Self Destructive Brake Shoe
self_DEBASE

Ein Projekt finanziert im Rahmen der Verkehrsinfrastrukturforschung 2018 (**VIF 2018**)

Januar 2022

Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:
Bundesministerium für Klimaschutz
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
1030 Wien

ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
1020 Wien

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

Für den Inhalt verantwortlich:

FH St. Pölten GmbH
Campus-Platz 1
3100 St. Pölten

FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH
Stelzhamerstraße 23
4600 Wels/Austria

Programmmanagement:
Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
1090 Wien

Self Destructive Brake Shoe self_DEBASE

Ein Projekt finanziert im Rahmen der Verkehrsinfrastrukturforschung (VIF2018)

AutorInnen:

Prof. (FH) Priv. Doz. Dr. Martin Egger (FH OÖ)
Philipp Graf BSc (FH St. Pölten)
FH-Prof. Dipl.-Ing. (FH) Dipl.-Ing. Frank Michelberger EURAIL-Ing. (FH St. Pölten)
Ing. Dipl.-Ing. Adrian Wagner BSc (FH St. Pölten)

Auftraggeber:
Bundesministerium für Klimaschutz
ÖBB-Infrastruktur AG
Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:
Fachhochschule St. Pölten GmbH
FH OÖ Forschungs & Entwicklungs GmbH

Inhalt

1 Zusammenfassung 5
2 Aufgabenstellung 6
3 Innovationsprozess 7
4 Anforderungen 12
4.1 Elemente des Hemmschuhs, Funktion und mechanische Verhältnisse 13
4.2 Belastungen auf den Hemmschuh 17
4.3 Wirkprinzip selbstzerstörender Hemmschuh 19
4.3.1 Wirkprinzip Öffnen durch Gewaltbruch/Überlastung 21
4.3.2 Wirkprinzip Thermisches Öffnen einer großflächigen Weichlötverbindung 21
4.3.3 Wirkprinzip Öffnen durch Verschleiß 24
4.3.4 Wirkprinzip Wegbasiertes Öffnen, kinematischer Mechanismus 25
4.4 Wirtschaftliche Bewertung der unterschiedlichen Lösungskonzepte 26
5 Feldtest 29
5.1 Messmittel 30
5.2 Versuchsaufbau 30
5.3 Versuchsablauf 31
5.4 Versuchsdurchführung und Ergebnisse 32
5.5 Fotodokumentation ‚Wegbasiertes Öffnen' 34
5.6 Fotodokumentation ‚Thermisches Öffnen' 36
5.7 Fotodokumentation ‚Öffnen durch Verschleiß' 38
5.8 Versuchszusammenfassung 40
5.9 Empfehlungen 40
5.10 Anforderung Zertifizierung 41
6 Literatur 42
7 Tabellenverzeichnis: 43
8 Abbildungsverzeichnis 44

1 Zusammenfassung

Im Eisenbahnbetrieb werden Hemmschuhe aus zwei Gründen verwendet:

- zum Sichern gegen Entrollen von abgestellten Schienenfahrzeugen ohne Handbremse
- zum Abbremsen von abgerollten oder abgestoßenen Einzelwagen oder Wagengruppen

Beim Sichern gegen Entrollen kann es aber trotz aller rechtlicher und betrieblicher Maßnahmen vorkommen, dass Hemmschuhe nicht vom Gleis entfernt werden. Beim Anfahren des Zuges kann es dadurch in weiterer Folge zum Übersteigen des Hemmschuhes, Verkeilen im Weichenbereich und zur Entgleisung kommen.

Um dies zukünftig zu vermeiden, war es daher das Ziel, einen Hemmschuh zu entwickeln, der folgende Eigenschaften vorweist:

- Sichern gegen Entrollen von abgestellten Schienenfahrzeugen möglich
- Selbstzerstörung beim Anfahren eines Zuges

Beantwortet wurde die Problemstellung mittels Durchführung eines Innovationsprozesses, in dem unvoreingenommen vielfältige Wirkprinzipien in großer Anzahl entwickelt wurden. Diese wurden dann im Konstruktionsprozess (Prozess laut VDI 2221) zu Wirkstrukturen zusammengeführt und bewertet. Daraus entstanden drei Wirkungsweisen: zurückgelegte Distanz (‚Wegbasiertes Öffnen‘), Verschleiß (‚Öffnen durch Verschleiß‘) und Hitze durch Reibungsenergie (‚Thermisches Öffnen‘). Daran anschließend erfolgte die Fertigung der Prototypen für diese Varianten des selbstzerstörenden Hemmschuhs, sowie die Ermittlung der wirtschaftlichen Prozesskette für die Serienherstellung. Der Nachweis der Wirkung der vorliegenden Hemmschuh-Demonstratoren erfolgte in Feldtests.
Die Ergebnisse des Versuches zeigen, dass sich der Hemmschuh Thermisches Öffnen‘ am besten als selbstzerstörender Hemmschuh eignet.

2 Aufgabenstellung

Hemmschuhe werden verwendet, um langsam fahrende/rollende Güterwagen abzubremsen oder stehende Wagen und Wagengruppen gegen das Entrollen zu sichern. Kommt es nicht zum ordnungsgemäßen Entfernen des Hemmschuhs vor neuerlicher Abfahrt des Zuges, besteht die Gefahr großer Schäden. Es kann einerseits der Hemmschuh von der Achse überstiegen werden, was bereits als Entgleisung zu werten ist, andererseits kann der Hemmschuh in der nächsten Weiche hängen bleiben. Dann wird er überrollt und es kann im harmlosen Fall zur Beschädigung der Weichenanlage und der Wagen kommen bzw. im schweren Fall zum Entgleisen des Zuges und in weiterer Folge zur Zerstörung kilometerweiter Eisenbahninfrastruktur.

Des Weiteren müssen sämtliche entgleisten Wagen, also auch jene, wo „nur“ die Achse den Hemmschuh überstiegen hat, einer wagentechnischen Untersuchung unterzogen und/oder repariert werden, was die Pünktlichkeit der Lieferung der Güter auf diesen Wagen stark beeinträchtigt und die Verfügbarkeit senkt.

Die ÖBB Infrastruktur AG versuchte dieses Problem mit dem Einsatz hochsichtbarer Hemmschuhe zu bekämpfen. Diese Hemmschuhe sind mit einer Signalfarbe (Neongelb) lackiert und mit Reflektionsstreifen beklebt. Dies macht die Hemmschuhe zwar sichtbarer, es besteht aber immer noch die Möglichkeit diese Hemmschuhe zu vergessen.

Ziel des gegenständlichen Projekts war es, einen Hemmschuh zu entwickeln, der folgende Eigenschaften vorweist:

- Sichern gegen Entrollen von abgestellten Schienenfahrzeugen möglich
- Selbstzerstörung beim Anfahren eines Zuges

3 Innovationsprozess

Im Rahmen des Innovationsprozesses wurden zunächst, unabhängig von der Realisierungsmöglichkeit, verschiedenste Ideen entwickelt, ausgearbeitet und dokumentiert. Diese werden im Folgenden kurz beschrieben.

Idee 1: Retarderkapseln

Die Idee ist es, das bekannte Prinzip der Retarderkapsel in einen Hemmschuh zu integrieren. Da eine Retarderkapsel mehr Widerstand gibt, desto größer die auf sie wirkende Kraft ist, wäre sie aufgrund der Kräftesituation für diesen Anwendungszweck geeignet. Bei einer Zugüberfahrt klappt dann ein Teil des Hemmschuhes zur Seite, um so das Überfahren des Wagens zu erlauben und durch das entstandene Ungleichgewicht fällt der Hemmschuh von der Schiene und macht die Schiene frei.

Vorteile:

- Bereits bekannte und bewährte Bauteile
- Wiederverwendbar
- Entspricht der ungewöhnlichen Kräftesituation
- Kapsel in sich geschlossenes, autarkes System

Nachteile:

- Komplexität
- Größe und Gewicht
- Instandhaltung und Inspektion notwendig
- Erhöhte Kosten

Probleme:

- Technische Umsetzung (Wie funktioniert der Mechanismus?)
- Hält eine Retarderkapsel den Aufprallkräften stand?
- Der Mechanismus muss beim Überfahren eine entgleisungssichere Überfahrt erlauben. Nichts darf im Weg sein außer der Hemmschuhsohle bei der Überfahrt der ersten Achse.
- Der weggeklappte Teil muss genug Gewicht haben, um den Hemmschuh von der Schiene kippen zu können.

Idee 2: Selbstzerstörung

Der gesamte Hemmschuh ist aus einem Material konstruiert, welches starken, plötzlichen, stoßartigen Belastungen standhält, allerdings bei einer bestimmten dauerhaft aufgebrachten Kraft (durch ein Tfz) nachgibt. Der Hemmschuh zerbricht dabei und ist nachher (zumindest teilweise) nicht mehr wiederverwendbar.

Vorteile:

- Keine Instandhaltung notwendig
- Einfachere Konstruktion
- Nicht viel größer oder schwerer als normaler Hemmschuh
- Billiger
- Weniger komplex

Nachteile:

- Keine Garantie, dass der Hemmschuh von der Schiene fällt
- Einmalprodukt -> höhere Kosten
- Dauerhaft Windkraft könnte evtl. zum Bruch führen
- Komplett neue Konstruktion aus nicht erprobten Materialien -> mehr Materialtests notwendig

Probleme:

- Geeignetes Material muss erst gefunden werden oder ist evtl. nicht verfügbar
- Das Material muss umfassend geprüft und getestet werden, bei mehreren Materialien sind mehrere Tests notwendig
- Preis und Herstellungskosten sind für dieses theoretische Material unbekannt
- Material muss witterungsbeständig sein, da Hemmschuhe meistens draußen im Anwendungsbereich aufbewahrt werden.
- Keine Garantie, dass der Hemmschuh von der Schiene fällt

Idee 3: Hemmschuh mit Sollbruchstelle

Entspricht weitestgehend dem selbstzerstörenden Hemmschuh, allerdings zerstört sich nur ein Teil des Hemmschuhes, die anderen Teile können wiederverwertet werden.

Vorteile:

- Keine Instandhaltung notwendig
- Einfachere Konstruktion
- Nicht viel größer oder schwerer als normaler Hemmschuh
- Billiger

- Weniger komplex

Nachteile:

- Keine Garantie, dass der Hemmschuh von der Schiene fällt
- Muss nach einmal überfahren instandgesetzt werden
- Dauerhaft Windkraft könnte evtl. zum Bruch führen
- Komplett neue Konstruktion aus teilweise nicht erprobten Materialien -> mehr Materialtests notwendig

Probleme:

- Geeignetes Material muss erst gefunden werden oder ist evtl. nicht verfügbar
- Das Material muss umfassend geprüft und getestet werden, bei mehreren Materialien sind mehrere Tests notwendig
- Preis und Herstellungskosten sind für dieses theoretische Material unbekannt
- Material muss witterungsbeständig sein, da Hemmschuhe meistens draußen im Anwendungsbereich aufbewahrt werden.
- Keine Garantie, dass der Hemmschuh von der Schiene fällt

Idee 4: Am Wagen befestigter Hemmschuh

Ein Hemmschuh welcher am Wagen befestigt ist. Er legt sich auf das Gleis, wenn die Handbremse angezogen ist und legt sich automatisch ab, wenn die Bremsen von einem Tfz gelöst werden oder durch betätigen eines Schalters auf dem Wagen.

Vorteile:

- Automatisches an- und ablegen
- Erhöhte Sicherheit

Nachteile:

- Erhöhte Instandhaltungs- und Wartungskosten für den Wagen
- Wagen müssen umgebaut werden
- Teurer
- Aufwändige Steuerung
- Komplex
- Kann nicht am Bahnhof gelagert werden, muss am Wagen vorhanden sein.

Probleme:

- Wagen müssen umgebaut werden -> Kosten für Wagenhalter -> Widerstand
- Wenn der Wagen auf dem Hemmschuh steht, kann er nicht sofort automatisch abgelegt werden. Der Wagen muss erst vom Hemmschuh gezogen werden.

- Aufwendige Mechanik muss getestet werden.
- Muss zuverlässig die Schiene treffen -> geringe Toleranzen
- Mechanik muss den Kräften eines Aufpralls standhalten

Idee 5: Automatischer Trennhemmschuh

Wie ein normaler Trennhemmschuh, allerdings wird der Druck auf den Bock und auf die Kappe kontinuierlich gemessen, beim richtigen, anhaltenden Druck trennt sich der Bock von der Sohle.

Vorteile:

- Technik teilweise vorhanden
- Nicht viel größer/schwerer als normaler Hemmschuh
- Elektronische Kontrolle
- Wiederverwendbar

Nachteile:

- Elektronik erfordert Instandhaltung, Kontrolle und Wartung
- Elektronik ist teuer
- Nicht so robust wie Standardhemmschuh

Probleme:

- Elektronik muss witterungsbeständig und stoßfest sein
- Definition der Kraft, bei der getrennt wird ist äußerst wichtig
- Wiederverwendbarkeit nach dem Trennen
- Wie und wo wird der Druck gemessen?
- Unterscheidung Druck des Wagens und Druck des Tfz

Idee 6: Hemmschuh mit Sollbruchstelle und Auswurf

Wie ein konventioneller Hemmschuh, allerdings mit einer Sollbruchstelle in der gleisinneren Führungslasche. Auf die Schiene wird vor der ersten Weiche außen ein Keil aufgeschweißt, welcher beim Überfahren den Hemmschuh auseinanderzieht und so zerbricht. Dadurch wird der Hemmschuh auch ausgeworfen. Er ist danach nicht mehr nutzbar.

Vorteile

- Günstig
- Hemmschuh hält theoretisch größeren Kräften stand, da Bremsbock unverändert
- Einfacher in der Herstellung und Handhabung
- Entspricht in Größe, Gewicht und Form dem üblichen Hemmschuh

Nachteile

- Geringe Anpassungen an der Infrastruktur notwendig
- Einmalprodukt, nach Zerstörung nicht wiederverwendbar

Probleme

- Die auszuhaltende Kraft auf der Sollbruchstelle muss noch ermittelt werden
- Sollbruchstelle darf nicht bei Auffahren des Wagens brechen, sondern nur durch Spreizung (evtl. Sollbruchstelle nicht ganz durchziehen)
- Verleitet zu weniger Vorsicht in der Handhabung von Hemmschuhen
- Muss von Standardhemmschuh unterscheidbar sein, damit er nicht zum Abfangen von abgerollten Wagen verwendet wird (z.B.: andere Farbe)
- Für die Tests müssen einige Modelle konstruiert werden.

Aus diesen Ideen wurden in internen Workshops Wirkprinzipen abgeleitet, aus denen die Prototypen entwickelt wurden.

4 Anforderungen

Ein Hemmschuh, der sich nach 2 - 30 Meter Bremsfahrt selbstzerstört, schafft für dieses Problem Abhilfe, da sich dieser vor dem Erreichen der Weiche oder dem Übersteigen der Achse selbst zerstört. Dabei trennt sich der Bock, auf den die Achse auffährt von der Sohle und springt von der Schiene. Die darauffolgenden Räder können die Sohle gefahrenlos überfahren.

Der zu entwickelnde Hemmschuh hat die prinzipielle Funktion abgestellte Eisenbahnwagen vor dem Entrollen zu sichern. Der Impuls eines auf den gesicherten Wagen auflaufenden anderen Wagens muss dabei anstandslos ertragen werden. Sobald sich der Wagen jedoch signifikant in Bewegung setzt, soll sich der Hemmschuh selbstzerstören. Damit kann und darf diese Art von Hemmschuhen nicht für Abbremsvorgänge bei Verschub genützt werden, sondern nur zum Sichern abgestellter Eisenbahnwagen. Im Zuge der Selbstzerstörung werdend idealerweise sämtliche Elemente des Hemmschuhs vom Schienenstrang geschleudert. Eventuell auf den Schienen zurückbleibende Hemmschuhelemente können bis zu einem Anhebend des Rades von maximal 5cm über Schienenoberkante überrollt werden. Die prinzipiellen funktionellen Anforderungen an den zu entwickelnden Hemmschuh sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Anforderung	Wert
Radlast	19,6 kN - 110,5 kN
Raddurchmesser	920 mm – 840 mm
Bremsweg bis zur Selbstzerstörung	2 m – 30 m
Maximales Anheben des Rades	5 cm
Maximale Masse	8,4 kg

Tabelle 1: Prinzipielle funktionale Anforderungen an den selbstzerstörenden Hemmschuh

Die zentrale Frage bei der Entwicklung eines selbstzerstörenden Hemmschuhs ist jene nach einer geeigneten physikalischen Größe die den Zerstörungsprozess auslöst. Unabhängig vom Gewicht des zu sichernden Wagens und den äußeren Bedingungen wie Temperatur und Feuchtigkeit, muss der Prozess der Selbstzerstörung vor der ersten Weiche abgeschlossen sein.

4.1 Elemente des Hemmschuhs, Funktion und mechanische Verhältnisse

Die Analyse der mechanischen Verhältnisse am Hemmschuh geht der Frage nach den wirksam werden Effekten und damit nach den in Erscheinung tretenden physikalische Größen beim Sichern von Eisenbahnwagen mittels Hemmschuh nach. Es wird eine Aussage hinsichtlich der für eine Selbstzerstörung in Frage kommenden Größen angestrebt.

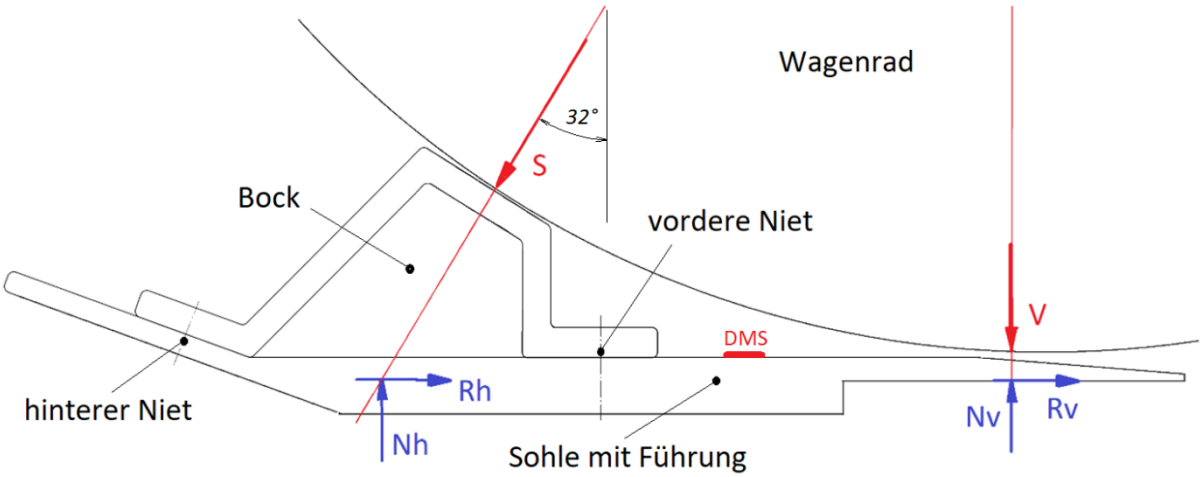


Abbildung 1: Mess-Hemmschuh mit appliziertem Dehnmessstreifen DMS: Elemente des Hemmschuhs mit mechanischen Verhältnissen

Entsprechend Abbildung 1 besteht ein Hemmschuh aus einer Sohle mit Führungen auf beiden Seiten und einem aufgenieteten Bock. Am abgebildeten Mess-Hemmschuh ist an der Sohlenoberseite ein Dehnmessstreifen appliziert. Mit den gemessenen Dehnungen können die abgeleiteten mechanischen Modelle verifiziert bzw. validiert werden. Das Wagenrad läuft auf die Sohle auf bis es vom Bock am Weiterlaufen gehindert wird. In weiterer Folge gleitet der Hemmschuh den Schienenstrang entlang. Die zwischen Schiene und Hemmschuh wirkende Reibkraft bremst den Wagen. Die Führungen leiten den Hemmschuh entlang des Schienenstranges und verhindern ein Herunterfallen. Dementsprechend hat ein klassischer Hemmschuh zwei Hauptfunktionen zu erfüllen:

Führen: Der Hemmschuh wird auf der Schiene geführt. Diese Funktion übernehmen die Führungen der Sohle.

Sichern: Der Hemmschuh übt auf das zu sichernde Rad eine Kraft aus. Diese Funktion übernimmt der Bock. Dabei stützt er sich über die beiden Nieten (vorderer Niet und hinterer Niet) auf der Sohle ab, die wiederum durch das Rad auf die Schiene gedrückt wird.

Statische Betrachtung:

Durch die Radsatzwelle sind die beiden Räder einer Achse miteinander drehstarr verbunden (Abbildung 2). Das Rad, welches auf den Hemmschuh aufläuft wird durch Reibung an den Kontaktstellen mit dem Hemmschuh gebremst. Die geometrischen Verhältnisse sind derart, dass die Radsatzwelle i.A. an der Rotation gehindert wird. Das gegenüberliegende Rad gleitet ohne zu rollen über die Schiene. Ein Hemmschuh entfaltet daher an beiden Rädern einer Radsatzwelle eine Bremswirkung. Dementsprechend wird ein Drehmoment vom Rad mit Schienenkontakt auf das am Hemmschuh aufliegende Rad übertragen. Im Hinblick auf ein einfaches mechanisches Modell wird dieser Effekt aber im Folgenden vernachlässigt. In Abbildung 1 wird ein einzelnes Rad ohne Radsatzwelle beim Auflaufen auf einen Hemmschuh und die sich dabei einstellenden Reaktionen betrachtet. Die Berücksichtigung der drehstarren Radsatzwelle im mechanischen Modell liefert nur unwesentlich andere Ergebnisse.

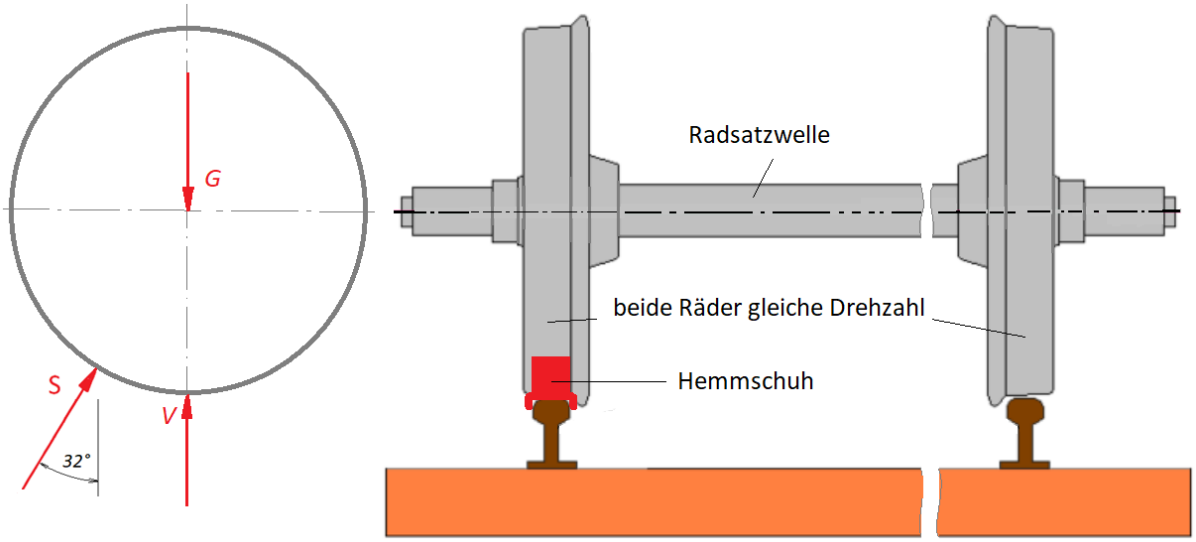


Abbildung 2: Die Radsatzwelle koppelt die beiden Räder mehr oder weniger drehstarr

Gleichgewicht des Wagenrads in vertikaler Richtung:

$$G = V + S \cdot \cos(32°) \rightarrow V = G - S \cdot \cos(32°)$$

(1)

Gleichgewicht in Schienenrichtung: $S \cdot \sin(32°) = G \cdot \mu \rightarrow S = \frac{G \cdot \mu}{\sin(32°)}$

(2)

Mit:
G… Radlast entspricht der halben Achslast
V… Vertikallast vom vorderen Bereich der Sohle,
S… Stützkraft vom Bock

Tabelle 2 zeigt die Extremwerte der Auswertung von (1) und (2) auf Basis des Radlastbereichs aus Tabelle 1.

Übersteigen des Hemmschuhs tritt auf, wenn die Vertikallast V→0:

$$V = G\left(1 - \frac{\mu}{\tan(32°)}\right) = 0 \rightarrow \mu_{max} = \tan(32°) = 0{,}62$$

Bis zu Reibwerten von μ_{max} wird der Hemmschuh vor dem Wagenrad hergeschoben. Für höhere Reibwerte oder bei einem Verklemmen des Hemmschuhs wird ein Übersteigen hingegen wahrscheinlich. Rad und Hemmschuh müssen geometrisch gut aufeinander abgestimmt sein. Geringe Änderungen in der Geometrie (Raddurchmesser vs. Hemmschuhabmessungen) verändern z.T. drastisch die Auflaufsituation entsprechend Abbildung 1. Große Raddurchmesser bzw. hohe Bauformen des Bocks oder kurze Sohlen verursachen ein Auflaufen auf den Bock bevor das Rad auf die Sohle aufläuft. Der Hemmschuh wird ohne Bremswirkung entfalten zu können von der Schiene geschleudert. Umgekehrt neigen niedrige Hemmschuhe dazu überstiegen zu werden.

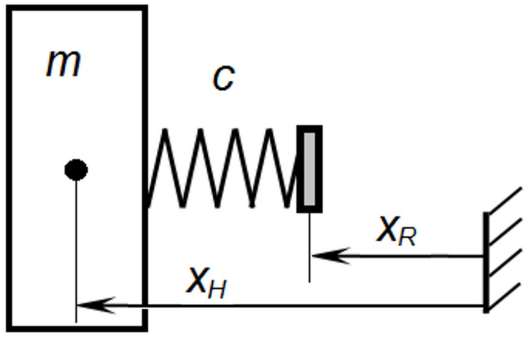
Extremwerte:

Radlast G [kN]	Reibwert μ	S [kN]	V [kN]
19,6	0,1	3,7	16,5
19,6	0,35	12,9	8,6
110,5	0,1	20,9	92,8
110,5	0,35	73	48,6

Tabelle 2: Auswertung des mechanischen Modells aus Abbildung 1, Extremwerte sind farblich gekennzeichnet

Dynamische Betrachtung:

Im Folgenden werden die dynamischen Verhältnisse beim Auflaufen eines starren Wagenrads mit der Geschwindigkeit v auf einen Hemmschuh grob abgeschätzt. Dabei wird einem starren Hemmschuh die Masse m zugewiesen. Die gesamte Verformung erfolgt im Kontaktbereich Hemmschuh-Wagenrad. Diese Situation wird durch eine lineare Feder mit der Steifigkeit c wie in Abbildung 3 abgebildet. Es handelt sich um ein Ein-Freiheitsgrad-Modell aus dem die zu erwartende Beschleunigung des Hemmschuhs abgeleitet wird.



Bewegungsgleichung des Hemmschuhs mit der Masse m:

$$m \cdot \ddot{x}_H = -c \cdot (x_H - x_R)$$

mit: $\omega^2 = \frac{c}{m}$

$$\ddot{x}_H + \omega^2 \cdot x_H = \omega^2 \cdot x_R$$

Abbildung 3: Starres Wagenrad rollt mit Geschwindigkeit v gegen den Hemmschuh mit der Masse m und der Steifigkeit c des Kontaktbereiches Hemmschuh-Wagenrad.

Das Rad bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit vorwärts: $x_R(t) = v \cdot t$

Damit, die Bewegungsgleichung des Hemmschuhs: $\ddot{x}_H + \omega^2 \cdot x_H = \omega^2 \cdot v \cdot t$

Lösungsansatz: $x_H(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t) + B \cdot \cos(\omega \cdot t) + v \cdot t$

Anfangsbedingung: $x_H(0) = 0, \ \dot{x}_H(0) = 0$

Bewegung des Hemmschuhs: $x_H(t) = v \cdot t - \frac{v}{\omega} \cdot \sin(\omega \cdot t)$

Die Kompression der Feder: $x = x_R - x_H = \frac{v \cdot \sqrt{m}}{\sqrt{c}} \cdot sin(\omega \cdot t)$

Die Kraft auf den Hemmschuh: $F = c \cdot x = v \cdot \sqrt{c \cdot m} \cdot sin(\omega \cdot t)$

Maximale Kraft auf den Hemmschuh: $F_{max} = v \cdot \sqrt{c \cdot m}$

Maximale Beschleunigung des Hemmschuhs: $a_{max} = v \cdot \omega$

Aus Beschleunigungsmessungen am Hemmschuh bzw. aus numerischen Analysen am Hemmschuh-CAD-Modell kann eine Steifigkeit c des Kontaktbereiches Hemmschuh-Wagenrad grob abgeschätzt werden. Entsprechend Tabelle 3 ergeben sich sehr steife Kontaktverhältnisse und damit eine enorme Beschleunigung des Hemmschuhs beim Auflaufen eines Wagenrades. Die Erkenntnisse dieser Einfachen mechanischen Analyse können durch das Experiment bestätigt werden, wobei bei Messungen mit sehr geringen Auflaufgeschwindigkeiten auf den begrenzten Messbereich des Sensors von 1000g Rücksicht genommen werden muss.

m [kg]	c [kN/mm]	ω [1/s]	F_{max} [kN]	a_{max} [m/s^2]
8,4	8000	30100	260	30100

Tabelle 3: Parameter und Ergebnisse der dynamischen Analyse beim Auflaufen eines starren Wagenrads auf einen Hemmschuh

4.2 Belastungen auf den Hemmschuh

Beim Aufrollen des Wagenrades entsprechend Abbildung 1 werden im Hemmschuh große Belastungen hervorgerufen. Im eingesetzten Messhemmschuh werden die Dehnungen an der Sohlenoberseite erfasst und in mechanische Spannungswerte umgerechnet. Damit kann zumindest qualitativ auf den zeitlichen Verlauf der auftretenden Belastungen geschlossen werden. Eine quantitative Aussage hinsichtlich der konkreten Kräfte zwischen Rad und

Hemmschuh bzw. zwischen Hemmschuh und Schiene gestaltet sich schwierig, da die Kontaktstellen nicht exakt genug erfasst werden können und bereits geringe Abweichungen einen großen Einfluss auf die mechanischen Zusammenhänge haben.

Auf Grund der Geometrie des Hemmschuhs wird seine Sohle beim Hemmvorgang auf Zug und Biegung belastet. Abbildung 4 zeigt die Auswirkungen des ersten Kontakts zwischen Wagenrad und Hemmschuh bei etwa 1,9 Sekunden nach Beginn der Messaufzeichnung. Der applizierte DMS erfasst zunächst eine konkave (nach oben gewölbte) Biegung der Sohle, mit zunehmendem Auflaufen Richtung Bock stellt sich eine konvexe (nach unten, gegen die Schiene gewölbte) Biegung der Sohle ein. Die Sohle wird an ihrer Oberseite gestaucht und der DMS erfährt eine negative Dehnung (Druck). Dem überlagert ist eine durch die Bremswirkung verursachte positive Dehnung (Zug). In Summe ergibt sich entsprechend Abbildung 4 eine negative Gesamtbelastung (Druck) an der Sohlenoberseite. Es zeigt sich, dass die maximalen Spannungen von etwa 100N/mm² in den ersten 500ms des Auflaufens auftreten. In dieser Zeit legt der Hemmschuh etwa einen Meter zurück.

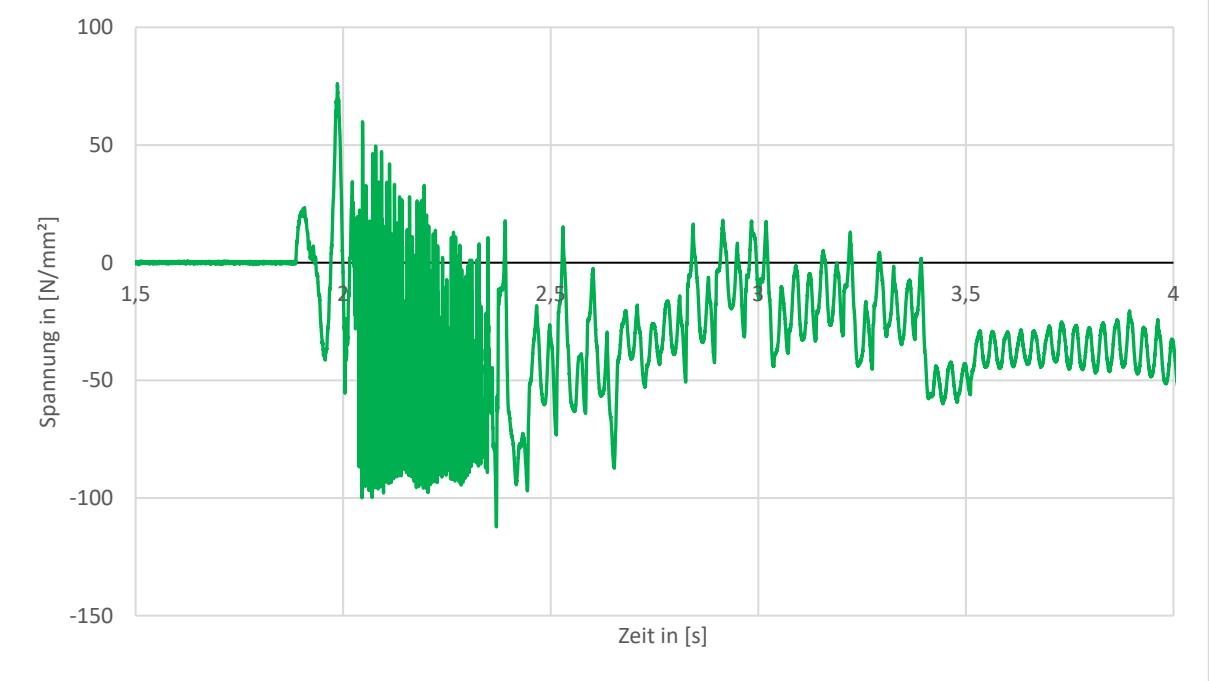


Abbildung 4: Ergebnis der DMS Messung an der Sohlenoberseite des Mess-Hemmschuhs nach Abbildung 1 beim Auflaufen eines Wagens, Radlast G≈90kN, Auflaufgeschwindigkeit v≈2m/s

4.3 Wirkprinzip selbstzerstörender Hemmschuh

Im Sinne einer geforderten Selbstzerstörung werden die beiden Hauptfunktionen des klassischen Hemmschuhs, Führen und Sichern, durch die Selbstzerstörung ergänzt. Ein nicht ordnungsgemäß entfernter Hemmschuh soll bei der Abfahrt des Zuges nach 2-30 Meter Bremsfahrt von der Gleisanlage weitestgehend entfernt werden. In einer verallgemeinerten Weise kann die Selbstzerstörung durch konstruktives Trennen der Elemente für das Führen und jener für das Sichern realisiert werden. Sind die Führungen der Sohle vom Bock getrennt und erfolgt keinerlei Kraftübertragung zwischen diesen Elementen, kann die Gesamtfunktion des Hemmschuhs nicht mehr erfüllt werden. Zentrale Frage in diesem Zusammenhang ist das Identifizieren einer geeigneten Trennstelle mit folgenden Kriterien:

- Die Trennstelle muss an einer hochbelasteten Stelle des Hemmschuhs liegen. Auf diese Weise kann das Öffnen zuverlässig ausgelöst und umgesetzt werden.
- Ausreichend große Trennfläche für stabile, aber lösbare Verbindung. Die großen Belastungen beim Auffahren des Wagens müssen über einen Bremsweg von mindestens zwei Meter ertragen werden.
- Elemente höher als 5 cm müssen nach dem Trennvorgang von der Schiene fallen

In weiterer Folge ist ein geeigneten Fügeverfahrens für Sohle und Bock zu entwickeln, sodass einerseits die großen mechanischen Belastungen beim Auffahren des Wagens ertragen werden, andererseits ein Öffnen innerhalb des gewünschten Bremswegs von 2-30 Meter umgesetzt wird.

Abbildung 5 zeigt den in seinen Funktionen bereits aufgelösten Hemmschuh: Die Sohle mit den Führungen ist vom Bock, der für das Sichern zuständig ist, bereits getrennt. Eine möglichst große Trennfläche erlaubt eine stabile Verbindung die bei Bedarf gelöst wird.

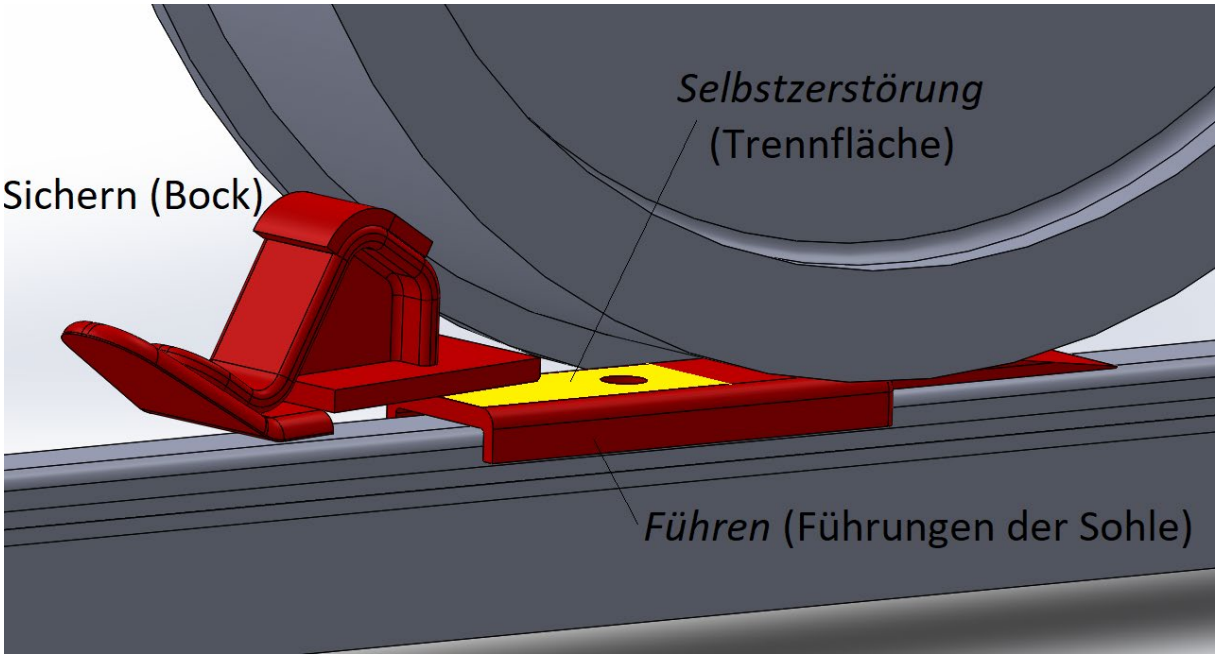


Abbildung 5: Funktionen des Hemmschuhs: Führen, Sichern und Selbstzerstörung. Der für das Sichern zuständige Bock ist von der Sohle mit ihren Führungen bereits getrennt.

Auf Basis von Versuchen, in welcher die Krafteinwirkungen und Wärmentwicklungen in einem vergessenen mitgeschliffenen Hemmschuh ermittelt wurden, konnten verschiedenen Wirkprinzipien für eine Selbstzerstörung entwickelt werden.

In zahlreichen Tests erfolgte die grundsätzliche Funktionalitätsprüfung der im Zuge des Innovationsprozesses entwickelten Wirkprinzipien. Diese Vortests fanden verteilt über einen einjährigen, Zeitraum unter realen Bedingungen am Gelände der Österreichische Gesellschaft für Eisenbahngeschichte in Ampflwang, Oberösterreich statt. Ideen die sich nicht empirisch bestätigen ließen wurden fallen gelassen, vielversprechende Wirkprinzipien wurden weiterentwickelt. Der Erkenntnisgewinn basiert auf Filmaufnahmen der Versuche, sowie auf der Begutachtung der Verschleiß- und Versagensspuren an eingesetzten Hemmschuh-Funktionsmustern.

Sohle und Bock werden konstruktiv voneinander getrennt und in weiter Folge durch ein nachgebendes Verfahren miteinander verbunden. Beim Öffnen der Verbindung wird die Sohle überrollt und der Bock vom Gleis geschoben. Unterschieden wird zwischen den Wirkprinzipien:

- Öffnen durch Gewaltbruch/Überlastung
- Thermisches Öffnen einer großflächigen Weichlötverbindung

- Öffnen durch Verschleiß
- Wegbasiertes Öffnen, kinematischer Mechanismus

Da sich der bestehende Hemmschuh über viele Jahre hinweg durch seine Zuverlässigkeit und Robustheit bewiesen und bewährt hat, soll der Hemmschuh in seiner Grundform nicht komplett neu definiert werden, sondern es sollen vielmehr zu dem bestehenden Prinzip die neue Funktion im Sinne einer „Selbstzerstörung“ implementiert werden.

4.3.1 Wirkprinzip Öffnen durch Gewaltbruch/Überlastung

Im Hinblick auf einen Hemmschuh der sich nach 2-30 Meter Bremsfahrt zerstört und sich von der Gleisanlage entfernt scheidet entsprechend Abbildung 3 das Wirkprinzip des Öffnens durch Gewaltbruch/Überlastung aus. Die maximalen Kräfte treten unmittelbar beim ersten Kontakt des Wagenrades mit dem Hemmschuh auf und würden die Selbstzerstörung zu früh auslösen.

4.3.2 Wirkprinzip Thermisches Öffnen einer großflächigen Weichlötverbindung

Die Zeitstandzugscherfestigkeit einer Weichlötverbindung nimmt mit der Dauer der Belastung und vor allem mit steigender Temperatur ab. Außerdem sind Weichlötverbindungen nicht für Schwingbeanspruchung geeignet. (Niemann Winter, 2019, Seite 221). Diese drei Effekte, insbesondere der thermische Einfluss auf die Festigkeit, werden für die angestrebte Selbstzerstörung nach 2-30 Meter Bremsfahrt ausgenutzt.

Der Bock wird über eine Weichlotverbindung mit der Sohle gefügt (Abbildung 7). Die Reibwirkung zwischen Schiene und Hemmschuh erwärmt zunächst lokal die Sohle. Thermokameramessungen zeigen besonders heiße Bereiche im vorderen Teil der Sohle, unter der Vertikallast V sowie unter dem vorderen Niet (Abbildung 6). Das Ausbreiten der Wärme im Hemmschuh benötigt Zeit. Dementsprechend wird die Fügestelle erst nach einer gewissen Verzögerung vom Wärmestrom erfasst. Belastungszeit und zunehmende Lastwechselzahlen unterstützen das Selbszerstörungsverhalten der Fügestelle im Zuge des Bremsvorganges.

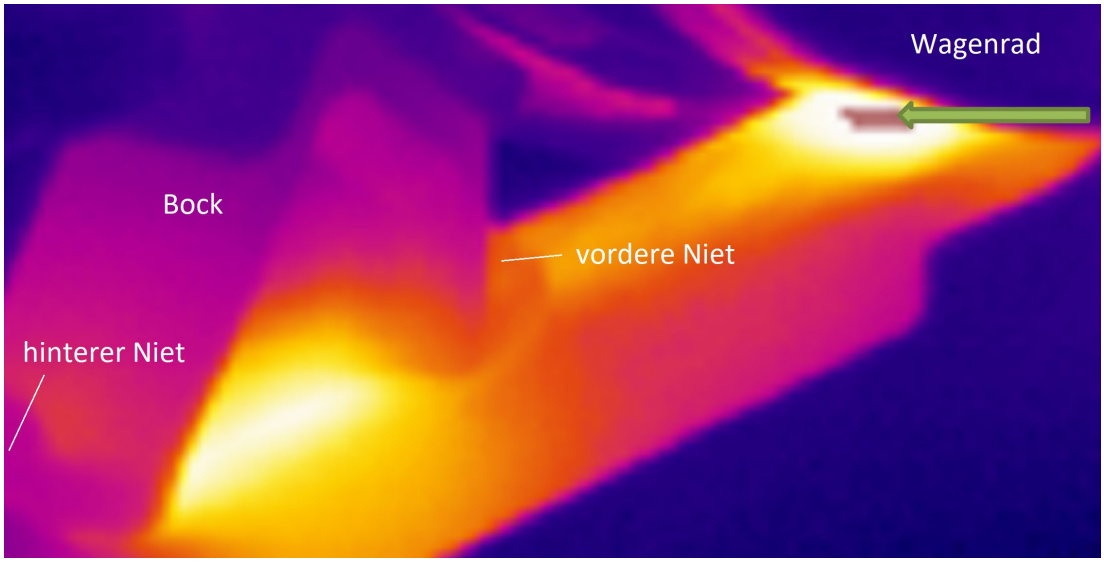


Abbildung 6: Gemessene Temperaturverteilung an der Hemmschuhoberfläche unmittelbar nach einem Abhemmvorgang: Je heller desto heißer, wobei die maximale Temperatur bei der vorliegenden Messung mit 120°C im vorderen Bereich der Sohle (Pfeil) gemessen wurde.

Unter den stark idealisierten Annahmen, dass

a) keine Wärme über die Schiene abgeführt wird, und

b) die Wärme sich schnell genug und gleichmäßig im Hemmschuh ausbreitet

liefert die Energiebilanz für den Hemmschuh dessen Erwärmung während der Bremsfahrt:

$$\Delta\vartheta \cdot m \cdot c = \mu \cdot G \cdot s$$

(3)

Auf der linken Seite von Gleichung (3) steht die innere Energie des Systems Hemmschuh, auf der rechten Seite steht die zugeführte Reibarbeit. Über die Extremwerte der Radlast *G* und des Reibkoeffizienten μ (Tabelle 2) kann die Länge der Bremsfahrt bis zum Öffnen der Fügestelle abgeschätzt werden.

$s_{min} = \frac{\Delta\vartheta_{min} \cdot m \cdot c}{\mu_{max} \cdot G_{max}}$ =9,8m $\qquad$ $s_{max} = \frac{\Delta\vartheta_{max} \cdot m \cdot c}{\mu_{min} \cdot G_{min}}$ =310m

Mit:

$\mu_{min}, G_{min}, \mu_{max}, G_{max}$ entsprechend Tabelle 2

$c = 452 \frac{J}{kg \cdot K}$ spezifisch Wärmekapazität von Eisen

$\Delta\vartheta_{min} = 100°K$ Temperaturerhöhung bis zum Öffnen der Fügestelle (Sommer)
$\Delta\vartheta_{min} = 160°K$ Temperaturerhöhung bis zum Öffnen der Fügestelle (Winter)
$m = 8{,}4kg$ Masse des Hemmschuhs

Obige Abschätzung liefert theoretische Grenzen für stark idealisierte Annahmen. Simulationsrechnungen zeigen, dass die geringe Wärmeausbreitungsgeschwindigkeit im Hemmschuh zu einer Erhöhung von s_{min} und zu einer Reduktion von s_{max} führen. Die Wäremeausbreitung bis zum Erreichen der Fügestelle benötigt Zeit, daher wird, in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit auch bei hohen Radlast- und Reibwerten ein gewisser Weg bis zum thermischen Öffnen zurückgelegt. Die gegenteiligen Auswirkungen der begrenzten Wäremausbreitungsgeschwidigkeit kommen bei niedrigen Radlast- und Reibwerten zum Tragen: Die relativ nahe an der Wärmequelle liegende Fügestelle wird lokal früher die Versagenstemperatur erreichen, als dies für den gesamten Hemmschuh berechnet.

Weichlötverbindungen werden wegen ihrer begrenzten Festigkeit als Überlappungsstöße mit großer Fügefläche ausgeführt. Dieser Forderung entsprechend kann das in Abbildung 7 dargestellte Konzept abgeleitet werden.

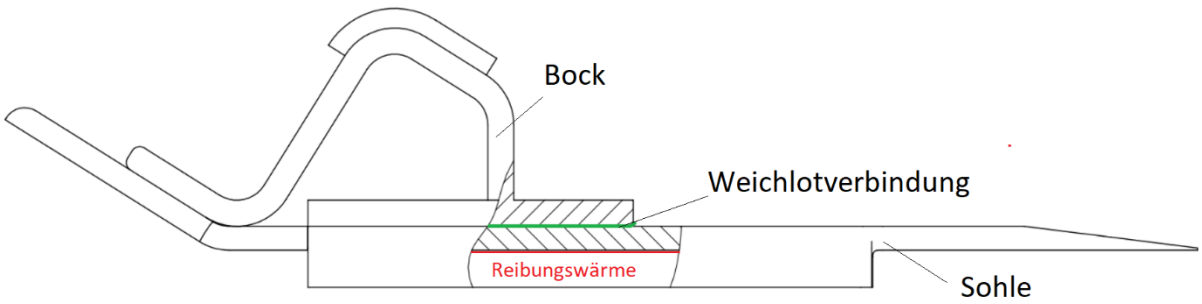


Abbildung 7: Wirkprinzip Thermisches Öffnen einer großflächigen Weichlötverbindung (grün)

Zug- und Torsionsversuche liefern für die eingesetzte Lötverbindungen von zwei Stahlteilen unter den zur Verfügung stehenden Werkstattverhältnissen (Oberflächenbehandlung, Entfettung, Lot, Flussmittel, Wärmequelle,…) eine Schubfestigkeit von $\tau_{max} \approx 17\frac{N}{mm^2}$ bei Raumtemperatur. Niemann Winter, 2019, Seite 221 bestätigt diese Größenordnung und gibt Informationen bezüglich des Festigkeitsabfalls mit der Temperatur und der Belastungsdauer. Bei 110°C reduziert sich die Festigkeit der Weichlotverbindung auf etwa ein Drittel der

Festigkeit bei Raumtemperatur. Der explizite Zeiteinfluss ist für die kurzzeitige Belastung beim Sichern ohne Bedeutung.

Fügefläche: $A_F = 150mm \cdot 60mm - \frac{(25mm)^2 \cdot \pi}{4} \approx 8500mm^2$

Maximale Nennlast die von der Fügefläche übertragbaren wird: $H_{max} = \tau_{max} \cdot A_f \approx 145kN$

Sicherheit gegen Gewaltbruch: $\gamma_L = \frac{H_{max}}{\mu_{max} \cdot G_{max}} = 3{,}7$

4.3.3 Wirkprinzip Öffnen durch Verschleiß

Eine konische Bolzenverbindung nutzt das mechanische Prinzip der schiefen Ebene. Die auf den Bock wirkende horizontale Bremskraft H_B induziert, in Abhängigkeit von den Geometrie- und Reibverhältnissen, eine axiale Bolzenkraft F (Abbildung 9). Bei geeigneter Auslegung kann die hohe Kraft H_B in eine kleiner Kraft F übersetzt werden. Diese Kraft F wird von einer verschleißenden Scheibe in der Kontaktzone Sohle-Schiene aufgenommen (Abbildung 8). Bei ausreichendem Verschleiß bzw. Festigkeitsverlust durch die Reibwirkung öffnet die Bolzenverbindung.

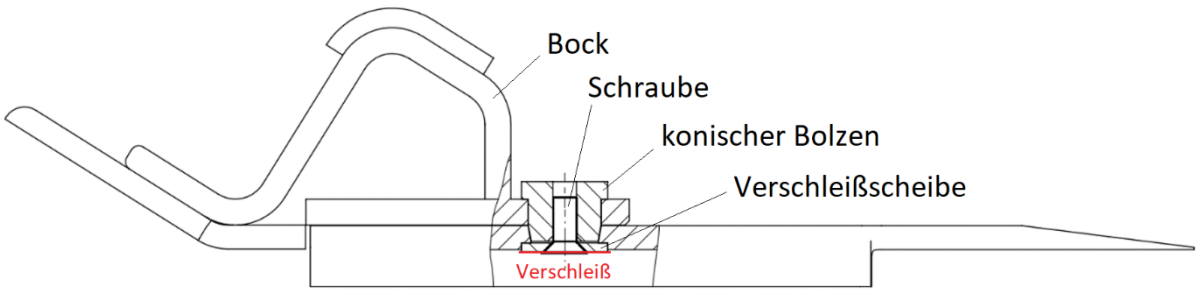
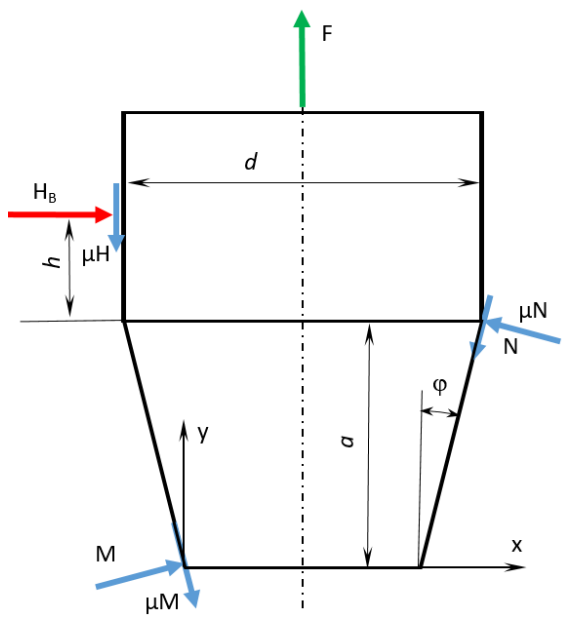


Abbildung 8: Wirkprinzip Öffnen durch Verschleiß: konische Bolzenverbindung mit geschraubter Verschleißscheibe



Die Gleichgewichtsbedingungen für den konischen Bolzen liefern einen Zusammenhang zwischen der horizontalen Bolzenkraft H_B und der vertikalen Kraft F die nötig ist um den Bolzen aus der Verbindung zu entfernen.

$$F = \frac{H_B \cdot (p1 \cdot p3 - p4)}{p2 \cdot p3 - p5}$$

Mit:

$$p1 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\mu}{sin\varphi - \mu \cdot cos\varphi} + \frac{1}{cos\varphi + \mu \cdot sin\varphi} \right)$$

$$p2 = \frac{1}{2 \cdot (sin\varphi - \mu \cdot cos\varphi)}$$

$$p3 = \left(cos\varphi \cdot a + sin\varphi \cdot (d - a \cdot tan\varphi) - \mu \cdot cos\varphi \cdot (d - 2 \cdot a \cdot tan\varphi) \right)$$

$$p4 = a + h - \mu \cdot a \cdot tan\varphi$$

$$p5 = \left(\frac{d}{2} - a \cdot tan\varphi \right)$$

Abbildung 9: Wirkprinzip Öffnen durch Verschleiß: mechanische Verhältnisse am konischen Bolzen

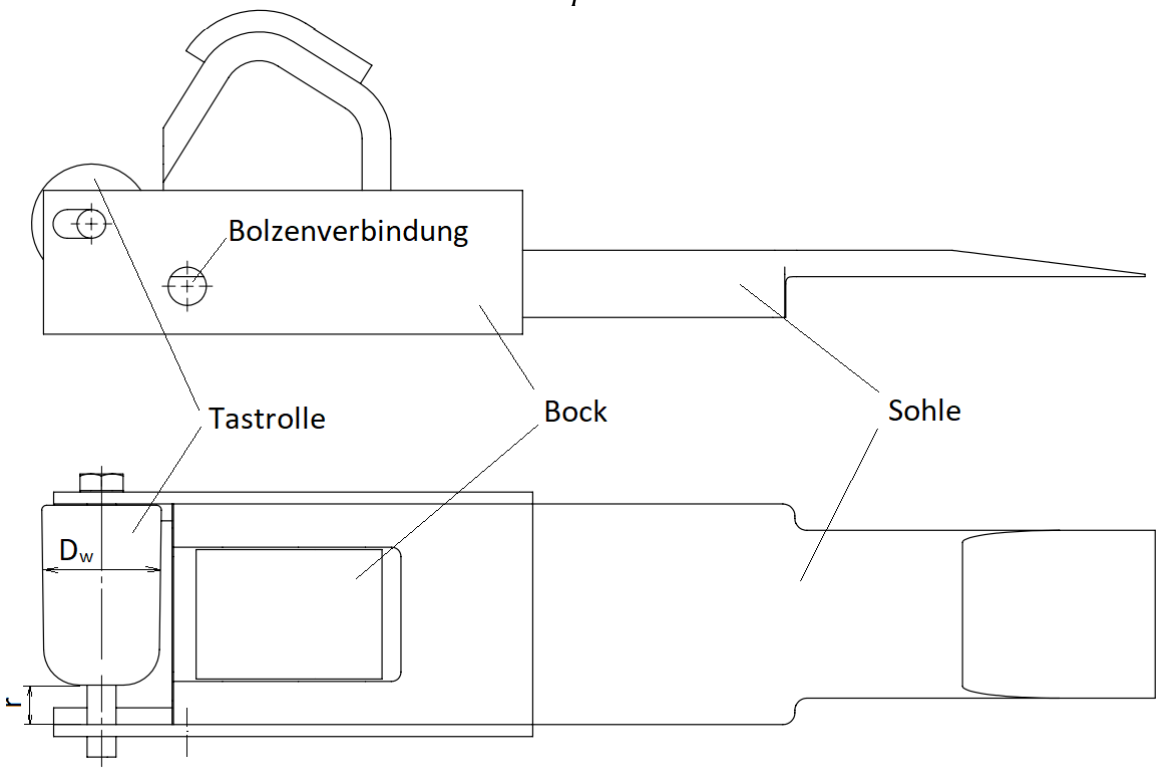
Die Verbindung wird so ausgelegt, dass sich eine vertikalen Kraft F≤0 einstellt die von der unbeschädigten Verschleißscheibe leicht ertragen werden kann. Die konstruktiven Parameter sind dabei insbesondere der Bolzendurchmesser d sowie der Konuswinkel φ. Eine Vorhersage bezüglich der Länge der Bremsfahrt bis zum Öffnen der Verbindung ist schwierig. Die Auswahl unterschiedlicher Materialien und Stärken bei der Verschleißscheibe ermöglicht eine empirische Anpassung.

4.3.4 Wirkprinzip Wegbasiertes Öffnen, kinematischer Mechanismus

Die Eigenschaft des Gewindes eine Umfangskraft in eine größere Längskraft umzusetzen wird genutzt, um ein wegbasiertes Öffnen durch einen kinematischen Mechanismus zu realisieren. Die Steigung des Gewindes P und der Durchmesser der Tastrolle D_w bestimmen dabei den Bremsweg bis zum Öffnen der Verbindung Bock-Sohle. Der Bock wird über eine Bolzenverbindung mit der Sohle gefügt (Abbildung 10). Sobald die Tastrolle die nutzbare Gewindelänge r durchlaufen hat, wird der Bolzen des Bocks aus der Bohrung der Sohle

gedrückt. Die Sohle wird vom Wagenrad überrollt und der Bock vom Gleis geschoben. Die konische Kontur der Tastrolle unterstützt das Abfallen des Bocks vom Gleis. Im Gegensatz zu den beiden anderen Wirkprinzipien ist der kinematische Mechanismus unabhängig von der Radlast G.

$$s = \frac{r \cdot D_w \cdot \pi}{P} = 2{,}5m$$



4.4 Wirtschaftliche Bewertung der unterschiedlichen Lösungskonzepte

Der vielfach eingesetzte Einheitshemmschuh mit durchgehender Sohle besteht im Wesentlichen aus den beiden Schmiedeteilen Sohle und Bock die miteinander vernietet sind (Abbildung 1). Er hat sich über viele Jahre hinweg durch seine Zuverlässigkeit und Robustheit bewährt. Hinsichtlich der Akzeptanz einer Weiterentwicklung mit Selbstzerstörungsfunktion wird es als nicht zielführend angesehen weder die Grundform noch die eingesetzten Werkstoffe oder die grundsätzlichen Fertigungsverfahren neu zu definieren. Dementsprechend bleiben die Hauptfunktionen ‚Führen‘ und ‚Sichern‘ durch die Originalteile

Sohle und Bock erfüllt. Die aus dem Innovationsprozess hervorgehenden Wirkprinzipien für die geforderte Funktion ‚Selbstzerstörung' zielen auf ein nachgebendes Fügeverfahren anstelle der Nietverbindung ab. Die Kombination der bewährten Hemmschuhelemente mit unterschiedlichen nachgebenden Fügeverfahren führt auf drei Lösungskonzepte die Form von Prototypen realisiert werden:

- Thermisches Öffnen einer großflächigen Weichlötverbindung
- Öffnen durch Verschleiß
- Wegbasiertes Öffnen, kinematischer Mechanismus

Tabelle 4 listet die Arbeitsschritte und den jeweiligen Zeitaufwand für die Fertigung des Prototyps ‚Thermisches Öffnen', Tabelle 5 für , Öffnen durch Verschleiß' und Tabelle 6 für ‚Wegbasiertes Öffnen'. Es wurden 5 Prototypen von jedem Wirkprinzip angefertigt. In Summe wurden also 15 selbstzerstörende Hemmschuhe gefertigt.

Arbeitsschritte für *‚Thermisches Öffnen'*	Arbeitszeit [h]
Arbeitsvorbereitung und Engineering	1
Teile vorbearbeiten mit DMG	1
Teile trennen und auf Maß schneiden	1
Oberteil fräsen	0,5
Zwischenplatte auf Maß fräsen	0,5
Vorbereitung zum Schweißen	0,5
Zwischenplatte auf Oberteil schweißen	0,5
Sohle sandstrahlen	1
Oberteil auf Sohle löten (Annahme)	1
Teile reinigen und lackieren	1
Arbeitszeit gesamt ‚Thermisches Öffnen'	**8**

Tabelle 4: Prozesskette für die Prototyperstellung ‚Thermisches Öffnen einer großflächigen Weichlötverbindung'

Arbeitsschritte für ‚Öffnen durch Verschleiß'	Arbeitszeit [h]
Arbeitsvorbereitung und Engineering	1
Teile vorbearbeiten mit DMG	1
Teile trennen und auf Maß schneiden	1
Oberteil fräsen	0,5
Zwischenplatte auf Maß fräsen und Bohrung fertigen	0,7
Vorbereitung zum Schweißen	0,5
Zwischenplatte auf Oberteil schweißen	0,5
Sohle bearbeiten/ Kegelbohrung und Senkung fräsen mit Programmieren	1,5
Kegelbolzen anfertigen	1
Teile montieren	0,5
Teile reinigen und lackieren	1
Arbeitszeit gesamt ‚Öffnen durch Verschleiß'	**9,2**

Tabelle 5: Prozesskette für die Prototyperstellung ‚Öffnen durch Verschleiß'

Arbeitsschritte für ‚Wegbasiertes Öffnen'	Arbeitszeit [h]
Arbeitsvorbereitung und Engineering	1
Teile vorbearbeiten mit DMG	1
Teile trennen und auf Maß schneiden	1
Oberteil fräsen	0,5
Zwischenplatte auf Maß fräsen	0,5
Vorbereitung zum Schweißen	0,5
Zwischenplatte auf Oberteil schweißen	0,5
Seitenteile gefräst	1,5
Seitenteile auf Zwischenplatte geschweißt	0,5
Sicherungsnut in die Sohle gefräst	0,5
Sicherungsbolzen anfertigen	0,5
Sicherungsbolzen verschweißen	0,5
Kegelrolle anfertigen	1
Gewindestange auf Maß schneiden	0,5
Kegelrolle positionieren und verschweißen	0,5
Teile reinigen und lackieren	1

Arbeitszeit gesamt für ‚Wegbasiertes Öffnen'	**11,5**

Tabelle 6: Prozesskette für die Prototyperstellung ‚Wegbasiertes Öffnen'

5 Feldtest

Der Nachweis der Wirkung der Hemmschuh-Demonstratoren wird am 14.9.2021 zwischen 09:30 und 14:00 Uhr mittels Feldtests auf einem Nebengleis im Lokpark Ampflwang durchgeführt.

Ziel des Versuchs war die Überprüfung der Wirkweisen der selbstzerstörenden Hemmschuhe. Dabei sollten sich die Hemmschuhe nach Anfahren des Zuges innerhalb der durch die Anforderungen (Tabelle 1) definierten Distanz selbst zerstören. Die Hypothese besagt, dass ein Entgleisen des Zuges oder ein Verklemmen des Hemmschuhs im Weichenherz verhindert werden kann, wenn ein vergessener Sicherungshemmschuh sich beim Anfahren des Zuges selbst zerstört.

Für die Versuche wurde seitens der ÖGEG ein Triebfahrzeug der Baureihe 2067, ein Triebfahrzeugführer, ein Verschubleiter, ein zweiachsiger Personenwagen und ein beladener, zweiachsiger Güterwagen zur Verfügung gestellt. Die nachfolgende Abbildung zeigt ein Luftbild der Örtlichkeit mit dem markierten Versuchsgleis:

Abbildung 11: Lokpark Ampflwang mit markiertem Versuchsgleis[1]

5.1 Messmittel

Für die Dokumentation der Versuche wurden zwei Kameras vom Typ GoPro Hero 9 und GoPro Hero 4 verwendet. Diese Kameras wurden an folgenden Punkten wechselweise fixiert:

- Verschiebertritt des Güterwagens
- Seitenwand des Personenwagens
- Stativ am Gleisrand

Für die zeitlichen Messungen wurden die Videoaufnahmen der Kameras herangezogen. Die räumliche Messung erfolgte durch Zählen der überfahrenen Schwellen. Als Schwellenabstand werden 80 Zentimeter (Schwelle + Abstand der Schwellen untereinander) herangezogen.

5.2 Versuchsaufbau

Bei den Versuchen wurden drei Arten von selbstzerstörenden Hemmschuhen mit unterschiedlichen Wirkungsweisen getestet. Die Versuche erfolgten mit zwei unterschiedlichen Wagen: einem beladenen, zweiachsigen Güterwagen mit 21 Tonnen

[1] Abbildung entnommen aus: Apple (Hg.): Maps. URL: https://www.apple.com/maps/ [Stand: 07.10.2021].

Achslast, und einem leeren zweiachsigen Personenwagen mit 7,5 Tonnen Achslast. Jeder Versuch wurde wiederholt, so dass insgesamt 12 Versuche durchgeführt wurden. Der Testzug bestand aus einem Triebfahrzeug der Baureihe 2067 welche im ersten Teil mit dem zweiachsigen Güterwagen alleine gekuppelt wurde. Der jeweils getestete Hemmschuh wurden dabei unter der ersten Achse des Güterwagens auf der, in Fahrtrichtung gesehen, linken Gleisachse aufgelegt. Im zweiten Teil der Verschsreihe wurde nach dem Güterwagen der zweiachsige Personenwagen hinter den Güterwagen gekuppelt. Die Hemmschuhe wurden dabei, analog zum ersten Teil, an der ersten Achse des Personenwagens aufgelegt. Abbildung 12 zeigt die eben beschriebenen Kompositionen mit der jeweiligen Lage des Hemmschuhs:

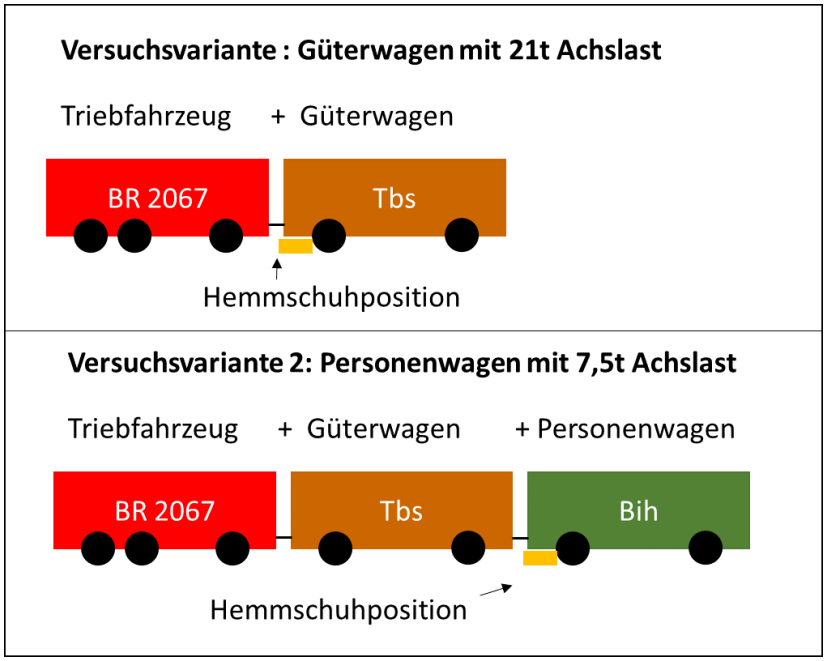


Abbildung 12: Schematische Abbildung des Versuchsaufbaus

5.3 Versuchsablauf

Der Hemmschuh wurde von Hand so weit wie möglich unter die jeweils erste Achse des getesteten Wagens geschoben. Dann wurde mit dem Triebfahrzug so angefahren, wie dies auch im Regelbetrieb geschehen würde. Der Zug hielt erst an, wenn sich entweder der Hemmschuh zerstört oder das Ende des sicher befahrbaren Bereiches erreicht wurde. Dabei wurde mit jeder Hemmschuhvariante der Versuch einmal wiederholt, also in Summe zweimal am Güterwagen mit den drei Varianten und zweimal am Personenwagen mit jeder Variante.

5.4 Versuchsdurchführung und Ergebnisse

Tabelle 7 zeigt den jeweiligen Versuch und die benötigte Distanz und Zeit bis zur Zerstörung des jeweiligen Hemmschuhs. Dabei wurden für die jeweiligen Hemmschuhbauarten folgende Namen vergeben:

- thermisch: Thermisches Öffnen einer großflächigen Weichlötverbindung
- verschleiß: Öffnen durch Verschleiß
- kinematisch: Wegbasiertes Öffnen, kinematischer Mechanismus

Einflussgrößen	Zielgröße
Hemmschuhbauart (thermisch, verschleiß, kinematisch) Radlast G (105kN, 37kN)	Distanz bis zur Selbstzerstörung

Jeder Versuch wird einmal wiederholt.

NR.	HEMMSCHUH	RADLAST [KN]	DISTANZ [M]	ZEIT [S]	BOCK	ANMERKUNGEN
1	kinematisch	105	3,2	-	Ja	keine Videoaufzeichnung
2	kinematisch	105	2,4	3	Ja	
3	thermisch	105	12,8	8	Ja	
4	thermisch	105	19,2	12	Ja	
5	verschleiß	105	0,8	1	Ja	
6	verschleiß	105	1,6	4	Ja	
7	kinematisch	37	2,4	3	Ja	
8	kinematisch	37	2,4	3	Ja	Bock fällt erst bei Stillstand von der Schiene
9	thermisch	37	2,4	2	Ja	Nicht korrekt verlötet
10	thermisch	37	71,2	22	Ja	Erst bei Anhalten des Zuges zerstört
11	verschleiß	37	77,6	-	Nein	Nicht zerstört, 97 Schwellen = Länge des Versuchsgleises

12	verschleiß	37	1,6	3	Ja	Verschleißstelle fester angezogen

Tabelle 7: Auswertung des mechanischen Modells aus Abbildung 1, Extremwerte sind farblich gekennzeichnet. [2]

- Versuch 1 bestand aus dem Auffahren des schweren Wagens auf den Hemmschuh ‚Wegbasiertes Öffnen'. Der Hemmschuh hat sich nach 3,2 Metern selbst zerstört.
- Versuch 2 ist die Wiederholung von Versuch 1. Diesmal hat sich der Hemmschuh nach 2,4 Metern bzw. drei Sekunden selbst zerstört.
- Versuch 3 bestand aus dem Auffahren des schweren Wagens auf den Hemmschuh ‚Thermisches Öffnen'. Der Hemmschuh hat sich nach 12,8 Metern bzw. acht Sekunden selbst zerstört.
- Versuch 4 ist die Wiederholung von Versuch 3. Diesmal hat sich der Hemmschuh nach 19,2 Metern bzw. zwölf Sekunden selbst zerstört.
- Versuch 5 bestand aus dem Auffahren des schweren Wagens auf den Hemmschuh ‚Öffnen durch Verschleiß'. Der Hemmschuh hat sich nach 0,8 Metern bzw. eine Sekunde selbst zerstört.
- Versuch 6 ist die Wiederholung von Versuch 5. Diesmal hat sich der Hemmschuh nach 1,6 Metern bzw. vier Sekunden selbst zerstört.
- Versuch 7 bestand aus dem Auffahren des leichten Wagens auf den Hemmschuh ‚Wegbasiertes Öffnen'. Der Hemmschuh hat sich nach 2,4 Metern bzw. drei Sekunden selbst zerstört.
- Versuch 8 ist die Wiederholung von Versuch 7. Diesmal hat sich der Hemmschuh nach 2,4 Metern bzw. drei Sekunden selbst zerstört. Bei diesem Versuch fiel allerdings erst nach Stillstand des Zuges der Bock korrekt von der Schiene.
- Versuch 9
- Versuch 9 bestand aus dem Auffahren des leichten Wagens auf den Hemmschuh ‚Thermisches Öffnen'. Der Hemmschuh hat sich nach 2,4 Metern bzw. zwei Sekunden selbst zerstört.
- Bei diesem Versuch war allerdings beim Hemmschuh die Lötverbindung zwischen Bock und Sohle nicht korrekt verlötet, weshalb sich der Bock früher löste.
- Versuch 10

[2] Vgl. Graf, Philipp: Versuchsaufzeichnungen Aufstellung. St. Pölten 2021.

- Versuch 10 ist die Wiederholung von Versuch 9. Diesmal hat sich der Hemmschuh nach 71,2 Metern bzw. 22 Sekunden selbst zerstört. Bei diesem Versuch musste der Zug am Ende bremsen, um nicht mit dem intakten Hemmschuh in die Weiche einzufahren. Erst während dieses Bremsvorganges hat sich der Hemmschuh selbst zerstört.
- Versuch 11 bestand aus dem Auffahren des leichten Wagens auf den Hemmschuh ‚Öffnen durch Verschleiß'. Der Hemmschuh hat sich auch nach einer Strecke von77,6 Metern nicht selbst zerstört. Der Versuch musste nach dieser Distanz abgebrochen werden, um die Weiche nicht zu beschädigen und um ein Entgleisen des Zuges zu verhindern.
- Versuch 12 ist die Wiederholung von Versuch 11. Diesmal hat sich der Hemmschuh nach 1,6 Metern bzw. drei Sekunden selbst zerstört. Bei diesem Versuch wurde die Verschleißstelle des Hemmschuhes ‚Öffnen durch Verschleiß' fester angezogen.

5.5 Fotodokumentation ‚Wegbasiertes Öffnen'

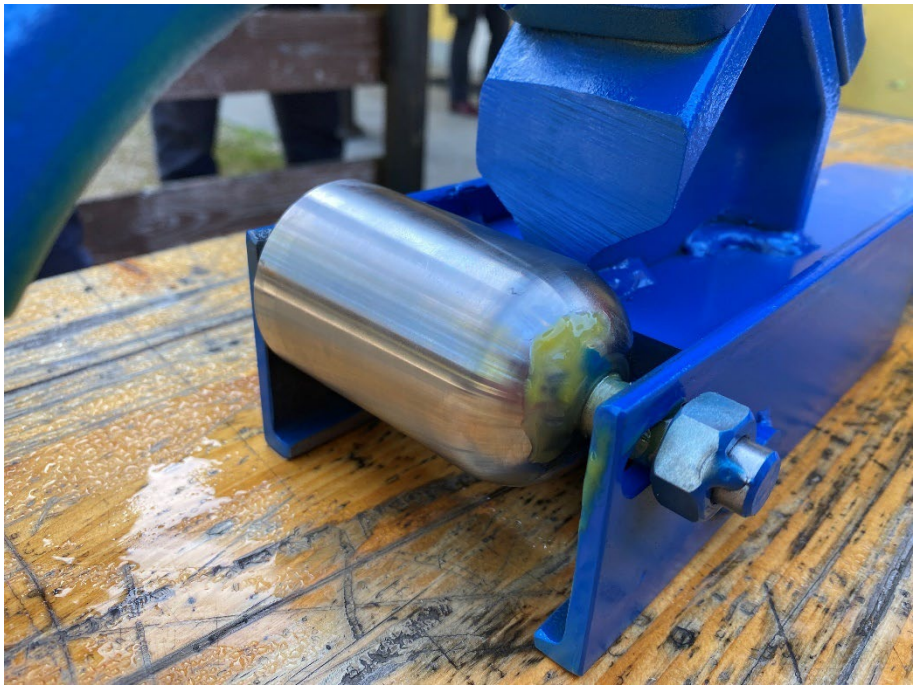


Abbildung 13: Hemmschuh „Wegbasiertes Öffnen" - Grundzustand

Der Hemmschuh zerstört sich durch die zurückgelegte Wegstrecke.

Der in **Abbildung 13** gut erkennbare Zylinder liegt auf der Schiene auf. Darin verläuft eine Schraube mit einem Gewinde. Durch das Drehen des Zylinders bewegt sich dieser auf dem Gewinde auf eine Seite und drückt so die Führungen, welche den Bock auf der Sohle halten, auseinander. Der Zylinder hat eine leichte Konizität, welche das Abspringen von der Schiene erleichtern soll.

Abbildung 14: Hemmschuh „Wegbasiertes Öffnen“ – Vor Versuch

Abbildung 15: Hemmschuh „Wegbasiertes Öffnen“ – Nach Versuch

5.6 Fotodokumentation ‚Thermisches Öffnen‘

Abbildung 16: Hemmschuh „Thermisches Öffnen“ - Grundzustand

Bei diesem Wirkprinzip wurde der Bock mit der Sohle mittels einer Schicht Lötzinn zusammengelötet.

Durch die bei der Bewegung des Hemmschuhs entstandene Reibungswärme schmilzt diese Schicht und der Hemmschuh zerstört sich.

Abbildung 17: Hemmschuh „Thermisches Öffnen“ – Vor Versuch

Abbildung 18: Hemmschuh „Thermisches Öffnen“ – Nach Versuch

5.7 Fotodokumentation ‚Öffnen durch Verschleiß‘

Abbildung 19: Hemmschuh „Öffnen durch Verschleiß“ - Grundzustand

Der schwarze Hemmschuh nutzt den Verschleiß der in **Abbildung 19** sichtbaren, silbernen Platte für die Selbstzerstörung. Diese schleift sich beim Anfahren des Zuges ab, wodurch der Konus, welcher den Bock festhält, rausspringt und der Bock sich löst.

Abbildung 20: Hemmschuh „Öffnen durch Verschleiß“ – Vor Versuch

Abbildung 21: Hemmschuh „Öffnen durch Verschleiß“ – Nach Versuch

5.8 Versuchszusammenfassung

Am 14.9.2021 fand im Lokpark Ampflwang eine Versuchsreihe zur Feststellung der Effektivität von drei verschiedenen Wirkungsweisen eines selbstzerstörenden Hemmschuhs statt. Die drei Wirkungsweisen sind die zurückgelegte Distanz (‚Wegbasiertes Öffnen'), Verschleiß (‚Öffnen durch Verschleiß') und Hitze durch Reibungsenergie (‚Thermisches Öffnen'). Die Versuche wurden mit einem Testzug bestehend aus einem Triebfahrzeug der Baureihe 2067, einem beladenen, zweiachsigen Güterwagen mit 21 Tonnen Achslast und einem leeren, zweiachsigen Personenwagen mit 7,5 Tonnen Achslast. Jede Wirkungsweise wurde mit jedem Wagen zweimal getestet, weshalb insgesamt zwölf Versuche durchgeführt wurden. Nur bei einem der Versuche, Hemmschuh ‚Öffnen durch Verschleiß' mit leichtem Wagen hat sich der Hemmschuh nicht selbst zerstört. Dies ist allerdings auf eine nicht fest genug angezogene Schraube an der Verschleißstelle zurückzuführen. Insgesamt ist die Wirkungsweise des Verschleißes die beste Wahl, da die Wirkungsweise der Distanz technisch zu aufwendig und die Wirkungsweise der Reibungswärme abhängig von der Achslast ist.

5.9 Empfehlungen

Die Ergebnisse des Versuches zeigen, dass sich der **Hemmschuh ‚Thermisches Öffnen'** am besten als selbstzerstörender Hemmschuh eignet. Dieser Hemmschuh benötigte bis auf Versuch 11 die kürzeste Distanz für eine Selbstzerstörung und ist technisch einfacher aufgebaut als der Hemmschuh ‚Wegbasiertes Öffnen'.

Die Versuche wurden an Prototypen unter Laborbedingungen durchgeführt. Dementsprechend sind die Aussagen unter diesen Randbedingungen gültig.

Als nächster Schritt wird die Herstellung einer Kleinserie des Hemmschuhs **‚Thermisches Öffnen'** empfohlen. Mit diesen müssen dann unterschiedliche Versuche in einer realen Umgebung (z.B. Verschubbahnhof) und unter unterschiedlichen Bedingungen (Fahrzeuge, Wetter, Lage, usw.) durchgeführt werden. Aus den daraus gewonnen Erkenntnissen lassen sich dann die finalen Anforderungen für die Herstellung des Hemmschuhs ableiten.

5.10 Anforderung Zertifizierung

Im Sinne des Antrags ist eine Dokumentation der Ergebnisse vorgesehen, die für eine Zertifizierung notwendig ist. Da laut den Empfehlungen vor einer Zertifizierung noch Versuche mit einer Kleinserie durchzuführen sind, sollen hier zunächst die bisherigen Daten für diesen Hemmschuh zusammengefasst werden und als Basis für die folgenden Schritte dargestellt werden.

Das Konstruktionsprinzip:

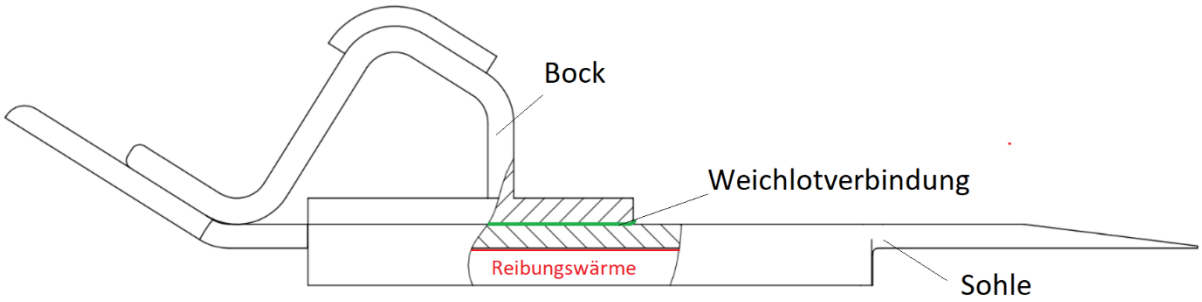


Abbildung 22: Wirkprinzip Thermisches Öffnen einer großflächigen Weichlötverbindung (grün)

Die prinzipiellen Anforderungen sind:

- Radlast: 19,6 kN - 110,5 kN
- Raddurchmesser: 920 mm – 840 mm
- Bremsweg bis zur Selbstzerstörung:2 m – 30 m
- Maximales Anheben des Rades: 5 cm
- Maximale Masse: 8,4 kg
- Steifigkeit c des Kontaktbereiches Hemmschuh-Wagenrad: 8000 kN/mm

6 Literatur

- EP 0 217 382 A2, Hemmschuh für Eisenbahnwagen: Behandelt einen Hemmschuh aus Gusseinsen mit Kugelgraphit zur Verringerung der Reibung zwischen Hemmschuh und Schiene

- Niemann Winter, 2019, (Seite 221), Abhängigkeit der Festigkeit von Belastungsdauer, Temperatur und Lastwechselanzahl

7 Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Prinzipielle funktionale Anforderungen an den selbstzerstörenden Hemmschuh 12
Tabelle 2: Auswertung des mechanischen Modells aus Abbildung 1, Extremwerte sind farblich gekennzeichnet 16
Tabelle 3: Parameter und Ergebnisse der dynamischen Analyse beim Auflaufen eines starren Wagenrads auf einen Hemmschuh 17
Tabelle 4: Prozesskette für die Prototyperstellung ‚Thermisches Öffnen einer großflächigen Weichlötverbindung' 27
Tabelle 5: Prozesskette für die Prototyperstellung ‚Öffnen durch Verschleiß' 28
Tabelle 6: Prozesskette für die Prototyperstellung ‚Wegbasiertes Öffnen' 29
Tabelle 7: Auswertung des mechanischen Modells aus Abbildung 1, Extremwerte sind farblich gekennzeichnet 33

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Mess-Hemmschuh mit appliziertem Dehnmessstreifen DMS: Elemente des Hemmschuhs mit mechanischen Verhältnissen 13
Abbildung 2: Die Radsatzwelle koppelt die beiden Räder mehr oder weniger drehstarr 14
Abbildung 3: Starres Wagenrad rollt mit Geschwindigkeit v gegen den Hemmschuh mit der Masse m und der Steifigkeit c des Kontaktbereiches Hemmschuh-Wagenrad. .. 16
Abbildung 4: Ergebnis der DMS Messung an der Sohlenoberseite des Mess-Hemmschuhs nach Abbildung 1 beim Auflaufen eines Wagens, Radlast G≈90kN, Auflaufgeschwindigkeit v≈2m/s 18
Abbildung 5: Funktionen des Hemmschuhs: Führen, Sichern und Selbstzerstörung. Der für das Sichern zuständige Bock ist von der Sohle mit ihren Führungen bereits getrennt. 20
Abbildung 6: Gemessene Temperaturverteilung an der Hemmschuhoberfläche unmittelbar nach einem Abhemmvorgang: Je heller desto heißer, wobei die maximale Temperatur bei der vorliegenden Messung mit 120°C im vorderen Bereich der Sohle (Pfeil) gemessen wurde. 22
Abbildung 7: Wirkprinzip Thermisches Öffnen einer großflächigen Weichlötverbindung (grün) 23
Abbildung 8: Wirkprinzip Öffnen durch Verschleiß: konische Bolzenverbindung mit geschraubter Verschleißscheibe 24
Abbildung 9: Wirkprinzip Öffnen durch Verschleiß: mechanische Verhältnisse am konischen Bolzen 25
Abbildung 10: Wirkprinzip Wegbasiertes Öffnen, kinematischer Mechanismus 26
Abbildung 11: Lokpark Ampflwang mit markiertem Versuchsgleis 30
Abbildung 12: Schematische Abbildung des Versuchsaufbaus 31
Abbildung 13: Hemmschuh „Wegbasiertes Öffnen“ - Grundzustand 34
Abbildung 14: Hemmschuh „Wegbasiertes Öffnen“ – Vor Versuch 35
Abbildung 15: Hemmschuh „Wegbasiertes Öffnen“ – Nach Versuch 36
Abbildung 16: Hemmschuh „Thermisches Öffnen“ - Grundzustand 36

Abbildung 17: Hemmschuh „Thermisches Öffnen“ – Vor Versuch 37
Abbildung 18: Hemmschuh „Thermisches Öffnen“ – Nach Versuch 37
Abbildung 19: Hemmschuh „Öffnen durch Verschleiß“ - Grundzustand.....38
Abbildung 20: Hemmschuh „Öffnen durch Verschleiß“ – Vor Versuch.....39
Abbildung 21: Hemmschuh „Öffnen durch Verschleiß“ – Nach Versuch 39
Abbildung 22: Wirkprinzip Thermisches Öffnen einer großflächigen Weichlötverbindung (grün) 41