieren, wurde diese über das Gleis 5 geleitet und durchfuhr so zehn enge Bögen mit einem Radius von 190 m. Für diese Fahrtstrecke wird ein Bogenwiderstand von jedem durchfahrenen Bogen von 3,125 ‰ (siehe (53)) auf insgesamt 280 m Bogenlänge berücksichtigt. Die Annahme einer Bogenlänge von ca. 28 m pro Bogen begründet sich mit der Verwendung der Absteckmaße der Weichen des Typs EW-190-1:9 [36].

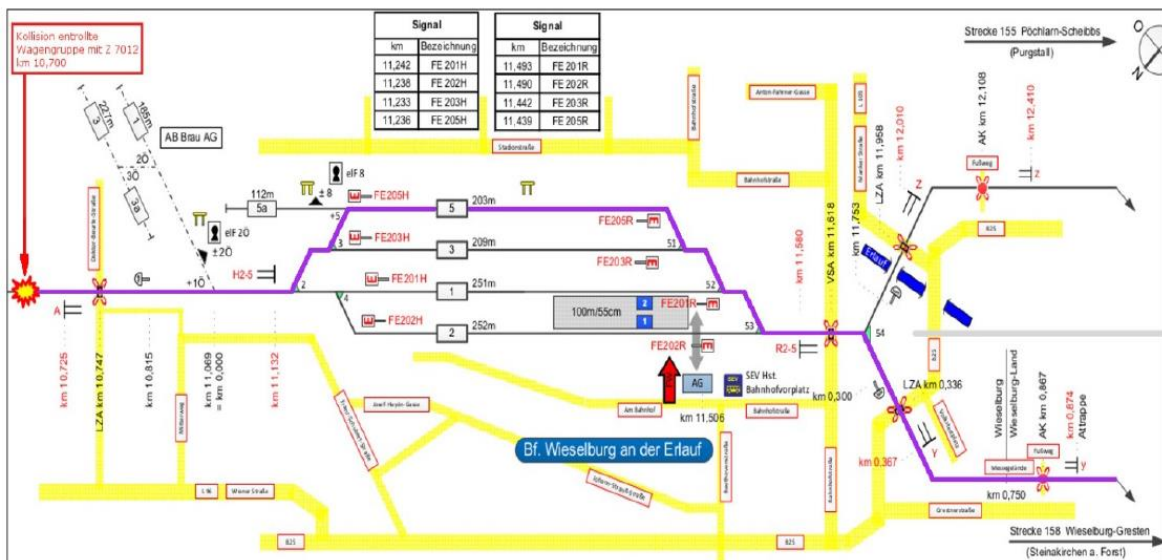


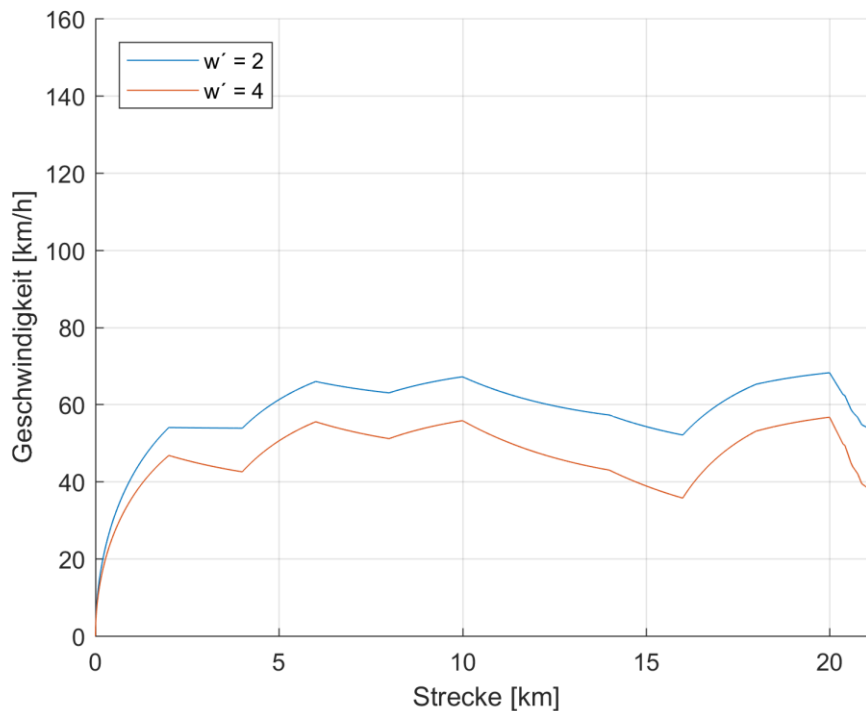
Abb. 4-31: Skizze der Betriebsstelle Wieselburg a. d. Erlauf mit eingezeichneter Gleisbelegung der entrollten Wagengruppe (lila) [21]

Die Längsneigungsverhältnisse in der Betriebsstelle werden ebenfalls berücksichtigt und sind in Tab. 4-20 aufgelistet. Die berücksichtigte Distanz erstreckt sich vom westlichen Einfahrtssignal bis zum Kollisionspunkt an der östlichen Seite.

**Tab. 4-20: Längsneigungen der Betriebsstelle Wieselburg a. d. Erlauf [37]**

Strecke [m]	Strecken-km-Anfang	Strecken-km-Ende	Längsneigung [‰]	berücksichtigte Bogenlänge [m]
367	0,367 (Strecke 15801)	11,630 (Strecke 15501)	0	0
49	11,630	11,581	5	0
219	11,581	11,362	0	168
242	11,362	11,120	2	112
270	11,120	10,850	4	0
150	10,850	10,700	5	0

Die erneute Auswertung des Geschwindigkeitsverlaufs der entrollten Wagengruppe ist in Abb. 4-32 dargestellt.



**Abb. 4-32: detaillierter Geschwindigkeitsverlauf der entrollten Wagengruppe**

Im „worst case“ beträgt die Aufprallgeschwindigkeit der Wagengruppe immer noch ca. 55 km/h. Die Kollisionsgeschwindigkeit mit einer leichten Bremswirkung oder einem erhöhten Laufwiderstand bei der entrollten Wagengruppe beträgt ca. 38 km/h. Dieser Wert erscheint plausibel. Die kinetische Energie der Wagengruppe zum Zeitpunkt des Aufpralls beläuft sich im letzteren Fall auf etwa 11142 kJ.

#### 4.2.4. Zusammenfassung

Die Geschwindigkeitszunahme entrollter Wagen ist masseunabhängig und hängt hauptsächlich mit dem Verhältnis zwischen Grundwiderstand und Längsneigung zusammen. Sobald der Wagen oder die Wagengruppe zum Beispiel durch Anprall in Bewegung gebracht wird und somit der höhere Anfahrwiderstand bereits überwunden wurde, wirkt im ungebremsten Fall nur ein sehr geringer Grundwiderstand von etwa 2 ‰. Somit nimmt die Geschwindigkeit der entrollten Wagen bereits bei sehr geringen Längsneigung von über 2 ‰ zu. Im Falle von größeren Längsneigungen tritt eine starke Geschwindigkeitszunahme bereits auf dem ersten Kilometer auf. Bei 5 ‰ beispielsweise beträgt die Geschwindigkeit der entrollten Wagen nach 1 km über 25 km/h. Bei dieser Geschwindigkeit gestaltet sich vor allem eine schadensarme Aufhaltung bereits sehr schwierig. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Situierung der

Aufhaltungsmaßnahmen möglichst nahe an den gefährdeten Bereichen (in der Regel Bereiche, wo Schubvorgänge stattfinden) sein muss. Der Luftwiderstand spielt erst bei höheren Fahrgeschwindigkeiten eine Rolle. Diese sollten bei Vorfällen von entrollten Wagen nicht erreicht werden.

## 5. KRITERIENKATALOG FÜR RISIKOBEWERTUNG IM ÖBB-NETZ

Die Basis der Ausarbeitung eines Kriterienkatalogs zur Risikobewertung im ÖBB-Netz und der Definition von Gefahrenkategorien ist eine Netzanalyse. Aufbauend auf dieser werden Ähnlichkeiten und Häufigkeiten von Betriebsstellen, wo bereits mindestens ein Vorfall mit entrollten Wagen passiert ist, ausgewertet. Als Datengrundlage wird eine von den ÖBB ermittelte Liste, welche die Vorfälle mit entrollten Wagen zwischen 2010 und 2017 enthält, verwendet. Im letzten Schritt wird eine Kategorisierung vorgenommen, die die Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Vorfalls mit entrollten Wagen widerspiegelt.

### 5.1. Netzanalyse

Da die Wahrscheinlichkeit von entrollten Wagen tendenziell mit der Häufigkeit von Verschubvorgängen zunimmt, wurden für die Netzanalyse alle Betriebsstellen ausgewählt, in denen regelmäßig Verschub stattfindet. Diese werden bei den ÖBB als Verschubstandorte bzw. Verschubknoten bezeichnet. Die Liste der Betriebsstellen, die als solche ausgewiesen sind, umfasst 100 Betriebsstellen (Datenstand Dezember 2017). Als Grundlage für die Untersuchung dienen VzG [35] und die Betriebsstellenbeschreibungen (Bsb) inklusive der Anhänge.

Von diesen Betriebsstellen wurden die Bsb ausgewertet. Aus den Spezifikationen in den Bsb (vor allem zusätzliche Regelungen zur ÖBB-Richtlinie 30 Dienstvorschrift 01 [28]) wurden folgende Kategorien empirisch entwickelt:

- Region
- Betriebsstelle
- Abkürzung der Betriebsstelle
- Verschubknoten (ja/nein)
- Streckennummer (VzG)
- Streckennummer im Gleisschema
- Streckenkilometer (ungefähr Höhe Aufnahmegebäude (AG))
- Verpflichtende Verwendung von sperrbaren Hemmschuhen bei abgestellten Fahrzeugen bei:
  - Tfz
  - Triebwagen/Triebzüge
  - Wendezügen
  - Güterwagen
  - Personenwagen



- Doppelte Sicherung (Handbremse und Hemmschuhe) bei abgestellten Kesselwagen auf Anlagen
- Luftbremse bei Verschub immer zu verwenden
- Zusätzlicher Hemmschuh am äußersten Fahrzeug Richtung Gefälle
- Zusätzlicher Hemmschuh Richtung Steigung
- Verbot von Abbremsen mit Hemmschuh
- Verbot von Abstoßen bzw. Abrollen
- Eingeschränktes Abstoßen/Abrollen (Entrollschutz erforderlich, nur in gewissen Bereichen, teilweise verboten, ...)
- Verbot von Handverschub
- Handverschub nur mit Entrollschutz oder aufgelegtem Sperrschuh
- Verbot von Verschub mit Kraftfahrzeugen
- Verschub mit Kraftfahrzeugen nur mit Entrollschutz oder aufgelegtem Sperrschuh
- Max. Längsneigung auf Gleisen wo regelmäßig Verschub stattfindet
  - > 2,5 ‰ und ≤ 5 ‰
  - > 5 ‰ und ≤ 10 ‰
  - > 10 ‰ und ≤ 15 ‰
  - > 15 ‰ und ≤ 20 ‰
  - > 20 ‰ und ≤ 25 ‰
  - > 25 ‰ und ≤ 30 ‰
  - > 30 ‰
- Anschließendes Gefälle der Streckengleise
  - > 2,5 ‰ und ≤ 5 ‰
  - > 5 ‰ und ≤ 10 ‰
  - > 10 ‰ und ≤ 15 ‰
  - > 15 ‰ und ≤ 20 ‰
  - > 20 ‰ und ≤ 25 ‰
  - > 25 ‰ und ≤ 30 ‰
  - > 30 ‰
- Anschließende Eisenbahnkreuzungen (EK) vorhanden (ja/nein)
- Anzahl technisch gesicherter EK
- Anzahl nicht technisch gesicherter EK
- Vorfall bereits in der Betriebsstelle passiert (ja/nein)
- Vorfallsdatum

- Anzahl der gemeldeten Vorfälle
- Anzahl verschubbehandelter Wagen pro Jahr (Daten aus 2018)

Die Informationen „Streckenummer (VZG)“ wurden dem VzG [35] entnommen. Für „Streckenummer im Gleisschema“ und „Streckenkilometer (ungefähr Höhe AG)“ wurden die jeweiligen Gleisschemata verwendet. In diesen Kategorien wurden die konkreten Zahlenwerte in die Tabelle eingetragen.

Für die Rubrik „Verpflichtende Verwendung von sperrbaren Hemmschuhen bei abgestellten Fahrzeugen“ bis zur Kategorie „Anzahl nicht technisch gesicherter EKs“ wurden die erforderlichen Informationen der Bsb der jeweiligen Betriebsstelle entnommen.

Für „Vorfall in der Betriebsstelle bereits passiert“, „Vorfallsjahr“ und „Anzahl der gemeldeten Vorfälle“ dient eine von den ÖBB zur Verfügung gestellte Liste, welche die Vorfälle von entrollten Wagen zwischen 2010 und 2017 beinhaltet, als Grundlage. Hier wurde die konkrete Anzahl an Vorfällen und die dazu entsprechenden Jahreszahlen in die Kategorien eingetragen.

Die „Anzahl an verschubbehandelten Wagen pro Jahr“ beläuft sich auf das Jahr 2018 und wurde von den ÖBB zur Verfügung gestellt. Hier wurde die konkrete Zahl der verschubbehandelten Wagen eingetragen.

Für die Standorte Wels Terminal und Wien Süd Güterzentrum sind keine Bsb verfügbar. Der Standort Matzleinsdorf wurde aufgrund der Bsb dem Wiener Hauptbahnhof zugeordnet. Somit reduziert sich die betrachtete Anzahl an Betriebsstellen auf 97.

Die Ergebnisse einzelner Kategorien sind in Tab. 5-1 bis Tab. 5-12 dargestellt. In jeder Tabelle ist die Anzahl der Betriebsstellen angeführt, die diese Kategorie erfüllen. Weiters ist die Anzahl der Betriebsstellen angeführt, wo zumindest ein Vorfall im Zeitraum von 2010 bis 2017 passiert ist. Die letzte Information der Tabellen beinhaltet die Anzahl der Vorfälle, die sich in den Betriebsstellen ereignet haben.

Als Beispiel, in Tab. 5-1 gibt es in zehn Betriebsstellen die Vorschrift, dass sperrbare Hemmschuhe bei abgestellten Fahrzeugen verwendet werden müssen. In drei dieser zehn Betriebsstellen ist bereits ein Vorfall passiert und in Summe sind in diesen Betriebsstellen drei Vorfälle mit entrollten Wagen vorgekommen. Die folgenden Tabellen sind in gleicher Art und Weise zu lesen.

**Tab. 5-1: verpflichtende Verwendung von sperrbaren Hemmschuhen bei abgestellten Fahrzeugen**

verpflichtende Verwendung von sperrbaren Hemmschuhen bei abgestellten Fahrzeugen			
Anzahl Betriebsstellen	10		
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	3	Anzahl der Vorfälle	3

**Tab. 5-2: doppelte Sicherung (Hbr und Hs) bei abgestellten Kesselwagen auf Anlagen**

doppelte Sicherung (Hbr und Hs) bei abgestellten Kesselwagen auf Anlagen			
Anzahl Betriebsstellen	13		
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	4	Anzahl der Vorfälle	9

**Tab. 5-3: Luftbremse bei Verschub immer zu verwenden**

Luftbremse bei Verschub immer zu verwenden			
Anzahl Betriebsstellen	4		
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	2	Anzahl der Vorfälle	11

**Tab. 5-4: zusätzlicher Hemmschuh am äußersten Fahrzeug Richtung Gefälle**

zusätzlicher Hemmschuh am äußersten Fahrzeug Richtung Gefälle			
Anzahl Betriebsstellen	11		
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	6	Anzahl der Vorfälle	11

**Tab. 5-5: zusätzlicher Hemmschuh Richtung Steigung**

zusätzlicher Hemmschuh Richtung Steigung			
Anzahl Betriebsstellen	1		
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	0	Anzahl der Vorfälle	0

**Tab. 5-6: Verbot von Abbremsen mit Hemmschuh**

Verbot von Abbremsen mit Hemmschuh			
Anzahl Betriebsstellen	3		
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	1	Anzahl der Vorfälle	1

**Tab. 5-7: Verbot von Abstoßen bzw. Abrollen**

Verbot von Abstoßen bzw. Abrollen			
Anzahl Betriebsstellen	24		
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	5	Anzahl der Vorfälle	23

**Tab. 5-8: eingeschränktes Abstoßen bzw. Abrollen (Entrollschutz erforderlich, nur in gewissen Bereichen, teilweise verboten, ...)**

eingeschränktes Abstoßen bzw. Abrollen			
Anzahl Betriebsstellen	49		
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	17	Anzahl der Vorfälle	49

**Tab. 5-9: Verbot von Handverschub**

Verbot von Handverschub			
Anzahl Betriebsstellen	56		
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	15	Anzahl der Vorfälle	42

**Tab. 5-10: Handverschub nur mit Entrollschutz oder aufgelegtem Sperrschuh**

Handverschub nur mit Entrollschutz oder aufgelegtem Sperrschuh			
Anzahl Betriebsstellen	6		
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	2	Anzahl der Vorfälle	3

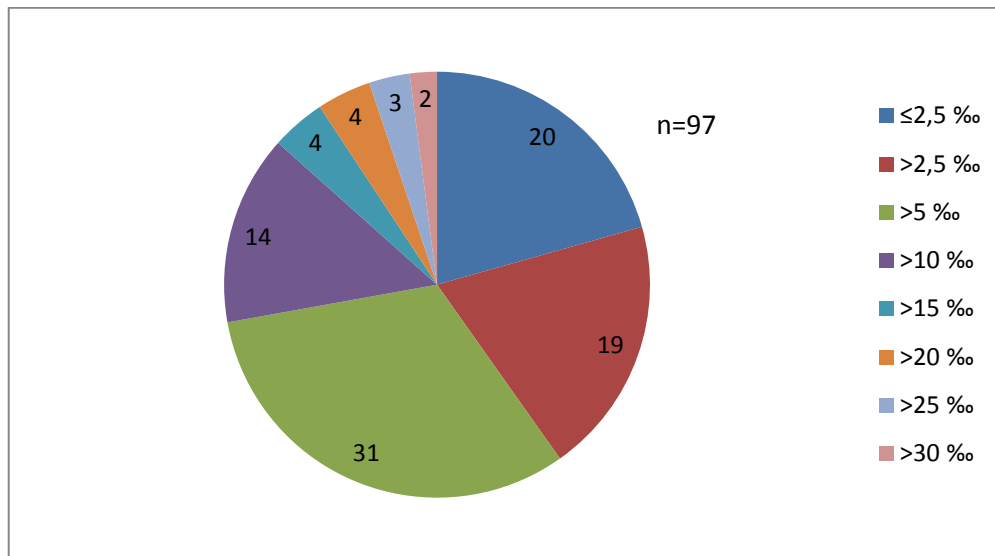
**Tab. 5-11: Verbot von Verschub mit Kraftfahrzeugen**

Verbot von Verschub mit Kraftfahrzeugen			
Anzahl Betriebsstellen	36		
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	12	Anzahl der Vorfälle	38

**Tab. 5-12: Verschub mit Kraftfahrzeugen nur mit Entrollschutz oder aufgelegtem Sperrschuh**

Verschub mit Kraftfahrzeugen nur mit Entrollschutz oder aufgelegtem Sperrschuh			
Anzahl Betriebsstellen	2		
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	1	Anzahl der Vorfälle	2

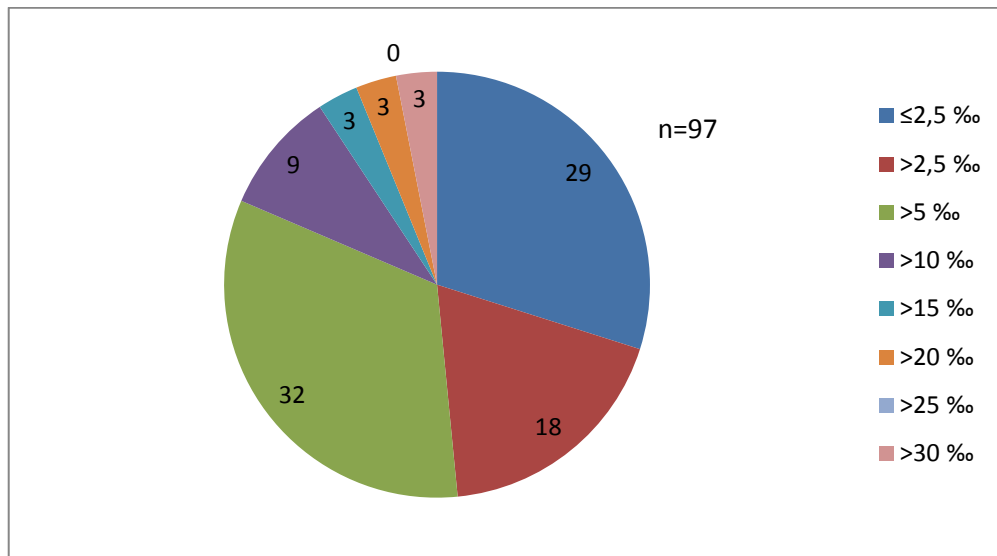
Zusätzlich zu den in Tab. 5-1 bis Tab. 5-12 untersuchten Kategorien wurden die Betriebsstellen nach dem maximal auftretenden Gefälle im Bahnhofsbereich unterteilt. Die Kategorien sind  $< 2,5\text{‰}$ ,  $> 2,5\text{‰}$  und  $\leq 5\text{‰}$ ,  $> 5\text{‰}$  und  $\leq 10\text{‰}$ ,  $> 10\text{‰}$  und  $\leq 15\text{‰}$ ,  $> 15\text{‰}$  und  $\leq 20\text{‰}$ ,  $> 20\text{‰}$  und  $\leq 25\text{‰}$ ,  $> 25\text{‰}$  und  $\leq 30\text{‰}$  und  $> 30\text{‰}$ . Dabei wurde das maximale Gefälle von Gleisen, auf denen häufig Wagen verschoben bzw. abgestellt werden, in einer Betriebsstelle als Eingangsparameter herangezogen. Die Verteilung der 97 Betriebsstellen in Bezug auf das Gefälle im Betriebsstellenbereich, stellt sich wie in Abb. 5-1 dar.



**Abb. 5-1: Betriebsstellen ausgewertet nach Gefälle innerhalb der Betriebsstelle**

In Abb. 5-1 ist ersichtlich, dass 20 Betriebsstellen ein geringeres Gefälle als 2,5 ‰, 19 Betriebsstellen ein Gefälle zwischen 2,5 ‰ und 5 ‰ und 31 Betriebsstellen ein Gefälle zwischen 5 ‰ und 10 ‰ aufweisen. Die restlichen 27 Betriebsstellen haben ein Gefälle größer 10 ‰ im Bahnhofsbereich.

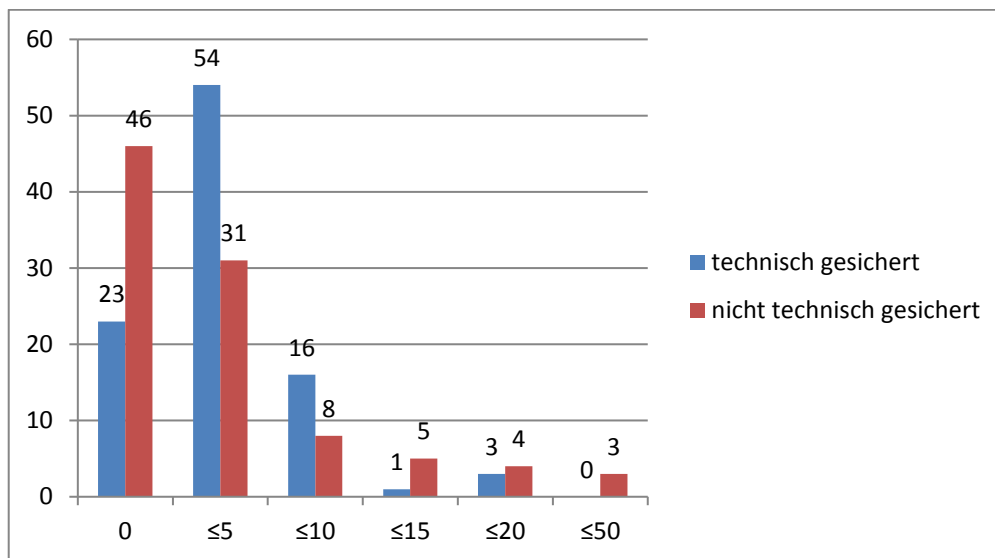
Die Kategorie „anschließendes Gefälle der Streckengleise“ beschreibt das im Anschluss an die Betriebsstellen vorhandene Gefälle auf den Streckengleisen. Es wird wiederum in die Kategorien < 2,5‰, > 2,5‰ und ≤ 5‰, > 5‰ und ≤ 10‰, > 10‰ und ≤ 15‰, > 15‰ und ≤ 20‰, > 20‰ und ≤ 25‰, > 25‰ und ≤ 30‰ und > 30‰ unterteilt. Dabei wurde das maximale Gefälle im Anschluss an die Betriebsstelle in einem Abstand von bis zu 500 m untersucht. Die Verteilung der 97 Betriebsstellen in Bezug auf das an die Betriebsstelle anschließende Gefälle stellt sich wie in Abb. 5-2 dar.



**Abb. 5-2: Betriebsstellen ausgewertet nach dem angrenzenden Gefälle**

In Abb. 5-2 ist ersichtlich, dass im Anschluss an 29 Betriebsstellen ein geringeres Gefälle als 2,5 ‰, an 18 Betriebsstellen ein Gefälle zwischen 2,5 ‰ und 5 ‰ und an 32 Betriebsstellen ein Gefälle zwischen 5 ‰ und 10 ‰ vorhanden ist. Im Anschluss an die restlichen 18 Betriebsstellen ist ein Gefälle größer als 10 ‰ vorhanden.

Die Untersuchungen erstrecken sich weiter auf Eisenbahnkreuzungen in und in unmittelbarer Nähe zur Betriebsstelle. Dabei wurden alle Eisenbahnkreuzungen gezählt, die in der Bsb aufgelistet sind. In Abb. 5-3 ist auf der Abszisse die Anzahl der Eisenbahnkreuzungen aufgetragen. Die Ordinate beschreibt die Anzahl an Betriebsstellen, die der Kategorie der Abszisse entspricht. Dabei werden die technisch gesicherten und die nicht technisch gesicherten Eisenbahnkreuzungen getrennt betrachtet, aber gemeinsam dargestellt.



**Abb. 5-3: Betriebsstellen mit nahen Eisenbahnkreuzungen**

In Ergänzung der Informationen wurden die Vorfälle den entsprechenden Betriebsstellen zugeordnet. Im weiteren Schritt wurden die Anzahl verschubbehandelter Wagen für die weiterführende Untersuchung eingefügt. Für die Betriebsstellen „Reutte in Tirol“, „St. Veit an der Glan Westbahnhof“, „Ebenfurth“, „Kaiserebersdorf“ und „Marchegg“ sind keine Informationen zu der Anzahl der verschubbehandelter Wagen vorhanden.

Somit ergibt sich die Anzahl der Betriebsstellen mit vollständigem Datensatz zu 91. Mit dieser Stichprobe werden die Auswertungen im nächsten Unterkapitel detaillierter durchgeführt.

## 5.2. Mögliche Kriterien für eine Risikobewertung

Im Unterkapitel 5.1 wurden die betrachteten Kategorien pro Betriebsstelle aufgelistet. Um eine statistische Aussagekraft zu erreichen, wurde eine Mindeststichprobenanzahl von zehn Betriebsstellen in jeder Kategorie festgelegt. Somit bleiben vier Kriterien übrig, welche in den Betriebsstellenbeschreibungen ergänzende Festlegungen zur ÖBB-Richtlinie 30 Dienstvorschrift 01 [28] beinhalten:

- Verbot von Abstoßen bzw. Abrollen (im Folgenden **Kriterium 1** genannt)
- eingeschränktes Abstoßen bzw. Abrollen (Entrollschutz erforderlich, nur in gewissen Bereichen, teilweise verboten, ...) (im Folgenden **Kriterium 2** genannt)
- Verbot von Handverschub (im Folgenden **Kriterium 3** genannt)
- Verbot von Verschub mit Kraftfahrzeugen (im Folgenden **Kriterium 4** genannt)

Da eine Wahrscheinlichkeit des Eintretens eines Vorfalles abgeschätzt wird, wird die Kategorie „Anschließendes Gefälle der Streckengleise“ nicht in die Auswertung

einbezogen, sondern nur die Kategorie „Max. Längsneigung auf Gleisen wo regelmäßig Verschub stattfindet“ (im Folgenden **Kriterium 5** genannt). Die Unterkategorien wurden wie folgt benannt:

- $\leq 2,5\text{‰}$  (im Folgenden **Kriterium 5.1** genannt)
- $> 2,5\text{‰}$  und  $\leq 5\text{‰}$  (im Folgenden **Kriterium 5.2** genannt)
- $> 5\text{‰}$  und  $\leq 10\text{‰}$  (im Folgenden **Kriterium 5.3** genannt)
- $> 10\text{‰}$  und  $\leq 15\text{‰}$  (im Folgenden **Kriterium 5.4** genannt)
- $> 15\text{‰}$  und  $\leq 20\text{‰}$  (im Folgenden **Kriterium 5.5** genannt)
- $> 20\text{‰}$  und  $\leq 25\text{‰}$  (im Folgenden **Kriterium 5.6** genannt)
- $> 25\text{‰}$  und  $\leq 30\text{‰}$  (im Folgenden **Kriterium 5.7** genannt)
- $> 30\text{‰}$  (im Folgenden **Kriterium 5.8** genannt)

Des Weiteren wird die Kategorie „Anzahl verschubbehandelter Wagen pro Jahr“ (im Folgenden **Kriterium 6** genannt) berücksichtigt. Dabei werden folgende Unterkategorien gebildet:

- $< 10000$  verschubbehandelte Wagen pro Jahr (im Folgenden **Kriterium 6.1** genannt)
- $\geq 10000$  und  $< 25000$  verschubbehandelte Wagen pro Jahr (im Folgenden **Kriterium 6.2** genannt)
- $\geq 25000$  und  $< 50000$  verschubbehandelte Wagen pro Jahr (im Folgenden **Kriterium 6.3** genannt)
- $\geq 50000$  und  $< 100000$  verschubbehandelte Wagen pro Jahr (im Folgenden **Kriterium 6.4** genannt)
- $> 100000$  verschubbehandelte Wagen pro Jahr (im Folgenden **Kriterium 6.5** genannt)

Die Anzahl der Betriebsstellen, die die jeweiligen Kriterien erfüllen, die Betriebsstellen daraus, wo mindestens ein Vorfall passiert ist und die Anzahl der Vorfälle werden für die jeweiligen Kriterien tabellarisch in Tab. 5-13 bis Tab. 5-18 dargestellt.

Zur Erklärung der Werte wird Tab. 5-13 als Beispiel genommen. In 23 der untersuchten 91 Betriebsstellen herrscht ein Verbot von Abstoßen bzw. Abrollen. In fünf von den 23 (21,74%) Betriebsstellen ist bereits mindestens ein Vorfall passiert (Datengrundlage 2010 bis 2017). Die Gesamtanzahl der Vorfälle in den fünf Betriebsstellen beträgt 23.



**Tab. 5-13: Betriebsstellen mit Verbot von Abstoßen bzw. Abrollen**

Verbot von Abstoßen bzw. Abrollen (Kriterium 1)				
Anzahl Betriebsstellen	23			
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	5	21,74%	Anzahl der Vorfälle	23

**Tab. 5-14: Betriebsstellen mit eingeschränktem Abstoßen bzw. Abrollen**

eingeschränktes Abstoßen/Abrollen (Entrollschutz erforderlich, nur in gewissen Bereichen, teilweise verboten, ...) (Kriterium 2)				
Anzahl Betriebsstellen	48			
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	17	35,42%	Anzahl der Vorfälle	49

**Tab. 5-15: Betriebsstellen mit Verbot von Handverschub**

Verbot von Handverschub (Kriterium 3)				
Anzahl Betriebsstellen	53			
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	15	28,30%	Anzahl der Vorfälle	42

**Tab. 5-16: Betriebsstellen mit Verbot von Verschub mit Kraftfahrzeugen**

Verbot von Verschub mit Kraftfahrzeugen (Kriterium 4)				
Anzahl Betriebsstellen	35			
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	12	34,29%	Anzahl der Vorfälle	38

**Tab. 5-17: Betriebsstellen in den Unterkategorien 5.1 ( $\leq 2,5$  ‰) bis 5.8 ( $> 30$  ‰)**

Gefälle in der Betriebsstelle [‰]	$\leq 2,5$	$> 2,5$	$> 5$	$> 10$	$> 15$	$> 20$	$> 25$	$> 30$
Anzahl Betriebsstellen	18	18	30	14	4	3	2	2
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	5	3	8	8	1	2	0	1
Häufigkeit der Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	27,78%	16,67%	26,67%	57,14%	25,00%	66,67%	0,00%	50,00%
Anzahl der Vorfälle	9	15	16	32	3	19	0	1

**Tab. 5-18: Betriebsstellen in den Unterkategorien 6.1 ( $< 10000$ ) bis 6.5 ( $\geq 100000$ )**

Verschubbehandelte Wagen pro Jahr	$< 10000$	$< 25000$	$< 50000$	$< 100000$	$\geq 100000$
Anzahl Betriebsstellen	7	23	18	21	22
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	1	3	3	6	15
Häufigkeit der Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	14,29%	13,04%	16,67%	28,57%	68,18%
Anzahl Vorfälle	3	4	4	12	72

Wie in Tab. 5-17 und Tab. 5-18 zu sehen, ist bei den Kriterien 5.5 bis 5.8 und 6.1 die geforderte Mindeststichprobenanzahl nicht erfüllt. Somit werden diese vorerst nicht in die weiteren Auswertungen einbezogen, sondern nur in der Einteilung der Kategorien im Unterkapitel 5.3 berücksichtigt.

Im nächsten Schritt werden die einzelnen Kriterien mit UND- bzw. ODER-Verknüpfungen kombiniert, um eine Einschätzung über die Veränderung der Häufigkeit von Betriebsstellen, wo bereits ein Vorfall passiert ist, und der Gesamtanzahl der Betriebsstellen pro Kriterium treffen zu können. Dabei ist zu beachten, dass sich das Kriterium 1 und das Kriterium 2 gegenseitig ausschließen. Betriebsstellen, die das Kriterium 1 erfüllen, weisen nicht das Kriterium 2 auf und umgekehrt. Aufgrund der geforderten Mindeststichprobenanzahl von zehn Betriebsstellen, werden nur die Verknüpfungen aufgeführt, die diese Mindestanforderung erfüllen.

Zunächst werden die Kriterien 1 bis 4 verknüpft (siehe Tab. 5-19). Dabei ist zu sehen, dass sich die Häufigkeit im Vergleich zu den einzelnen Auswertungen der Kriterien 1 bis 4 nicht wesentlich erhöht. Somit lässt sich schlussfolgern, dass, wenn mehr als ein Verbot beziehungsweise mehr als eine Einschränkung laut Betriebsstellenbeschreibung besteht, nicht auf eine erhöhte Häufigkeit geschlossen werden kann.

**Tab. 5-19: Verknüpfungen zwischen den Kriterien 1 bis 4**

Verknüpfungen	UND(1,3)	UND(2,3)	UND(2,4)	UND(3,4)	UND(2,3,4)
Anzahl Betriebsstellen	13	29	22	31	20
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	3	9	8	10	7
Häufigkeit der Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	23,1%	31,0%	36,4%	32,3%	35,0%

Im nächsten Schritt werden die Kriterien 1 bis 5 miteinander verknüpft. Folgend aus der Schlussfolgerung aus den ersten Verknüpfungen wird jeweils nur das Bestehen von einem Verbot bzw. einer Einschränkung mit einem Unterkriterium des Kriteriums 5 verknüpft. Wie in Tab. 5-20 zu sehen, erfüllt nur eine Verknüpfung die Mindeststichprobenanzahl. Aufgrund der Auffälligkeit in der höheren Häufigkeit wurden trotzdem zwei Verknüpfungen zusätzlich in die Auswertung einbezogen. Bei sehr geringem Gefälle im Bahnhof (< 2,5‰) und Bestehen einer Einschränkung oder eines Verbots steigt die Häufigkeit stark an. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass bei Bestehen einer Einschränkung oder eines Verbots trotz geringem Gefälle und somit geringem Gefährdungspotential von Entrollen generell eine Spezifikation bestehen könnte (zum Beispiel hohe Windgeschwindigkeiten). Bei der Verknüpfung zwischen Kriterium 5.3 (> 5‰ und ≤ 10‰) und Bestehen einer Einschränkung oder eines Verbots kam es analog zu den

Verknüpfungen in Tab. 5-19 zu keiner Erhöhung der Häufigkeit. Somit existiert keine Erhöhung der Häufigkeit bei Vorhandensein eines mittleren Gefälles im Bahnhof und dem Bestehen einer Einschränkung oder eines Verbots.

**Tab. 5-20: Verknüpfungen zwischen den Unterkriterien 5.1 bis 5.4 und den Kriterien 1 bis 4**

Verknüpfungen	UND(5.1,ODER(1,3,4))	UND(5.1,ODER(2,3,4))	UND(5.3,ODER(2,3,4))
Anzahl Betriebsstellen	3	9	11
Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	2	4	3
Häufigkeit der Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall	66,67%	44,44%	27,27%

Die Verknüpfungen zwischen den Kriterien 5 und 6 liefern keine ausreichenden Stichproben zur Interpretation. Ebenso erreichen die Verknüpfungen zwischen dem Kriterium 6 und den Kriterien 1 bis 4 nicht die Mindestanforderung.

### 5.3. Kategorisierung

In der ersten Auswertung werden die in Unterkapitel 5.2 beschriebenen Häufigkeiten berücksichtigt. Zusätzlich zu den Häufigkeiten werden noch zwei zusätzliche Auswertungen durchgeführt, da in der Häufigkeit nicht die Anzahl der Vorfälle berücksichtigt wurde.

#### 5.3.1. Auswertung 1

Aufbauend auf den in Unterkapitel 5.2 durchgeführten Untersuchungen wurde eine Kategorisierung anhand der ausgewerteten Häufigkeiten von Betriebsstellen mit min. 1 Vorfall zu Betriebsstellen in diesem Kriterium vorgenommen. Dabei wurden 3 Kategorien definiert:

- Kategorie 1: Betriebsstellen, die mindestens einem Kriterium oder einer Verknüpfung mit  $\geq 40\%$  relativer Häufigkeit zugeordnet sind
- Kategorie 2: Betriebsstellen, die mindestens einem Kriterium oder einer Verknüpfung, die  $\geq 20\%$  und  $< 40\%$  relativer Häufigkeit aufweist, zugeordnet sind
- Kategorie 3: alle anderen Betriebsstellen

Im Folgenden werden explizit die Kriterien und Verknüpfungen aufgeführt, welche der jeweiligen Kategorie zugeordnet werden.

#### Kategorie 1

Die Unterkriterien 5.5 bis 5.8 wurden zwar durch die Anforderung der Mindeststichprobenanzahl zunächst nicht berücksichtigt, aber da eine größere

Längsneigung auf Gleisen, wo regelmäßig Vers Schub stattfindet auch tendenziell die Gefahr von entrollten Wagen erhöht, wurden die Betriebsstellen, welche den Unterkriterien 5.5 bis 5.8 zugeordnet sind, der Kategorie 1 zugeordnet. Somit ergeben sich folgende Kriterien und Verknüpfungen für die Zuordnung zu Kategorie 1:

- Längsneigung  $\leq 2,5 \text{ ‰}$  in der Betriebsstelle UND entweder Verbot von Abstoßen/Abrollen oder Verbot von Handvers Schub oder Verbot von Vers Schub mit Kraftfahrzeugen
- Längsneigung  $\leq 2,5 \text{ ‰}$  in der Betriebsstelle UND entweder eingeschränktes Abstoßen/Abrollen oder Verbot von Handvers Schub oder Verbot von Vers Schub mit Kraftfahrzeugen
- Längsneigung  $> 10 \text{ ‰}$  in der Betriebsstelle
- $\geq 100000$  vers chubbehandelte Wagen pro Jahr

Betriebsstellen, die die gelisteten Eigenschaften nicht erfüllen, wo aber trotzdem zwischen 2010 und 2017 drei oder mehr Vorfälle mit entrollten Wagen vorgekommen sind, werden zusätzlich in die Kategorie 1 eingestuft.

### Kategorie 2

- Verbot von Abstoßen und Abrollen
- Eingeschränktes Abstoßen und Abrollen
- Verbot von Handvers Schub
- Verbot von Vers Schub mit Kraftfahrzeugen
- Längsneigung in der Betriebsstelle  $\leq 2,5 \text{ ‰}$
- Längsneigung in der Betriebsstelle  $> 5 \text{ ‰}$  und  $\leq 10 \text{ ‰}$

Betriebsstellen, die die gelisteten Eigenschaften nicht erfüllen, wo aber zwischen 2010 und 2017 ein oder zwei Vorfälle mit entrollten Wagen vorgekommen sind, werden zusätzlich in die Kategorie 2 eingestuft.

### Kategorie 3

Alle untersuchten Betriebsstellen, die anhand der Eigenschaften weder Kategorie 1 noch Kategorie 2 zugeordnet wurden, werden in Kategorie 3 eingestuft.

**Von den 91 untersuchten Betriebsstellen werden 24 der Kategorie 1, 26 der Kategorie 2 und 41 der Kategorie 3 zugeordnet (siehe**

Tab. 5-21). Die Häufigkeit bezieht dabei jeweils auf 91 untersuchte Betriebsstellen.

**Tab. 5-21: Anzahl und Häufigkeit der einzelnen Kategorien**

	Summe	Häufigkeit
Kategorie 1	24	26,4%
Kategorie 2	26	28,6%
Kategorie 3	41	45,1%

### 5.3.2. Auswertung 2 und Auswertung 3

Um die Anzahl der Vorfälle zu berücksichtigen und eine weitere Einschätzung zu ermöglichen, werden zwei weitere Auswertungen durchgeführt. Diese beschränken sich auf die Anzahl an verschubbehandelten Wagen im Vergleich zur Anzahl an Vorfällen (siehe Tab. 5-18).

In der ersten Auswertung wird die Häufigkeit eines Vorfalles pro Jahr und pro 100000 verschubbehandelten Wagen für jede Betriebsstelle berechnet.

$$x_1 = \frac{a}{n \cdot b} \cdot 100000 \quad (60)$$

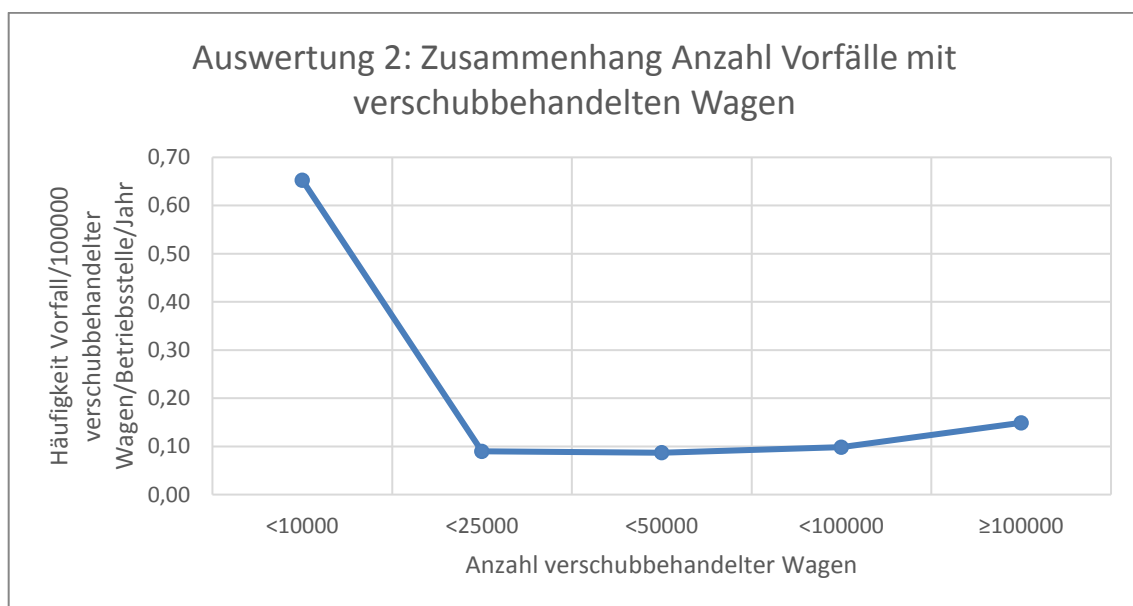
$x_1$  ... Häufigkeit

a ... Anzahl Vorfälle

b ... Anzahl verschubbehandelter Wagen

n ... Anzahl Jahre der Datenverfügbarkeit (2010-2017, 8 Jahre)

Anschließend werden die Häufigkeiten der Betriebsstellen, die das jeweilige Kriterium erfüllen summiert und durch die Gesamtanzahl der Betriebsstellen im Kriterium dividiert.

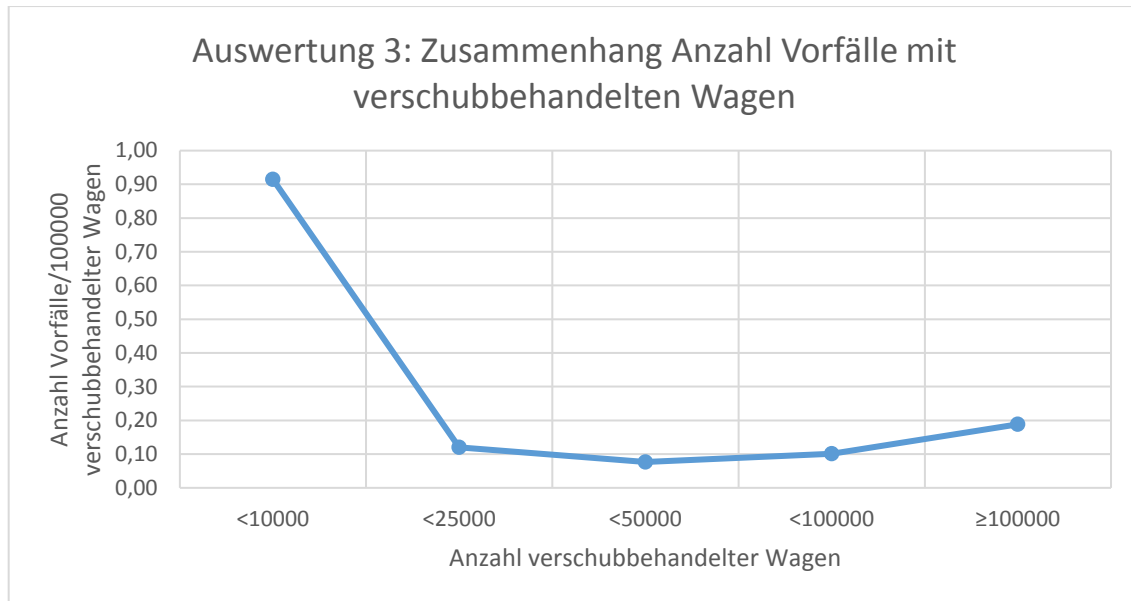


**Abb. 5-4: Auswertung Häufigkeit eines Vorfalles pro 100000 verschubbehandelter Wagen**

In der zweiten Auswertung wird die Anzahl der Vorfälle pro 100000 verschubbehandelter Wagen dargestellt. Dazu wird für jedes Unterkriterium die Anzahl der Vorfälle pro Jahr durch die Summe der verschubbehandelten Wagen dividiert und anschließend mit 100000 skaliert.

$$x_2 = \frac{a}{n \cdot \sum b} \cdot 100000 \quad (61)$$

$x_2$  ... Anzahl Vorfälle pro 100000 verschubbehandelter Wagen pro Kriterium



**Abb. 5-5: Auswertung Anzahl Vorfälle pro 100000 verschubbehandelter Wagen**

Beim Unterkriterium 6.1 (< 10000 verschubbehandelte Wagen pro Jahr) handelt es sich um eine Betriebsstelle, in der drei Vorfälle passiert sind. Das Unterkriterium wurde bereits aus der Auswertung ausgeschlossen, da es die Mindeststichprobenanzahl nicht erfüllt und ist somit als statistischer Ausreißer zu sehen. Generell zeigt die Tendenz, dass in Betriebsstellen mit mehr verschubbehandelten Wagen auch mehr Vorfälle mit entrollten Wagen passieren. Im Vergleich zur Zahl von etwa 15 Vorfällen pro Jahr (siehe Abb. 3-1) ist aus Abb. 5-5 zu erkennen, dass pro 100000 verschubbehandelten Wagen weniger als ein Wagen entrollt, was auf ein hohes Sicherheitsniveau schließen lässt.

## 5.4. Zusammenfassung

Durch eine Netzanalyse des ÖBB-Netzes werden Verschubstandorte bzw. Verschubknoten untersucht und deren Eigenschaften erfasst. Zusätzlich wurde die Anzahl der verschubbehandelten Wagen in den Betriebsstellen zur Verfügung gestellt. Aufbauend auf der Netzanalyse werden Kriterien definiert, wo ausreichend viele Stichproben an Betriebsstellen vorhanden sind. Diese werden als mögliche Eingangskriterien in eine

Risikobewertung definiert. Die Auswertungen werden über die relative Häufigkeit von Betriebsstellen mit mindestens einem Vorfall im Vergleich zur Gesamtanzahl der Betriebsstellen in den jeweiligen Kriterien durchgeführt. Im letzten Schritt werden die Betriebsstellen anhand ihrer Eigenschaften in drei Kategorien eingeteilt – erhöhte Entrollwahrscheinlichkeit, mittlere Entrollwahrscheinlichkeit und geringe Entrollwahrscheinlichkeit. Die Kategorisierung erlaubt eine grobe Einschätzung, welche Betriebsstellen auf das Erfordernis von zusätzlichen Maßnahmen zu überprüfen sind. Eine weitere Auswertung zeigt, dass pro 100000 verschubbehandelten Wagen weniger als ein Wagen entrollt, was auf ein hohes Sicherheitsniveau schließen lässt.

## 6. MASSNAHMEN ZUR DETEKTION VON ENTROLLTEN SCHIENENFAHRZEUGEN

In diesem Kapitel werden Konzepte von Maßnahmen zur Detektion von entrollten Schienenfahrzeugen erarbeitet. Der methodische Ablauf beinhaltet eine Sammlung von Ideen, die mit einer Bewertungsmatrix einander gegenübergestellt werden. Im Zuge der Ideensammlung werden sowohl die bereits beschriebenen Systeme im Kapitel 2, als auch allgemeine möglich erscheinende Lösungen im Bereich der Mess- und Sensortechnik berücksichtigt.

### 6.1. Ideensammlung

Fibre Optic Sensing (FOS) gilt als Zukunftssystem mit vielen verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten. Aufgrund der Probleme bei der Detektion bei gleichzeitigen Verschubarbeiten und einer erforderlichen Minimalgeschwindigkeit bei der Überfahrt, wird dieses System nach aktuellem Stand der Forschung als nicht anwendbar für die gegenständliche Aufgabenstellung angesehen. Hydraulische und pneumatische Schienenkontakte werden aufgrund einer erforderlichen Mindestgeschwindigkeit bzw. Mindestachsdruck, um eine Durchbiegung der Schiene zu detektieren, ausgeschlossen, da entrollte Wagen eventuell sehr geringe Geschwindigkeiten bzw. verschieden hohe Achsdrücke aufweisen. Darunter fällt auch der Schienenkontakt S 44, der von Siemens im Jahr 1946 entwickelt wurde und immer noch teilweise im Einsatz ist [38]. Magnetische Schienenkontakte werden aufgrund von Störanfälligkeiten durch andere magnetische Felder (z.B. durch Magnetschienenbremsen) für die gegenständliche Anwendung ausgeschlossen. Da im geringen Geschwindigkeitsbereich das Rollgeräusch tendenziell niedrig ist und durch Störgeräusche (z.B. Verschubgeräusche) in der Umgebung überlagert werden könnte, werden akustische Systeme zur Detektion als nicht zuverlässig eingeschätzt und somit ausgeschlossen. Beschleunigungssensoren auf der Schiene können Radüberfahrten detektieren, werden aber durch Unsicherheiten im sehr geringen Geschwindigkeitsbereich als nicht zuverlässig eingestuft und somit nicht weiter betrachtet.

#### 6.1.1. Mechanischer Schienenkontakt

Das Rad durchfährt das System und bewegt oder drückt einen Kontakt mechanisch. Durch die Bewegung wird ein elektrischer Kontakt betätigt, durch welchen die Überfahrt detektiert und gemeldet werden kann. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts erfolgte wegen der Störanfälligkeit die Ablösung des Systems durch hydraulische Systeme [38].



Trotzdem wird das mechanische System heutzutage noch in manchen Fällen angewendet – beispielsweise bei automatischer Auslösung von Rottenwarnanlagen bei Gleisbaustellen [1]. Ein Beispiel für ein an den technischen Fortschritt angepasstes System ist in [39] zu finden.

### **6.1.2. Induktiver Schienenkontakt**

Das grundsätzliche Wirkprinzip wurde bereits in Unterkapitel 2.1.2 erläutert. Der Schienenkontakt kann sowohl als Einzelkontakt, als auch als Doppelkontakt ausgeführt werden, wobei der Doppelkontakt für Achszählkreise benutzt wird [38]. In der gegenständlichen Anwendung ist ein Einzelkontakt vermutlich ausreichend. Induktive Systeme werden seit Jahrzehnten eingesetzt und haben sich im Bereich der Raddetektion bewährt.

### **6.1.3. Gleisstromkreis**

Gleisstromkreise dienen zum Erkennen von Radsätzen in einem begrenzten Bereich des Gleises. In dem Bereich müssen beide Schienen gegeneinander und an den Enden in der Regel auch gegen die jeweils benachbarten Schienen elektrisch (galvanisch) isoliert werden. Dabei wird eine besondere Oberbauart mit isolierfähigen Schwellen und möglichst sauberem Schotterbett und an den Enden des Bereichs jeweils ein elektrisch isolierender Stoß der Schienen benötigt. Bei der Befahrung durch Fahrzeuge werden die beiden Schienen leitend verbunden. Diese Veränderung des Isolationswertes wird von der Auswerte- bzw. Empfangseinrichtung ausgewertet [38].

### **6.1.4. Lichtschranke**

Zur Verwendung für die gegenständliche Anwendung bietet sich ein System mit einer Einweg-Lichtschranke an. Diese besteht aus zwei Sensoren (Sender und Empfänger) und ist somit unempfindlich gegenüber reflektierenden oder spiegelnden Oberflächen an Objekten. Dieses System wird für die Verwendung im Freien oder in schmutzigen Umgebungen empfohlen. Bei der Sensorauswahl ist vor allem auf eine hohe Fremdlichtunempfindlichkeit zu achten. Um visuell störende Effekte zu vermeiden, bietet sich die Verwendung einer Wellenlänge im Infrarotbereich an. Gefahren, die von der Strahlung ausgehen, müssen durch entsprechende Warnschilder bzw. Abgrenzungen oder Abschirmungen verhindert werden [40]. Lichtschrankensysteme sind bei Verschubbahnhöfen nach dem Abrollberg in Kombination mit Achszählern vor der ersten Verzweigungsweiche im Einsatz. Deren Aufgabe ist es einerseits zu prüfen, ob die Weiche

frei ist und andererseits die Achsanzahl festzustellen (siehe z.B. [41]). Die Lichtschranke wird auch eingesetzt, um die richtige Trennung der Wagen zu prüfen.

### **6.1.5. Radar**

Radarbasierte Systeme können Züge und deren Fahrtrichtung zuverlässig erkennen. Der Vorteil bei diesen Systemen ist, dass der Sensor außerhalb des Gefahrenbereichs installiert werden kann und somit keinen Einbau im Gleis nötig ist. Ein existierendes System am Markt wird bei Gleisbauarbeiten in Verbindung mit einer Warnanlage verwendet. Eine fixe Montage des Sensors z.B. an einem Mast erscheint möglich [42]. Bei diesem System wird ein stehender Zug als keine Gefahr erkannt, somit kann dieses System nicht in der Form auf die gegenständliche Aufgabenstellung angewandt werden und müsste angepasst werden.

## **6.2. Bewertungsmatrix zur Vorselektion**

Die im Unterkapitel 6.1 beschriebenen Ideen werden in einer Bewertungsmatrix einander gegenübergestellt. In den folgenden Unterkapiteln werden die Bewertungskriterien, deren Gewichtung und die Bewertungsmethoden erläutert. Darauf folgend wird die Bewertungsmatrix und das Ergebnis dargestellt.

### **6.2.1. Bewertungskriterien und Gewichtung**

Für die Bewertungsmatrix wurden insgesamt vier Kriterien definiert. Diese sollen die Vor- und Nachteile der einzelnen Ideen möglichst gut darstellen. Zu den einzelnen Kriterien wird eine Gewichtung zwischen 1 (sehr niedrig) und 10 (sehr hoch) definiert. Die Matrix mit der Auflistung und der Kategorisierung ist in Tab. 6-1 ersichtlich.

#### Investitionskosten

In dieser Kategorie wird eine grobe Kostenschätzung der Investitionskosten zur Anschaffung der Anlage durchgeführt. Sonstige Kosten wurden dabei nicht berücksichtigt.

#### Sicherheits-Integritätslevel (SIL)

In dieser Kategorie wird die Einstufung der Anlage nach dem in der EN 61508 definierten SIL – sofern vorhanden – angeführt. Der Kategorie wird eine geringe Gewichtung zugeordnet (2).

### Erhaltungskosten

In dieser Kategorie werden die Kosten der Instandhaltung über den Lebenszyklus der Anlage abgeschätzt und in Relation zu den anderen Ideen gesetzt. Dabei werden die Einschätzungswerte „gering“ (1), „mittel“ (2) und „hoch“ (3) zur Beschreibung verwendet.

### automatische Zustandsüberwachung

In dieser Kategorie wird unterschieden, ob die Funktionsfähigkeit der Anlage fernüberwacht werden kann oder nicht. Der Kategorie wird eine mittlere Gewichtung zugeordnet (5).

**Tab. 6-1: Auflistung der Kriterien und Kategorisierung der Lösungsansätze**

Lösungsansatz	Investitionskosten*	SIL	Erhaltungskosten	automatische Zustandsüberwachung
Induktiver Schienenkontakt	7.000 €	4	1	ja
Mechanischer Schienenkontakt	5.000 €	3	2	nein
Gleisstromkreis	10.000 €	4	2	ja
Lichtschranke	30.000 €	2	1	ja
Radar	10.000 €	4	1	ja

\* ohne Kosten für Einbau, Verkabelung und Einbindung in Sicherheitslogik

### **6.2.2. Bewertungsskala**

Im nächsten Schritt werden die einzelnen Kriterien und deren Werte in eine untereinander vergleichbare Skala übergeführt. Die Skala beinhaltet Zahlen von 0 (schlecht) bis 10 (sehr gut) in jedem Kriterium. Bei „SIL“ werden den Werten 0 bis 4 jeweils 1, 3, 5, 7 und 9 Punkte zugewiesen. Bei den Investitionskosten wurde der Ansatz gewählt alle Lösungsansätze auf den teuersten Wert zu beziehen. Dem teuersten Wert wird die Zahl 0 zugewiesen und den restlichen Werten linear im Verhältnis Werte zwischen 0 und 10. Bei „automatische Zustandsüberwachung“ wurde bei „ja“ der Zahlenwert 7 und bei „nein“ der Zahlenwert 3 vergeben.

### **6.2.3. Bewertungsmethoden**

In der ersten Bewertungsmethode werden die zugewiesenen Zahlenwerte mit der in Unterkapitel 6.2.1 bereits erläuterten Gewichtung multipliziert und danach die Kategorien aufsummiert. Jegliche Kosten werden in dieser Bewertung mit mittlerer Gewichtung (5) berücksichtigt. Dies betrifft die Kategorien „Investitionskosten“, „Einbaukosten“ und „Erhaltungskosten“. Die Matrix mit dieser Bewertungsmethode ist in Tab. 6-2 dargestellt.

In der zweiten Bewertungsmethode werden die Kosten in der Summenbildung zunächst nicht berücksichtigt (mit 0 gewichtet). Danach wird die entstehende Summe mit der Summe der Werte in den drei Kostenkategorien multipliziert. Mit dieser Methode bekommen Kosten einen höheren Einfluss in der Bewertung und es ist möglich den Einfluss der Kosten auf die Bewertung abzuschätzen. Die Matrix mit der zweiten Bewertungsmethode kann Tab. 6-3 entnommen werden.

**Tab. 6-2: Bewertungsmethode 1**

Lösungsansatz	Wert	Investitions-kosten	SIL	Erhaltungskosten	automatische Zustandsüberwachung
<b>Gewichtung</b>	<b>170</b>	5	2	5	5
Induktiver Schienenkontakt	<b>136</b>	7,7	9	9	7
Radar	<b>131</b>	6,7	9	9	7
Gleisstromkreis	<b>111</b>	6,7	9	5	7
Mechanischer Schienenkontakt	<b>96</b>	8,3	7	5	3
Lichtschranke	<b>90</b>	0,0	5	9	7

**Tab. 6-3: Bewertungsmethode 2**

Lösungsansatz	Wert	Investitions-kosten	SIL	Erhaltungskosten	automatische Zustandsüberwachung
<b>Gewichtung</b>	<b>1400</b>	0	2	0	5
Induktiver Schienenkontakt	<b>883</b>	7,7	9	9	7
Radar	<b>830</b>	6,7	9	9	7
Gleisstromkreis	<b>618</b>	6,7	9	5	7
Lichtschranke	<b>405</b>	0,0	5	9	7
Mechanischer Schienenkontakt	<b>387</b>	8,3	7	5	3

### 6.3. Endergebnis der Bewertung

Zwischen den beiden Bewertungsmethoden ergibt sich nur ein Wechsel der letzten beiden Plätze und keine Änderung der Reihung auf den ersten drei Plätzen. Bei beiden Bewertungen erreicht der induktive Schienenkontakt am meisten Punkte. Somit sind aktuell eingesetzte Anlagen und Systeme zur Gleisfreimeldung auch für die Detektion von entrollten Schienenfahrzeugen zu empfehlen sind. Da in Kapitel 7 der Fokus von aufhaltenden Maßnahmen auf aktiv wirkenden und passiv wirkenden Aufhaltungsmaßnahmen liegt und diese keine Detektion von entrollten Wagen benötigen,

wird auf eine genauere Konzeption oder Anordnung von Detektionsmaßnahmen nicht weiter eingegangen.

## **7. MASSNAHMEN ZUR AUFHALTUNG VON ENTROLLTEN SCHIENENFAHRZEUGEN**

In diesem Kapitel werden Konzepte von alternativen Maßnahmen zur Aufhaltung von entrollten Schienenfahrzeugen erarbeitet. Als methodische Herangehensweise wurde im ersten Schritt eine Ideensammlung der Experten des Konsortiums – unterstützt durch die durchgeführte Grundlagenrecherche in Kapitel 2 – durchgeführt. Als Unterstützung zur Ideenfindung wurde dem Konsortium der Ergebnisbericht des Forschungsprojekts StilVA (Studie für eine innovative, lärm- und verschleißarme Bremsung am Abrollberg), welches im Rahmen der Verkehrsinfrastrukturforschung 2015 finanziert wurde, zur Verfügung gestellt [43]. Die gesammelten Ideen und Vorschläge werden mittels einer Bewertungsmatrix einander gegenübergestellt. Ziel der Gegenüberstellung ist eine Auswahl von zwei bis drei potenziell geeignet erscheinenden Möglichkeiten. Diese werden im Anschluss zu Konzepten entwickelt und einer Machbarkeitsstudie unterzogen. Zusätzlich werden die ausgewählten Möglichkeiten im Zuge einer Kosten-Nutzen-Analyse mit den aktuell eingesetzten Einrichtungen – Sperrschuh und Auffangweiche – verglichen. Am Schluss folgt ein Leitfaden welche Kriterien bei der Auswahl der im Sinne der Kosten-Nutzen-Betrachtung besten Einrichtung für eine beliebige Betriebsstelle entscheidend sind.

### **7.1. Ideensammlung**

In Rangierbahnhöfen befinden sich einige Systeme zur Bremsung von ablaufenden Wagen in Verwendung. Das Ziel dieser Einrichtungen ist die Regulierung und Harmonisierung der Abrollgeschwindigkeit der abrollenden Wagen. Die in diesem Kapitel betrachteten Maßnahmen beziehen sich auf infrastrukturseitige Einrichtungen zur Abbremsung von entrollten Wagen bis zum Stillstand. Somit wurden geschwindigkeitsabhängige Systeme, die Wagen lediglich auf eine Zielgeschwindigkeit bremsen und nicht zum Stillstand bringen können, ausgeschlossen. In diese Kategorie fallen Kolbenkleinbremsen, Schraubenbremsen und elektromagnetische Gleisbremsen (siehe Unterkapitel 2.2.1). Diese Einrichtungen könnten als bremsende Einrichtungen vor den aufhaltenden Maßnahmen eingesetzt werden, um die aufzuhaltende Energie zu reduzieren.

Da ein Großteil der bisherigen Vorfälle auf menschliches Versagen zurückzuführen ist (siehe Kapitel 3), war das Ziel der Überlegungen, dass Auffangeinrichtungen entrollter Wagen keinerlei zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen durch Menschen benötigen. Im Folgenden werden die betrachteten Systeme kurz beschrieben und mit Skizzen erklärt.

### **7.1.1. Balkenbremse**

Das Funktionsprinzip der Balkenbremse wurde bereits in Unterkapitel 2.2.1 erläutert. Die entscheidenden Parameter sind die Wirklänge und die Anpresskraft der Bremsbalken. Für den Ablauf verwendete Wirklängen belaufen sich auf 6 m - 20 m. Bezogen auf eine Achsfahrmasse von 22,5 t erreichen Balkenbremsen eine Bremsleistungsdichte von 20 kJ/m bis 50 kJ/m. Schwere Ausführungen können auch über 70 kJ/m erreichen [5].

Eine Sonderform der Balkenbremse stellt die Abrollsicherungsbremse (Asib) dar (siehe Unterkapitel 2.2.1). Die Funktion dieser ist es Wagen festzuhalten und gegen Entrollen zu sichern. Die Anordnung von Balkenbremsen kann grundsätzlich einseitig oder zweiseitig ausgeführt werden, wobei bei einseitiger Ausführung bei höheren Geschwindigkeiten die Gefahr des Aufkletterns gegeben ist [5].

### **7.1.2. Entgleisungsweiche**

Die Entgleisungsweiche ist eine Sonderform einer Weiche und wurde im Unterkapitel 2.2.2 bereits beschrieben. Zur Veranschaulichung ist in Abb. 2-8 die einfachste Form der Entgleisungsweiche dargestellt.

### **7.1.3. Auffangweiche mit Stumpfgleis**

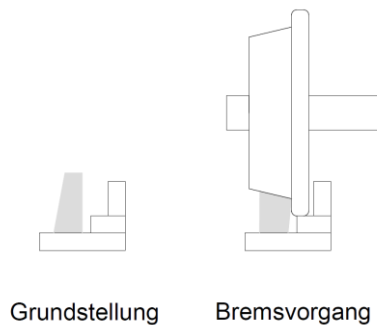
Als aktives Flankenschutzelement werden häufig Weichen mit vordefinierter Grundstellung eingesetzt, bei denen eine Fahrrelation in einem kurzen Stumpfgleis endet. In so einer Konstellation werden diese als Auffangweichen bezeichnet, da das Stumpfgleis eine reine Auffangfunktion besitzt und normalerweise keinen weiteren betrieblichen Nutzen bietet. Je nach erwarteter Aufprallgeschwindigkeit kann der Gleisabschluss des Stumpfgleises beispielsweise als Erdprellbock, Festprellbock oder Bremsprellbock ausgeführt werden [44]. Alternativ dazu kann das Gleis als Sandgleis oder endend in einer Sandgrube ausgeführt werden (siehe Abb. 2-7).

### **7.1.4. Sperrschuh**

Ein weiteres aktives Flankenschutzelement, welches aktuell vor allem bei Anschlussbahnen und Ladegleisen verwendet wird, ist der Sperrschuh (siehe Unterkapitel 2.2.2). Dieser bringt Wagen bis zu einer gewissen Grenzgeschwindigkeit gezielt zur Entgleisung. Die Grenzgeschwindigkeit kann über Vorgaben der zulässigen Gleislänge und der Längsneigung des Gleises berechnet werden [45]. Es wird im gegenständlichen Fall von einem elektrisch fernbedienten Sperrschuh ausgegangen.

### 7.1.5. fixe überfahrbare elastische Elemente

Durch die Befahrung von elastischen Elementen (z.B. Elastomere) mit der Radlaufläche oder dem Spurkranz wird Walkarbeit geleistet und der Rollwiderstand erhöht. In diesem Unterkapitel werden ausschließlich Systeme beschrieben, die nicht steuerbar ausgeführt werden können und somit im Regelbetrieb ebenfalls überfahren werden müssen. Bei der in Unterkapitel 2.2.1 bereits beschriebenen Gummigleisbremse wird die Fahrschiene mit einem Gummibalken ersetzt (siehe Abb. 7-1).



**Abb. 7-1: Funktionsprinzip einer Gummigleisbremse im Querschnitt [vgl. [5]]**

Eine andere Variante stellt das System veloSTRAIL® dar. Das System ist konzipiert, um bei Eisenbahnkreuzungen ein sicheres Überqueren für Rad- und Rollstuhlfahrer sowie Kinderwägen zu ermöglichen, indem die Spurrille für die Befahrung des Spurkranzes mit einem elastischen Element abgedeckt wird (siehe Abb. 7-2). Während der Zugsüberfahrt wird das elastische Element durch den Spurkranz über eine Schwalbenschwanzverbindung eingedrückt. Der Spurkranz erfährt dabei eine zusätzliche Reibung durch die befahrene Oberfläche. Diese wird als zu gering eingeschätzt, sodass dieses System für die gegenständliche Anwendung als nicht geeignet eingestuft wird.



**Abb. 7-2: Querschnitt des Systems veloSTRAIL® – (2) Schienenformstück, (4) Schwalbenschwanzverbindung zur Innenplatte [Quelle: [46]]**

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Erzeugung einer Spurrille durch Anbringen von begrenzenden Stahlprofilen oder einer parallel laufenden innenliegenden Schiene. Diese Methode ist zum Beispiel bei Eisenbahnkreuzungen oder bei überfahrbaren Gleisen in Werkstätten- oder Industriegelände üblich. Die Spurrille wird mit einem elastischen Element ausgefüllt, wodurch bei der Überfahrt der Spurkranz am Element Walkarbeit leistet und so der Rollwiderstand erhöht wird (siehe Abb. 7-3).





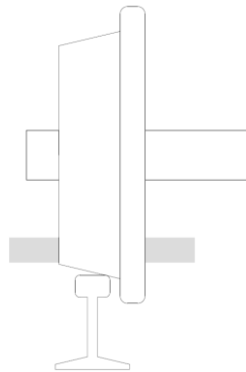
**Abb. 7-3: künstlich erzeugte und mit elastischem Element ausgefüllte Spurrille<sup>6</sup>**

### 7.1.6. steuerbare überfahrbare elastische Elemente

Der Bremsmechanismus ist analog zu den Systemen, die im Unterkapitel 7.1.5 erläutert wurden. Der Unterschied liegt darin, dass die in diesem Unterkapitel beschriebenen Ideen auch steuerbar ausgeführt werden können und somit im Regelbetrieb nicht überfahren werden müssen. Dies bringt erhebliche Vorteile hinsichtlich des Verschleißes. Ein weiterer Vorteil ist auch, dass die Rollwiderstandserhöhung deutlich erhöht werden kann, sodass kürzere Einbaulängen benötigt werden, um denselben Bremsseffekt zu erzielen oder der Einsatz bei höheren Längsneigungen möglich ist. Der Nachteil dabei ist, dass die Investitionskosten im Vergleich wesentlich zunehmen.

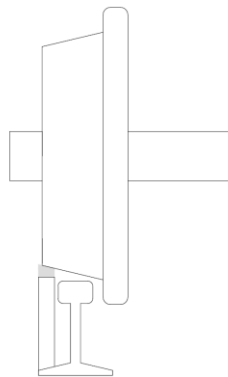
Analog zur Bauweise der Balkenbremse können Bremsbalken mit zu den Schienen gewandten elastischen Elementen ausgestattet werden, die das Rad durch Reibung und Verformungsarbeit bremsen (siehe Abb. 7-4). Solche Systeme sind sowohl klappbar, als auch starr möglich. Die elastischen Balken können auf beiden Seiten außerhalb und innerhalb des Gleises situiert werden.

<sup>6</sup> Getzner Werkstoffe GmbH, „Sylomer® Spurrillenfüller“. [Online]. Available: <https://www.getzner.com/de/downloads?downloadTags=Railway%20Solution,Brochure,de>. [Zugriff am 28.08.2019].



**Abb. 7-4: Balken mit elastischen Elementen, die durch Reibung den Rollwiderstand des durchlaufenden Rades erhöhen**

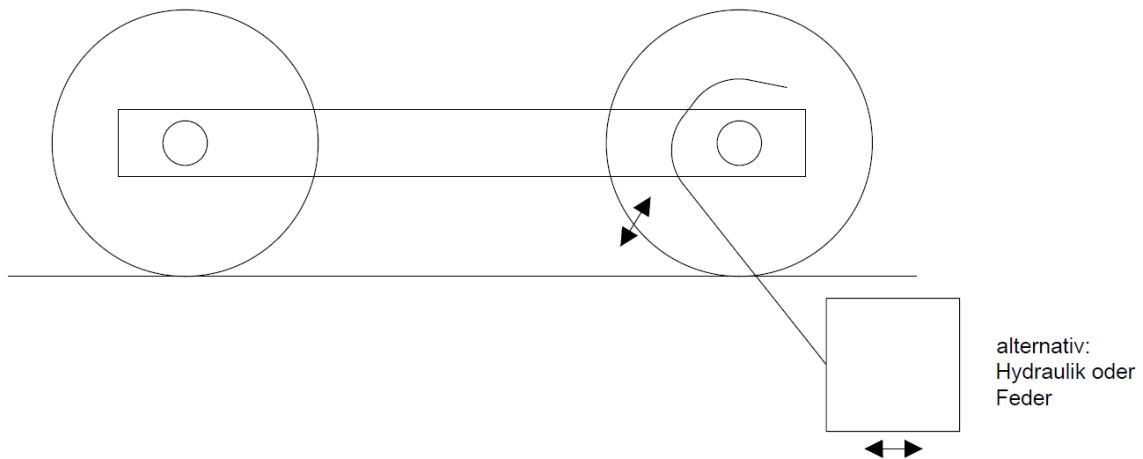
Eine ähnliche Anwendung ist auch Gegenstand eines Patents der Firma Thyssen Krupp Automotive AG [47], in dem ein auf Unterlagsplatten oder Gleitstuhlplatten gelagerter Bremsbalken mit elastischen Elementen parallel zur Fahrschiene angeordnet wird (schematisch in Abb. 7-5 dargestellt). Dieser erstreckt sich bis über den Schienenkopf (etwa 5 cm - 6 cm) und kann mittels einem Verstellantrieb aus einer inaktiven Position in eine aktive Position verschoben werden. Wenn sich der Bremsbalken in einer aktiven Position befindet, hebt das Rad von der Fahrschiene ab und fährt auf den Balken, der sich gewichtsabhängig deformiert und so durch gewichtsabhängige Walkarbeit abgebremst wird. Das System kann ebenfalls auch ohne Steuermechanismus ausgeführt werden.



**Abb. 7-5: schematische Skizze eines Balkens mit elastischen Elementen neben der Schiene**

### 7.1.7. Fangmechanismus mit Trägheitsmodul zur Energieumwandlung

Durch die Aktivierung von Fangmechanismen (z.B. Haken analog zum Flugzeugträger), werden die Wagen gefangen und mittels eines Gewichts auf einer Reibfläche, einer Feder, einem Generator oder einem hydraulischen System zum Stillstand gebracht (siehe beispielhaft Abb. 7-6). Das System müsste entweder unter dem Gleis oder neben dem Gleis eingebaut werden.



**Abb. 7-6: beispielhafte Skizze mit ausklappbarem Haken und Energieumwandlung**

### 7.1.8. Klappbarer Hemmschuh

Hemmschuhe sind ein Absicherungsmittel, das bereits regelmäßig im Betrieb eingesetzt wird und dementsprechend in den Betriebsstellen auch vorgehalten wird. Durch einen Klappmechanismus können Hemmschuhe ferngesteuert auf den Schienenkopf gelegt werden. Die Einrichtungen können nur an den Enden oder auch in einem gewissen Abstand in den Verschiebgleisen eingebaut werden. Zusätzlich können die Klappmechanismen einseitig oder beidseitig eingebaut werden. Ziel des Systems ist es, Hemmschuhe auf den Schienenkopf zu legen und bei Auffahren eines Rades auf den Hemmschuh, diesen vom System zu entkoppeln. Durch die Gleitung des Hemmschuhs am Schienenkopf wird der Wagen oder die Wagengruppe gebremst. Es ist darauf zu achten, dass genügend Platz zur nächsten Weiche gegeben ist. Nach der Verwendung, muss ein Hemmschuh wieder in den Klappmechanismus eingehängt und der benutzte Hemmschuh wieder von der Schiene entfernt werden, um die Funktionsfähigkeit wiederherzustellen.

### 7.1.9. Klappbarer Bremsschuh

Ein klappbarer Bremsschuh wurde bereits entwickelt und in Unterkapitel 2.2.3 beschrieben. Der Unterschied ist, dass der Bremsschuh nicht beim Auffahren eines Rades auf der Klappvorrichtung ausgehängt wird, sondern durch energieverzehrende Elemente (Feder, Hydraulik) sich in Längsrichtung verschiebt und den Wagen auf diese Art abbremst [17].

### 7.1.10. Klappbarer Festprellbock

Das System eines klappbaren Festprellbocks wurde bereits entwickelt und in Unterkapitel 2.2.3 beschrieben. (vgl. [15]).

### **7.1.11. Klappbarer Bremsprellbock**

Das System eines klappbaren Bremsprellbocks wurde bereits entwickelt und in Unterkapitel 2.2.3 beschrieben. (vgl. [16]).

### **7.1.12. ausfahrbare infrastrukturseitige Magnetschienenbremse**

Durch die Ausstattung des Bremsbalkens einer Balkenbremse mit einem Elektromagneten, wird die Anpresskraft des Bremsbalkens am Rad erhöht und somit die mögliche Energieumwandlung pro Laufmeter Balkenbremse gesteigert. Der Vorteil dabei ist, dass für die gleiche umzuwandelnde Energie eine geringere Einbaulänge benötigt wird.

## **7.2. Bewertungsmatrix zur Vorselektion**

Die im Unterkapitel 7.1 beschriebenen Ideen werden in einer Bewertungsmatrix einander gegenübergestellt. Die Bewertungskriterien und die Bewertung der einzelnen Ideen wurden durch das Konsortium in mehreren internen Workshops ausgearbeitet. Zusätzlich wurden auch zwei Experten der ÖBB gebeten eine unabhängige Einschätzung zu den einzelnen Maßnahmen abzugeben. In den folgenden Unterkapiteln werden die Bewertungskriterien, deren Gewichtung und die Bewertungsmethoden erläutert. Darauf folgend wird die Bewertungsmatrix und das Ergebnis dargestellt.

### **7.2.1. Bewertungskriterien und Gewichtung**

Für die Bewertungsmatrix wurden insgesamt 12 Kriterien definiert. Diese sollen die Vor- und Nachteile der einzelnen Ideen möglichst gut darstellen. Zu den einzelnen Kriterien wird eine Gewichtung zwischen 1 (sehr niedrig) und 10 (sehr hoch) definiert. Die Matrix mit der Auflistung und der Kategorisierung ist in Tab. 7-1 dargestellt.

#### Wirkung

Unter dem Kriterium „Wirkung“ wird die Art des Wirkmechanismus der Idee beschrieben. Dabei werden die Kriterien „aufhaltend“ – das System ist in der Lage entrollte Wagen bis zum Stillstand abzubremsen –, „bremsend“ – das System ist in der Lage entrollte Wagen zu bremsen, aber eine Aufhaltung ist nicht möglich – und „nicht relevant“ – die Idee erscheint nicht machbar oder nicht anwendbar auf die gegenständliche Aufgabenstellung – definiert. Für die weitere Bewertung werden nur die Ideen weiterverfolgt, welche das Kriterium „aufhaltend“ aufweisen, somit sind Systeme, die „bremsend“ oder „nicht relevant“ kategorisiert werden automatisch von der Bewertung ausgeschlossen.

### Wirkungsmechanismus

Unter dem Kriterium „Wirkmechanismus“ wird die Möglichkeit der Ansteuerung zusammengefasst. Dabei werden die Kriterien „aktiv“ – das System kann in die Sicherungstechnik als Fahrstraßenelement eingebunden werden und wirkt immer, außer es wird durch Einstellung einer Fahrstraße deaktiviert –, „reaktiv“ – bei Erkennen eines Vorfalls mit entrollten Wagen wird das System als Auffangmechanismus aktiviert – und „passiv“ – das System wirkt immer und ist nicht steuerbar – definiert. Der Kategorie wird eine hohe Gewichtung zugeordnet (8).

### aufhaltbare Energie

Unter dem Kriterium „aufhaltbare Energie“ wird versucht das Potential der einzelnen Systeme hinsichtlich der Energiedissipation zu quantifizieren. Dabei werden Energiewerte aus Angaben und Berechnungen abgeschätzt. Der Kategorie wird eine mittelhohe Gewichtung zugeordnet (7).

### Schadensausmaß am Rollmaterial

In dieser Kategorie wird eine Einschätzung der einzelnen Ideen hinsichtlich der bei der Aufhaltung entstehenden Schäden am Rollmaterial getroffen. Dabei werden die Einschätzungswerte „gering“ (1), „mittel“ (2) und „hoch“ (3) zur Beschreibung verwendet. Der Kategorie wird eine mittlere Gewichtung zugeordnet (5), da die Schäden am Rollmaterial zwar wichtig sind, aber die vorzeitige Aufhaltung potentiell viel höhere Folgekosten verhindert (z.B. bei Zusammenstoß mit einem anderen Zug).

### Schadensausmaß an der Infrastruktur

In dieser Kategorie wird eine Einschätzung der einzelnen Ideen hinsichtlich der bei der Aufhaltung entstehenden Schäden an der Infrastruktur getroffen. Dabei werden die Einschätzungswerte „gering“ (1), „mittel“ (2) und „hoch“ (3) zur Beschreibung verwendet. Der Kategorie wird die höchste Gewichtung zugeordnet (10), da Schäden an der Infrastruktur hohe Kosten verursachen und die Verfügbarkeit der Gleise über einen Zeitraum einschränken, was zu betrieblichen Einschränkungen führt.

### Schadensausmaß an der Anlage

In dieser Kategorie wird eine Einschätzung der einzelnen Ideen hinsichtlich der bei der Aufhaltung entstehenden Schäden an der Anlage selbst getroffen. Dabei werden die Einschätzungswerte „gering“ (1), „mittel“ (2) und „hoch“ (3) zur Beschreibung verwendet. Der Kategorie wird eine sehr niedrige Gewichtung zugeordnet (1), da die Anlage den

einzigem Zweck der Aufhaltung verfolgt und die Instandsetzung im Vergleich zu anderen möglichen Kostenfaktoren zu geringen Kosten führt.

#### Investitionskosten

In dieser Kategorie wird eine grobe Kostenschätzung der Investitionskosten zur Anschaffung der Anlage durchgeführt. Sonstige Kosten wurden dabei nicht berücksichtigt.

#### Einbaukosten

In dieser Kategorie werden die Kosten des Einbaus der Anlage abgeschätzt und in Relation zu den anderen Ideen gesetzt. Dabei werden die Einschätzungswerte „gering“ (1), „mittel“ (2) und „hoch“ (3) zur Beschreibung verwendet.

#### Verkabelung nötig

Da die Verkabelung im Gleisbereich einen hohen Kostenfaktor darstellt, wird in dieser Kategorie ausgewiesen, ob die Anlage eine Verkabelung benötigt oder nicht. Es fließen in dieser Kategorie keine Kosten für eine etwaige Verkabelung in die Bewertung ein.

#### Erhaltungskosten

In dieser Kategorie werden die Kosten der Instandhaltung über den Lebenszyklus der Anlage abgeschätzt und in Relation zu den anderen Ideen gesetzt. Dabei werden die Einschätzungswerte „gering“ (1), „mittel“ (2) und „hoch“ (3) zur Beschreibung verwendet.

#### Marktreife

In dieser Kategorie wird ausgewiesen, ob ein entsprechendes Produkt bereits am Markt vorhanden ist oder ob die Anlage erst entwickelt und entsprechend getestet werden muss. Der Kategorie wird eine niedrige Gewichtung zugeordnet (3), da das Ziel des Forschungsprojekts vor allem darin besteht auch neue Ideen herauszufinden und somit ein zusätzlicher Entwicklungsaufwand sich nicht stark negativ auswirken sollte.

#### automatische Zustandsüberwachung

In dieser Kategorie wird unterschieden, ob die Funktionsfähigkeit der Anlage fernüberwacht werden kann oder nicht. Der Kategorie wird eine mittlere Gewichtung zugeordnet (5).

**Tab. 7-1: Auflistung der Kriterien und Kategorisierung der Lösungsansätze**

Lösungsansatz	Wirkung	Wirkungsmechanismus	aufhaltbare Energie	Schadensausmaß am Rollmaterial	Schadensausmaß an der Infrastruktur	Schadensausmaß an der Anlage	Investitionskosten	Einbaukosten	Verkabelung nötig	Erhaltungskosten	Marktreife	automatische Zustandsüberwachung
Balkenbremse/Asib	aufhaltend	aktiv	20 - 70 kJ/m	1	1	1	20.000 €	3	ja	3	ja	ja
Entgleisungsweiche	aufhaltend	aktiv	unbeschränkt	3	3	3	15.000 €	3	ja	3	ja	ja
Auffangweiche inkl. Stumpfgleis	aufhaltend	aktiv	> 500 kJ	1	1	2	100.000 €	3	ja	3	ja	ja
Sperrschuh, el. ferngestellt	aufhaltend	aktiv	> 115 kJ	2	3	2	6.000 €	2	ja	2	ja	ja
fixe überfahrbare elastische Elemente	aufhaltend	passiv	10% Rollwiderstand	1	1	1	10.000 €	2	nein	3	ja	nein
steuerbare überfahrbare elastische Elemente	aufhaltend	aktiv	40% Rollwiderstand	1	1	1	30.000 €	3	ja	3	ja	ja
Trägheitsmodul zur Energieumwandlung mit Fangmechanismus	aufhaltend	reaktiv	???	1	1	2	50.000 €	3	ja	2	nein	ja
Klappbarer Hemmschuh	aufhaltend	aktiv	< 17 kJ/m	1	1	1	7.000 €	2	ja	2	nein	ja
Klappbarer Bremschuh	aufhaltend	aktiv	40 kJ	1	1	1	7.000 €	3	ja	2	ja	ja
Klappbarer Festprellbock	aufhaltend	aktiv	1000 kJ	2	2	3	60.000 €	3	ja	3	ja	ja
Klappbarer Bremsprellbock	aufhaltend	aktiv	< 400 kJ/m	1	1	1	40.000 €	3	ja	3	ja	ja
ausfahrbare infrastrukturseitige Magnetschienenbremse	aufhaltend	aktiv	50 - 70 kJ/m	1	1	1	30.000 €	3	ja	3	nein	ja

### 7.2.2. Bewertungsskala

Im nächsten Schritt werden die einzelnen Kriterien und deren Werte in eine untereinander vergleichbare Skala übergeführt. Die Skala beinhaltet Zahlen von 0 (schlecht) bis 10 (sehr gut) in jedem Kriterium. Beim „Wirkungsmechanismus“ werden „aktiv“ und „passiv“ wirkenden Systemen 10 Punkte zugewiesen und „reaktiv“ wirkenden Systemen 5 Punkte zugewiesen. Bei der „aufhaltbaren Energie“ erfolgt eine subjektive Einschätzung der Punktevergabe anhand der dargestellten Werte in Tab. 7-1. Bei den Kategorien mit den Kriterien „gering“, „mittel“ und „hoch“, werden jeweils die Zahlenwerte 9, 5 und 1 zugewiesen. Das betrifft die Kategorien „Schadensausmaß am Rollmaterial“, „Schadensausmaß an der Infrastruktur“, „Schadensausmaß an der Anlage“ und „Einbaukosten“. Bei den Investitionskosten wurde der Ansatz gewählt alle Lösungsansätze auf den teuersten Wert zu beziehen. Dem teuersten Wert wird die Zahl 0 zugewiesen und den restliche Werten linear im Verhältnis Werte zwischen 0 und 10. Beim Kriterium „Verkabelung nötig“ wurde bei „ja“ der Zahlenwert 1 vergeben und bei „nein“ der Zahlenwert 9 vergeben. Bei „Marktreife“ wurde bei „ja“ der Zahlenwert 10 und bei „nein“ der Zahlenwert 5 zugewiesen. Bei „automatische Zustandsüberwachung“ wurde bei „ja“ der Zahlenwert 7 und bei „nein“ der Zahlenwert 3 vergeben.

### 7.2.3. Bewertungsmethoden

In der ersten Bewertungsmethode werden die zugewiesenen Zahlenwerte mit der in Unterkapitel 7.2.1 bereits erläuterten Gewichtung multipliziert und danach die Kategorien aufsummiert. Jegliche Kosten werden in dieser Bewertung mit mittlerer Gewichtung (5) berücksichtigt. Dies betrifft die Kategorien „Investitionskosten“, „Einbaukosten“, „Verkabelung nötig“ und „Erhaltungskosten“. Die Matrix mit der Bewertungsmethode ist in Tab. 7-2 dargestellt.

In der zweiten Bewertungsmethode werden die Kosten in der Summenbildung zunächst nicht berücksichtigt (mit 0 gewichtet). Danach wird die entstehende Summe mit der Summe der Werte in den vier Kostenkategorien multipliziert. Mit dieser Methode bekommen Kosten einen höheren Einfluss in der Bewertung und es ist möglich den Einfluss der Kosten auf die Bewertung abzuschätzen. Die Matrix mit der zweiten Bewertungsmethode kann Tab. 7-3 entnommen werden.



Tab. 7-2: Bewertungsmethode 1

Lösungsansatz	Wert	Wirkung	Wirkungsmechanismus	aufhaltbare Energie	Schadensausmaß am Rollmaterial	Schadensausmaß an der Infrastruktur	Schadensausmaß an der Anlage	Investitionskosten	Einbaukosten	Verkabelung nötig	Erhaltungskosten	Marktreife	automatische Zustandsüberwachung
<b>Gewichtung</b>	<b>590</b>		8	7	5	10	1	5	5	5	5	3	5
Klappbarer Hemmschuh	<b>432</b>	aufhaltend	10	8	9	9	9	9,3	5	1	5	5	7
Klappbarer Bremschuh	<b>413</b>	aufhaltend	10	6	9	9	9	9,3	1	1	5	10	7
fixe überfahrbare elastische Elemente	<b>410</b>	aufhaltend	10	3	9	9	9	9,0	5	9	1	10	3
Klappbarer Bremsprellbock	<b>404</b>	aufhaltend	10	10	9	9	9	6,0	1	1	1	10	7
Balkenbremse/Asib	<b>400</b>	aufhaltend	10	8	9	9	9	8,0	1	1	1	10	7
ausfahrbare infrastrukturseitige Magnetschienenbremse	<b>387</b>	aufhaltend	10	9	9	9	9	7,0	1	1	1	5	7
steuerbare überfahrbare elastische Elemente	<b>381</b>	aufhaltend	10	6	9	9	9	7,0	1	1	1	10	7
Auffangweiche inkl. Stumpfgleis	<b>370</b>	aufhaltend	10	10	9	9	5	0,0	1	1	1	10	7
Trägheitsmodul zur Energieumwandlung mit Fangmechanismus	<b>346</b>	aufhaltend	5	8	9	9	5	5,0	1	1	5	5	7
Sperrschuh, el. ferngestellt	<b>336</b>	aufhaltend	10	7	5	1	5	9,4	5	1	5	10	7
Klappbarer Festprellbock	<b>326</b>	aufhaltend	10	10	5	5	1	4,0	1	1	1	10	7
Entgleisungsweiche	<b>289</b>	aufhaltend	10	10	1	1	1	8,5	1	1	1	10	7

**Tab. 7-3: Bewertungsmethode 2**

Lösungsansatz	Wert	Wirkung	Wirkungs- mechanismus	aufhaltbare Energie	Schadens- ausmaß am Rollmaterial	Schadens- ausmaß an der Infrastruktur	Schadens- ausmaß an der Anlage	Investitions- kosten	Einbau- kosten	Verkabelung nötig	Erhaltungs- kosten	Markt- reife	automatische Zustands- überwachung
<b>Gewichtung</b>	<b>15600</b>		8	7	5	10	1	0	0	0	0	3	5
fixe überfahrbare elastische Elemente	<b>6960</b>	aufhaltend	10	3	9	9	<b>9</b>	9,0	5	9	1	10	3
Klappbarer Hemmschuh	<b>6699</b>	aufhaltend	10	8	9	9	<b>9</b>	9,3	5	1	5	5	7
Klappbarer Bremsschuh	<b>5395</b>	aufhaltend	10	6	9	9	<b>9</b>	9,3	1	1	5	10	7
Sperrschuh, el. ferngestellt	<b>4774</b>	aufhaltend	10	7	5	1	<b>5</b>	9,4	5	1	5	10	7
Balkenbremse/Asib	<b>3795</b>	aufhaltend	10	8	9	9	<b>9</b>	8,0	1	1	1	10	7
Trägheitsmodul zur Energieumwandlung mit Fangmechanismus	<b>3432</b>	aufhaltend	5	8	9	9	<b>5</b>	5,0	1	1	5	5	7
ausfahrbare infrastrukturseitige Magnetschienebremse	<b>3370</b>	aufhaltend	10	9	9	9	<b>9</b>	7,0	1	1	1	5	7
steuerbare überfahrbare elastische Elemente	<b>3310</b>	aufhaltend	10	6	9	9	<b>9</b>	7,0	1	1	1	10	7
Klappbarer Bremsprellbock	<b>3231</b>	aufhaltend	10	10	9	9	<b>9</b>	6,0	1	1	1	10	7
Entgleisungsweiche	<b>2657</b>	aufhaltend	10	10	1	1	<b>1</b>	8,5	1	1	1	10	7
Klappbarer Festprellbock	<b>2037</b>	aufhaltend	10	10	5	5	<b>1</b>	4,0	1	1	1	10	7
Auffangweiche inkl. Stumpfgleis	<b>1065</b>	aufhaltend	10	10	9	9	<b>5</b>	0,0	1	1	1	10	7

#### 7.2.4. Bewertung durch Experten der ÖBB

Im Zuge einer Statusbesprechung wurden die Ideen zwei Experten der ÖBB vorgestellt. Um das Bewertungsergebnis zu plausibilisieren und zu validieren, wurden im Anschluss die beiden Experten gebeten – ohne Vorkenntnis auf die ausgewählten Kriterien, Gewichtung und Bewertung durch das Konsortium – eine Grobeinschätzung über die Wirkung und die Kosteneffizienz der betrachteten Ideen durchzuführen. Für die Bewertung standen Zahlen von 1 (niedrig) bis 10 (sehr hoch) zur Verfügung. Die Experten führten die Bewertung unabhängig voneinander aus, sodass eine gegenseitige Beeinflussung ausgeschlossen werden kann. Die Einschätzung kann Tab. 7-4 entnommen werden. Für die Berechnung der Spalte „Wert“ wurden die Produkte der Zahlen der beiden Einschätzungen addiert.

**Tab. 7-4: Grobeinschätzung durch 2 Experten der ÖBB**

Lösungsansatz	Einschätzung 1 Wirkung	Einschätzung 1 Kosteneffizienz	Einschätzung 2 Wirkung	Einschätzung 2 Kosteneffizienz	Wert
Sperrschuh, el. ferngestellt	9	8	8	7	<b>128</b>
Klappbarer Bremsschuh	8	5	9	8	<b>112</b>
Klappbarer Hemmschuh	6	5	8	9	<b>102</b>
fixe überfahrbare elastische Elemente	8	8	4	8	<b>96</b>
Auffangweiche inkl. Stumpfgleis	10	6	9	3	<b>87</b>
steuerbare überfahrbare elastische Elemente	8	4	6	7	<b>74</b>
Entgleisungsweiche	9	6	8	2	<b>70</b>
Klappbarer Festprellbock	7	3	10	4	<b>61</b>
Balkenbremse/Asib	8	3	8	4	<b>56</b>
Trägheitsmodul zur Energieumwandlung mit Fangmechanismus	7	4	9	2	<b>46</b>
Klappbarer Bremsprellbock	8	2	10	2	<b>36</b>
ausfahrbare infrastrukturseitige Magnetschienenbremse	8	2	9	2	<b>34</b>

#### 7.3. Endergebnis der Bewertung

In den Unterkapiteln 7.2.3 und 7.2.4 wurden die Ergebnisse der Bewertung dargestellt. Um einen Überblick zu geben, wurden die Platzierungen nach den drei durchgeführten Bewertungen in Tab. 7-5 dargestellt. In der letzten Spalte ist das gemittelte Ergebnis der Platzierungen zu erkennen, wobei die Summe der drei Bewertungen durch vier dividiert wird, da die Experteneinschätzung durch zwei Mitarbeiter der ÖBB durchgeführt wurde. Es ist zu sehen, dass vor allem auf den ersten drei Plätzen die Platzierungen in allen drei Bewertungsmethoden sehr ähnlich sind und somit das Endergebnis auf den vorderen Plätzen eindeutig ist. Aufgrund der durchgeführten Bewertungen werden die Ideen

Klappbarer Hemmschuh, klappbarer Bremsschuh und fixe überfahrbare elastische Elemente für die weiteren Betrachtungen ausgewählt.

**Tab. 7-5: Gegenüberstellung der Platzreihung der Bewertungen**

Lösungsansatz	Platzierung nach Bewertung 1	Platzierung nach Bewertung 2	Platzierung nach Experten-Einschätzung	Platzierung gemittelt
Klappbarer Hemmschuh	1	2	3	<b>2,3</b>
Klappbarer Bremsschuh	2	3	2	<b>2,3</b>
fixe überfahrbare elastische Elemente	3	1	4	<b>3,0</b>
Sperrschuh, el. ferngestellt	10	4	1	<b>4,0</b>
steuerbare überfahrbare elastische Elemente	7	8	6	<b>6,8</b>
Balkenbremse/Asib	5	5	9	<b>7,0</b>
Auffangweiche inkl. Stumpfgleis	8	12	5	<b>7,5</b>
Klappbarer Bremsprellbock	4	9	11	<b>8,8</b>
Trägheitsmodul zur Energieumwandlung mit Fangmechanismus	9	6	10	<b>8,8</b>
Entgleisungsweiche	12	10	7	<b>9,0</b>
ausfahrbare infrastrukturseitige	6	7	12	<b>9,3</b>
Klappbarer Festprellbock	11	11	8	<b>9,5</b>

## 7.4. Machbarkeitsstudie

In den folgenden Unterkapiteln wird die Machbarkeit der Systeme, die weiterbetrachtet werden und welche es in der Form noch nicht als Produkt am Markt gibt, überprüft. Im Zuge dessen werden die Systeme detailliert beschrieben und mit Abbildungen erläutert.

### 7.4.1. Klappbarer Hemmschuh

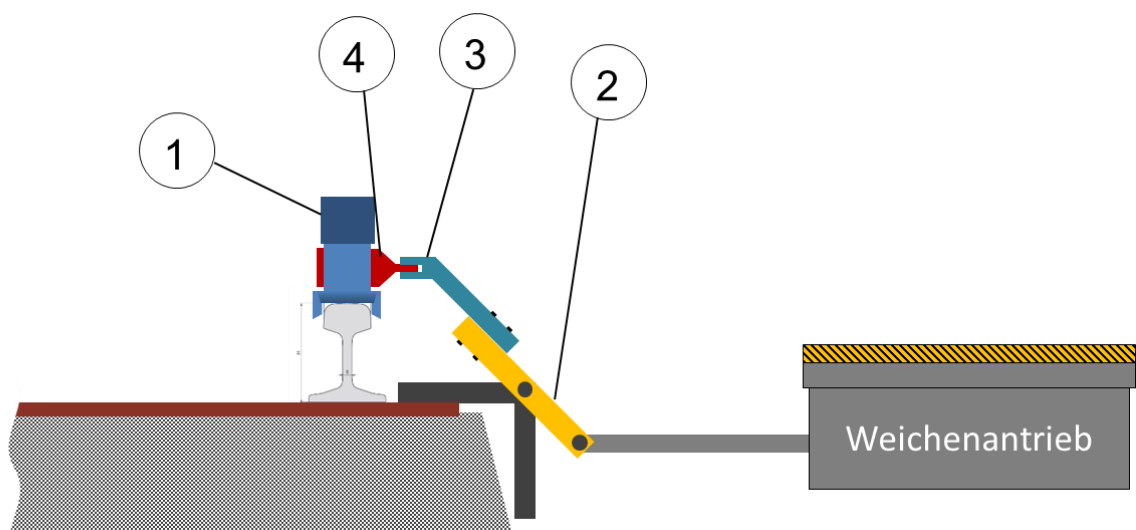
Hemmschuhe sind ein Absicherungsmittel, das bereits regelmäßig im Betrieb eingesetzt wird und dementsprechend in den Betriebsstellen auch vorgehalten wird. Während jedoch heutzutage die Hemmschuhe händisch aufgelegt werden, um abgestellte Wagen oder ganze Wagengruppen abzusichern sowie bei Abstoß- und Abrollvorgängen die rollenden Fahrzeuge abzubremsen, ist für die Aufhaltung von unabsichtlich entrollenden Fahrzeugen eine automatische Bedienung des Hemmschuhs von Vorteil. Dabei sollen Hemmschuhe durch einen Klappmechanismus ferngesteuert auf den Schienenkopf gelegt bzw. wieder weggeklappt werden. Die Sicherung gegen entrollende Fahrzeuge erfolgt dergestalt, dass dieses Element mit der Grundstellung „aufgelegt“ definiert wird und nur im Fall des ordnungsgemäßen Befahrens im Zuge einer Fahrstraße (Zug- oder Verschubfahrstraße) oder per expliziter Bedienhandlung vom Gleis abgelegt wird. Dies ist in allen Stellwerkstechnologien realisierbar, die eine automatische Fahrstraßeneinstellung mit Überwachung der verschlossenen Fahrweegelemente kennen, d.h. nicht nur in

elektronischen Stellwerken (ESTW), sondern auch in Relaisstellwerken mit automatischer Weichenstellung (z.B. Spurplanstellwerke).

### Funktionsweise

Der Klappmechanismus funktioniert im Prinzip wie bei einem elektrisch fernbedienten Sperrschuh, nur dass statt des Auswurfteils ein Hemmschuh auf die Schiene gelegt wird. Die beiden Endlagen sind „aufgelegt“ und „abgelegt“.

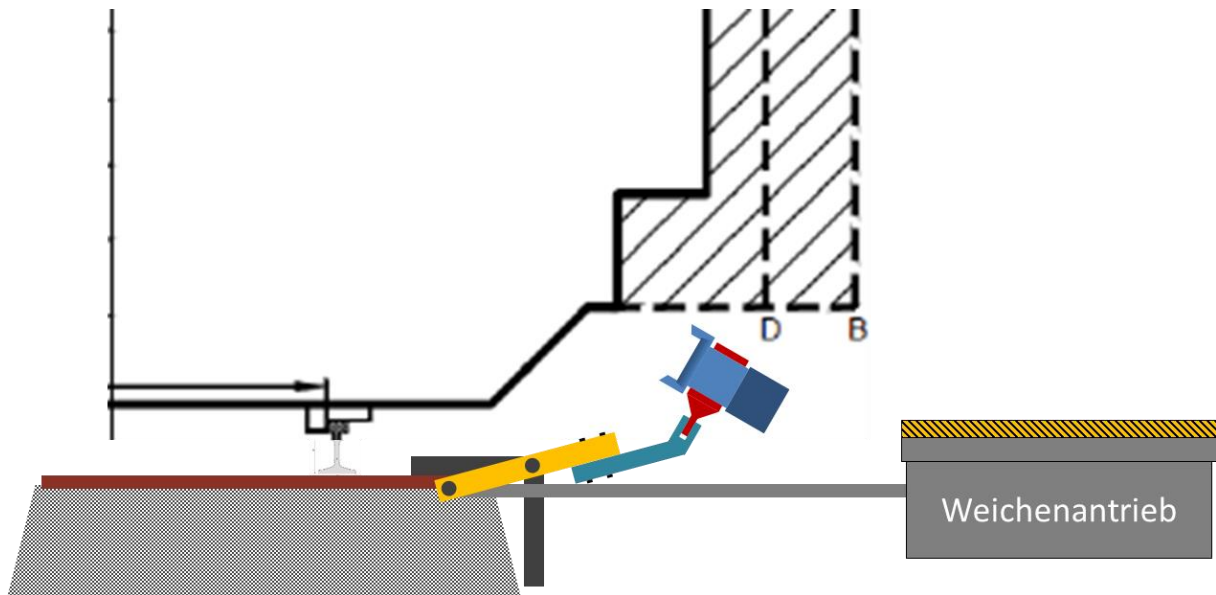
Da die Bremswirkung des Hemmschuhs auf der Gleitung am Schienenkopf beruht, ist dieser bei Anfahren durch einen entrollten Wagen freizugeben, damit der Hemmschuh unter dem Rad mitgeführt wird. Daher bedarf es eines speziellen Haltemechanismus, der so konstruiert sein muss, dass der Hemmschuh in dieser Situation herausgeschoben werden kann. Dies wird beispielsweise dadurch erreicht, dass der Hemmschuh mit einem Hemmschuhträger (HS-Träger) in den Haltemechanismus parallel zur Schienenoberkante gesteckt wird, was ein Abstreifen im Auslösefall ermöglicht. Eine schematische Darstellung ist in Abb. 7-7 ersichtlich.



**Abb. 7-7: schematische Darstellung des klappbaren Hemmschuhs in der Lage „aufgelegt“**

Dabei ist für das elektrisch fernbediente Auf- und Ablegen des Hemmschuhs (1) ein Weichenantrieb vorgesehen, der den dafür abgestimmten Auflage- (2) und Haltemechanismus (3) bewegt. Der Hemmschuh wird mit dem HS-Träger (4) so in den Haltemechanismus gesteckt, dass er beim Anfahren durch ein Fahrzeug mechanisch freigegeben wird. Der HS-Träger wiederum ist so konstruiert, dass er an den gebräuchlichen Hemmschuharten hinreichend fest montiert werden kann.

Der Klappmechanismus muss zudem so konstruiert sein, dass im Zustand „abgelegt“ das Lichtraumprofil nicht verletzt wird (siehe Abb. 7-8).



**Abb. 7-8: schematische Darstellung des klappbaren Hemmschuhs in der Lage „abgelegt“**

In der Steckverbindung zwischen HS-Träger und Haltemechanismus muss ein Überwachungsmechanismus eingebaut werden, der das Entfernen des Hemmschuhs samt dem HS-Träger erkennt und daraufhin eine Elementstörung an das Stellwerk auslöst. Dies wird beispielsweise dadurch erreicht, dass eine oder mehrere Adern der Vierdraht-Schnittstelle elektrisch über diese Verbindung geführt wird, sodass bei Unterbrechung dieser Verbindung (z.B. durch Auslösen des Hemmschuhs) eine Störmeldung im Stellwerk zu diesem Element generiert wird.

Da das Anfahren des Hemmschuhs (d.h. das Entrollen eines Fahrzeugs) keinen Regelfall darstellt, sondern eine Ausnahmesituation, die mit betrieblichen Maßnahmen ohnedies so weit wie möglich verhindert wird, ist die Störmeldung eine sinngemäße und im Meldespektrum von Weichenantrieben bereits enthaltene Information, die zudem den Bediener vom betrachteten Vorfall informiert (Alarmfunktion). Die über die Alarmfunktion hinausgehenden Sicherheitsaspekte werden im darauffolgenden Abschnitt beschrieben.

Nach der Verwendung (d.h. nach Auslösung durch ein Fahrzeug) muss wieder ein Hemmschuh in den Klappmechanismus eingehängt und der benutzte Hemmschuh von der Schiene entfernt werden, um die Funktionsfähigkeit der Einrichtung wiederherzustellen.

Wenn die Strecke, die der Hemmschuh mitgeführt werden darf, begrenzt werden soll, kann an geeigneter Stelle eine Auswurfeinrichtung angebracht werden. Es ist jedenfalls darauf zu achten, dass genügend Platz zur nächsten Weiche gegeben ist. Klappbare Hemmschuhe können entweder nur an den Enden oder auch in einem gewissen Abstand

voneinander mehrfach in den betroffenen Gleisen eingebaut werden. Dabei gilt laut <https://de.wikipedia.org/wiki/Hemmschuh> (Aufruf 12.08.2019) zu beachten:

*Der Schlüssel zur bestmöglichen Bremswirkung ist das Weiterdrehen des Radsatzes. Aus diesem Grund sollen Hemmschuhe nicht auf beiden Schienen ausgelegt werden. Die Bremswirkung mit zwei Hemmschuhen ist erheblich geringer. Wenn insbesondere schwere Wagen mit einem Hemmschuh nicht sicher abgebremst werden können, wird vor die zweite Achse oder das zweite Drehgestell ein weiterer Hemmschuh ausgelegt.*

Dabei ist mit der „Bremswirkung mit zwei Hemmschuhen“ die Anordnung auf beiden Seiten ein und derselben Achse gemeint.

#### Überlegungen zur Anwendung des klappbaren Hemmschuhs

Tatsächlich ist die Idee eines klappbaren Hemmschuhs nicht neu. So wird im Patent DE 553 633 [48] aus dem Jahr 1929 eine Gleisbremse mit dahinter angeordnetem Hemmschuh beschrieben, die mittels Hebel von Hand oder durch einen Motor bedient werden können. Als Einsatzzweck der Einrichtung wird der vorübergehende Schutz von „Weichenstraßen gegen den Einlauf von Fahrzeugen“ und als Ziel die im Vergleich zu Sperrschuhen schadensarme Aufhaltung genannt.

Ein weiteres Beispiel ist das Patent DE 596 051 [49] aus dem Jahr 1932, in dem eine Vorrichtung zum automatischen und gefahrlosen Auflegen von Hemmschuhen vor und unter rollenden Fahrzeugen beschrieben wird. Diese Einrichtung ist für die Dosierung der Bremswirkung beim Abstoßbetrieb gedacht, z.B. im Zuge eines Abrollberges, und nicht zur Absicherung von Gleisen und Weichenbereichen. Die grundlegende Idee ist eine reaktive Betätigung, um die Hemmschuhe gefahrlos vor speziell ausgewählte Achsen zu legen.

Beide Patente beschreiben ähnliche Ideen wie den oben beschriebenen klappbaren Hemmschuh, nur auf Basis der technischen Mittel der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Daraus darf geschlossen werden, dass in Bezug auf die Konstruktion und Anwendung des oben beschriebenen klappbaren Hemmschuhs keine Verletzungen bestehender Schutzrechte zu befürchten sind. Die Anwendung eines Weichenmotors und die Einbindung in Stellwerke mit automatischer Fahrstraßeneinstellung mit Überwachung der verschlossenen Fahrwegelemente sind ebenfalls als freier Stand der Technik zu sehen.

Die Frage, warum derartige Einrichtungen bisher nicht bzw. nicht häufig zum Einsatz kamen, jetzt aber als potenzielle Verbesserung des Status quo dienen sollen, lässt sich nur mehrschichtig beantworten:

- Die erste Voraussetzung für eine praxistaugliche Anwendung ist die Automatisierung der Bedienung. Diese war in den 1930ern noch nicht gegeben. Erst mit der Spurplantechnologie war die Funktionalität so weit fortgeschritten, dass Flankenschutzelemente automatisch und signaltechnisch sicher in die Fahrstraßenbildung einbezogen werden konnten, ohne den Bediener zu belasten. Dies ist jedoch unabdingbar mit der Forderung verbunden, dass die Aufhaltung von entrollten Fahrzeugen durch technische Einrichtung, die infrastrukturseitig und selbständig wirken, erzielt werden soll.
- Die als Flankenschutzeinrichtung gebräuchlichen Sperrschuhe sind vielfach nicht als separates Element in der Stellwerkslogik eingebunden. Meist dienen sie als Abgrenzung eines nicht überwachten Bereichs, der mittels einer schlossgesperrten Weiche an den Bahnhofsteil mit Zugverkehr angebunden ist. Die Anwendung von klappbaren Hemmschuhen anstelle dieser Sperrschuhe hat den Vorteil der Schadensfreiheit bei der Aufhaltung, aber den Nachteil, dass das Leistungsvermögen geringer als beim Sperrschuh ist. Für das zuverlässige Anhalten vor der nächsten Weiche müsste der Hemmschuh in deutlich größerer Entfernung vom Gefahrenpunkt angebracht werden, als dies beim Sperrschuh der Fall ist.
- Nach der aktuellen Vorschriftenlage dürfen Sperrschuhe nicht im Fahrweg von Zugfahrstraßen liegen. Genau dort wäre aber auch ein Einsatzgebiet des klappbaren Hemmschuhs gegeben.
- Technische Lösungen werden nicht nur nach den Gesichtspunkten der Machbarkeit eingesetzt, sondern vielmehr nach der Bedarfslage in Bezug auf ihre Funktion und deren Nutzen. Dieser Bedarf wiederum ist ein Abbild der Zeit und ihren Ansprüchen an Sicherheit und Zuverlässigkeit. Bei steigender Zugsdichte und erhöhter Aufmerksamkeit der Öffentlichkeit ist eine weitere Steigerung des Schutzes gegen entrollende Fahrzeuge ein konsequenter Schritt nach vorne.

Auf alle diese Punkte kann heute positiv im Sinne einer Anwendung des klappbaren Hemmschuhs geantwortet werden. Auf die aktuelle Vorschriftenlage bezogen wären sicherlich Ergänzungen nötig, die den Einsatz dieser Einrichtung beschreiben und absichern. Das Verbot der Anwendung im Bereich von Zugfahrstraßen muss nach Einschätzung des Konsortiums nicht auf den Hemmschuh übertragen werden, wenn sichergestellt ist, dass bei ordnungsgemäßer Funktion das Ablegen auch gewährleistet ist, sodass kein Hemmschuh im Fahrweg liegt. Dies wird dadurch erreicht, dass die



ordnungsgemäße Anbringung des Hemmschuhs in der Haltevorrichtung des Klappmechanismus in der Störungsfreiheit des Antriebs überwacht wird.

Da die Schutzfunktion des klappbaren Hemmschuhs insbesondere bei Besetzung des betroffenen Gleises wirken soll, stellt sich die Frage des Stellens der Einrichtung bei Besetzung. Um nicht auf den Bediener zurückgreifen zu müssen oder gar die Hilfsumstellung zur Regelbedienung werden zu lassen, ist zu empfehlen, den Abschnitt rund um den klappbaren Hemmschuh (z.B. vier Meter davor und danach) separat zu überwachen und diesen Abschnitt als einzigen in die Freimeldung des Elements einwirken zu lassen. Damit wird sowohl erreicht, dass die automatische Stellung nicht durch die Gleisbesetzung verhindert wird, als auch unterbunden, dass eine Umstellung erfolgt, wenn eine Achse oder ein Drehgestell unmittelbar vor dieser Einrichtung steht. Kostengünstiger ist es, wenn der klappbare Hemmschuh im Freimeldeabschnitt der angrenzenden Weiche liegt. Dies hängt aber sehr stark von den örtlichen Verhältnissen wie z.B. den Signalstandorten bzw. Isolierstößen oder Achszählpunkten und deren Abstand zur Weiche ab. Für den Fall, dass der klappbare Hemmschuh vor einem Signal zu liegen kommt, wäre jedenfalls ein Rückwärtsverschluss oder eine ähnliche Sicherungsmaßnahme – wirksam sowohl für Verschub- als auch für Zugfahrten – anzuwenden, damit eine Fahrt über einen aufgelegten Hemmschuh sicher vermieden wird.

#### **7.4.2. Fixe überfahrbare elastische Elemente**

Als Ausführungsvariante wird die Variante mit der Erzeugung einer Spurrille durch begrenzende Stahlprofile oder eine zweite parallellaufende Schiene weiterverfolgt (siehe Abb. 7-3), da diese am ehesten anwendbar erscheint. Es existieren Spurrillenfüller, die bei überfahrbaren Gleisen zum Beispiel im Werkstätengelände oder bei Eisenbahnkreuzungen eingesetzt werden. Diese bestehen aus geschlossenzelligem Polyurethan-Elastomer (PUR) und weisen ausgezeichnete Beständigkeit gegenüber Ölen, Fetten, Streusalzen und sonstigen Witterungsbedingungen auf. Als Einsatztemperaturbereich wird  $-30^{\circ}\text{C}$  bis  $70^{\circ}\text{C}$  angegeben. Die Profile werden in Längen zwischen 1,2 und 1,5 m eingebaut und können in beliebigen Längen an den Stirnseiten verschweißt (z.B. durch ein Spiegelschweißgerät) oder geklebt werden. Die Breite der Profile sollte im Kopfbereich ca. 1,5 mm - 2 mm kleiner sein als die Rillenbreite. Die Oberkante der Spurrillenfüller sollte etwa 2 mm unterhalb der Schienenoberkante liegen. Es sind regelmäßige visuelle Inspektionen notwendig, um zu prüfen, ob die Spurrillenfüller nach den Überfahrten wieder in ihre Ausgangsposition zurückgekehrt sind. Teilweise wird dies durch Verschmutzungen verhindert, sodass daraufhin die Profile entfernt und nach

erfolgter Reinigung der Spurrille wiedereingesetzt werden müssen. Bei auftretenden Schäden in einem Teilbereich kann nur der Teilbereich durch Herausschneiden und Wiedereinsetzen getauscht werden. Die maximal zugelassene Überfahrtsgeschwindigkeit beträgt 40 km/h. Es handelt sich bei den Elementen um Verschleißteile. Die Lebensdauer hängt von diversen Faktoren, wie Verschmutzungen, Anzahl Überfahrten, Achslasten und Schienenverschleiß, ab. Nach Experteneinschätzung kann für die Kostenkalkulation eine Lebensdauer von etwa fünf Jahren abgeschätzt werden (Mindestwert). Die Spurrillenfüller können in jeder beliebigen Querschnittsform hergestellt werden oder auch nach der Herstellung eines Standardprofils auf die gewünschte Form nachbearbeitet werden [50].

Die Funktion derzeit ist die Gefahrenminderung beim Überqueren der Gleise – vor allem bei Radfahrern und Fußgängern. In der Funktion zur Aufhaltung entrollter Wagen werden elastische Profile derzeit nicht eingesetzt, weshalb die Machbarkeit nicht rein in der Theorie ohne Praxiserprobung bewiesen werden kann. Unsicherheiten in der Theorie sind die Eignung der Querschnittsform, da diese für das bisherige Anwendungsgebiet einen möglichst geringen Rollwiderstand aufweisen soll, und die tatsächlich erreichbare Rollwiderstandserhöhung.

Da eine Praxiserprobung nicht Gegenstand dieses Projekts ist, werden Überlegung des Konsortiums für eine Erprobung und dessen Versuchsdurchführung im Folgenden beschrieben. Zusätzlich wird zur theoretischen Einschätzung der Wirksamkeit eine fahrdynamische Simulation durchgeführt und ein vereinfachter Ansatz beschrieben, dessen Annahmen aber ebenfalls durch Versuche validiert werden muss.

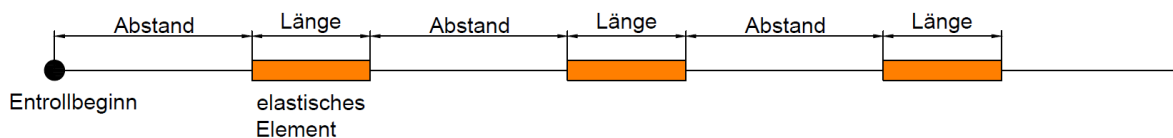
#### Leitfaden zur Versuchsdurchführung

Das Testgleis soll eine Gerade von ca. 15 m - 20 m aufweisen und auf beiden Seiten mit einer Gerade von mindestens 10 m weitergehen, um mögliche Einflüsse durch eine Bogenfahrt (z.B. zusätzlicher Rollwiderstand durch Spurkranzkontakt) auszuschließen. Die Längsneigung des Testgleises sollte konstant und möglichst gering sein – idealerweise 0 ‰. Zur Bestimmung der Rollwiderstandserhöhung wird empfohlen, einen antriebslosen Güterwagen mit einem angetriebenen Fahrzeug in Richtung des Testgleises abzustößen. In Abstoßrichtung ist nach der Versuchslänge ein entsprechender Entrollschutz zu platzieren. Dabei sollten Abstoßort, Abstoßgeschwindigkeit und Geschwindigkeitsverlauf dokumentiert werden. Zusätzlich wird die Länge gemessen, die der abgestoßene Wagen bis zum Stillstand zurücklegt. Die Bestimmung des Abstoßorts kann mittels Markierung und visueller Beobachtung durchgeführt werden. Zur Bestimmung der Abstoßgeschwindigkeit und der Dokumentation des Geschwindigkeitsverlaufs wird eine Radarüberwachung,

welche das Geschwindigkeitsprofil speichert, empfohlen. Die Bremsweglänge kann mittels eines Laserdistanzmessgeräts ermittelt werden. Die Versuche sollen zuerst ohne eingebaute elastische Elemente und anschließend mit den eingebauten Elementen stattfinden. Um eine mögliche Achslast-abhängige Tendenz herauszufinden, wird empfohlen, dass die Versuche mit mehreren nicht angetriebenen Wagentypen mit unterschiedlicher Achslast durchgeführt werden. Insgesamt werden mindestens 50 Überfahrten (25 mit und 25 ohne Elemente) pro Wagentyp empfohlen, um eine aussagekräftige Statistik auswerten zu können. Mittels der Differenz der Bremswege und des bekannten Geschwindigkeitsprofils kann die Erhöhung des Rollwiderstands berechnet werden. Zusätzlich können im Zuge der Versuche elastische Profile mit unterschiedlicher Härte und Oberflächenbeschaffenheit ausprobiert werden, um eine optimale Kombination der Eigenschaften der elastischen Profile für die gegenständliche Anwendung zu erreichen.

### Fahrdynamische Simulation

Um eine Einschätzung der benötigten Länge und Anzahl an elastischen Elementen in Betriebsstellen zu treffen, wird eine fahrdynamische Simulation durchgeführt. Die Simulation verwendet die in Unterkapitel 4.2 bereits erläuterte Bewegungsgleichung mit denselben getroffenen Annahmen. In den Berechnungen wird ein Gleis angenommen, in welchem drei elastische Elemente in einem regelmäßigen Abstand angeordnet sind. Der Entrollbeginn ist vor den drei Elementen. Die Länge der Elemente und der Abstand der Elemente wird variiert. Die Definitionen und Abstände sind in Abb. 7-9 dargestellt.

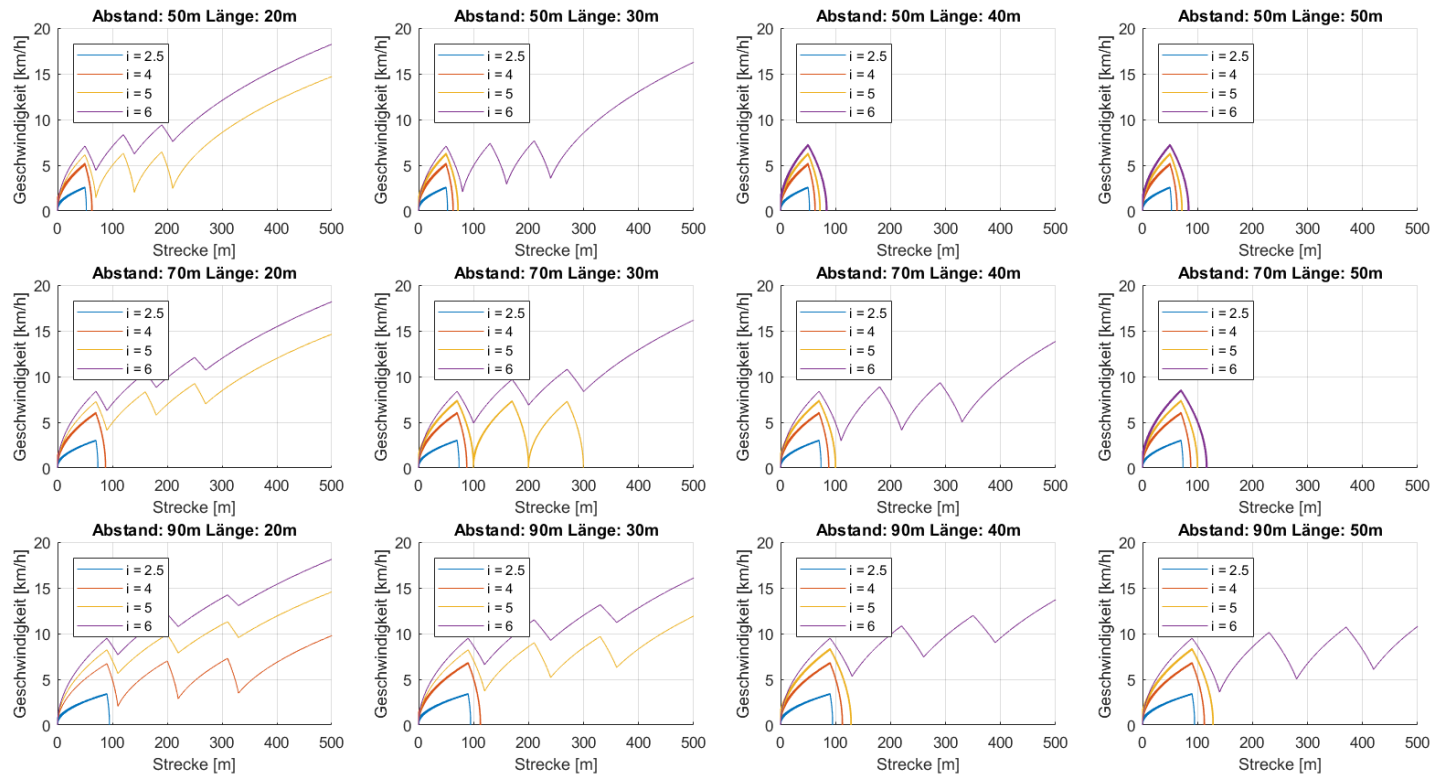


**Abb. 7-9: Begriffsdefinition und Rahmenbedingungen der fahrdynamischen Simulation**

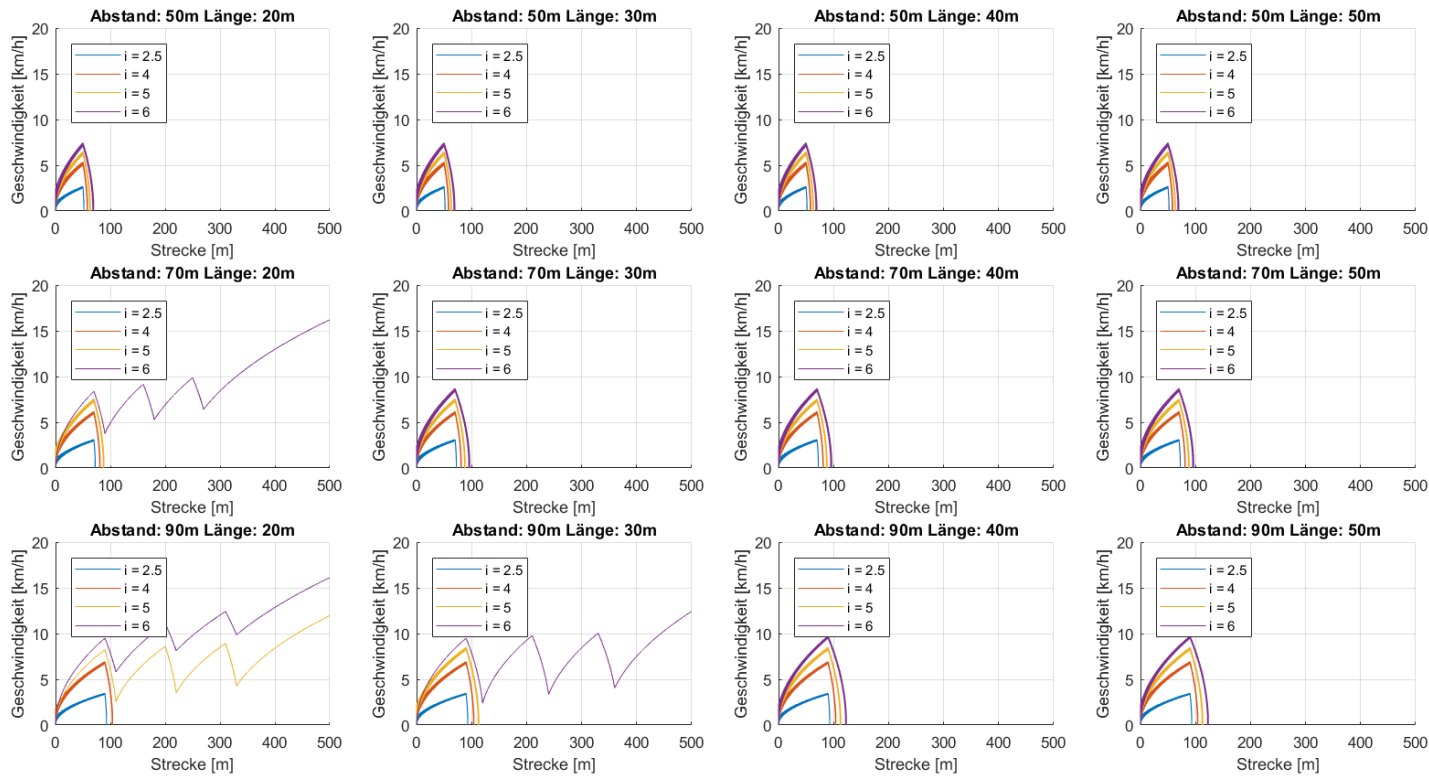
Die Simulation wird für 4 verschiedenen Längsneigungen – 2,5 ‰, 4 ‰, 5 ‰ und 6 ‰ – durchgeführt. Diese werden jeweils in einem Diagramm dargestellt. Nach grob abschätzenden Berechnungen wird die Rollwiderstandserhöhung der elastischen Elemente in der ersten Berechnung mit 10 ‰ und in der zweiten Berechnung mit 15 ‰ angesetzt. Somit ergibt sich mit dem wirkenden Grundwiderstand von 2 ‰ („worst case“) ein gesamter Rollwiderstand von 12 ‰ beziehungsweise 17 ‰. Die erste Auswertung ist in Abb. 7-10 und die zweite Auswertung ist in Abb. 7-11 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass bis zu einer Längsneigung von 5 ‰ auch bei größeren Abständen zwischen den elastischen Profilen eine wahrscheinlich relativ zuverlässige Aufhaltung von

entrollten Wagen möglich ist. Zusätzlich wird deutlich wie wichtig eine genauere Kenntnis der Rollwiderstandserhöhung ist, da die benötigte Länge der elastischen Elemente bei einem höheren Rollwiderstand stark reduziert werden könnte und somit die Maßnahme wesentlich wirtschaftlicher umgesetzt werden könnte. Deshalb werden Versuche in der Praxis als nächsten Schritt empfohlen.



**Abb. 7-10: aufhaltende Wirkung von elastischen Profilen bei variabler Länge und variablem Abstand mit 10 % Rollwiderstandserhöhung**



**Abb. 7-11: aufhaltende Wirkung von elastischen Profilen bei variabler Länge und variablem Abstand mit 15 % Rollwiderstandserhöhung**

### Vereinfachter Ansatz

Um die Einschätzung der benötigten Länge an elastischen Elementen und deren Aufteilung zu erleichtern, wurde ein heuristischer Zusammenhang zwischen der benötigten Prozentzahl an Gleislänge, die mit elastischen Elementen auszustatten ist, dem Betrag der Längsneigung und der angesetzten Rollwiderstandserhöhung (im Folgenden Bremsleistung genannt) durch die elastischen Elemente formuliert (siehe (62)). Die Methodik beläuft sich dabei auf die Berechnung der notwendigen Prozentanzahl an elastischen Elementen bei verschiedenen Längsneigungen und Bremsleistungen der Elemente, sodass ein Aufhalten möglich ist, sowie einer Regressionsrechnung zur Ableitung eines Zusammenhangs. Der Luftwiderstand wurde bei der Berechnung vernachlässigt, da bei geringen Geschwindigkeiten der Einfluss ebenfalls gering ist. Zusätzlich handelt es sich dabei um eine Vereinfachung auf der sicheren Seite. Bei der Ermittlung des Zusammenhangs wurde eine proportionale Bremswirkung der elastischen Elemente zur Achslast unterstellt. Diese Annahme ist durch Versuche zu überprüfen.

$$M = \frac{102 \cdot i - 190}{B} \quad (62)$$

M ... notwendige Prozentanzahl an elastischen Elementen bezogen auf die Gleislänge [%]

i ... Längsneigung des Gleises (Gefälle und Steigung positiv eingesetzt) [‰]

B ... angesetzte Bremsleistung der elastischen Elemente [‰]

Die Anwendung der Formel wird mit einem Beispiel veranschaulicht. Ein 500 m langes Gleis mit einer Längsneigung von 4 ‰ soll mit elastischen Elementen zur Aufhaltung von entrollten Wagen ausgestattet werden. Als Einschätzung der Bremsleistung wird 10 ‰ gewählt. Die benötigte Anzahl an elastischen Elemente ermittelt sich wie folgt:

$$M = \frac{102 \cdot 4 - 190}{10} = 21,8\% \quad (63)$$

Im Beispiel müssen 21,8 % der Gleislänge (entspricht 109 m) mit elastischen Elementen ausgestattet werden. Die Aufteilung der Elemente ist grundsätzlich frei wählbar. Es wird empfohlen, die elastischen Elemente über die gesamte Gleislänge ungefähr symmetrisch zu verteilen. Als Längen für einzelne Felder werden 5 m - 30 m empfohlen.

## **7.5. Kosten-Nutzen-Analyse**

Die Kosten für die Anordnung einer infrastrukturseitigen Einrichtung zur Aufhaltung entrollter Wagen werden dem Nutzen – quantifiziert durch den verhinderten Schaden, der durch einen Vorfall mit entrollten Wagen entstehen würde – gegenübergestellt. In der Analyse werden vorerst sowohl die weiterverfolgten Ansätze aus der Bewertung in

Unterkapitel 7.3 – klappbarer Bremsschuh, klappbarer Hemmschuh und fixe überfahrbare elastische Elemente –, als auch die bisher eingesetzten Einrichtungen – Sperrschuh und Auffangweiche – betrachtet.

Im ersten Schritt wird die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Vorfalles in einer Betriebsstelle berechnet. Die Datengrundlage ist ident mit den Betrachtungen in Kapitel 5 und beläuft sich somit auf 91 Betriebsstellen, welche ausgewiesene Verschubstandorte oder Verschubknoten sind (Datenstand Dezember 2017). Für diese Betriebsstellen wird die Anzahl der Vorfälle von entrollten Wagen summiert (2010 bis 2017) und durch die Anzahl der Jahre der Datenverfügbarkeit (acht Jahre) und durch die Anzahl an Betriebsstellen (91) dividiert. Das Ergebnis ist, dass 0,13 Vorfälle pro Jahr und Betriebsstelle auftreten und somit eine 13-prozentige Wahrscheinlichkeit existiert, dass in einer Betriebsstelle in einem Jahr ein Vorfall passiert. Weitere Eingangsdaten in die Analyse sind die Randbedingungen in den verschiedenen Betriebsstellen zur Quantifizierung des Kostenaufwands für die Ausstattung mit der Einrichtung und die Kosten für Anschaffung, Einbau und Erhaltung dieser. Im Folgenden wird zunächst eine vereinfachte Kosten-Nutzen-Betrachtung durchgeführt, um die Einrichtungen untereinander zu vergleichen. Dies wird exemplarisch für vier Betriebsstellen gezeigt. Danach wird eine universal auf jede Betriebsstelle anwendbare und praktikable Eingabemaske in Form einer MS Excel-Tabelle ausgearbeitet und genau erläutert. Diese wird dem Auftraggeber zur Verfügung gestellt.

### **7.5.1. vereinfachte Gegenüberstellung**

Als Beispielbetriebsstellen werden Randegg, Hütteldorf, Bad Vöslau und Neumarkt-Kallham ausgewählt, da bei diesen Untersuchungsberichte der Sicherheitsuntersuchungsstelle des Bundes zur Verfügung stehen und somit die Vorfälle ausführlich dokumentiert sind. Für jede Betriebsstelle werden die Gleisschemata betrachtet und daraus die Anzahl der zu sichernden Gleise (mehrheitlich Nebengleise oder Hauptgleise, wo regelmäßig Verschub vermutet wird), die Gleisnummern und die Gleislängen extrahiert. Die Längsneigung und die zulässige Geschwindigkeit der Gleise müssen ebenfalls recherchiert werden. Bei den in den Betriebsstellen passierten Vorfällen wurden der entstandene Sachschaden und die zulässige Geschwindigkeit am Entrollgleis recherchiert. Eine Übersicht der Parameter für die vier Beispiele ist in Tab. 7-6 dargestellt. In Neumarkt-Kallham hätte das Entrollen auch durch die Ausstattung der Betriebsstelle mit Einrichtungen zur Aufhaltung entrollter Wagen nach dem Ansatz in diesem Projekt nicht aufgehalten werden können, da das Entrollen von einem Personenzuggleis am Bahnsteig passiert ist und dieses mit keiner Einrichtung gesichert werden würde.



**Tab. 7-6: Randbedingungen der Betriebsstellen-Beispiele**

	Einheit	Bsp 1	Bsp 2	Bsp 3	Bsp 4
Betriebsstelle Entrollbeginn	-	Randegg	Hütteldorf	Bad Vöslau	Neumarkt-Kallham
Anzahl zu sichernder Gleise	-	2	6	2	4
Gleisnummern	-	1, 3	203, 205, 207, 209, 215, 217	305, 307	305, 407, 307, 404
Gleislänge gesamt	m	200	3.506	584	1.413
durchschnittliche Gleislänge	m	100	584	292	353
entstandener Sachschaden	€	1.605.000 €	72.000 €	- €	1.750.000 €
Längsneigung	‰	5	4	4,8	3,7
Geschwindigkeit auf den betrachteten Gleisen lt. VzG	km/h	30	40	40	40
Geschwindigkeit am Entrollgleis lt. VzG	km/h	30	40	40	100

Die Kosten für die einzelnen Einrichtungen werden in die Kostenstellen Anschaffung, Einbau und Erhaltung gegliedert. Zusätzlich wird für steuerbare Anlagen eine Kostenstelle „örtliche Ansteuerung“ eingeführt, die die Kosten für den Antriebsmechanismus der Anlage und die Einbindung in die Stellwerkslogik beinhaltet. Die Kosten für Verkabelung wurden nicht in die Betrachtung einbezogen. Die Kostenübersicht für die Einrichtungen ist in Tab. 7-7 bis Tab. 7-11 dargestellt. Bei den fixen überfahrbaren elastischen Elementen wurde in die Erhaltungskosten eingerechnet, dass diese alle 5 Jahre zu tauschen sind. Bei dieser Einrichtung entfällt der Kostenpunkt örtliche Ansteuerung, da kein Antrieb und keine Fernbedienung benötigt wird. Bei der Auffangweiche sind die Einbaukosten bereits in den Anschaffungskosten miteingerechnet. Beim Sperrschuh muss in die Kosten-Nutzen-Betrachtung auch der entstehende Folgeschaden durch die gezielte Entgleisung bei der Aufhaltung mit dieser Einrichtung berücksichtigt werden.

**Tab. 7-7: Kosten von fixen überfahrbaren Gummielementen**

fixe überfahrbare Gummielemente		
Anschaffung	€/m	80 €
Einbau (inkl. Spurrille)	€/m	500 €
Erhaltung	€/m/Jahr	26 €

**Tab. 7-8: Kosten eines klappbaren Hemmschuhs**

Klappbarer Hemmschuh		
Anschaffung	€	4.500 €

Einbau	€	1.000 €
Erhaltung	€/Jahr	3.600 €
örtliche Ansteuerung	€	16.000 €

**Tab. 7-9: Kosten eines klappbaren Bremsschuhs**

<b>Klappbarer Bremsschuh</b>		
Anschaffung	€	6.000 €
Einbau	€	2.500 €
Erhaltung	€/Jahr	3.600 €
örtliche Ansteuerung	€	16.000 €

**Tab. 7-10: Kosten einer Auffangweiche inkl. Stumpfgleis**

<b>Auffangweiche inkl. Stumpfgleis</b>		
Anschaffung	€	120.000 €
Erhaltung	€/Jahr	10.000 €
örtliche Ansteuerung	€	16.000 €

**Tab. 7-11: Kosten eines fernbedienten Sperrschuhs**

<b>Sperrschuh</b>		
Anschaffung	€	4.500 €
Einbau	€	1.000 €
Erhaltung	€/Jahr	3.600 €
örtliche Ansteuerung	€	16.000 €
Folgeschaden	€	50.000 €

Die Kostenrechnung wird auf die Kosten pro Jahr mit einem Rechenzeitraum von 20 Jahren bezogen. Einmalige Kosten werden über den gesamten Rechenzeitraum verteilt. Die Kosten für die Ausstattung der Betriebsstellen mit den betrachteten Einrichtungen hängen von unterschiedlichen Randbedingungen der Betriebsstelle ab (siehe Tab. 7-6).

Bei der Berechnung der Kosten für die Ausstattung mit fixen überfahrbaren elastischen Elementen sind die (durchschnittlichen) Gleislängen und die vorhandene Längsneigung relevant. Die Prozentzahl der Gleislänge, die mit elastischen Elementen auszustatten ist, wird aus dem heuristischen Ansatz (Formel (62)) berechnet, wobei als Bremsleistung 10 ‰ angesetzt wurde. Dieser Wert ist durch entsprechende Versuche in der Praxis zu validieren. Bei den Einrichtungen – klappbarer Hemmschuh, klappbarer Bremsschuh und Sperrschuh – wird als vereinfachte Gegenüberstellung davon ausgegangen, dass eine Einrichtung pro

Gleis gefälleseitig angeordnet wird. Beim Sperrschuh muss der Folgeschaden durch die erzwungene Entgleisung in der Kosten-Nutzen-Analyse ebenfalls berücksichtigt werden. Bei der Auffangweiche inkl. Stumpfgleis wird davon ausgegangen, dass die Einrichtung nur am Übergang zwischen Verschubbereich und Hauptgleisen bzw. Streckengleisen gefälleseitig angeordnet wird und nicht für jedes Verschubgleis. In der Betriebsstelle Hütteldorf beispielsweise sind die Verschubgleise zwischen den Streckengleisen verteilt und somit kein eigener Verschubbereich und keine Schnittstelle zwischen Verschubbereich und Streckengleisen vorhanden. In diesem Fall ist die Anwendung dieser Einrichtung auszuschließen. Bei den übrigen Betriebsstellen werden die Kosten für eine Einrichtung pro Betriebsstelle berücksichtigt.

Eine Übersicht der jährlichen Kosten der verschiedenen Einrichtungen kann Tab. 7-12 entnommen werden.

**Tab. 7-12: jährliche Kosten für die Ausstattung der Betriebsstellen**

	Einheit	Bsp 1	Bsp 2	Bsp 3	Bsp 4
Betriebsstelle	-	Randegg	Hütteldorf	Bad Vöslau	Neumarkt-Kallham
<b>fixe überfahrbare elastische Elemente</b>	€/Jahr	3.520,00 €	42.036,94 €	9.623,15 €	14.563,79 €
<b>Klappbarer Hemmschuh</b>	€/Jahr	9.350,00 €	28.050,00 €	9.350,00 €	18.700,00 €
<b>Klappbarer Bremsschuh</b>	€/Jahr	9.650,00 €	28.950,00 €	9.650,00 €	19.300,00 €
<b>Auffangweiche inkl. Stumpfgleis</b>	€/Jahr	16.800,00 €	- €	16.800,00 €	16.800,00 €
<b>Sperrschuh</b>	€/Jahr	9.350,00 €	28.050,00 €	9.350,00 €	18.700,00 €

Um den Nutzen der einzelnen Einrichtungen zu berechnen, werden die jährlichen Kosten durch die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Vorfalles dividiert. Dieser Wert quantifiziert bei welcher verhinderten Schadenshöhe (Nutzen), die durch einen Vorfall entstanden wäre, sich die Kosten für die Installation der Einrichtungen gerade gelohnt hätten. In anderen Worten stellt dieser Wert eine Mindestschadenshöhe dar, die durch einen Vorfall mit entrollten Wagen in der Betriebsstelle verursacht werden müsste, sodass sich die Investition in die Einrichtung ausgezahlt hätte (siehe Tab. 7-13).

**Tab. 7-13: verhinderter Mindestschaden zur Deckung der Investition**

	Einheit	Bsp 1	Bsp 2	Bsp 3	Bsp 4
Betriebsstelle	-	Randegg	Hütteldorf	Bad Vöslau	Neumarkt-Kallham

<b>fixe überfahrbare elastische Elemente</b>	€	26.974,32 €	322.135,71 €	73.743,73 €	111.604,63 €
<b>Klappbarer Hemmschuh</b>	€	71.650,53 €	214.951,58 €	71.650,53 €	143.301,05 €
<b>Klappbarer Bremsschuh</b>	€	73.949,47 €	221.848,42 €	73.949,47 €	147.898,95 €
<b>Auffangweiche inkl. Stumpfgleis</b>	€	128.741,05 €	- €	128.741,05 €	128.741,05 €
<b>Sperrschuh</b>	€	78.175,25 €	221.476,30 €	78.175,25 €	149.825,78 €

Beim Vergleich zwischen den Werten in Tab. 7-13 für den Mindestschaden und den entstandenen Sachschäden bei den Vorfällen fällt auf, dass die entstandenen Sachschäden teilweise um ein Vielfaches höher sind. Somit wird empfohlen, dass zumindest für die ausgewiesenen Verschiebepunkte bzw. Verschiebestandorte die Anordnung einer infrastrukturseitigen Einrichtung zur Aufhaltung von entrollten Wagen geprüft wird. Zusätzlich zeigt sich, dass die Kosten für die Anordnung der verschiedenen betrachteten Einrichtungen stark von den Randbedingungen der Betriebsstelle abhängen und für jede Betriebsstelle einzeln zu prüfen sind. Deshalb wird im folgenden Unterkapitel eine MS Excel-Tabelle vorgestellt, mit der es möglich ist für beliebige Betriebsstellen die Maßnahme mit dem besten Kosten-Nutzen-Verhältnis zu extrahieren.

### 7.5.2. Ausarbeitung einer universal anwendbaren Methode

Um die Kosten-Nutzen-Analyse für beliebige Betriebsstellen einfach und praktikabel durchzuführen, wird eine MS Excel-Tabelle erarbeitet, welche, unter Eingabe der Randbedingungen der Betriebsstelle, die Kosten-Nutzen-Analyse automatisiert durchführt. Anhand der Werte für den Nutzen kann die wirtschaftlichste Maßnahme für die Betriebsstelle abgelesen werden.

Für eine automatisierte Berechnung der Kosten-Nutzen-Analyse müssen verschiedene Aspekte detaillierter berücksichtigt werden. In der vereinfachten Gegenüberstellung in Unterkapitel 7.5.1 wird angenommen, dass sich – für den klappbaren Hemmschuh, klappbaren Bremsschuh und Sperrschuh – eine Einrichtung pro Gleis gefälleseitig befindet. Dies muss nicht immer zutreffen und hängt vor allem von der Gleislänge und der Längsneigung des Gleises ab. In einer „worst case“-Betrachtung kann die Maximalzahl der benötigten Einrichtungen abgeschätzt werden.

Beim klappbaren Hemmschuh ergibt sich unter Annahme einer maximalen Auffahrgeschwindigkeit folgender Zusammenhang:

$$s_{\max} = \frac{v^2}{2 \cdot g \cdot (i - w')} \quad (64)$$

$s_{\max}$  ... Höchstabstand für Hemmschuh [m]

$v$  ... maximale Auffahrgeschwindigkeit (angenommen mit 3 m/s)

$i$  ... Längsneigung des Gleises (Gefälle positiv einzusetzen)

$w'$  ... Grundwiderstand (angenommen mit 0,002)

Der ermittelte Höchstabstand wird in der MS Excel-Tabelle in Abhängigkeit der Längsneigung als Tabellenwert ermittelt und je nach tatsächlich vorhandener Längsneigung der Gleise automatisch ausgewählt. Die Anzahl der benötigten Einrichtungen wird durch Division der Gleislänge und des ermittelten Höchstabstandes ermittelt und aufgerundet. Dies ist als Maximalzahl zu verstehen, was mit anderen Worten bedeutet, dass eine höhere Zahl von klappbaren Hemmschuhen keine sinnvolle Verbesserung der Sicherheitseigenschaften bringt. Im Gegenteil kann aus betrieblichen Überlegungen (typischer Ort von abgestellten Wagen und daraus resultierend der Ort der Einrichtung im praxisgerechten Abstand) auch eine geringere Zahl von Elementen sinnvoll sein. Zusätzlich zur Maximalzahl benötigter klappbarer Hemmschuhe pro Gleis ist die Berücksichtigung der Bremsweglänge ( $s$ ) nötig, um einen ausreichenden Abstand zum nächsten Gefahrenpunkt (meist der nächsten Weiche) einzuplanen. Mit den Annahmen, dass eine Achse durch den Hemmschuh gebremst wird, sich das Gesamtgewicht auf eine beliebige Anzahl Achsen ( $A$ ) gleichverteilt aufteilt, der Hemmschuh einen Reibwert von 0,3 erreicht (Wert wurde durch Versuche bei den ÖBB ermittelt) und die Anlaufgeschwindigkeit 3 m/s beträgt, kann folgender trivialer Zusammenhang abgeschätzt werden:

$$s = 1,5 \cdot A \quad (65)$$

Die Bremsweglänge in Abhängigkeit der abgeschätzten Achszahl, auf welche die Einrichtung ausgelegt wird, ist in einer eigenen Spalte der MS Excel-Tabelle ablesbar.

Der klappbare Bremsschuh weist lt. Herstellerangabe ein Arbeitsvermögen von 40 kJ auf (siehe Unterkapitel 2.2.3). Unter der Annahme einer entrollten Masse von 100 t und eines Grundwiderstands von 2 ‰ kann über die Energiebetrachtung ebenfalls ein Höchstabstand für den Bremsschuh in Abhängigkeit der vorhandenen Längsneigung berechnet werden. Die Anzahl der benötigten Einrichtungen wird analog zum klappbaren Hemmschuh berechnet.

Sperrschuhe weisen in der Gegenüberstellung mit den Einrichtungen – klappbarer Hemmschuh und klappbarer Bremsschuh – meist ein schlechteres Kosten-Nutzen-Verhältnis auf (siehe Tab. 7-13) und eignen sich aufgrund der gezielten Entgleisung nicht als schadensarme Maßnahme zur Aufhaltung entrollter Wagen. Zusätzlich ist die Anordnung von Sperrschuhen im Fahrweg von Zugstraßen (unabhängig von der Stellung)

nicht zulässig (siehe [45]). Die zu sichernden Gleise in den Beispielbetriebsstellen umfassen nur Hauptgleise und somit Gleise, über welche auch Zugstraßen gelegt werden können. Deshalb wird die Betrachtung von Sperrschuhen in der Kosten-Nutzen-Analyse ausgeschlossen.

Für die nähere Erläuterung der MS Excel-Tabelle wird die Betriebsstelle Wien Hütteldorf als Beispiel dargestellt. Grundsätzlich bedeuten gelb hinterlegte Zellen Eingabefelder und grün hinterlegte Zellen automatisiert berechnete Werte oder Berechnungsannahmen. Für die Betriebsstelle werden die Gleisnummern und die Gleislängen der zu sichernden Gleise (mehrheitlich Nebengleise oder Hauptgleise, wo regelmäßig Verschub- oder Abstellvorgänge vermutet wird) aus dem Gleisschema extrahiert. Zur Validierung der Annahme der zu sichernden Gleise wird empfohlen mit örtlich zuständigem Personal Kontakt aufzunehmen (z.B. Fahrdienstleiter, falls noch vorhanden). Die Längsneigung und die zulässige Geschwindigkeit auf den Gleisen müssen ebenfalls recherchiert werden. Entsprechend den regelmäßigen Abstellvorgängen auf den Gleisen muss eine durchschnittliche Achszahl der abgestellten Wagengruppen pro Gleis abgeschätzt werden (im Beispiel wird die Anlage auf zwölf Achsen pro Gleis dimensioniert). Diese wird ausschließlich für die Ermittlung der Bremsweglänge für klappbare Hemmschuhe verwendet. Auf Basis der Gleiskonfiguration muss die Anzahl der theoretisch benötigten Auffangweichen inkl. Stumpfgleis ermittelt werden – im gegenständlichen Beispiel wird diese Maßnahme als nicht anwendbar betrachtet und deshalb der Wert 0 ausgewählt. Die erhobenen Daten sind in die gelb markierten Zellen der Tabelle einzutragen (siehe Tab. 7-14) – im dargestellten Beispiel ausgefüllt für die Betriebsstelle Wien Hütteldorf. Die Längsneigung ist in der Tabelle immer positiv einzutragen.

**Tab. 7-14: Eintragung der Eingangsdaten für die zu untersuchende Betriebsstelle**

Eingangsdaten		Gleisnummer	Gleislänge [m]	Längsneigung* [%o]	zulässige Geschwindigkeit [km/h]	Achszahl**
Betriebsstelle	Wien Hütteldorf					
Anzahl der zu sichernden Gleise	6					
Gleislänge gesamt [m]	3506					
Anzahl Auffangweichen inkl. Stumpfgleis	0					
Gleisdateneinträge der zu sichernden Gleise, wo regelmäßig Verschub- oder Abstellvorgänge stattfinden		203	478	4	40	12
		205	541	4	40	12
		207	578	4	40	12
		209	718	4	40	12
		215	597	4	40	12
		217	594	4	40	12

Die benötigte Anzahl der drei Einrichtungen – klappbarer Sperrschuhe, klappbarer Hemmschuh und klappbarer Bremsschuh – werden pro Gleis und die fixen überfahrbaren elastischen Elemente werden in Prozent der jeweiligen Gleislänge automatisiert ermittelt (siehe .Tab. 7-15). Ab Längsneigungen von 5 ‰ werden bereits so viele klappbare Bremsschuhe benötigt (ungefähr eine Einrichtung alle 15 m Gleislänge), dass die Anordnung dieser Maßnahme als nicht mehr sinnvoll erachtet wird. Somit wird ab 5 ‰ Längsneigung die Meldung „nicht anwendbar“ ausgegeben. Nach Einschätzung des Konsortiums sind die elastischen Elemente bis 5 ‰ Längsneigung anwendbar. Sofern die Längsneigung eines Gleises diesen Wert überschreitet, wird ebenfalls die Meldung „nicht anwendbar“ ausgegeben. Dieser Wert kann je nach Versuchsergebnissen adaptiert werden. Die Meldung wird ebenfalls ausgegeben, wenn die zulässige Geschwindigkeit des Gleises über 40 km/h liegt, da die Zulassung der Befahrung mit dieser Geschwindigkeit limitiert ist.

**Tab. 7-15: automatische Auswertung der benötigten Anzahl der Einrichtungen beispielhaft für Wien Hütteldorf**

Gleisnummer	Maximalzahl benötigter Einrichtungen		Prozentzahl elastische Elemente pro Gleis***	Bremsweglänge für Hemmschuh [m]****
	klappbarer Hemmschuh	klappbarer Bremsschuh		
203	3	22	21,8	18,0
205	3	25	21,8	18,0
207	3	27	21,8	18,0
209	4	33	21,8	18,0
215	3	28	21,8	18,0
217	3	27	21,8	18,0

Durch die Berücksichtigung der Anzahl der Einrichtungen pro Gleis besteht bei den Einrichtungen – klappbarer Hemmschuh und klappbarer Bremsschuh – das Erfordernis – bei mehr als einer Anlage pro Gleis – zusätzliche Gleisfreimeldeanlagen im Verlauf der Gleise zu situieren. Somit wird zusätzlich zu den bisherigen Kosten (siehe Tab. 7-7 bis Tab. 7-10) bei den zwei genannten Einrichtungen eine weitere Kostenstelle von 12.000 € eingeführt. Dieser Betrag beinhaltet die Kosten der Sensorik und die Einbindung in die

Stellwerklogik. Die zusätzliche Kostenstelle wird angesetzt, wenn mehr als eine Anlage pro Gleis benötigt wird.

Die Kostenrechnung wird auf einen Rechenzeitraum von 20 Jahren bezogen. Dieser Wert kann in der Tabelle entsprechend geändert werden.

Falls bei sehr geringer oder nicht vorhandener Längsneigung eine Einrichtung angeordnet werden soll, wird empfohlen diese an beiden Enden der zu sichernden Gleise anzuordnen oder die örtlichen Bedingungen (z.B. häufige Verschub-/Abstoßrichtung, Windbedingungen) genau zu prüfen. Die MS Excel-Tabelle ist so formatiert, dass bei geringen Längsneigung die Zellen orange eingefärbt werden und auf eine erforderliche Prüfung hinweisen.

Die Kosten-Nutzen-Rechnung wird analog zu Unterkapitel 7.5.1 durchgeführt und ist in Tab. 7-16 bzw. Tab. 7-17 zu sehen.

**Tab. 7-16: jährliche Kosten für die Ausstattung der Betriebsstelle Hütteldorf**

<b>Kostenrechnung [€/Jahr]</b>	
fixe überfahrbare elastische Elemente	42.036,94 €
klappbarer Hemmschuh	96.625,00 €
klappbarer Bremschuh	875.250,00 €
Auffangweiche inkl. Stumpfgleis	- €

**Tab. 7-17: verhinderter Mindestschaden zur Deckung der Investition**

<b>Nutzen - Mindestschaden pro Vorfall für Kostendeckung der Investition [€]</b>	
fixe überfahrbare elastische Elemente	322.135,71 €
klappbarer Hemmschuh	740.452,63 €
klappbarer Bremschuh	6.707.178,95 €
Auffangweiche inkl. Stumpfgleis	- €

Für die Entscheidung, welche Maßnahme das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis für eine Betriebsstelle bietet, sind die Werte in Tab. 7-17 entscheidend. Die Maßnahme mit dem niedrigsten Wert – im Beispiel fixe überfahrbare elastische Elemente – weist für die Betriebsstelle Wien Hütteldorf das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis auf. Es ist zu erkennen, dass das Kosten-Nutzen-Verhältnis stark von der benötigten Anzahl der Einrichtungen und somit von den Gleislängen und Längsneigungen abhängt. Deshalb muss die wirtschaftlichste Maßnahme für jede Betriebsstelle mittels der zur Verfügung gestellten MS Excel-Tabelle einzeln geprüft werden.



## 7.6. Zusammenfassung

In einer Gegenüberstellung der Ideen für infrastrukturseitige Einrichtungen zur Aufhaltung von entrollten Wagen mittels einer Bewertungsmatrix stellen sich die Maßnahmen klappbarer Bremsschuh, klappbarer Hemmschuh und fixe überfahrbare elastische Elemente als am besten geeignet heraus. Für die neu konzipierten Systeme klappbarer Hemmschuh und fixe überfahrbare elastische Elemente wird das Erstere als machbar eingestuft, während die Machbarkeit von Letzterem zwar plausibel erscheint, jedoch nur aufgrund von theoretischen Überlegungen nicht nachgewiesen werden konnte. Um die Annahmen in der Theorie zu beweisen, wird empfohlen Versuche durchzuführen. Ein entsprechendes Versuchskonzept wird in Unterkapitel 7.4.2 beschrieben. Die drei am besten geeigneten Einrichtungen werden zunächst in einer vereinfachten Kosten-Nutzen-Analyse den bisher eingesetzten Maßnahmen – Sperrschuh und Auffangweiche – gegenübergestellt. Eine generelle Aussage, welche Einrichtung das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis hat, ist nicht möglich, da eine starke Abhängigkeit zu den Randbedingungen der Betriebsstelle – vorwiegend Gleisanzahl, Gleislänge und Gleiskonfiguration – gegeben ist. Deshalb wird eine MS Excel-Tabelle zur Verfügung gestellt, in der die Randbedingungen für die Betriebsstelle eingetragen werden können und automatisch die Einrichtung mit dem besten Kosten-Nutzen-Verhältnis ablesbar ist. Somit können für jede beliebige Betriebsstelle die jährlichen Kosten der verschiedenen Einrichtung und der Nutzen – quantifiziert mit dem verhinderten Schaden, ab dem sich die Investition gerechnet hat – berechnet werden. Auf Basis dessen kann entschieden werden, ob eine der Maßnahmen eingebaut werden soll und wenn ja, welche sich am besten eignet. Die ausgegebene Anzahl der benötigten Einrichtungen bzw. die generelle Ausstattung einer Betriebsstelle mit infrastrukturseitigen Maßnahmen zur Aufhaltung entrollter Wagen stellt eine Verringerung des Restrisikos dar, welches von entrollten Wagen ausgeht. Eine hundertprozentige Sicherheit kann nicht erreicht werden.

## 8. ZUSAMMENFASSUNG

In einer Grundlagenrecherche werden bestehende oder in Patenten entwickelte infrastrukturseitige Einrichtungen zur Detektion und zur Aufhaltung von entrollten Wagen oder Wagengruppen aufgelistet und beschrieben. Bei den Detektionsmaßnahmen gibt es eine Vielzahl bestehender Systeme, die theoretisch anwendbar sind. Diese werden nach dem Wirkprinzip in punktförmig, linienförmig, flächenförmig, räumlich und visuell kategorisiert. Zusätzlich werden die Art der Auslösung und die Anforderungen an die Energieversorgung dargestellt. Bei den Aufhaltungsmaßnahmen werden Gleisbremsen, aktive Flankenschutzmaßnahmen und sonstige Einrichtungen (z.B. klappbare Prellbocksysteme) beschrieben. In einer Analyse bisheriger Vorfälle von entrollten Wagen wird im Zeitraum zwischen 2010 und 2017 jedem Vorfall die Betriebsstelle, der Verursacher und die Ursache zugeordnet und statistisch aufbereitet. Dabei zeigt sich, dass 77% der Vorfälle durch eine Form von menschlichem Versagen verursacht wurden. In einer Erhebung der Vorgehensweise bei Bekanntwerden eines Vorfalls mit entrollten Wagen bei den ÖBB, stellt sich heraus, dass keine generellen Handlungsweisen existieren. Es wird für jeden Einzelfall je nach vorhandenen Rahmenbedingungen entschieden, welche Maßnahmen gesetzt werden. Die ÖBB Notfallleitstelle nimmt die Meldung entgegen und veranlasst Sofortmaßnahmen (z.B. Anhalten von Fahrten).

In einer fahrdynamischen Modellierung wurde untersucht, unter welchen Umständen Wagen entrollen können und wie der Geschwindigkeitsverlauf von entrollenden Wagen aussieht. Dabei werden als verursachende Einwirkungen Wind, Anprall und die Längsneigung des Gleises identifiziert. Es kann sowohl jede einzelne Einwirkung Entrollen verursachen, als auch eine Kombination von mehreren Einwirkungen. Als Widerstände gegen Entrollen existieren der Anfahrwiderstand und der Bremswiderstand – bedingt durch die Handbremse oder durch Hemmschuhe. Die Regelungen für das Absichern von abgestellten Wagen beinhaltet die ÖBB-Richtlinie 30 Dienstvorschrift 01 [28]. Der erzielte Bremswiderstand durch Absichern mit Handbremse ist stark von der erzeugten Anziehungskraft abhängig. Durch Widerstände im Bremsgestänge kann der subjektive Widerstand beim Anziehen sehr hoch werden, obwohl die Handbremse noch nicht ausreichend angezogen wurde. Dies führt zu einer geringeren Bremswirkung. Beim Hemmschuh besteht die Gefahr, dass durch die hohen Massen bei Fahrzeuganprall der Hemmschuh überrollt werden kann und so je nach Längsneigung der normalerweise ungebremste Wagen entrollt. Eine Simulation von entrollten Wagen mit mehreren Längsneigungen und Rollwiderstände zeigt, dass Wagen bei 5 ‰ Längsneigung nach 1 km bereits über 25 km/h erreichen können.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass Aufhaltungsmaßnahmen möglichst nahe an den gefährdeten Bereichen (in der Regel Bereiche, wo Verschiebeprozesse stattfinden) situiert sein müssen.

In einer Analyse des ÖBB-Netzes werden die Eigenschaften und Randbedingungen der Betriebsstellen, die als Verschiebestandorte und Verschiebeknoten ausgewiesen sind, erhoben. Mittels einer Auswertung der relativen Häufigkeit zwischen Betriebsstellen, wo bereits mindestens ein Vorfall passiert ist und der Gesamtstichprobe, werden Kriterien herausgefunden, welche mögliche Indikatoren für ein erhöhtes Risiko von Betriebsstellen darstellen. Diese können als Eingangsparameter für eine zukünftige Risikoanalyse verwendet werden. In Abhängigkeit der relativen Häufigkeiten werden drei Kategorien gebildet, welche die Wahrscheinlichkeit auf einen Vorfall von entrollten Fahrzeugen widerspiegeln.

In einer Gegenüberstellung von infrastrukturseitigen Einrichtungen zur Detektion von entrollten Wagen mittels einer Bewertungsmatrix stellt sich heraus, dass bisher angewandte Einrichtungen zur Gleisfreimeldung (z.B. Achszähler) auch für diesen Zweck am geeignetsten erscheinen.

Zusätzlich zu den bestehenden infrastrukturseitigen Einrichtungen zur Aufhaltung von entrollten Wagen, welche in der Grundlagenrecherche erhoben wurden, werden zwei neue Ideen konzipiert. Die erste Idee beinhaltet einen ansteuerbaren klappbaren Hemmschuh, welcher im Prinzip wie ein elektrisch fernbedienter klappbarer Sperrschuh funktioniert. Bei Anlauf eines Rades an den Hemmschuh wird dieser von der Einrichtung entkoppelt und bremst durch Gleitreibung den Wagen bis zum Stillstand. Nach erfolgter Auslösung muss ein Hemmschuh manuell wieder in die Einrichtung eingehängt werden. Die zweite Idee beinhaltet die Erzeugung einer Spurrille (z.B. durch Anordnung eines innenliegenden parallelen Schienenprofils) und das Ausfüllen dieser mit einem elastischen Element (z.B. Elastomer). Durch die Walkarbeit, die der Spurkranz beim Überfahren verrichtet, wird der Rollwiderstand erhöht und somit das entrollte Fahrzeug bis zu einer gewissen Längsneigung zum Stillstand gebracht. Beim Vergleich aller weiterverfolgten Ideen in einer Bewertungsmatrix stellt sich heraus, dass die Einrichtungen klappbarer Bremsschuh, klappbarer Hemmschuh und fixe überfahrbare elastische Elemente als am besten geeignet erscheinen.

Der klappbare Hemmschuh wird als machbar eingestuft, während die fixen überfahrbaren elastischen Elemente zwar plausibel erscheinen, jedoch die Machbarkeit nur aufgrund von theoretischen Überlegungen nicht nachgewiesen werden konnte. Da im Zuge dieses

Projekts keine Praxiserprobungen durchgeführt werden können, wird ein entsprechendes Versuchskonzept in Unterkapitel 7.4.2 dargestellt.

Um die am besten geeigneten drei Maßnahmen zur Aufhaltung von entrollten Wagen, den bisher angewandten Einrichtungen – Sperrschuh und Auffangweiche – gegenüberzustellen, wird zuerst eine vereinfachte Kosten-Nutzen-Analyse durchgeführt. Eine generelle Aussage, welche Einrichtung das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis hat, ist nicht möglich, da eine starke Abhängigkeit zu den Randbedingungen der Betriebsstelle – vorwiegend Gleisanzahl, Gleislänge und Gleiskonfiguration – gegeben ist. Deshalb wird eine MS Excel-Tabelle zur Verfügung gestellt, in der die Randbedingungen für jede beliebige Betriebsstelle eingetragen werden können und das Ergebnis – welche Maßnahme das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis hat – ausgewertet werden kann. Das Ergebnis dient zur Unterstützung der Entscheidung, ob eine infrastrukturseitige Maßnahme in einer Betriebsstelle angeordnet werden soll, und wenn ja, welche Maßnahme das beste Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweist.

## 9. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Ulrich Maschek, *Sicherung des Schienenverkehrs - Grundlagen und Planung der Leit- und Sicherungstechnik*, Wiesbaden, Springer+Teubner Verlag, 2018.
- [2] ASO - Safety Solutions, Online: [https://contra.at/pdfs\\_diverse/SENTIR\\_mat\\_Datenblatt\\_DE\\_16\\_DB\\_00\\_001\\_Rev\\_1\\_1.pdf](https://contra.at/pdfs_diverse/SENTIR_mat_Datenblatt_DE_16_DB_00_001_Rev_1_1.pdf), März 25, 2019.
- [3] Fraunhofer IAIS, Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS, Online: <https://www.iais.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder/bildverarbeitung/uebersicht.html>, März 25, 2019.
- [4] "Einsatz von faseroptischen Sensoren im Bereich der ÖBB-Infrastruktur ÖBB - FOS", Oktober 2015.
- [5] Jörn Pachl, *Systemtechnik des Schienenverkehrs*, Wiesbaden, Springer Vieweg, 2016.
- [6] "Modernisierung des Verschiebebahnhof Graz", in *Signal+Draht*, Vol. 003, Nr. 003, S. 24ff, 2013.
- [7] Wikimedia, Online: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/97/Schutzweiche.jpg>, März 25, 2019.
- [8] *Lexikon der Eisenbahn*, Berlin, transpress VEB Verlag für Verkehrswesen, 1981.
- [9] Freiherr v. Röhl, *Enzyklopädie des Eisenbahnwesens: Band 4*, Berlin, Wien, Urban & Schwarzenberg, 1912.
- [10] Wikimedia, Online: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c9/QC-STM\\_GarageBeaugrand\\_20040706-132759\\_VoieEssai.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c9/QC-STM_GarageBeaugrand_20040706-132759_VoieEssai.jpg), März 25, 2019.
- [11] Wikimedia, Online: <http://up.picr.de/14431270hf.jpg>, März 25, 2019.
- [12] Rawie GmbH & Co. KG, Online: <https://www.rawie.de/portfolio-item/gleissperre/>, März 25, 2019.
- [13] Mayer und J. Joe, "Portable derail", 4,165,060, August 21, 1979.
- [14] Rawie GmbH & Co. KG, Online: <https://www.rawie.de/prellboecke/>, März 25, 2019.
- [15] Rawie - Festprellbock, Online: <https://www.rawie.de/portfolio-item/klappbarer-festprellbock-metro-helsinki-finnland/>, März 25, 2019.

- [16] Rawie - Bremsprellbock, Online: <https://www.rawie.de/portfolio-item/klappbarer-bremsprellbock-dormagen/>, März 25, 2019.
- [17] Rawie - Bremsschuh klappbar, Online: <https://www.rawie.de/portfolio-item/bremsschuh-klappbar/>, März 25, 2019.
- [18] Intelligenter Hemmschuh, Online: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5751527/>, März 25, 2019.
- [19] Bernd Engeler, "Interview", Rawie GmbH & Co. KG, Dezember 11, 2018.
- [20] BMVIT, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Online: [https://www.bmvit.gv.at/verkehr/sub/schiene/berichte/2013/130729\\_eub\\_gz795345.pdf](https://www.bmvit.gv.at/verkehr/sub/schiene/berichte/2013/130729_eub_gz795345.pdf), März 25, 2019.
- [21] BMVIT, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie - Wieselburg, Online: [https://www.bmvit.gv.at/verkehr/sub/schiene/berichte/2016/161019\\_bf\\_wieselburg\\_795374.pdf](https://www.bmvit.gv.at/verkehr/sub/schiene/berichte/2016/161019_bf_wieselburg_795374.pdf), März 25, 2019.
- [22] BMVIT, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie - Hütteldorf, Online: [https://www.bmvit.gv.at/verkehr/sub/schiene/berichte/2016/161129\\_zb\\_bf\\_huetteldorf\\_795375.pdf](https://www.bmvit.gv.at/verkehr/sub/schiene/berichte/2016/161129_zb_bf_huetteldorf_795375.pdf), März 25, 2019.
- [23] BMVIT, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie - Bad Vöslau, Online: [https://www.bmvit.gv.at/verkehr/sub/schiene/berichte/2017/170309\\_zb\\_badvoeslau\\_795380.pdf](https://www.bmvit.gv.at/verkehr/sub/schiene/berichte/2017/170309_zb_badvoeslau_795380.pdf), März 25, 2019.
- [24] BMVIT, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie - Haiding, Online: [https://www.bmvit.gv.at/verkehr/sub/schiene/berichte/2017/171030\\_zb\\_bf\\_haiding795393.pdf](https://www.bmvit.gv.at/verkehr/sub/schiene/berichte/2017/171030_zb_bf_haiding795393.pdf), März 25, 2019.
- [25] ÖBB Infrastruktur AG / GB BE / L BE-BFM, "Verfahrensanleitung Notfallmanagement Schiene", 2018.
- [26] Hans Täubler, "Weiterentwicklung des Notfallmanagements am Beispiel der ÖBB-Infrastruktur AG", in *Signal+Draht*, Nr. 5, 2010, S. 16-19.
- [27] Dietrich Wende, *Fahrdynamik des Schienenverkehrs*, 1. Auflage, Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, 2003.

- [28] ÖBB Infrastruktur AG, "30.01 Betriebsvorschrift V3", Dez. 2018.
- [29] Dipl.-Ing. Günter Singer, "Interview", ÖBB Infrastruktur AG, Nov. 21, 2018.
- [30] Dipl.-Ing. Klaus Schulner, "Interview", ÖBB Infrastruktur AG, Dez. 6, 2018.
- [31] ÖBB Infrastruktur AG, "07.09.30 Techn. Lieferbedingungen Hemmschuhe", 2018.
- [32] Gerhard Vollmer, *Luftwiderstand von Güterwagen*, Darmstadt, Technische Hochschule Darmstadt, 1989.
- [33] Internationaler Eisenbahnverband, "UIC-Kodex 544-1: Bremse - Bremsleitung", 2014.
- [34] Internationaler Eisenbahnverband, "UIC B 126/RP 44: Fragen des Bremswesens - zusammenfassender Bericht über die Problematik der Handbremse bei Güterwagen die mit Verbundstoffbremsklotzsohlen ausgerüstet ist", 2014.
- [35] ÖBB Infrastruktur AG, "VzG-Grafik-Ausdruck aller VzG-Strecken der ÖBB-Infrastruktur für den Zwischenfahrplan ab 9.12.2018", 2018.
- [36] Volker Matthews, *Bahnbau*, 8. Auflage, Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, 2011.
- [37] ÖBB Infrastruktur AG, "Lageskizze Bf. Wieselburg an der Erlauf (Wie)", 2018.
- [38] Peter Neumann, Jochen Trinkauf Wolfgang Fenner, *Bahnsicherungstechnik: Steuern, Sichern und Überwachen von Fahrwegen und Fahrgeschwindigkeiten im Schienenverkehr*, 2. Auflage, Erlangen, Publicis Publishing, 2004.
- [39] Schweizer Electronic AG, Mechanischer Schienenkontakt RSK89, Online: <https://www.schweizer-electronic.com/minimel-lynx-schienenkontakt-mechanisch-rsk89.html>, April 10, 2019.
- [40] Pepperl+Fuchs, Pepperl+Fuchs Lichtschranken, Online: [https://files.pepperl-fuchs.com/webcat/navi/productInfo/doct/tdoct1797a\\_ger.pdf?v=29-AUG-18](https://files.pepperl-fuchs.com/webcat/navi/productInfo/doct/tdoct1797a_ger.pdf?v=29-AUG-18), Mai 15, 2019.
- [41] SBB Cargo AG, Eine Nacht im Rangierbahnhof Limmattal, Online: <https://blog.sbbcargo.com/16390/eine-nacht-im-rangierbahnhof-limmattal/>, Mai 27, 2019.
- [42] Schweizer Electronic AG, Radargestützte Zugserfassung RSK-R, Online: <https://www.schweizer-electronic.com/minimel-lynx-radarsensor-rsk-r.html>, Mai 15, 2019.
- [43] Christian Fabian et al., "Studie für eine innovative, lärm- und verschleißarme Bremsung am Abrollberg - StilvA", 2018.

- [44] Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft Strasse-Schiene-Verkehr, "RVE 05.00.11 (Entwurf) Gleisabschlüsse", 2006.
- [45] ÖBB Infrastruktur AG, "13.01.01 Eisenbahnsicherungsanlagen", 2017.
- [46] KRAIBURG STRAIL GmbH & Co. KG, STRAIL, Online: [http://www.strail.de/fileadmin/content01/INTERNET/5.0%20%20S%20e%20r%20v%20i%20c%20e/5.3%20%20Download/STRAIL/deutsch/Broschueren%2BFlyer/veloSTRAIL\\_Brochure.pdf](http://www.strail.de/fileadmin/content01/INTERNET/5.0%20%20S%20e%20r%20v%20i%20c%20e/5.3%20%20Download/STRAIL/deutsch/Broschueren%2BFlyer/veloSTRAIL_Brochure.pdf), April 3, 2019.
- [47] Günter Meuters, "Gleisbremse, insbesondere Gefälleausgleichsbremse", DE19614665C2, Aug. 14, 1995.
- [48] Vereinigte Stahlwerke Akt.-Ges., "Steuervorrichtung für eine Gleisbremse mit dahinter angeordnetem Hemmschuh", DE553633, Apr. 18, 1929.
- [49] Dr.-Ing. E. Frohne und Jakob Dietrich, "Vorrichtung zum Bremsen von Schienenfahrzeugen mittels Hemmschuhe", DE596051, Okt. 27, 1932.
- [50] Getzner Werkstoffe GmbH, Sylomer® Spurrillenfüller, Online: <https://www.getzner.com/de/downloads?downloadTags=Railway%20Solution,Brocure.de>, August 28, 2019.
- [51] Wikipedia, Online: [https://de.wikipedia.org/wiki/Drehgestell\\_Bauart\\_Y25](https://de.wikipedia.org/wiki/Drehgestell_Bauart_Y25), November 13, 2018.
- [52] ÖBB Infrastruktur AG, "31.03 Bremsvorschrift M26", 2018.
- [53] Wikipedia, Online: <https://de.wikipedia.org/wiki/ISO-Container>, November 13, 2018.



## Anhang A Bremskraft Theorie

Die Bremskraft eines abgestellten Fahrzeugs wird mittels einer Hand- oder Feststellbremse erzielt. Die Handbremse wird vom Fahrzeug aus bedient und kann somit auch während der Fahrt verwendet werden. Die Feststellbremse kann nur von außerhalb des Fahrzeugs bedient werden und damit nur im Stillstand. Sowohl die Handbremse, als auch die Feststellbremse steuert eine mechanische Bremse des Fahrzeugs an. Als mechanische Bremsen werden Klotz- oder Scheibenbremsen verwendet. Die Bremskraft wird dabei an das Bremsgestänge weitergeleitet, welches wiederum die Bremsbeläge an das Rad oder die Bremsscheibe presst und somit durch Reibung eine Bremswirkung erzeugt. Um die Bremskraftenerzeugung zu berechnen, muss zunächst die Klotzkraft  $F_{Kl}$  (bei Klotzbremsen) oder die Belagskraft  $F_{Bel}$  (bei Scheibenbremsen) berechnet werden. Für die Auswertung des Widerstands gegen Entrollen, wird davon ausgegangen, dass die mechanische Bremse mit der Hand angezogen wird und sich das Fahrzeug im Stillstand befindet. Die Berechnung der Klotz- bzw. Belagskraft pro Anpressstelle ist folgendermaßen [27]:

$$F_{Kl} = f_t \cdot f_{St} \cdot i_H \cdot \eta_G \cdot \frac{F_{H,max}}{z_{Kl}} - F_G \quad (66)$$

$$F_{Bel} = f_t \cdot f_{St} \cdot i_H \cdot \eta_G \cdot \frac{F_{H,max}}{z_{Bel}} \quad (67)$$

$f_t$  ... Zeitfaktor zur Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit des Aufbaus der Bremswirkung (Berücksichtigung wie in Bremsstellung „G“ Güterzug)

$f_{St}$  ... Bremsstufenfaktor zur Berücksichtigung wie stark die Bremse angezogen wurde (Werte zwischen 0 und 1)

$i_H$  ... Handkraftübersetzung (bei Güter- und Triebwagen  $i_H = 1400$ )

$\eta_G$  ... Gestängewirkungsgrad – bei Hand- und Feststellbremse  $\eta_G = 0,25$

$F_{H,max}$  ... maximale Handkraft -  $F_{H,max} = 0,5 \text{ kN}$

$z_{Kl}$  ... Klotzanpressstellen pro Bremszylinder (üblicherweise 1 Bremszylinder pro Radsatz und je Rad 2 Anpressstellen)  $\rightarrow z_{Kl} = 4$

$z_{Bel}$  ... Belagsanpressstellen pro Bremszylinder (üblicherweise 1 Bremszylinder pro Radsatz und 2 Anpressstellen pro Bremsscheibe mit 1 bis 4 Bremsscheibe pro Radsatz)  $\rightarrow z_{Bel} = 2,4,6$  oder 8, worst case Annahme: 2)

$F_G$  ... Gestängegegenkraft pro Anpressstelle ( $F_G = 1 \text{ kN}$ )

Im Folgenden werden die einzelnen Faktoren diskutiert bzw. erläutert.

Der Zeitfaktor  $f_t$  berücksichtigt die Reaktionszeit des Triebfahrzeugführers  $t_R$  vor Betätigung der Bremse (der empfohlene Wert ist 3 s), die Ansprechzeit des ersten Bremszylinders  $t_A$  (der empfohlene Wert liegt bei 1,5 s), die Füllzeit und Lösezeit der Bremszylinder. Da in

dieser Betrachtung eine Modellierung der Feststellbremse erfolgt und diese nicht pneumatisch bedient wird, wird der Zeitfaktor auf 1 gesetzt und hat somit keine Auswirkung auf die Bremskraftberechnung [27].

Der Bremsstufenfaktor  $f_{st}$  gibt an, wie stark die Bremse angezogen wird. Es ist somit ein Abminderungsfaktor für die aufgebrachte Handkraft von maximal 0,5 kN. Um zu zeigen, wie sich die Bremskraft in Abhängigkeit der Kraft des Anziehens verändert, wird die Berechnung für alle Werte für  $f_{st}$  zwischen 0,01 und 1 im Abstand von 0,02 berechnet und als Funktion dargestellt [27].

Die Handkraftübersetzung hängt von der Verbindung zwischen dem zu betätigenden Objekt (z.B. eine Kurbel) und dem Bremsgestänge ab. Der Maximalwert beträgt bei Güter- und Triebwagen beträgt 1400 [27].

Der Gestängewirkungsgrad  $\eta_G$  hängt von der Gestängeübersetzung, vom Schmierzustand und von den Wartungsintervallen ab. Der Wert für Hand- und Feststellbremsen wird mit 0,25 angegeben. Allgemein wird der Gestängewirkungsgrad je länger das Fahrzeug ohne Wartung unterwegs ist, immer niedriger und somit sinkt die übertragbare Bremskraft nach einer Wartung immer weiter [27].

Mittels der Bremskraft pro Anpressstelle kann die Abbremsung  $\varphi_{max}$  ermittelt werden [27]:

$$\varphi_{Kl} = \frac{F_{Kl,ges}}{G_F} \quad (68)$$

$$\varphi_{Bel} = \frac{F_{Bel,ges}}{G_F} \cdot \frac{r_{BR}}{r_L} \quad (69)$$

$F_{Kl,ges}$  ... gesamte Klotzkraft pro Fahrzeug oder pro Zug

$F_{Bel,ges}$  ... gesamte Belagskraft pro Fahrzeug oder pro Zug

$G_F$  ... Gewichtskraft des Fahrzeugs ( $m_{beladen} = 90$  t,  $m_{leer} = 20$  t)

$r_{BR}$  ... Radius der Bremsscheibe (in Abhängigkeit des Laufkreisdurchmessers des Rades)

$r_L$  ... Laufkreisradius des Rades

Die gesamte Klotz- bzw. Belagskraft wird durch die Multiplikation der Kraft pro Anpressstelle mit der Anzahl der Anpressstellen berechnet.

Bei der Gewichtskraft pro Fahrzeug spielt die Masse der Beladung eine entscheidende Rolle. Da im gerechneten „worst case“ Szenario die geringste Abbremsung gesucht wird, wird von einem voll beladenen vierachsigen Fahrzeug mit einer Gesamtmasse von 90 t ausgegangen.

Der Laufkreisdurchmesser wird mit 920 mm angenommen, was dem unter Güterwagen am meisten verbreiteten Drehgestell (Y25) entspricht [51]. Daraus ergibt sich ein Radius der Bremsscheibe von 290,3 mm.

Aus der berechneten Abbremsung  $\varphi$  und dem Klotz- bzw. Belagsreibungwert  $\mu_{Kl}$  bzw.  $\mu_{Bel}$  kann die Bremskraftzahl  $f_B$  ermittelt werden [27]:

$$f_{B,Kl} = \mu_{Kl} \cdot \varphi_{Kl} \quad (70)$$

$$f_{B,Bel} = \mu_{Bel} \cdot \varphi_{Bel} \quad (71)$$

Die Berechnung des Klotz- bzw. Belagsreibungswerts müssen viele Einflüsse berücksichtigt werden. Unter anderem fließen der aufgebrauchte Klotz- bzw. Belagsdruck, die Materialart, die Reibarbeit, die Reibgeometrie, Verschleiß und Umweltbedingungen ein. Die Eingangsp Parameter für die Reibwertberechnung wurden aus Prüfstandversuchen und den daraus entstandenen Statistiken bestimmt. Karwatzki entwickelte eine Reibwertgleichung, die im Regelfall für brems technische Berechnungen verwendet wird. Gralla entwickelte eine erweiterte Reibwertgleichung für GG-Bremsklötze. Um die erreichbare Bremskraftzahl für GG-Klötze, Verbundstoff-Klötze und Scheibenbremsen mit demselben Ansatz zu berechnen, wird der Ansatz von Karwatzki gewählt [27]:

$$\mu_{Kl} = k_1 \cdot B_{Kl} \cdot D \quad (72)$$

$$\mu_{Bel} = k_1 \cdot B_{Bel} \cdot D \quad (73)$$

B ... Klotz-/Belagskraftterm

D ... Geschwindigkeitsterm

Der Kraftterm berechnet sich wie folgt [27]:

$$B_{Kl} = \frac{F_{Kl} + k_2}{F_{Kl} + k_3} \quad (74)$$

$$B_{Bel} = \frac{F_{Bel} + k_2}{F_{Bel} + k_3} \quad (75)$$

Der Geschwindigkeitsterm berechnet sich wie folgt [27]:

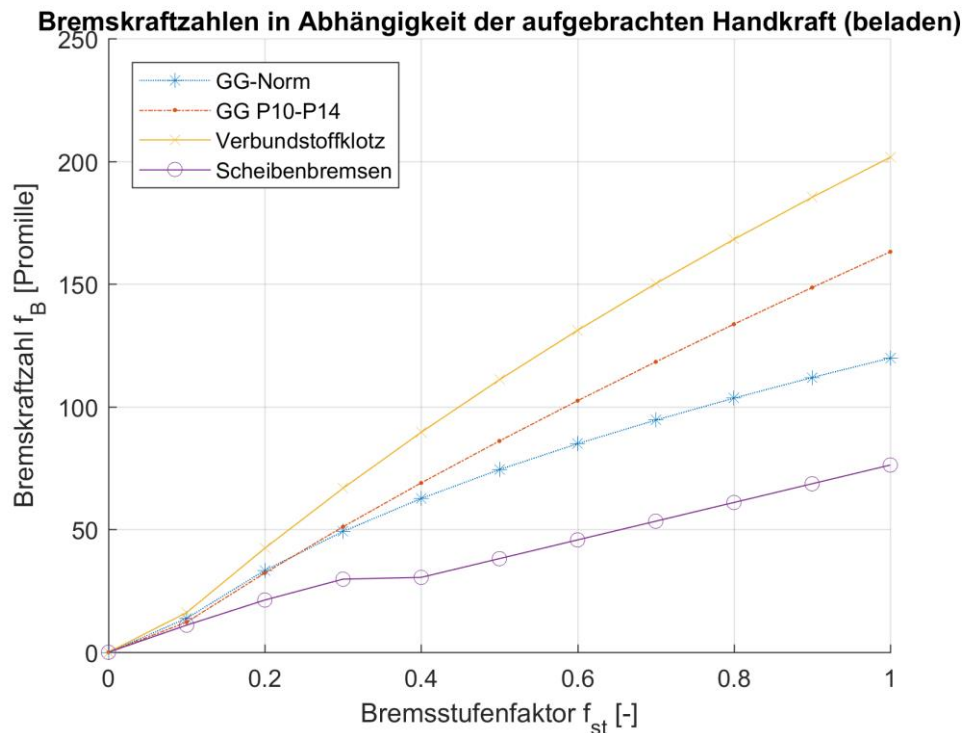
$$D = \frac{v + k_4}{v + k_5} \quad (76)$$

Die ermittelten Konstanten der Reibwertgleichung sind in Tab. 9-1 zu finden. Die Auswertung erfolgt für alle vier unterschiedlichen Bremskategorien.

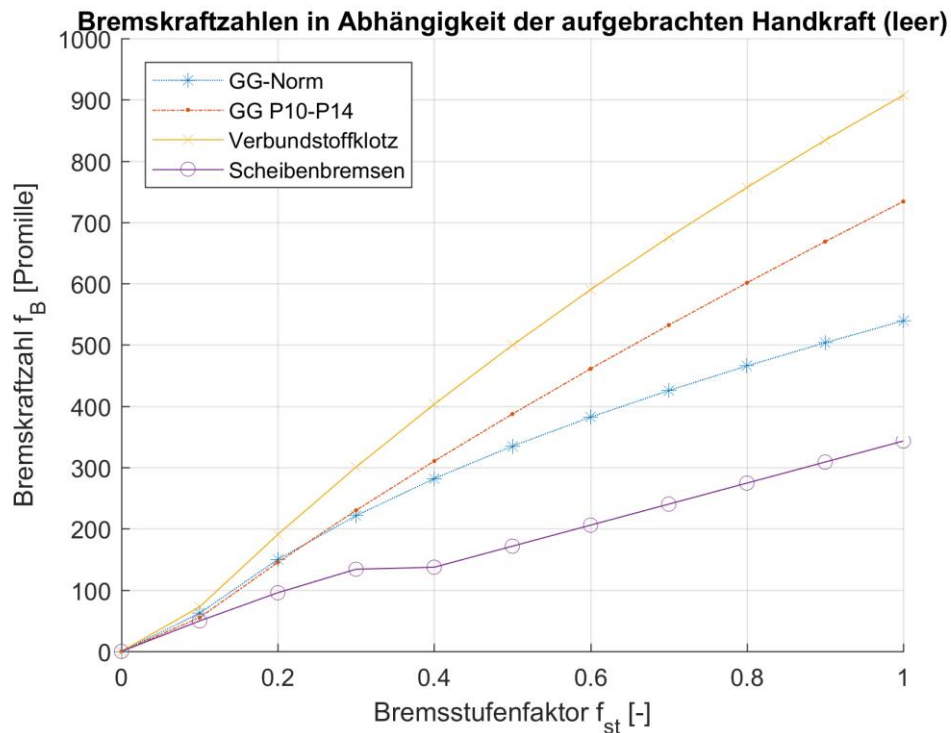
**Tab. 9-1: Konstanten der Reibwertgleichung**

	$k_1$ [-]	$k_2$ [kN]	$k_3$ [kN]	$k_4$ [km/h]	$k_5$ [km/h]
Normal-GG-Klötze	0,024	62,50	12,50	100	20
P10 bis P14-Klötze	0,050	62,50	31,25	100	20
Verbundstoffklötze 6 KB 10	0,055	200	50	150	75
Scheibenbremsbelag Typ 5-6-60	0,385	-24,5	-27,2	39,5	33

Da der Ansatz von Karwatzki nur bis zu Belagskräften von  $F_{Bel} = 15,2 \text{ kN}$  gültig ist, wird für Belagskräfte über diesem Wert ein Belagsreibungswert von 0,28 angenommen. Dieser entspricht den Mittelwertkurven des UIC Merkblatts 541 für ein Fahrzeug im Stillstand [27]. Die Auswertung der Formeln (70) und (71) in Abhängigkeit des Bremsstufenfaktors für die in Tab. 9-1 dargestellten Bremstypen ist in Abb. 9-1 und Abb. 9-2 dargestellt.



**Abb. 9-1: Auswertung der Bremskraftzahl in Abhängigkeit der aufgebrauchten Handkraft für die vier betrachteten Bremstypen für einen beladenen Wagen**



**Abb. 9-2: Auswertung der Bremskraftzahl in Abhängigkeit der aufgebrauchten Handkraft für die vier betrachteten Bremstypen für einen leeren Wagen**

Es ist zu erkennen, dass die Bremswirkung der Scheibenbremse am Schlechtesten ist und die Bremswirkung eines Verbundstoffklotzes am besten ist. Über 10 % aufgebrauchter Bremskraft übersteigt diese bereits die bei der Eisenbahn üblichen Längsneigungen und sichert somit vor unbeabsichtigtem Entrollen allein durch die Längsneigung.

Wenn die Einwirkungen auf den Wagen die Widerstände überwinden, können beim gebremsten Wagen zwei Fälle auftreten:

- Gleiten des Rades auf der Schiene
- Gleiten des Bremsklotzes auf der Lauffläche oder der Bremsbacke an der Bremsscheibe

Welche Art des Gleitvorgangs entsteht hängt vom Verhältnis zwischen den erzielten Rückhaltekräften  $F_{tang}$  der Reibung ab:

$$F_{tang,Kl} = F_{Kl} \cdot \mu_{Kl} \quad (77)$$

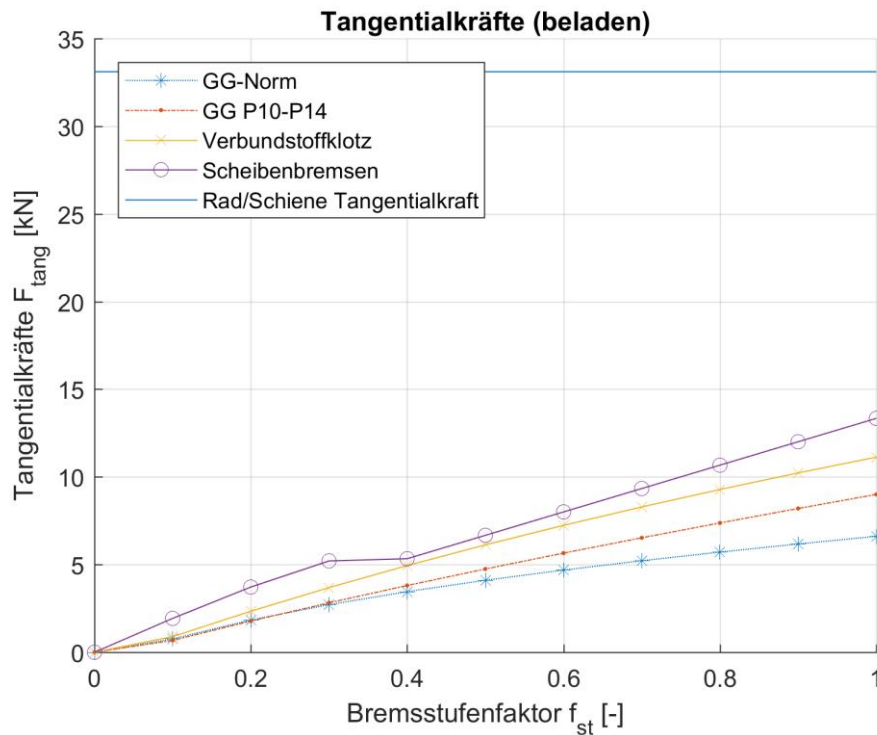
$$F_{tang,Bel} = F_{Bel} \cdot \mu_{Bel} \quad (78)$$

$$F_{tang,W} = G_W \cdot \mu \quad (79)$$

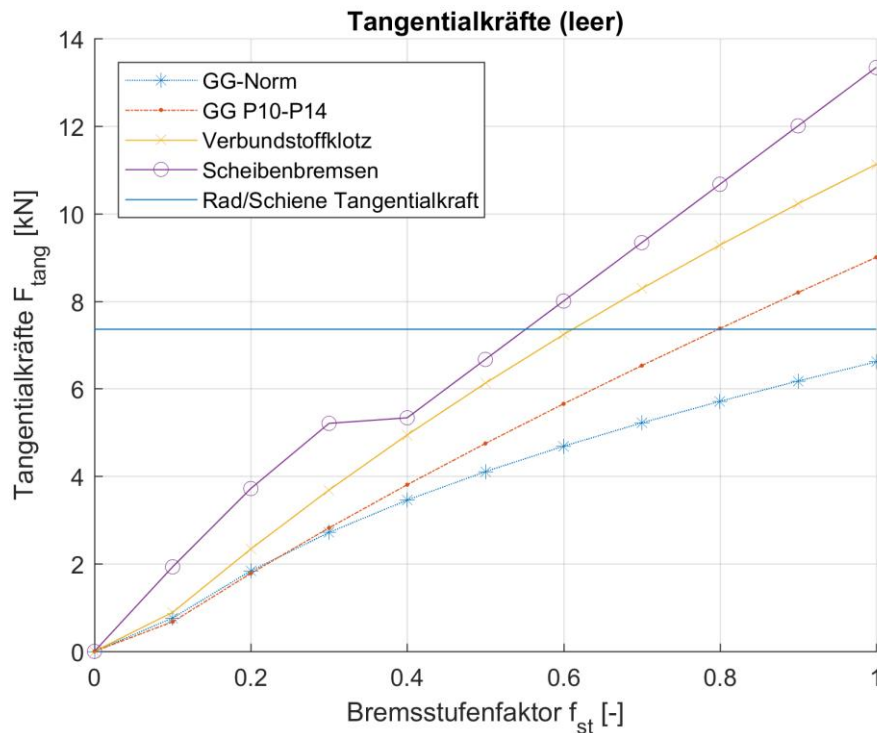
$\mu$  ... Reibwert zwischen Rad und Schiene (Annahme 0,15)

Die aufgebrauchte Klotz- und Belagskraft hängt davon ab, wie stark die Bremse angezogen wird. Der Reibwert zwischen Bremsklotz und Lauffläche bzw. Bremsbacke und

Bremsscheibe nimmt mit zunehmender Bremskraft ab. Die Tangentialkomponente der Gewichtskraft hängt vom angenommenen Wagengewicht ab. Für einen beladenen Wagen ist die Tangentialkomponente der aufgebrachtten Bremskraft auf der Lauffläche oder auf der Bremsscheibe kleiner als die durch die Gewichtskraft erzeugte Tangentialkraft zwischen Rad und Schiene (siehe Abb. 9-3). Somit tritt bei beladenen Wägen ein Gleitvorgang des Bremsklotzes auf der Lauffläche bzw. der Bremsbacke auf der Bremsscheibe ein. Bei einem leeren Wagen, tritt je nach Bremssystem ab einer gewissen Bremsstufe ein Gleiten des Rades auf der Schiene auf (siehe Abb. 9-4). Falls der Reibwert zwischen Rad und Schiene höher ist (bei trockenem Wetter), zeigt sich aber auch beim leeren Wagen dasselbe Verhalten wie beim beladenen Wagen.



**Abb. 9-3: Reibungskräfte durch Bremskraft und Gewichtskraft (beladen)**



**Abb. 9-4: Reibungskräfte durch Bremskraft und Gewichtskraft (leer)**

Die theoretische Bremskraftberechnung dient zur Veranschaulichung der verschiedenen Parameter, die bei der Bremswirkung eine Rolle spielen. In der Praxis ist der Reibwert der Bremsklötze bzw. der Bremsbacken und die aufgebrachte Bremskraft so aufeinander abgestimmt, dass unabhängig welches Bremssystem verwendet wird, ungefähr dieselben Werte für die Abbremsung erzielt werden [30].

## Anhang B Eingangsparameter für den äußeren Luftwiderstand



**Tab. 9-2: Eingangsparmeter der betrachteten Güterwagen in x-Richtung [27]**

	Gls 205, Türen zu	Es 040 leer	Es 040 beladen	Kesselwagen, 2-achsig, Bühne vorne	Kbs 442, leer, ohne Rungen	Ed 090 leer	Ed 090 beladen, Schüttgut
A <sub>sp</sub> [m <sup>2</sup> ]	9,912	6,989	7,234	10,319	3,659	9,083	9,501
l <sub>wk</sub> [m]	8,8	8,96	8,96	7,2	8,8	8,96	8,96
a <sub>st/h0</sub>	6649,61	5155,33	4691,41	4679,65	3082,95	5393,73	5058,01
a <sub>st/h2</sub>	4825,72	3516,97	3309,82	3742,16	2198,34	4737,47	4719,46
a <sub>st/h4</sub>	-2259,41	-1158,89	-1226,76	-23,9	-155,07	-1372,14	-1421,86
a <sub>st/h6</sub>	-150,72	-436,96	-95,92	-824,89	-184,53	-46,14	-197,38
a <sub>st/h8</sub>	-124,59	-297,92	-109,27	602,61	-147,37	8,12	-29,93
a <sub>st/h10</sub>	-139,31	-143,13	4,8	-559,6	45,57	-163,27	109,01
a <sub>L0</sub>	103,95	168,04	136,33	274,63	143,59	261,19	246,83
a <sub>L2</sub>	70,83	157,95	88,56	121,42	45,5	28,55	-13,28
a <sub>L4</sub>	-37,79	-25,53	-63,56	-157,4	-73,14	-73,94	-103,54
a <sub>L6</sub>	-16,53	-10,35	-24,6	-30,17	-3,13	-14,08	-24,96
a <sub>L8</sub>	-17,01	-17,25	-11,89	-63,78	-8,26	-23,09	-29,55
a <sub>L10</sub>	-7,26	-8,56	-6,89	14,56	-3,75	5,66	-19,38
a <sub>zw0</sub>	1302,94	939,3	1026,04	1548,51	662,62	1536,87	1161,67
a <sub>zw2</sub>	-474,17	-378,16	-348,5	-441,23	150,96	-324,65	-144,95
a <sub>zw4</sub>	-1024,32	-691,45	-811,21	-554,23	-364,55	-1287,95	-1220,92
a <sub>zw6</sub>	274,06	159,22	167,21	146,95	-157,9	72,75	95,95
a <sub>zw8</sub>	-155,19	-48,34	-31,55	-136,66	-114,15	66,82	20,98
a <sub>zw10</sub>	128,69	82,19	101,93	89,51	69,32	21,97	3,66

**Tab. 9-3: Eingangsparameter der betrachteten Güterwagen in y-Richtung [27]**

	Gls 205, Türen zu	Es 040 leer	Es 040 beladen	Kesselwagen, 2-achsig, Bühne vorne	Kbs 442, leer, ohne Rungen	Ed 090 leer	Ed 090 beladen, Schüttgut
a <sub>st/h0</sub>	5108,64	2446,64	3088,7	-738,33	21446,96	482,5	1364,73
a <sub>st/h2</sub>	1485,23	2447,33	2593,62	5734,76	1450,01	2219,45	2313,24
a <sub>st/h4</sub>	-2823,53	-1482,86	-2343,59	-1240,89	-1614,64	51,8	-146,34
a <sub>st/h6</sub>	-1105,8	-1535,78	-1626,52	-842,57	-972,45	-893,94	-1039,11
a <sub>st/h8</sub>	-636,46	-1001,24	-49,36	-623,75	-223,02	-1164,69	-836,46
a <sub>st/h10</sub>	-559,61	-378,86	-221,2	-537,24	-71,94	-684,09	-326,43
a <sub>L0</sub>	1667,44	1705,88	1591,89	3184,2	909,66	2376,79	2321,28
a <sub>L2</sub>	-1293,49	-1410,66	-1478,59	-2526,32	-776,82	-1831,1	-1805,41
a <sub>L4</sub>	-270,13	-245,82	-87,36	-482,83	-108,67	-447,96	-433,34
a <sub>L6</sub>	-45,33	30,37	60,7	-115,66	7,89	-35,7	-44,65
a <sub>L8</sub>	-12,47	36,16	-59,43	-65,07	7,5	52,33	18,47
a <sub>L10</sub>	10,66	-7,42	-22,93	32,56	-14,66	29,07	-4,27
a <sub>zw0</sub>	-508,81	-1274,88	-1017,39	-4088,97	-565,92	-2197,55	-2369,18
a <sub>zw2</sub>	900,96	1282,44	1727	4002,68	1043,4	858,83	1063,76
a <sub>zw4</sub>	236,9	529,53	-9,09	-429,74	-174,72	1518,74	1737,76
a <sub>zw6</sub>	-162,93	-184,74	-950,75	349,72	-493,56	78,91	-59,08
a <sub>zw8</sub>	-481,46	-503,11	158,62	394,68	-86,15	-375,47	-469,35
a <sub>zw10</sub>	-260,29	-70,67	339,06	-332,97	290,06	-349,3	-133,05

Tab. 9-4: Eingangsparameter der betrachteten Güterwagen in x-Richtung

	Sgis 716 2x20' Außencontainer	Sgis 716 3x20' Container	Fad 168 leer	Fad 168 beladen, Schüttgut	Eaos 106 leer	Eaos 106 beladen, Schüttgut
$A_{sp}$ [m <sup>2</sup> ]	9,361	9,361	11,364	11,87	8,711	9,131
$l_{wk}$ [m]	18,9	18,9	11,2	11,2	12,8	12,8
x-Richtung						
$a_{st/h0}$	5495,73	5260,45	7589,31	7086,81	5916,62	5268,88
$a_{st/h2}$	4843,11	4697,65	6199,6	5985,95	4912,12	4311,88
$a_{st/h4}$	-983,6	-766,85	-1995,37	-2250,73	-1465,55	-1493,32
$a_{st/h6}$	-512,23	-425,19	-462,11	-778,91	-822,29	-306,41
$a_{st/h8}$	334,33	314	-306,72	-134,42	-479,75	136,88
$a_{st/h10}$	-628,36	-627	-470,86	-313,93	-934,72	-404,9
$a_{L0}$	273,47	143,04	95,53	91,35	156,44	121,89
$a_{L2}$	136,98	58,3	76,61	45,18	150,77	79,69
$a_{L4}$	-191,71	-94,91	-16,11	-37,1	-7	-67,15
$a_{L6}$	-23,62	-19,46	-12,63	-14,62	11,53	-32,68
$a_{L8}$	-20,78	-12,36	0,23	-8,68	11,92	-12,78
$a_{L10}$	-5,35	6,4	-0,85	-7,89	17,09	-2,49
$a_{zw0}$	2382	2236,21	1446,91	1157,84	1158,07	1129,92
$a_{zw2}$	-331,12	-591,19	-194,43	-407,35	-529,88	-366,76
$a_{zw4}$	-1919,68	-1607,1	-885,62	-820,63	-822,22	-691,78
$a_{zw6}$	815,77	546,05	171,27	124,68	121	203,81
$a_{zw8}$	-215,56	-11,41	11,24	100,27	-238,93	-109,99
$a_{zw10}$	-100,65	25,97	75,31	207,26	-52,92	101,57

Tab. 9-5: Eingangsparameter der betrachteten Güterwagen in y-Richtung

	Sgis 716 2x20` Außencontainer	Sgis 716 3x20` Container	Fad 168 leer	Fad 168 beladen, Schüttgut	Eaos 106 leer	Eaos 106 beladen, Schüttgut
a <sub>st/h0</sub>	-357,47	1696,34	3850,39	2953,92	4251,75	4362,48
a <sub>st/h2</sub>	6106,23	4392,93	1098	1487,19	2845,64	2414,89
a <sub>st/h4</sub>	931,88	2194,96	714,43	817,44	-149,65	-1329,98
a <sub>st/h6</sub>	-3592,51	-3134,59	-1037,83	-1256,88	-2162,48	-2337,12
a <sub>st/h8</sub>	-1861,07	-1452,08	-1736,54	-1446,42	-1201,61	-974,15
a <sub>st/h10</sub>	-735,82	-1359,1	-1538,34	-1032,99	-1287,92	-744,06
a <sub>L0</sub>	2127,99	2661,04	2329,46	2376,25	1973,11	1898,55
a <sub>L2</sub>	-1755,25	-2146,47	-1741,34	-1772	-1654,02	-1704,81
a <sub>L4</sub>	-426,29	-647,45	-600,28	-610,31	-388,29	-237,48
a <sub>L6</sub>	87,82	94,48	-27,59	-15,85	59,99	87,41
a <sub>L8</sub>	55,2	81,72	84,98	61,65	32,08	-15,48
a <sub>L10</sub>	-5,38	2,42	79,29	41,02	21,31	-3,67
a <sub>zw0</sub>	-4843,12	-5869,2	-1093,72	-1410,97	-1386,42	-2022,06
a <sub>zw2</sub>	3072,27	1902,71	8,24	689,65	687,5	784,1
a <sub>zw4</sub>	2714,02	4269,9	1785,86	1880,91	1384,97	2195,51
a <sub>zw6</sub>	-493,35	818,35	-240,31	-789,79	-305,81	-529,89
a <sub>zw8</sub>	-1152,37	-957,26	-444,02	-873,15	-153,35	-888,49
a <sub>zw10</sub>	-130,75	-898,78	-373,53	39,97	-467,38	359,63

