



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Technische Universität Berlin

**Institut für Verkehrsplanung und
Transportsysteme (IVT)**

Prof. Dr. Ulrich Weidmann

TEL.: +41 44 633 33 50

E-MAIL: weidmann@ivt.baug.ethz.ch

**FAKULTÄT V
Verkehrs- und Maschinensysteme**

Institut für Land- und Seeverkehr

Fachgebiet Schienenfahrzeuge

Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht

Daniel Jobstfinke M.Sc.

TEL.: +49 30 314 22444

FAX: +49 30 314 22529

E-MAIL: daniel.jobstfinke@tu-berlin.de

Bericht Nr. 11 / 2015

Life Cycle Costs von Güterwagen mit Verbundstoffbremssohlen und Scheibenbremsen

Bearbeitet von

Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht
Daniel Jobstfinke M.Sc.

Berlin, 09.09.2015

Im Auftrag der Schweizerischen Eidgenossenschaft

I Inhaltsverzeichnis

II Abbildungsverzeichnis.....	4
III Tabellenverzeichnis.....	6
1 Auftrag und Vorgehensweise.....	7
2 Zusammenfassung.....	9
3 Einleitung.....	11
4 Technische Grundlagen und Begriffe.....	12
5 Vorstellung der verwendeten Quellen.....	15
5.1 Projekt „Dolomite Shuttle“	15
5.1.1 Rahmenbedingungen	15
5.1.2 Ergebnisse des Projekts.....	16
5.2 Projekt „Whispering Train“	17
5.2.1 Rahmenbedingungen	17
5.2.2 Ergebnisse des Projekts.....	19
5.3 Projekt „Leiser Rhein / Leiser Güterverkehr“	22
5.3.1 Rahmenbedingungen	22
5.3.2 Ergebnisse des Projekts.....	23
5.4 Projekt „EuropeTrain“	24
5.4.1 Rahmenbedingungen	24
5.4.2 Ergebnisse des Projekts.....	25
5.5 Excel-Tool „LCC-Modell Drehgestelle“ (TIS LCC-Tool).....	33
5.6 UIC Bericht „Railway Noise in Europe“	36
6 Ergebnisse.....	38
6.1 LCC bei Verwendung von GG-Sohlen und Auswirkungen der Betriebs- und Randbedingungen auf den Verschleiß	38
6.1.1 LCC bei Verwendung von GG-Sohlen.....	38
6.1.2 Unterschiedliche Verschleißraten und Lebensdauern bei GG-Sohlen und deren monetäre Auswirkungen	39

6.2	Zusätzliche LCC der Verbundstoffsohlen und Scheibenbremsen	42
6.3	Mögliche Maßnahmen zur Verringerung der LCC	48
IV	Literaturangaben	50

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Exemplarische Reibwertverläufe der verschiedenen Bremssohlenmaterialien [1]	13
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Ermittlung der äquivalenten Konizität. Geänderte Darstellung aus [5]	14
Abbildung 3: Überwälzung im Bereich der Fase eines Eisenbahnrades [4]	17
Abbildung 4: Zusätzliche LCC in EUR der Wagen im Projekt „Whispering Train“ im Vergleich zu Wagen mit GG-Bremse über die Lebenszeit bei einer zulässigen äquivalenten Konizität von 0,6 [5]	21
Abbildung 5: Einfluss der Bremsenergie pro Strecke auf den Bremssohlenverschleiß. Eigene Darstellung mit Daten aus [2]	29
Abbildung 6: Einfluss der Bremsenergie pro Strecke auf den Radverschleiß. Eigene Darstellung mit Daten aus [2]	30
Abbildung 7: LCC des Laufwerks eines GG-gebremsten vierachsigen Güterwagens in Abhängigkeit der jährlichen Laufleistung bei einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren. Eigene Darstellung mit Daten aus [11]	39
Abbildung 8: Laufleistung bis Reprofilierung der Räder bei GG-Sohlen in km. Eigene Darstellung mit Daten aus [11] und [4]	40
Abbildung 9: Raddurchmesserverschleißraten bei GG-Sohlen in mm/100.000 km. Eigene Darstellung mit Daten aus [4] und [2]	40
Abbildung 10: Lebensdauer der GG-Sohlen in km. Eigene Darstellung mit Daten aus [11], [4] und [2]	41
Abbildung 11: LCC des Laufwerks eines GG-gebremsten vierachsigen Güterwagens in Abhängigkeit der jährlichen Laufleistung bei einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren. Eigene Darstellung mit Daten aus [11] und [4]	42
Abbildung 12: Zusätzliche LCC eines vierachsigen Wagens mit Verbundstoffsohlen / Scheibenbremse im Vergleich zu einem GG-gebremsten Wagen	45
Abbildung 13: Zusätzliche LCC eines vierachsigen Wagens mit K-Sohlen im Vergleich zu einem GG-gebremsten Wagen	46

Abbildung 14: Zusätzliche LCC eines vierachsigen Wagens mit LL-Sohlen im Vergleich zu einem GG-gebremsten Wagen	47
--	----

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gemittelte zus. LCC für einen vierachsigen Wagen im Projekt „Whispering Train“. ÄK = äquivalente Konizität. Daten aus [5]	20
Tabelle 2: Berechnete zusätzliche LCC der Wagen im Projekt „Whispering Train“ im Vergleich zu Wagen mit GG-Bremse über 20 Jahre bei einer zulässigen äquivalenten Konizität von 0,6. Daten aus [5]	21
Tabelle 3: Zusätzliche LCC im Projekt „Leiser Rhein“ im Vergleich zu Wagen mit GG-Bremse. Daten aus [9]	23
Tabelle 4: Gemittelte zusätzliche LCC im Projekt „Leiser Rhein“ im Vergleich zu Wagen mit GG-Bremse bei einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren	23
Tabelle 5: Gemittelte zusätzliche LCC im Projekt „Leiser Rhein“ im Vergleich zu Wagen mit GG-Bremse bei einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren ohne Berücksichtigung der Umrüstkosten	23
Tabelle 6: Bremssohlenverschleißraten im Projekt „EuropeTrain“. Eigene Darstellung mit Daten aus [2]	26
Tabelle 7: Radverschleißraten im Projekt „EuropeTrain“. Eigene Darstellung mit Daten aus [2]	27
Tabelle 8: Radverschleißraten der Wagentypen Eas und Eanos mit verschiedenen Sohlentypen in % zu den Mittelwerten aller Wagentypen mit dem jeweiligen Sohlentyp. Eigene Berechnung mit Daten aus [2]	31
Tabelle 9: Radverschleißraten des Wagentyps Eanos in % zu denen des Wagentyps Eas. Eigene Berechnung mit Daten aus [2]	32
Tabelle 10: Zusätzliche Kostensätze und Quellen aus [8]	37

1 Auftrag und Vorgehensweise

Das Institut für Verkehrsplanung und Transportsysteme (IVT) der ETH Zürich wurde vom Schweizerischen Bundesamt für Umwelt (BAFU) beauftragt, eine Studie und ein Referat zu Life Cycle Costs für Eisenbahn-Güterwagen mit Verbundstoffbremssohlen und Scheibenbremsen anzufertigen. Ziel dieses Auftrags war es, den aktuellen Stand des Wissens zu Life Cycle Costs für Eisenbahn-Güterwagen zu erheben. Im Vordergrund stand dabei die Differenzierung nach den Bremsbauarten: Grauguss-, K-, LL-Sohlen sowie Scheibenbremsen. Dabei waren die Kosten für Beschaffung, Verschleiß von Rad und Bremsbelag sowie der Instandhaltung zu unterscheiden.

Die Projektverantwortung auf Seiten der Auftraggeberin lag bei Herrn Fredy Fischer, unterstützt durch Herrn Christoph Wenger.

Ursprünglich war die Projektverantwortung auf Seiten des Auftragnehmers beim IVT geplant, welches wiederum das Fachgebiet Schienenfahrzeuge der TU Berlin (FG Schienenfahrzeuge) unterbeauftragt hat. Bedingt durch kurzfristige personelle Veränderungen am IVT wurde der Auftrag schließlich vollständig durch das FG Schienenfahrzeuge, namentlich durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht (Leiter des Fachgebiets) sowie Herrn Daniel Jobstfinke M.Sc. (Wissenschaftlicher Mitarbeiter) bearbeitet. Das IVT, namentlich Herr Prof. Dr. Ulrich Weidmann, hat den vorliegenden Bericht gegengelesen und vertritt dessen Inhalt.

Die in diesem Bericht zusammengestellten LCC wurden weitestgehend im Rahmen einer Literaturrecherche in wissenschaftlichen Veröffentlichungen und Fachzeitschriften gesammelt. Weiterhin wurden LCC mit Hilfe eines Programms der Schienenfahrzeugindustrie berechnet, welches im realen Betrieb ermittelte Kostensätze der verschiedenen Akteure (Stakeholder) im Schienengüterverkehr zur Berechnung verwendet. Durch diese Vorgehensweise wurden zum einen verschiedene definierte Einsatzszenarien betrachtet und zum anderen über viele Einsatzszenarien gemittelte reale Kostensätze verschiedener Stakeholder berücksichtigt.

Die ermittelten LCC werden gemäß der Offerte zum Auftrag in Schweizer Franken pro Wagenkilometer angegeben. Da die Kostensätze in der Literatur und im genutzten Programm in der Regel in Euro angegeben sind, wurden sie mit einem Kurs von

1,0455 CHF/EUR umgerechnet. Hierbei handelt es sich jedoch um eine reine Währungs-
umrechnung. Unterschiedliche Kostenniveaus, beispielsweise bei Löhnen, sind nicht be-
rücksichtigt.

2 Zusammenfassung

Sämtliche ausgewertete Quellen zeigen, dass es bei der Verwendung von Verbundstoffbremssohlen zu einer Erhöhung der Lebensdauer der Bremssohlen gegenüber Graugussbremssohlen kommt. Allerdings kommt es auch zu einer Verringerung der Lebensdauer der Räder, sodass die Life Cycle Costs (LCC) eines Güterwagens insgesamt bei der Verwendung von Verbundstoffsohlen gegenüber der Verwendung von Graugusssohlen steigen.

Das genaue Maß dieser Steigerung hängt maßgeblich von den Betriebs- und Rahmenbedingungen des jeweiligen Güterwagens ab. Auch bei verschiedenen Güterwagen mit Graugussbremssohlen kommt es zu unterschiedlichen Verschleißraten (hier 40 % bis 60 % Abweichung), welche sich auf bis zu 9 % Abweichungen bei den Betriebskosten des Laufwerks auswirken.

Ein „quasi ss-fähiger“ Wagen¹, der gemischt in einem Zug mit s-fähigen Wagen² verkehrt, verursacht sowohl bei Graugusssohlen als auch bei Verbundstoffsohlen einen etwa 1,5-fachen Verschleiß bei den Bremskomponenten. Dies dürfte die Obergrenze für den zusätzlichen Verschleiß von ss-fähigen Güterwagen mit Knickventilen in gemischten Zügen sein.

Die im Rahmen dieser Studie ermittelten zusätzlichen Betriebskosten bei Bremsen mit Verbundstoffsohlen erstrecken sich im Wesentlichen über zwei verschiedene Kostenbereiche. Ein Kostenbereich reicht von etwa 0,017 CHF/km bis 0,024 CHF/km. Der andere Kostenbereich schließlich erstreckt sich von knapp unter 0 CHF/km bis etwa 0,010 CHF/km. In diesem Kostenbereich befindet sich auch die Scheibenbremse, die nach den durchgeführten Berechnungen ab spätestens etwa 55.000 km jährlicher Laufleistung mit nur einer Ausnahme wirtschaftlicher ist als alle untersuchten Verbundstoffsohlen. Ab 135.000 km jährlicher Laufleistung ist die Scheibenbremse gemäß der durchgeführten Berechnungen sogar wirtschaftlicher als die GG-Bremse. Es ist jedoch zu beachten, dass für die Daten der Scheibenbremse nur eine Quelle verwendet wurde.

¹ Wagen, der in seiner bremstechnischen Auslegung einem Wagen sehr ähnlich ist, der im beladenen Zustand mit 120 km/h verkehren darf (ss-Fähigkeit), aber nicht mit einem Knickventil ausgestattet ist.

² Wagen, die im beladenen Zustand mit 100 km/h verkehren dürfen (s-Fähigkeit).

Maßnahmen für die Reduktion der bremsbedingten LCC von Güterwagen sind die verstärkte Nutzung der elektrodynamischen Bremsen (unter Erhöhung der zulässigen ertragbaren Längsdruckkräfte und/oder Verwendung von automatischen Kupplungen), die flächendeckende Einführung von ETCS Level 2 sowie intelligente Echtzeit-Dispositionssysteme. Außerdem könnte der Nachteil hoher Investitionskosten der Scheibenbremse durch zinsfreie Kredite abgeschwächt werden.

3 Einleitung

In der vorliegenden Studie wird der aktuelle Wissensstand zu Life Cycle Costs (LCC) von Eisenbahn-Güterwagen mit dem Fokus auf verschiedenen Bremsbauarten dargestellt. Im Fokus der Untersuchung stehen dabei die zusätzlichen Betriebskosten von Klotzbremsen mit Verbundstoffsohlen sowie von Scheibenbremsen im Vergleich zu Klotzbremsen mit Graugusssohlen. Dazu werden verschiedene Quellen und Studien ausgewertet. Weiterhin werden anhand von bestehenden Rechenmodellen die Betriebskosten der Klotzbremse mit Graugusssohlen dargestellt. Außerdem wird der Einfluss unterschiedlicher Einsatzszenarien der Güterwagen hinsichtlich jährlicher Laufleistung, Zugbildung (Ganzzug vs. gemischter Zug), zulässiger Höchstgeschwindigkeit des Wagens (s- und ss-Fähigkeit) und Einsatzregion betrachtet.

Im Abschnitt 4 finden sich zunächst technische Grundlagen und Begriffe des Bremssystems und der für die Betriebskosten relevanten Komponenten des Güterwagens. Im Abschnitt 5 werden die verwendeten Quellen vorgestellt und jeweils die Rahmenbedingungen der Datenerhebung sowie die jeweils spezifischen Ergebnisse vorgestellt. Im Abschnitt 6 werden schließlich die Ergebnisse der vorliegenden Studie dargestellt. Dabei werden zunächst die LCC bei der Verwendung von Graugusssohlen sowie der Einfluss von Randparametern auf die LCC am Beispiel von Graugusssohlen betrachtet. Im Anschluss finden sich die gesammelten zusätzlichen Kosten bei der Verwendung von Verbundstoffsohlen und Scheibenbremsen in übersichtlicher Form. Abschließend wird ein kurzer Überblick über Möglichkeiten, die durch das Bremssystem verursachten Betriebskosten zu senken, gegeben.

4 Technische Grundlagen und Begriffe

Das bei Güterwagen in Europa ausnahmslos verwendete Bremssystem ist das der durchgehenden, selbsttätigen Druckluftbremse. Bei diesem Bremssystem ist das Medium „Druckluft“ sowohl Signalübertragungsmedium als auch Energieversorgungsmedium. Absenkungen des Druckniveaus in der durchgehenden Hauptluftleitung werden in den Steuerventilen der Wagen in Erhöhungen des Drucks in den Bremszylindern der Wagen umgesetzt. In den Bremszylindern wird aus dem Druck eine Kraft erzeugt, die über Hebel und Gestänge auf Reibelemente wirkt. Reibelemente sind bei der am Güterwagen standardmäßig verwendeten Klotzbremse die Bremssohlen und die Räder. Die Bremssohlen werden hier bei einer Bremsung mit der Kraft aus dem Bremsgestänge auf die Lauffläche der Räder gepresst. Die entstehende Reibkraft, die neben der Anpresskraft auch vom Reibungskoeffizienten zwischen Bremssohle und Rad abhängig ist, führt zu einer Verzögerung des Wagens. Während des Bremsvorgangs kommt es zu Verschleiß an den beiden Reibpartnern Bremssohle und Rad.

Bei der im Güterwagenbereich (noch) sehr selten verwendeten Scheibenbremse wird die Kraft im Bremsgestänge auf Bremsbacken übertragen, die dadurch auf Bremsscheiben gepresst werden. Durch die entstehende Reibkraft zwischen Bremsbacke und Bremsscheibe kommt es zu einer Verzögerung des Wagens. Während des Bremsvorgangs kommt es zu Verschleiß an den beiden Reibpartnern Bremsbacke und Bremsscheibe. Das Rad verschleißt im Vergleich zur Klotzbremse nur minimal durch Schlupfvorgänge. Außerdem weisen Bremsbacken und –scheiben in der Regel eine längere Lebensdauer auf als Bremssohlen und Räder. Nachteile der Scheibenbremse sind jedoch ihr größeres Gewicht, sowie ihre höheren rotierenden Massen und ihre höheren Anschaffungskosten.

Bei den Bremssohlen der Klotzbremse kommen verschiedene Reibmaterialien zum Einsatz. Klassisch werden Sohlen aus Grauguss (GG)³ verwendet, die aber den Nachteil haben, dass die Laufflächen der Räder während der Bremsvorgänge aufrauen, wodurch es zu einem permanent höheren Rollgeräusch kommt. Dieser Effekt tritt bei der Verwendung von Verbundstoffsohlen nicht auf. Verbundstoffsohlen bestehen aus metallischen oder organischen Bestandteilen, die entweder gesintert oder in Elastomerverbindungen

³ Standardmäßig werden hier sog. P10-Sohlen verwendet, deren Legierung neben Eisen, Kohlenstoff und einigen anderen Elementen einen Phosphoranteil von 1 % aufweist.

in Form gepresst werden. Zu unterscheiden sind die K-Sohlen (Komposit-Sohle) und die LL-Sohlen (low noise, low friction Sohle oder very low friction Sohle). Die K-Sohlen weisen einen deutlich höheren Reibungskoeffizienten auf als GG-Sohlen und sind daher nicht mit ihnen tauschbar. Für den Einsatz von K-Sohlen ist das komplette Bremssystem eines Wagens anzupassen. Die LL-Sohle ähnelt in ihrem Reibverhalten jedoch den GG-Sohlen. Daher sind die LL-Sohlen mit den GG-Sohlen tauschbar. Die exemplarischen Reibwertverläufe der verschiedenen Bremssohlenmaterialien finden sich in Abbildung 1. Die zulässigen Streubänder der Reibwerte können den UIC-Merkblättern entnommen werden.

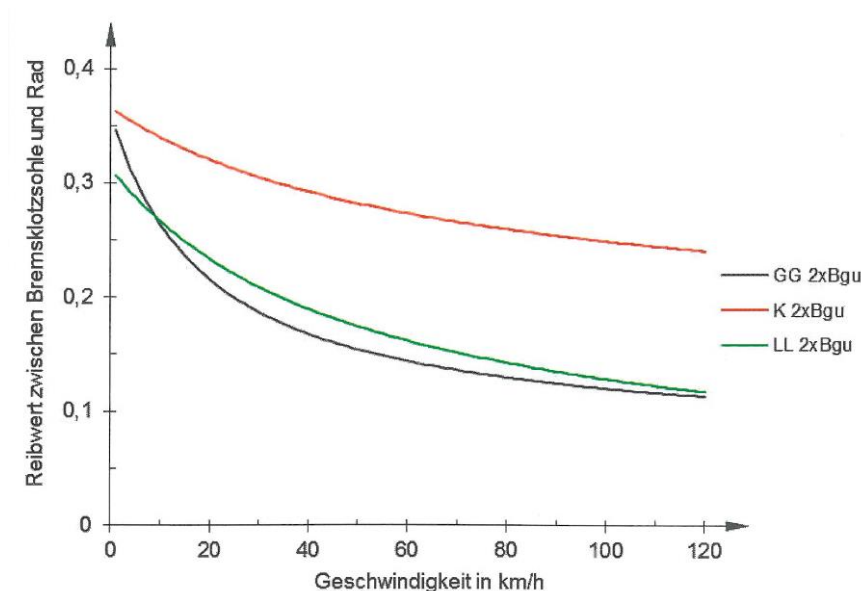


Abbildung 1: Exemplarische Reibwertverläufe der verschiedenen Bremssohlenmaterialien [1]

Bei dem durch die Klotzbremse entstehenden Radverschleiß ist zwischen verschiedenen Verschleißmechanismen zu unterscheiden. Einerseits kommt es zu einem (allgemeinen) Abtrag von Material von der Lauffläche der Räder. Hier ist das Erreichen von Verschleißgrenzmaßen des Rades relevant. Andererseits kann es aber durch diesen Materialabtrag zu einer Veränderung des Profils der Lauffläche des Rades kommen. Die Lauffläche der Räder ist nicht zylindrisch, sondern hat einen nichtlinearen Verlauf, der für die Spurführung der Fahrzeuge relevant ist. Das Fahrverhalten eines Fahrzeugs mit bestimmten Radprofilen auf einem Gleis mit bestimmten Schienenprofilen kann durch die linearisierte Ersatzgröße der äquivalenten Konizität (ÄK) ausgedrückt werden. Ersatzmodell ist hier ein Doppelkegel, der auf runden Schienen läuft. Hat dieser Doppelkegel den gleichen

Wellenlauf wie das reale Fahrzeug auf dem realen Gleis, so entspricht die Konizität dieses Kegels der äquivalenten Konizität. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 2 dargestellt.

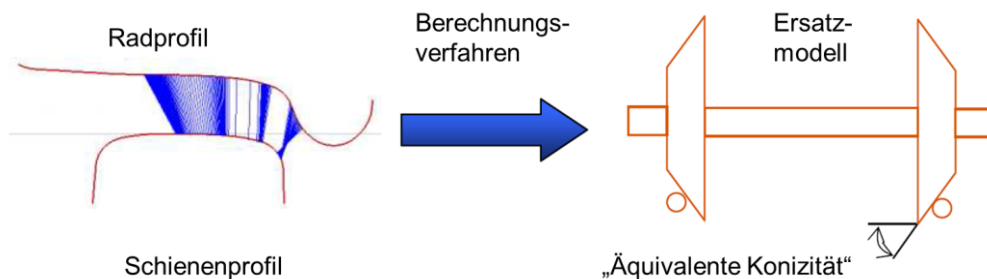


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Ermittlung der äquivalenten Konizität. Geänderte Darstellung aus [5]

Hohe äquivalente Konizitäten wirken sich negativ auf das Stabilitätsverhalten der Schienenfahrzeuge bei der Fahrt aus. Während die äquivalente Konizität bei der Verwendung von GG-Sohlen anfangs nur leicht anwächst und später konstant bleibt, ist insbesondere bei den LL-Sohlen ein stetiges Anwachsen zu verzeichnen. [2] Die zulässige äquivalente Konizität der Güterwagen ist auf 0,4 festgelegt. [3]

In Hinblick auf die zulässige Höchstgeschwindigkeit von Güterwagen ist unter anderem zwischen Güterwagen für den s-Verkehr (schnellen Verkehr) und den ss-Verkehr (sehr schnellen Verkehr) zu unterscheiden. Die s-fähigen Güterwagen dürfen in beladenem Zustand mit 100 km/h verkehren. Voraussetzung dafür ist, dass sie im beladenen Zustand mindestens 65 Brems-hundertstel erreichen. Die ss-fähigen Güterwagen dürfen in beladenem Zustand mit 120 km/h verkehren. Voraussetzung dafür ist, dass sie im beladenen Zustand bis 18 t Radsatzlast 100 Brems-hundertstel und bis 20 t Radsatzlast 90 Brems-hundertstel erreichen.

Wagen, die mit mindestens zwei Sternen gekennzeichnet sind **, sind zwar lauftechnisch für eine Geschwindigkeit von 120 km/h im beladenen Zustand ausgelegt, verfügen jedoch nicht über die bremstechnischen Anforderungen des ss-Verkehrs.

5 Vorstellung der verwendeten Quellen

Wie im weiteren Verlauf der vorliegenden Studie noch weiter ausgeführt wird, hängen die LCC von Güterwagen sehr stark von den jeweiligen Einsatzbedingungen ab. Darüber hinaus stellt sich messbarer Verschleiß der für das Bremssystem relevanten Komponenten, insbesondere also an Rädern, Bremssohlen und ggf. Bremsscheiben, erst nach größeren Laufleistungen ein. Um über möglichst klar definierte und insbesondere klar dokumentierte Randbedingungen / Einsatzszenarien für die (längerfristige) Erhebung von LCC-Daten verfügen zu können, werden diese in erster Linie aus wissenschaftlichen Veröffentlichungen bezogen, anstatt durch die Befragung von Akteuren (Stakeholdern) im Schienengüterverkehr. Zwar liegen bei letzteren reale Kostensätze vor, die Einsatzszenarien eines Wagens variieren jedoch häufig und vor allem sind sie meist nicht ausreichend dokumentiert. Weitere Daten werden aus einem Simulationsprogramm der Industrie bezogen. Hier dienen gemittelte reale Kostensätze verschiedener Stakeholder und verschiedener Randbedingungen / Einsatzszenarien als Datengrundlage.

Im Folgenden werden die Quellen detailliert vorgestellt und die im Rahmen in dieser Studie relevanten Daten herausgestellt.

5.1 Projekt „Dolomite Shuttle“

5.1.1 Rahmenbedingungen

Im Jahre 2002 startete unter Leitung von Lloyd's Register Rail Europe und unter Beteiligung des Eisenbahnverkehrsunternehmens (EVU) Railion Nederland und dem Eisenbahninfrastrukturbetreiber (EIU) ProRail ein Projekt zur Prüfung von lärmreduzierenden Maßnahmen an Schienenfahrzeugen sowie deren Auswirkungen auf die LCC. Das Projekt war Teil des Innovationsprogramms Lärm (Innovatie Programma Geluid, IPG) der niederländischen Ministerien für Umwelt und Verkehr, bei dem insgesamt sowohl der Schienen- als auch der Straßenverkehr betrachtet wurden. Sofern nicht gesondert gekennzeichnet, wurden die folgenden Informationen [4] entnommen.

Im Rahmen des Projekts wurde ein Güterzug teilweise auf K-Sohlen des Typs Cosid C810 umgerüstet und über mehrere Jahre bis 2007 im Betrieb untersucht. Zum Vergleich wurden einige Wagen in der ursprünglichen Ausführung mit GG-Sohlen belassen. Der Zug verkehrte drei Mal wöchentlich zwischen Hermalle in Belgien und Veendam in den

Niederlanden in einer festen Konfiguration aus 29 Wagen des Typs Tapps. Die Wagen waren bremstechnisch für eine Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h im beladenen Zustand ausgelegt (s-Fähigkeit). Ladegut war das Mineral Dolomit; die jährliche Laufleistung betrug 90.000 km. Die Dicke der Bremssohlen sowie die Radprofile wurden alle drei Monate erfasst.

5.1.2 Ergebnisse des Projekts

Sofern nicht gesondert gekennzeichnet, wurden die folgenden Informationen [4] entnommen. Es wurde ein Sohlenverschleiß der K-Sohle von 17 mm/100.000 km und der GG-Sohle von 52 mm/100.000 km bestimmt. Da es zu einem asymmetrischen Verschleiß der K-Sohlen kam (am unteren Sohlenende wurde mehr Material abgetragen als am oberen; das Trägerblech der Sohle war in Folge dessen nicht mehr konzentrisch zum Rad), ergab sich jedoch statt der theoretischen Lebensdauer von 230.000 km eine praktische Lebensdauer von lediglich 130.000 km.

Die GG-gebremsten Räder wiesen einen Durchmessererschleiß von 1 mm/100.000 km auf, die K-gebremsten Räder von 3,2 mm/100.000. Bei den K-gebremsten Wagen wurden vorab Räder mit reduzierter Spurkranzdicke eingebaut⁴.

Die durchschnittliche Laufleistung bis zur Reprofilierung der GG-gebremsten Räder betrug 350.000 km. Bei der Reprofilierung wurden 13 mm des Durchmessers entfernt. Bei den K-gebremsten Rädern betrug die durchschnittliche Laufleistung bis zur Reprofilierung 230.000 km bei einer durchschnittlichen Durchmesserabnahme von 9 mm während des Reprofilierens. Grund für die Reprofilierung der K-gebremsten Räder war in 100 % der Fälle eine Überwalzung im Bereich der Fase des Rades. Abbildung 3 zeigt eine solche Überwalzung exemplarisch. Flachstellen, Profilverschleiß oder Laufflächenschäden kamen nicht vor.

⁴Erfahrungsgemäß kommt es im Betrieb mit Verbundstoffsohlen durch die Verschleißvorgänge zu einer langsamen Zunahme der Spurkranzdicke. Durch eine vorab reduzierte Spurkranzdicke besteht im Betrieb eine weniger große Wahrscheinlichkeit, dass zwischen zwei Reprofilierungen das Grenzmaß der Spurkranzdicke überschritten wird.



Abbildung 3: Überwalzung im Bereich der Fasse eines Eisenbahnrades [4]

Die zusätzlichen Kosten des Betriebs eines vierachsigen Wagens mit K-Sohlen gegenüber GG-Sohlen bei einer zulässigen äquivalenten Konizität von 0,6 wird mit **0,0050 €/km bzw. 0,0052 CHF/km** angegeben. [5]

5.2 Projekt „Whispering Train“

5.2.1 Rahmenbedingungen

Im Anschluss an das Projekt „Dolomite Shuttle“ entschlossen sich das Niederländische Verkehrsministerium, das EIU ProRail sowie das EVU DB Schenker Nederland in ähnlicher Weise Untersuchungen auch für LL-Sohlen durchzuführen. Auch diese liefen innerhalb des Innovationsprogramms Lärm (IPG). Verschiedene, im Folgenden näher beschriebene Unternehmen rüsteten dazu ab 2005 Wagen mit verschiedenen LL-Sohlen aus und führten von 2006 bis 2009 regelmäßige Untersuchungen während des regulären Betriebs durch. Diese fanden zu Beginn des Projekts monatlich, später – auf Grund von positiven Ergebnissen – viermonatlich statt. Während sicherheitskritische Daten an allen Wagen erfasst wurden, fand die Aufnahme von LCC-relevanten Daten nur an einem Teil der Wagen statt. Alle Einzelprojekte gemeinsam bildeten das Projekt „Whispering Train“, das unter Leitung von Lloyd's Register Rail Europe durchgeführt wurde und unter anderem zum Ziel hatte, die LCC von LL-Sohlen zu bestimmen. Sämtliche Informationen wurden, wenn nicht gesondert gekennzeichnet, [5] entnommen. Es bestand im Einzelnen aus den Projekten:

Cobelfret Autotransportwagen

Unter Beauftragung durch ProRail stattete der Wagenhalter Cobelfret Rail insgesamt 72 Autotransportwagen der Typen Laeks und Laaers mit LL-Sohlen aus. Es wurden einige Wagen beider Typen mit Sohlen des Typs CoFren C952 bzw. C952-1⁵ ausgestattet sowie einige Wagen des Typs Laeks mit Sohlen des Typs Jurid J777. Zum Vergleich fuhren insgesamt 15 Wagen beider Typen weiterhin mit GG-Sohlen.

Die Wagen fuhren regellos zwischen Dillingen in Deutschland, Genk in Belgien und dem Hafen Flushing in den Niederlanden. Weiterhin fanden gelegentlich Fahrten zwischen Kiel in Deutschland, Zeebrugge in Belgien und Orten in Italien statt.

Die Wagen waren bremstechnisch für eine Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h im beladenen Zustand ausgelegt (s-Fähigkeit). Ladegut waren Pkw; die durchschnittliche jährliche Laufleistung betrug 50.000 km und es wurde eine durchschnittliche Gesamtleistung von 130.000 km erfasst.

DB Schenker Containertragwagen

Unter Beauftragung durch DB Schenker Nederland stattete der Wagenhalter Ahaus-Alstätter Eisenbahn (AAE) jeweils neun Containertragwagen des Typs Sgns mit LL-Sohlen des Typs CoFren C952 bzw. C952-1 sowie des Typs Jurid J777 aus. Zum Vergleich fuhren acht Wagen weiterhin mit GG-Sohlen.

Die Wagen fuhren täglich zwischen Stein in den Niederlanden und dem Hafen von Rotterdam. Die Wagen waren in gemischte Güterzüge eingestellt und waren zufällig innerhalb dieser verteilt.

Die Wagen waren bremstechnisch für eine Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h im beladenen Zustand ausgelegt (s-Fähigkeit). Ladegut waren Container; die durchschnittliche jährliche Laufleistung betrug 60.000 km und es wurde eine durchschnittliche Gesamtleistung von 175.000 km erfasst.

ACTS Containertragwagen

Unter Beauftragung von ProRail stattete das EVU ACTS 16 Containertragwagen des Typs Sgns mit LL-Sohlen des Typs Becorit IB116* aus. Zum Vergleich fuhren fünf Wagen weiterhin mit GG-Sohlen.

⁵ Der Sohlentyp C 952 ist heute nicht mehr zugelassen. Der Hersteller CoFren hat daraufhin die Sohle C952-1 entwickelt.

Die Wagen fuhren täglich entweder zwischen Veendam oder Leeuwarden in den Niederlanden und dem Hafen von Rotterdam. Die Wagen waren in gemischte Güterzüge eingestellt und waren zufällig innerhalb dieser verteilt.

Die Wagen waren bremstechnisch für eine Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h im beladenen Zustand ausgelegt (s-Fähigkeit). Ladegut waren Container; die durchschnittliche jährliche Laufleistung betrug 100.000 km und es wurde eine durchschnittliche Gesamtlaufleistung von 300.000 km erfasst.

VTG Kesselwagen

Unter Beauftragung von ProRail stattete der Wagenhalter VTG jeweils zehn Kesselwagen des Typs Zas mit LL-Sohlen des Typs CoFren C952 sowie des Typs Jurid J777 aus. Zum Vergleich fuhren vier Wagen weiterhin mit GG-Sohlen.

Die Wagen fuhren zwischen Sittard in den Niederlanden und dem Hafen von Rotterdam. Informationen zur Zugzusammenstellung sind nicht bekannt.

Die Wagen waren bremstechnisch für eine Höchstgeschwindigkeit von 100 km/h im beladenen Zustand ausgelegt (s-Fähigkeit). Ladegut waren chemische Produkte; die durchschnittliche jährliche Laufleistung betrug 25.000 km und es wurde eine durchschnittliche Gesamtlaufleistung von 75.000 km erfasst.

5.2.2 Ergebnisse des Projekts

Sämtliche Informationen wurden, wenn nicht gesondert gekennzeichnet, [5] entnommen. In allen Anwendungen zeigte sich, dass der Verschleiß aller untersuchten LL-Sohlen niedriger war als der der GG-Sohlen. Dementsprechend ergab sich eine größere Lebensdauer für die LL-Sohlen. Zwischen den verschiedenen Anwendungen und LL-Sohlentypen ergaben sich jedoch große Unterschiede hinsichtlich der Lebensdauern. Weiterhin zeigte sich in allen Anwendungen und bei allen LL-Sohlentypen, dass der Verschleiß der LL-gebremsten Räder gegenüber den GG-gebremsten Rädern zunimmt. Auch hier waren große Unterschiede je nach Anwendung und LL-Sohlentyp feststellbar.

Wichtigster Wirkmechanismus bei der Abnahme der Lebensdauer der Räder war dabei die Zunahme der äquivalenten Konizität. Da es zum damaligen Zeitpunkt noch keinen international anerkannten Grenzwert für die äquivalente Konizität (ÄK) gab, wurden die LCC in Abhängigkeit der zulässigen äquivalenten Konizität in den drei Szenarien 0,23; 0,40 und 0,60 ermittelt.

Neben diesem Verschleißmechanismus kam es bei den LL-gebremsten Rädern häufiger zum Anwachsen der Spurkranzdicke und zu Überwalzungen als bei GG-gebremsten Rädern. Flachstellen und Unrundheiten kamen jedoch seltener vor.

Der heute nicht mehr zugelassene Sohlentyp J777 führte zum höchsten Zuwachs der LCC, der Sohlentyp IB116* zum niedrigsten. Der ebenfalls heute nicht mehr zugelassene Sohlentyp C952 lag dazwischen. Über den Nachfolger C952-1 konnten nicht ausreichend Informationen gesammelt werden. Die gemittelten Daten zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1: Gemittelte zus. LCC für einen vierachsigen Wagen im Projekt „Whispering Train“. ÄK = äquivalente Konizität. Daten aus [5]

Sohlentyp	Zusätzliche LCC je km			
	Min. (ÄK = 0,6)		Max. (ÄK = 0,23)	
	in EUR	in CHF	in EUR	in CHF
J777	0,010	0,0105	0,053	0,0554
C952	0,003	0,0031	0,031	0,0324
IB116*	0,004	0,0042	0,017	0,0178

In Abbildung 4 finden sich die zusätzlichen LCC der Wagen im Vergleich zu Wagen mit GG-Bremse aufgetragen über die Lebensdauer bei einer zulässigen äquivalenten Konizität von 0,6 unter Berücksichtigung ihrer individuellen jährlichen Laufleistung. Hieraus können die mittleren zusätzlichen LCC pro Kilometer bei einer betrachteten Lebensdauer von 20 Jahren⁶ berechnet werden. Diese Werte finden sich in Tabelle 2. Insbesondere beim Sohlentyp C952 zeigen sich in den verschiedenen Anwendungen große Unterschiede bei den zusätzlichen Kosten pro Kilometer.

⁶ 20 Jahre wurden an dieser Stelle gewählt, weil das im Folgenden noch vorgestellte TIS LCC-Tool ebenfalls eine Lebensdauer von 20 Jahren betrachtet.

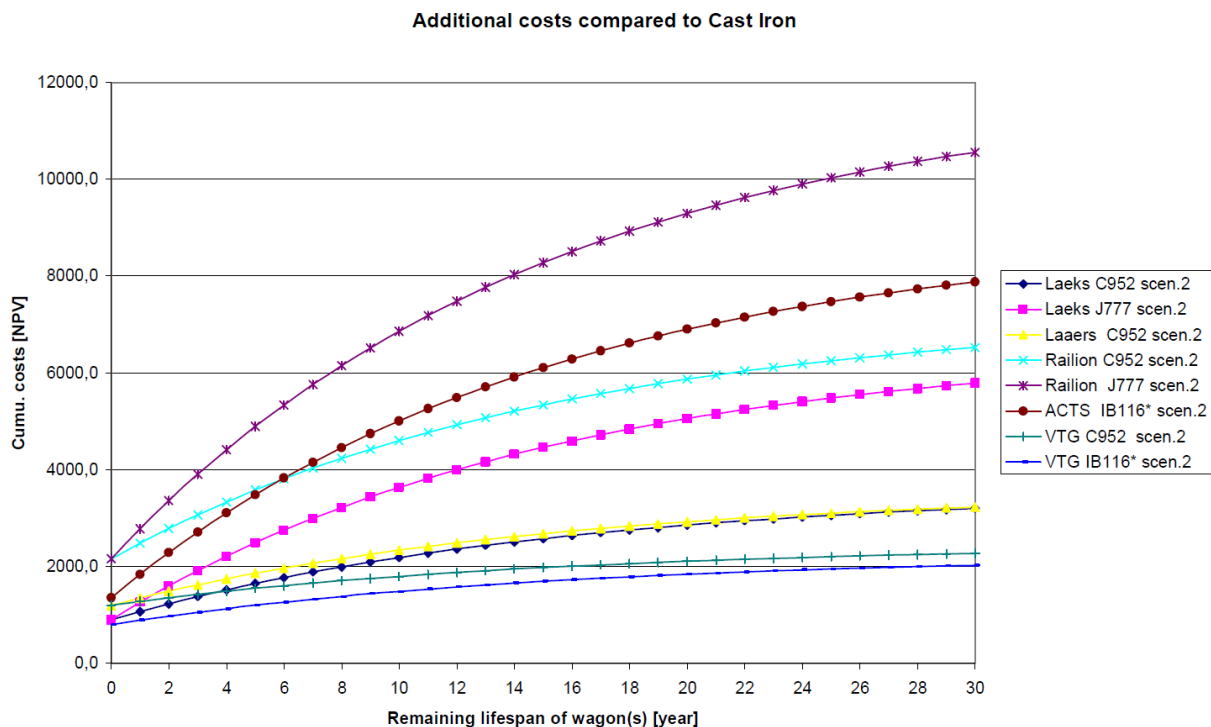


Abbildung 4: Zusätzliche LCC in EUR der Wagen im Projekt „Whispering Train“ im Vergleich zu Wagen mit GG-Bremse über die Lebenszeit bei einer zulässigen äquivalenten Konizität von 0,6 [5]

Während im Fall der DB Schenker Wagen mit C952-Sohlen ausdrücklich angegeben ist, dass diese zufällig in gemischten Güterzügen verteilt waren, gibt es zu den Cobelfret und VTG Wagen keine näheren Angaben. Aufgrund einer Abbildung in [5] kann jedoch vermutet werden, dass die Cobelfret Wagen zumindest teilweise in Ganzzügen gefahren wurden. Ob dies eine stichhaltige Begründung für die vergleichsweise niedrigen zusätzlichen LCC ist, kann jedoch nicht mit Sicherheit geklärt werden.

Tabelle 2: Berechnete zusätzliche LCC der Wagen im Projekt „Whispering Train“ im Vergleich zu Wagen mit GG-Bremse über 20 Jahre bei einer zulässigen äquivalenten Konizität von 0,6. Daten aus [5]

Teilprojekt und Sohlientyp	Zusätzliche LCC je km	
	in EUR	in CHF
Cobelfret C952	0,0029	0,0030
DB Schenker C952	0,0049	0,0051
ACTS IB116*	0,0035	0,0037
VTG C952	0,0042	0,0044
VTG IB116*	0,0036	0,0038

5.3 Projekt „Leiser Rhein / Leiser Güterverkehr“

5.3.1 Rahmenbedingungen

Die deutsche Bundesregierung initiierte im Jahr 2008 das Pilot- und Innovationsprojekt „Leiser Güterverkehr / Leiser Rhein“⁷. Das Projekt wurde geleitet vom damaligen Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS). Weiterhin beteiligt waren die damaligen Bundesministerien für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), für Wirtschaft und Technologie (BMW) und der Finanzen (BMF) sowie das Eisenbahn-Bundesamt (EBA), das Umweltbundesamt (UBA) und die Bundesnetzagentur (BNetzA). [6]

Im Zeitraum von 2008 bis 2012 sollten bis zu 5000 Güterwagen auf K- bzw. LL-Sohlen umgerüstet und schwerpunktmäßig auf den Strecken durch das Rheintal eingesetzt werden. Ursprünglich sollten die Fahrten durch das Rheintal sowohl durch automatische Überprüfung (RFID-Chips am Wagen und Lesestationen entlang der Strecke) als auch durch vereinheitlichte Wagenlisten der beteiligten EVU überprüft werden. Tatsächlich umgesetzt wurde jedoch nur letztere Variante. [6]

Das Projekt sollte der Anreizsetzung zur Umrüstung von Wagen auf lärmreduzierende Bremssohlen, der Demonstration der Wirksamkeit dieser Maßnahmen sowie der Untersuchung von Möglichkeiten zur Einführung eines lärmabhängigen Trassenpreissystems dienen.

Eine Auflistung aller am Projekt beteiligten EVU und Wagenhalter ist nicht bekannt. Auch besteht keine Kenntnis über die tatsächliche Anzahl der umgerüsteten Wagen, die Gattungen der umgerüsteten Wagen, die Laufleistungen oder Details zur Ermittlung der Verschleißraten und der Auswirkungen auf die Kosten. Es ist lediglich gesichert, dass DB Schenker Rail und die Ahaus-Alstätter Eisenbahn am Projekt beteiligt waren. [7]

Aus [8] geht hervor, dass bei den mit K-Sohle umgerüsteten Wagen sowohl s- als auch ss-fähige Wagen betrachtet wurden, während sich unter den mit LL-Sohle umgerüsteten Wagen keine ss-fähigen Wagen befanden.

⁷ Im Abschlussbericht mit dem Titel „Pilot- und Innovationsprogramm ‚Leiser Güterverkehr‘“ [6] wird der Begriff „Leiser Rhein“ offenbar synonym zu „Leiser Güterverkehr“ benutzt. Der Begriff „Leiser Rhein“ hat darüber hinaus eine größere mediale Verbreitung gefunden.

5.3.2 Ergebnisse des Projekts

Die in [9] veröffentlichten Angaben zu Umrüst- und erhöhten Betriebskosten, die bis 2011 im Projekt „Leiser Rhein“ ermittelt wurden, finden sich in Tabelle 3. In der Quelle wird ebenfalls eine Bezugs-Laufleistung von 30.000 km genannt. Dieselben Werte für die Kosten finden sich auch in [8].

Tabelle 3: Zusätzliche LCC im Projekt „Leiser Rhein“ im Vergleich zu Wagen mit GG-Bremse. Daten aus [9]

Kosten	LL-Sohle (4 Achsen)	K-Sohle (4 Achsen)
Umrüstungskosten B_g in EUR	1250 - 2030	5650 - 6850
Umrüstungskosten B_{gu} in EUR	1500 - 2280	6250 - 7450
Erhöhte Betriebskosten pro Jahr in EUR (Laufleistung 30.000 km)	500 - 600	600 - 770

Betrachtet man jeweils die mittleren Werte sowie die **einmalige Umrüstung und eine Lebensdauer von 20 Jahren** ohne Berücksichtigung von Zinseffekten, ergeben sich daraus die zusätzlichen Kosten je Kilometer gemäß Tabelle 4.

Tabelle 4: Gemittelte zusätzliche LCC im Projekt „Leiser Rhein“ im Vergleich zu Wagen mit GG-Bremse bei einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren

Sohle	Zusätzliche LCC je km	
	in EUR	in CHF
LL	0,021	0,022
K	0,034	0,036

Ohne Berücksichtigung der Umrüstkosten ergeben sich aus den Daten in Tabelle 3 die mittleren zusätzlichen Kosten je Kilometer gemäß Tabelle 5.

Tabelle 5: Gemittelte zusätzliche LCC im Projekt „Leiser Rhein“ im Vergleich zu Wagen mit GG-Bremse bei einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren ohne Berücksichtigung der Umrüstkosten

Sohle	Zusätzliche LCC je km	
	in EUR	in CHF
LL	0,018	0,019
K	0,023	0,0240

Gemäß einer Studie der Internationalen Vereinigung der Wagenhalter (UIP) [10] ergeben sich für einen vierachsigen Wagen die zusätzlichen Kosten von **0,0188 EUR/km bei der organischen LL-Sohle** und von **0,0204 EUR/km bei der K-Sohle**. Laut der Studie stammt auch hier die Datengrundlage aus dem Projekt „Leiser Rhein“ im Zeitraum bis zum Jahr 2011. Eine Bezugsgröße für die Laufleistung ist hier in beiden Fällen nicht angegeben. Geht man in Analogie zu Tabelle 3 von 30.000 km pro Jahr aus, ergeben sich zusätzliche Kosten in Höhe von 564 EUR für die LL-Sohle und von 612 EUR für die K-Sohle. Diese Werte liegen innerhalb der in Tabelle 3 genannten Grenzen. Die Umrüstungskosten scheinen hier jedoch nicht mit berücksichtigt zu sein.

5.4 Projekt „EuropeTrain“

5.4.1 Rahmenbedingungen

Sämtliche Informationen wurden, wenn nicht gesondert gekennzeichnet, [2] entnommen. Im Rahmen des Zulassungsprozesses der LL-Sohlen wurde im September 2009 das Projekt „EuropeTrain“ gestartet. Zielsetzung war unter anderem, Erfahrungen über das Verschleißverhalten von Bremssohlen und Rädern im Betrieb zu sammeln sowie Verständnis über die fahrdynamischen Auswirkungen der Zunahme der äquivalenten Konizität zu erlangen. Das Projekt wurde von der UIC Arbeitsgruppe B 126.13 E geleitet und unter anderem in Kooperation mit den Wagenhaltern DB Schenker, Société Nationale des Chemins de fer Français (SNCF), AAE, Rail Cargo Austria und Železničná spoločnosť Slovensko (ZSSK) Cargo durchgeführt.

Zur Erreichung der genannten Ziele wurde im Rahmen des Projekts ein Versuchszug zusammengestellt, der 32 Wagen unterschiedlicher Gattungen und bremstechnischer Ausrüstungen enthielt und von Dezember 2010 bis September 2012 über 200.000 km auf Europäischen Eisenbahnstrecken zurücklegte. Dabei wurden alle topografischen und klimatischen Besonderheiten in zwölf Europäischen Staaten berücksichtigt.

Der Fokus lag auf s-fähigen Güterwagen, dennoch sollten auch vier ss-fähige Wagen in den Zug eingestellt werden. Innerhalb des Zuges gab es ein ausgewogenes Verhältnis

zwischen Wagen mit Bg- und Bgu-Sohlen. Ein Teil der Wagen jeder Konfiguration verkehrte mit LL-Sohlen (Sohlentypen CoFren C952-1 und Becorit IB116*)⁸ und ein anderer Teil zu Vergleichszwecken mit GG-Sohlen. Die Beladezustände der einzelnen Wagen wurden zwischen den einzelnen Läufen variiert. Pro Lauf war jeweils etwa die Hälfte aller Wagen beladen und die andere Hälfte unbeladen. Die Wagen wiesen einen guten Instandhaltungszustand auf und waren mit frisch reprofilierten Rädern mit reduzierter Spurkranzdicke ausgestattet.

Der Zug verkehrte unter normalen Betriebsbedingungen und nicht als Versuchszug. Auf Gefällestrecken wurden sowohl „Sägezahnbremsungen“ (wiederholt deutliches Reduzieren der Geschwindigkeit gefolgt von anschließender Beschleunigung bis auf zulässige Höchstgeschwindigkeit) als auch „Regulierbremsungen“ (weitgehendes Konstanthalten der Geschwindigkeit) durchgeführt. Der Sohlenverschleiß wurde bei jedem Halt zwischen zwei Fahrten an drei Punkten der Sohle gemessen, gemittelt und anschließend nochmals pro Wagen gemittelt. Die Radprofile wurden mit einem Profilmessgerät aufgezeichnet und daraus die Änderung der Spurkranzhöhe abgeleitet. Diese Änderung wurde als Maß für den Verschleiß des Rades gewertet.

5.4.2 Ergebnisse des Projekts

5.4.2.1 Verschleißverhalten von Sohlen und Rädern

Es lassen sich folgende Ergebnisse hinsichtlich des Bremssohlenverschleißes aus dem Projekt „EuropeTrain“ festhalten:

- *„Alle LL-Sohlentypen weisen geringeren Verschleiß als Grauguss auf. Die Sintersohle C952-1 weist lediglich 20 % des Graugussverschleißes auf, die organische Sohle IB116* lediglich 52 % des Graugussverschleißes (im beladenen Zustand).*
- *Der Sohlenverschleiß variiert stark zwischen den einzelnen Läufen.*
- *Im Allgemeinen korrelieren Verschleißrate und Bremsenergie.“ [2]*

⁸ Weiterhin waren einige Wagen im Zug mit der Sohle Becorit IB116* Combi ausgestattet. Dabei handelt es sich um eine Mischung der Sohle IB116* und GG. Ergebnisse dieser Sohle werden im Folgenden jedoch nicht explizit dargestellt.

Zum letzten Punkt sei an dieser Stelle auch auf den Abschnitt 5.4.2.2 verwiesen. Die durchschnittlichen Sohlenverschleißraten bei den einzelnen Sohlentypen sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Bremssohlenverschleißraten im Projekt „EuropeTrain“. Eigene Darstellung mit Daten aus [2]

Sohlenverschleißrate	Sohlentyp					
	GG leer	GG bel.	C952-1 leer	C952-1 bel.	IB116* leer	IB116* bel.
in mm/10.000 km	2,08	7,99	0,78	1,67	1,28	4,00
in % zu GG	100	100	37,45	20,88	61,47	50,10

Analog zu den Erkenntnissen bezüglich des Bremssohlenverschleißes lassen sich folgende Erkenntnisse zum Radverschleiß aus dem Projekt „EuropeTrain“ festhalten:

- „Der Radverschleiß variiert je nach Bremssohlenart“ [2]; LL-Sohlen verursachen höheren Verschleiß der Räder.⁹
- „Der Radverschleiß variiert stark von Lauf zu Lauf. Ein durchschnittlich hoher Verschleiß wurde auf den Läufen nach Schweden [...], Italien [...] und Osteuropa [...] festgestellt. Auf den Läufen nach Frankreich ergab sich eindeutig ein relativ niedriger Radverschleiß.“
- Bei den Fahrten durch die Alpen und Deutschland sind die Ergebnisse viel unterschiedlicher. In Lauf 5 (Schweiz) wurde eindeutig ein hoher Radverschleiß verursacht, in Lauf 8 (Österreich) eindeutig weniger. In Lauf 2 durch Deutschland (Richtung Süd-West) wurde ein höher [sic] Radverschleiß festgestellt als in Lauf 13 (nordöstliche Richtung).
- Der Radverschleiß in den Läufen durch Osteuropa ist relativ hoch im Verhältnis zur absorbierten Bremsenergie. Dafür liegt derzeit noch keine Erklärung vor.
- Der Radverschleiß in der Österreichfahrt ist relativ niedrig im Vergleich zum Sohlenverschleiß und zur absorbierten Bremsenergie. Das Gesamtenergievolumen ist vergleichbar mit der Fahrt in der Schweiz [...], allerdings lag der Radverschleiß in Österreich sehr viel niedriger als in der Schweiz.
- Der Radverschleiß hängt stark vom Beladezustand der Güterwagen ab.

⁹ Hier steht in der Quelle „geringeren“. Aufgrund der Daten handelt es sich dabei jedoch eindeutig um einen Schreibfehler.

- *Der Radverschleiß hängt von der Wagenbauart ab [...]“ [2]*

Zum Einfluss der s-/ss-Fähigkeit der Wagen sei an dieser Stelle auf den Abschnitt 5.4.2.3 verwiesen. Die durchschnittlichen Radverschleißraten (ausgedrückt in der Differenz der Spurkranzhöhe ΔSh) bei den einzelnen Sohlentypen sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Radverschleißraten im Projekt „EuropeTrain“. Eigene Darstellung mit Daten aus [2]

Radverschleißrate	Sohlentyp					
	GG leer	GG bel.	C952-1 leer	C952-1 bel.	IB116* leer	IB116* bel.
ΔSh in mm/100.000 km	0,7	0,9	0,8	2,2	0,8	1,8
in % zu GG	100	100	109	237	109	194

5.4.2.2 Kenngrößen der Bremsungen

Im Rahmen des Projekts „EuropeTrain“ wurden an einigen Wagen auch Parameter der pneumatischen Bremse gemessen und aufgezeichnet. Dadurch war es möglich, spezifische Kenngrößen der Bremsungen in den jeweiligen Läufen zu bestimmen. Im Einzelnen waren diese Kenngrößen:

- Anzahl der Bremsungen pro 10.000 km
- Anzahl der Bremsungen mit einer mittleren Zugverzögerung von 0,3 m/s² oder mehr pro 10.000 km
- Anzahl der Bremsungen mit einer Dauer von 30 s oder mehr pro 10.000 km
- Absorbierte Energie im Referenzwagen

Während die beiden letzteren Kenngrößen einen deutlichen Topografieeinfluss haben (lange Bremsungen und hoher Energieeintrag bei Gefällefahrt), sind die beiden ersten Kenngrößen deutlich von Betriebsparametern wie Bremswegabstand, Signal- und Zugsicherungssystem, gefahrener Höchstgeschwindigkeit, Disposition etc. abhängig.

Hier zeigten sich folgenden Erkenntnisse:

- *„Im Allgemeinen ist der Energieeintrag der Läufe desselben Landes gut reproduzierbar.“*

- Die Anzahl der Bremsungen mit einer mittleren Verzögerung von über $0,3 \text{ m/s}^2$ und die Anzahl der Dauer der Bremsungen über 30 s unterscheiden sich bereits stärker, normalerweise ist der Trend jedoch ähnlich.
- Die vier Läufe in Frankreich (Belgien, Niederlande) ähneln sich, wie auch die beiden Läufe in Schweden.
- Die Anzahl der Bremsungen pro 10.000 km schwankt zwischen 618 und 2553 (Faktor 4).
- In Deutschland wurde der höchste Anteil von Bremsungen mit einer Verzögerungen [sic] über $0,3 \text{ m/s}^2$ gemessen (Deutschland max. ca 29 % aller Bremsungen und Polen / Slowakei ca. 6 %).
- Die Anzahl der Bremsungen mit einer Dauer von über 30 s variiert zwischen 38 % (Italien) und 70 % (Schweden).
- Die schwedischen Läufe weisen den bei weitem höchsten Energieeintrag aller Läufe auf: 6125 MJ/10.000 km im Referenzwagen Sggmrs (leer).
- Bei den transalpinen Läufen in der Schweiz und Österreich wurden Energieeinträge zwischen 3581 und 3319 MJ/10.000 km. [sic]
- Polen, Italien und Deutschland folgen mit Werten zwischen 2067 und 2511 MJ/10.000 km.
- Die niedrigsten Werte waren in Frankreich, Belgien und den Niederlanden mit ca. 1254 MJ/10.000 km zu finden.“ [2]

Die in Abschnitt 5.4.2.1 bereits angesprochene Korrelation zwischen Verschleißrate der Bremssohlen und Bremsenergie ist in Abbildung 5 exemplarisch für die Bremssohlen GG und C952-1 dargestellt.

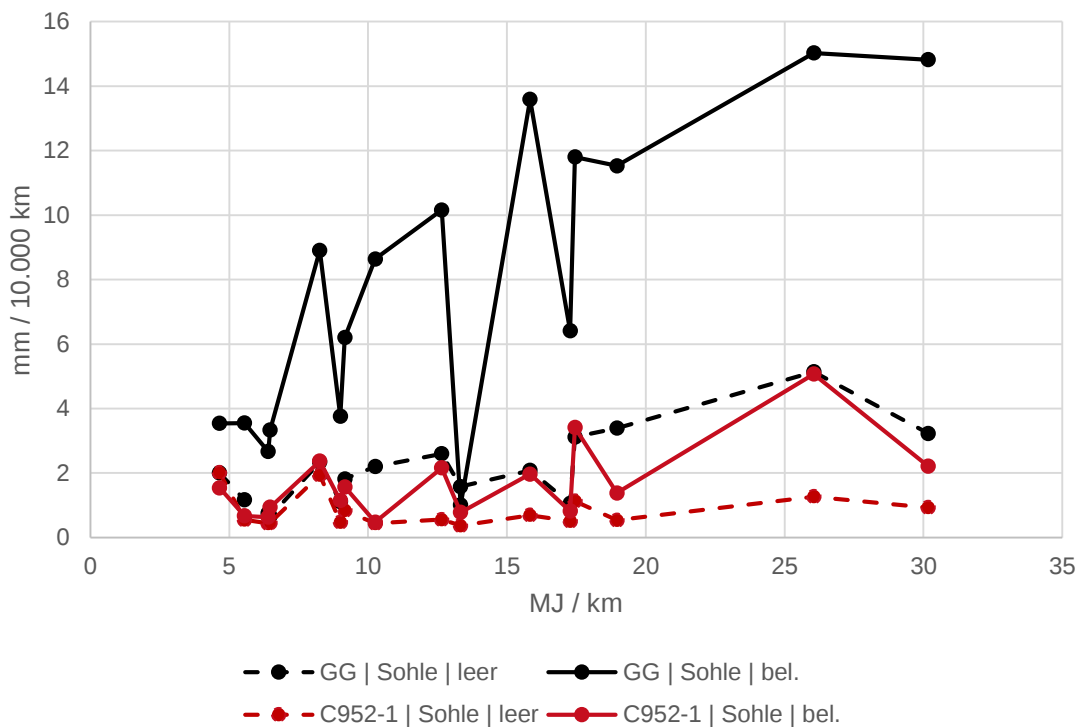


Abbildung 5: Einfluss der Bremsenergie pro Strecke auf den Bremssohlenverschleiß. Eigene Darstellung mit Daten aus [2]

Zu erkennen sind die unterschiedlichen Verschleißraten in Abhängigkeit des Beladungszustands des Wagens sowie die jeweils niedrigeren Verschleißraten der Verbundstoffsohle. Außerdem kann in allen Fällen ein Anstieg der Verschleißraten mit der Bremsenergie pro Strecke verzeichnet werden.

Eine analoge Abbildung für die Verschleißraten beim Rad zeigt Abbildung 6.

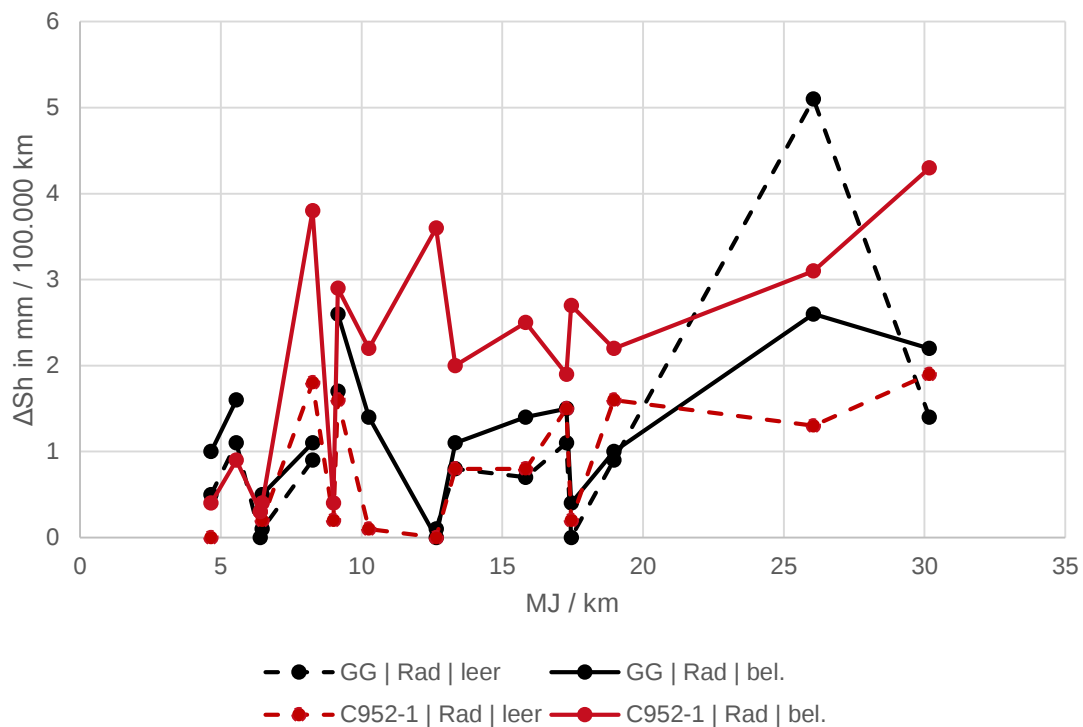


Abbildung 6: Einfluss der Bremsenergie pro Strecke auf den Radverschleiß. Eigene Darstellung mit Daten aus [2]

Auch hier zeigt sich wieder ein Anstieg aller Verschleißraten mit der Bremsenergie pro Strecke. Die Verschleißraten der LL-gebremsten Räder liegen jedoch insbesondere im beladenen Zustand höher.

5.4.2.3 Verschleiß von ss-fähigen Wagen in einem gemischten Zug

Wie bereits im Abschnitt 5.4.1 erwähnt, sollten sich im Zug des „EuropeTrain“-Projekts auch einige Wagen mit ss-Fähigkeit befinden. Im Schlussbericht des Projekts wird jedoch klar, dass es sich bei den verwendeten Wagen nicht um ss-fähige Wagen, sondern lediglich um **-fähige Wagen handelte. Die vier Wagen des Typs Eanos (Offener Güterwagen der Regelbauart mit vier Radsätzen) haben ein maximales Bremsgewicht von 72 t, was im beladenen Zustand (90 t) 80 Bremshundertstel entspricht. Neben der Tatsache, dass ein ss-fähiger Güterwagen nur maximal 20 t Radsatzlast haben darf, müssten für die ss-Fähigkeit 90 Bremshundertstel erlangt werden. Auch die Typenbezeichnung (Eanos) lässt erkennen, dass die Wagen lediglich s-fähig sind. Während der Fahrten waren die Wagen jedoch nicht voll beladen, so dass sie ein Gesamtgewicht von 82 t erreichten.

Dies entspricht 88 Brems-hundertstel. Insgesamt dürften diese Wagen in ihrem Verhalten folglich einem ss-fähigen Güterwagen sehr ähnlich gewesen sein. Mit großer Wahrscheinlichkeit waren sie jedoch nicht mit Knickventilen ausgestattet. Zwar macht der Schlussbericht dazu widersprüchliche Angaben: „Eine begrenzte Anzahl Güterwagen für hohe Geschwindigkeiten (SS oder **/***) mit Knickventilen [...] musste mit eingestellt werden“ [2], sowie „Es wird eine SS-gebremste Güterwagenbauart mit Knickventil (gem. Anwendungsrichtlinie V-BKS LL) eingesetzt“ [2], und „Sie besitzen keine Knickventile, d.h. sie übernehmen die Bremsenergie des restlichen Zuges.“ [2]. Es ist aber unwahrscheinlich, dass ein nicht ss-fähiger Güterwagen ein Knickventil hat. Dennoch sollen im Folgenden die „quasi ss-fähigen“ Eanos-Wagen stellvertretend für „echte“ ss-fähige Güterwagen stehen.

Neben den vier Eanos-Wagen waren vier Wagen des Typs Eas (ebenfalls offener Güterwagen der Regelbauart mit vier Radsätzen) mit einem maximalen Bremsgewicht von 52 t in den Zug eingestellt. Diese Wagen haben im beladenen Zustand (80 t) 65 Brems-hundertstel, was gerade der s-Fähigkeit entspricht.

Die Radverschleißraten der beiden Wagentypen Eas und Eanos sind in Tabelle 8 in Prozent zu den Mittelwerten aller Wagentypen mit dem jeweiligen Sohlentyp dargestellt. Es fällt auf, dass der Wagentyp Eas im leeren Zustand verhältnismäßig wenig vom Durchschnitt nach oben hin abweicht. Im beladenen Zustand findet sich im Fall der GG-Sohle eine größere Abweichung nach unten sowie eine kleine Abweichung nach unten im Fall der C952-1-Sohle. Die Wagen des Typs Eanos differieren hingegen in allen Fällen nach oben hin. Im Fall der GG-Sohle beim leeren Wagen beträgt die Abweichung 17,4 %, in allen anderen Fällen über 30 %.

Tabelle 8: Radverschleißraten der Wagentypen Eas und Eanos mit verschiedenen Sohlentypen in % zu den Mittelwerten aller Wagentypen mit dem jeweiligen Sohlentyp. Eigene Berechnung mit Daten aus [2]

Radverschleißrate in % zum Mittelwert aller Wagentypen mit dem jeweiligen Sohlentyp je Wagentyp	Sohlentyp			
	GG leer	GG bel.	C952-1 leer	C952-1 bel.
Eas	102,2	72,9	112,0	92,0
Eanos	117,4	141,1	185,9	132,9

Da sich die Wagentypen Eanos und Eas außerhalb der bremstechnischen Auslegung sehr ähnlich sind, bietet sich ein Vergleich der Radverschleißraten der beiden Wagen untereinander an. Dazu sind in Tabelle 9 die Radverschleißraten des Wagentyps Eanos in Prozent zu denen des Wagentyps Eas dargestellt. Außerdem sind die prozentualen Radverschleißraten nicht nur für Fahrten mit entweder leerem oder voll beladenem Wagen dargestellt, sondern auch für Fahrten, bei denen die Wagen jeweils die Hälfte der Strecke beladen respektive leer sind.

Tabelle 9: Radverschleißraten des Wagentyps Eanos in % zu denen des Wagentyps Eas. Eigene Berechnung mit Daten aus [2]

Radverschleißrate Eanos	Sohlentyp					
	GG leer	GG bel.	GG 50 % leer, 50 % bel.	C952-1 leer	C952-1 bel.	C952-1 50 % leer, 50 % bel.
in % Eas	114,8	193,6	154,2	165,9	144,4	155,1

Es zeigt sich, dass es bei den Eanos-Wagen im Fall der GG-Sohlen zu leicht höheren Verschleißraten im leeren Zustand als bei den Eas-Wagen im gleichen Zustand kommt. Im beladenen Fall ergeben sich hingegen fast doppelt so hohe Verschleißraten. Bei der C952-1-Sohle gibt es weniger starke Unterschiede zwischen leerem und beladenem Zustand. In beiden Fällen sind die Verschleißraten der Eanos-Wagen etwa 1,5-mal so hoch wie beim Eas-Wagen. Bei dem Szenario, dass die Wagen die eine Hälfte der Strecke beladen sind und die andere Hälfte der Strecke leer zurücklegen, ergeben sich für beide Sohlen bei den Eanos-Wagen fast identische Verschleißraten von etwa 150 % der jeweiligen Verschleißraten der Eas-Wagen.

Es zeigt sich also, dass die „quasi ss-fähigen“ Güterwagen des Typs Eanos unabhängig vom Bremssohlentyp einen höheren Radverschleiß aufweisen, als die s-fähigen Eas-Wagen. Zwischen den beiden Sohlentypen GG und C952-1 gibt es Unterschiede in den Verschleißraten in Abhängigkeit des Beladezustands der Wagen. Geht man aber von streckenmäßig gleichen Anteilen von leeren und beladenen Fahrten aus, ist der Verschleiß der „quasi ss-fähigen“ Wagen in einem gemischten Zug gegenüber s-fähigen Wagen ähnlicher Bauart unabhängig von den beiden untersuchten Bremssohlentypen GG und C952-1 etwa 1,5-mal so hoch. Hier ist jedoch zu beachten, dass die Wagen mit großer Wahrscheinlichkeit nicht mit Knickventilen ausgestattet waren, wie es bei „echten“ ss-

fähigen Wagen erforderlich gewesen wäre. Dies wird auch an einer Stelle des Schlussberichtes angeführt: „Sie besitzen keine Knickventile, d.h. sie übernehmen die Bremsenergie des restlichen Zuges.“ [2] Die 1,5-fache Verschleißrate korreliert gut mit einem 1,35-fachen Bremschwertwert (88 zu 65). Ein Wagen mit Knickventilen hätte vermutlich jedoch weniger starken Verschleiß, sodass diese Steigerung der Verschleißrate als absolute Obergrenze angesehen werden kann.

5.5 Excel-Tool „LCC-Modell Drehgestelle“ (TIS LCC-Tool)

Der Technische Innovationskreis Schienengüterverkehr (TIS) setzt sich zusammen aus Vertretern der am Schienengüterverkehr beteiligten Akteure Wagenhersteller, Komponentenhersteller, Wagenhalter, EVU und verladender Wirtschaft. Dies sind im Einzelnen:

- AAE Ahaus-Alstätter Eisenbahn AG
- BASF SE
- DB Schenker Rail AG
- GATX Rail Germany GmbH
- Knorr-Bremse Systeme für Schienenfahrzeuge GmbH
- SBB Cargo AG
- VTG AG
- Waggonbau Graaf GmbH
- WBN Waggonbau Niesky GmbH

Ziel des TIS ist es, durch eine gemeinsame Zielsetzung und Vorgehensweise der Akteure die Innovationskraft des Schienengüterverkehrs zu stärken und mit innovativen Güterwagen die Wachstumschancen des Sektors zu erhöhen.

In diesem Zusammenhang wurde von den Mitgliedern des TIS in Zusammenarbeit mit der hwh Gesellschaft für Transport- und Unternehmensberatung mbH ein Excel-Tool entwickelt, mit dem die LCC von Drehgestellen berechnet werden können. Dies soll der Bewertung innovativer Ansätze dienen.

Die folgenden Informationen wurden der Dokumentation des Tools [11] entnommen.

Die Eingangsdaten des LCC-Tools wurden im Rahmen einer sektorenübergreifenden Studie im TIS auf der Basis von realen Kostensätzen bzw. von hergeleiteten Kostensät-

zen erhoben. Grundlage für die LCC-Berechnungen sind durchschnittliche Ist-Kostensätze aus der planmäßigen und außerplanmäßigen Instandhaltung von Drehgestellen im Schienengüterverkehr. Wo Ist-Kostensätze nicht vorhanden waren, wurden durch die Experten der beteiligten Unternehmen plausible Schätzungen durchgeführt.

Bisher wurde zur Ermittlung der LCC nur das Fahrwerk inklusive Bremsanlage betrachtet. Weitergehende Entwicklungen des Modells sollen noch weitere Komponenten des Güterwagens betrachten und außerdem den Nutzen von Innovationen durch ein Ertragswertmodell berücksichtigen.

Das Modell arbeitet heute mit folgenden Methoden und Annahmen:

- Die LCC werden auf der Basis der Discounted Cash-Flow-Methode ermittelt. D. h. die in der Zukunft auftretenden Kosten werden mit einem Zinssatz von 8 % abdiskontiert. Dieser Zinssatz ist in dem Modell frei einstellbar. Ebenso wird eine Kostensteigerungsrate berücksichtigt, die ebenfalls frei einstellbar ist und standardmäßig 2,5 % jährlich beträgt.¹⁰
- Die verwendete Währung bei der Berechnung ist der Euro.
- Die Lebenszykluskosten für Drehgestelle werden in der derzeitigen Modell-Version für ein Standard-Drehgestell Y25 1xBGU berechnet. Dabei werden die LCC für das gesamte Drehgestell in folgende vier Module unterteilt:
 - Drehgestell-Rahmen,
 - Radsatz,
 - Bremssystem sowie
 - Sensorik

¹⁰ Bei der Untersuchung verschiedener Zins-Szenarien durch die Autoren kam es zu nicht plausibel erscheinenden Kostensprüngen. Dies wurde später durch Mitarbeiter der hwh Gesellschaft für Transport- und Unternehmensberatung mbH bestätigt. Im Rahmen dieser Studie wurde daher ausschließlich mit den Standsätzen (8 % Abzinsung und 2,5 % Teuerung) gerechnet.

- Für das Bremssystem werden folgende vier verschiedene Ausführungen betrachtet:
 - Wellenscheibenbremse,
 - Konventionelle Klotzbremse (K-Sohle) mit zweiseitiger Abbremsung,
 - Konventionelle Klotzbremse (K-Sohle) mit einseitiger Abbremsung,
 - Konventionelle Klotzbremse (Grauguss-Sohle) mit zweiseitiger Abbremsung.
- Das eingesetzte Bremssystem hat erhebliche Auswirkungen auf die LCC von Drehgestellen. Daher kann eine Bremskonfiguration aus den vier o. g. Bremssystemen frei gewählt werden.
- Die LCC-Berechnung beinhaltet die Kostenpositionen Beschaffungskosten, planmäßige und außerplanmäßige Instandhaltung sowie Restwerte der einzelnen Module.
- Das LCC-Modell ist auf eine Laufzeit von 20 Jahren ausgelegt. Da die jeweiligen Module eine höhere technische Lebensdauer haben, wird nach Ablauf der Laufzeit von 20 Jahren ein Restwert für die jeweiligen Module ermittelt.
- Die Werte für die Beschaffungskosten stellen eine erhebliche Eingangsgröße für die LCC dar, da diese ab dem Zeitpunkt $t=0$ einfließen. Dadurch haben hier auch geringfügige Änderungen in den Beschaffungskosten erhebliche Auswirkungen. Weiter können die Kosten für dasselbe Bremssystem je nach Wagenkategorie und gewünschter Ausstattung um bis zu 25 % variieren. In dem Modell wurden die Beschaffungspreise für die verschiedenen Bremssysteme durch einen Bremssystemhersteller vorgelegt. Durch die Teilnehmer der Arbeitsgruppe wurde eine Einigung auf einen durchschnittlichen Beschaffungspreis je System/Modul erzielt. Die Beschaffungskosten können in dem Modell allerdings auch unternehmensindividuell eingestellt werden.
- Für die Berechnung der LCC für Drehgestelle wird angenommen, dass diese in Güterwagen eingebaut sind, die gemischt sowohl in Ganzzugverkehren als auch in Einzelwagenverkehren eingesetzt werden (Verhältnis 50:50).

- Ebenso wird für die betrachteten Drehgestelle angenommen, dass diese gemischt sowohl in Güterwagen der Ausführung „s“ als auch in der Ausführung „ss“ eingesetzt werden (Verhältnis 50:50).

Bei der Analyse der Instandhaltungskosten von Drehgestellen der TIS-Unternehmen konnten teils deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Unternehmen festgestellt werden. Dies ist insbesondere dadurch begründet, dass die Güterwagen der TIS-Unternehmen teilweise in verschiedenen Ländern eingesetzt werden und dort verschiedene Niveaus für Instandhaltungskosten bestehen. Bei den im Modell verwendeten Kostensätzen handelt es sich daher um durchschnittliche Ist-Kostensätze aus einem europäischen Bahnbetrieb. Daher können die Kosten bei Einsatz der Güterwagen in einzelnen europäischen Ländern durchaus abweichen (z. B. aufgrund höherer oder niedrigerer Werkstattkosten). Die Kosten für die planmäßige Instandhaltung von Drehgestellen können im Modell jedoch auch unternehmensspezifisch eingestellt werden.

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Berechnungen wurden für die Wellenscheibenbremse, die Klotzbremse mit K-Sohle mit zweiseitiger Abbremsung und für die Klotzbremse mit GG-Sohle durchgeführt.

5.6 UIC Bericht „Railway Noise in Europe“

Der UIC Bericht „Railway Noise in Europe – A 2010 report on the state of the art“ [8] beschäftigt sich entsprechend seines Namens mit Bahnlärm, den politischen Randbedingungen und Möglichkeiten zur Reduktion des Bahnlärms. Dabei werden jedoch auch kurz erhöhte Kosten, die durch den Betrieb von Wagen mit K- und LL-Sohlen entstehen, thematisiert. Ohne detailliertere Informationen über Randbedingungen oder Erfassungsmethoden zu nennen, werden in einer Tabelle die Ergebnisse verschiedener Studien von verschiedenen Gutachtern zusammengefasst. Diese Tabelle beinhaltet teilweise auch Ergebnisse, die im Rahmen dieser Studie bereits vorgestellt wurden.

Zusätzlich sind drei weitere Quellen genannt, die hier ebenfalls der Vollständigkeit halber erwähnt werden sollen. Die Quellen sowie die im Rahmen dieser Studie relevanten Ergebnisse finden sich in Tabelle 10.

Tabelle 10: Zusätzliche Kostensätze und Quellen aus [8]

Quelle	Jahr	zusätzliche Kosten pro Wagen			
		bei K-Sohlen		bei LL-Sohlen	
		in EUR/km	in CHF/km	in EUR/km	in CHF/km
ERRI Bericht	2004	0,007 - 0,025	0,007 - 0,026	-	-
PWC DG TREN Einschätzung	2007	0,004	0,004	0,0041	0,0043
KWC DG TREN Studie	2009	0,0053	0,0055	0,0054	0,0056

6 Ergebnisse

6.1 LCC bei Verwendung von GG-Sohlen und Auswirkungen der Betriebs- und Randbedingungen auf den Verschleiß

In den verwendeten Quellen im Abschnitt 5 wurde bereits an mehreren Stellen darauf hingewiesen, dass die Betriebs- und Randbedingungen einen großen Einfluss auf das Verschleißverhalten von Bremssohlen und Rädern haben. Besonders deutlich wird dies beispielsweise in den Projekten „Whispering Train“ und „EuropeTrain“.

Die LCC des Laufwerks der Wagen werden maßgeblich durch das Verschleißverhalten durch den Bremsbetrieb, namentlich also die Verschleißraten von Bremssohlen/-backen und Rädern/Bremsscheiben, bestimmt. Zur größenordnungsmäßigen Einordnung der im Abschnitt 6.2 aufgelisteten zusätzlichen LCC bei der Verwendung von Verbundstoff- und Scheibenbremsen sollen in diesem Abschnitt die entstehenden LCC bei Verwendung von GG-Sohlen dargestellt werden. Außerdem sollen die Schwankungen der Verschleißraten bzw. Lebensdauern der GG-Sohlen und GG-gebremsten Räder sowie die monetären Auswirkungen dieser Schwankungen anhand des in Abschnitt 5.5 vorgestellten TIS LCC-Tools exemplarisch aufgezeigt werden.

6.1.1 LCC bei Verwendung von GG-Sohlen

Um die entstehenden zusätzlichen Kosten durch die Verwendung von Verbundstoffsohlen und Scheibenbremsen größenordnungsmäßig einstufen zu können, sind in diesem Abschnitt die durch das Laufwerk entstehenden LCC pro Kilometer und vierachsigen Wagen in Abhängigkeit der jährlichen Laufleistung dargestellt. Zur Berechnung der Werte wurde das TIS-Tool verwendet. Es wurden die Standardwerte aus dem Programm gemäß der Ausführungen in Abschnitt 5.5 verwendet¹¹. Es werden nur die Kosten für die Laufwerke der Wagen inklusive Bremseinrichtungen betrachtet. Die LCC für die Aufbauten der Wagen sind auf Grund der großen Streubreite unter den verschiedenen Wagengattungen nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse finden sich in Abbildung 7.

¹¹ Die in Abschnitt 5.5 genannten Sätze für Teuerung und insbesondere Abzinsung erscheinen eher hoch. Andere Werte führten jedoch gemäß der Angaben in Abschnitt 5.5 auf Grund eines Fehlers im Programm zu falschen Ergebnissen. Mitarbeiter des TIS haben jedoch die Richtigkeit der Rechnungen für die Standardwerte bestätigt. Da im Rahmen dieses Berichts jedoch nicht die absoluten Kosten nach 20 Jahren, sondern der Unterschied zwischen den verschiedenen Bremsbauarten im Vordergrund steht, sind die Auswirkungen verschiedener Zinssätze weniger gravierend.

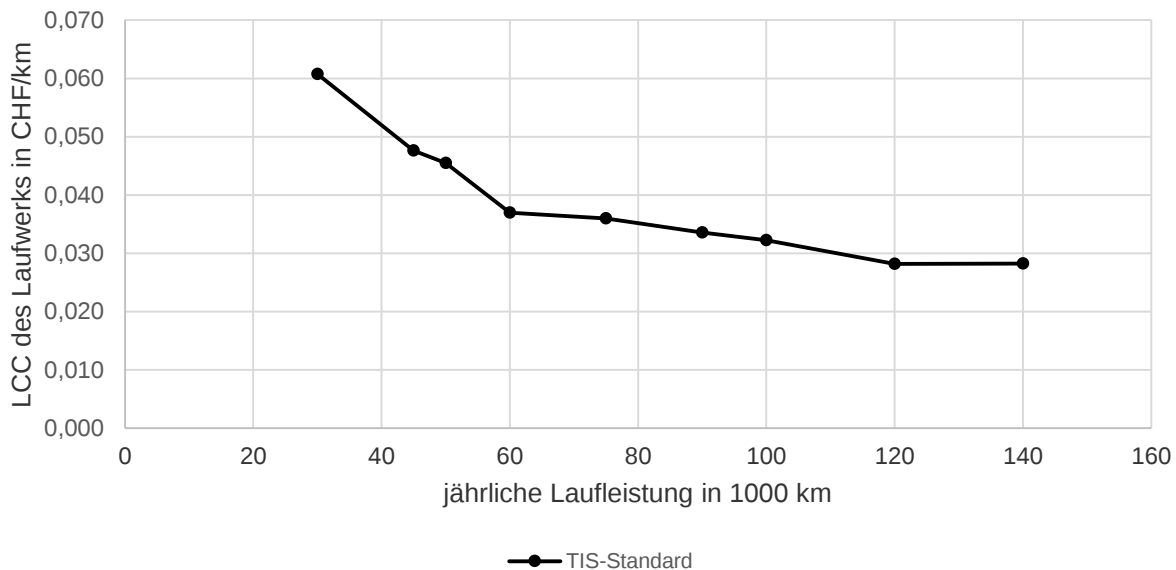


Abbildung 7: LCC des Laufwerks eines GG-gebremsten vierachsigen Güterwagens in Abhängigkeit der jährlichen Laufleistung bei einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren. Eigene Darstellung mit Daten aus [11]

Es zeigt sich ein fallender Verlauf der LCC je Kilometer über die jährliche Laufleistung. Bei einer jährlichen Laufleistung von 30.000 km ergeben sich Kosten in Höhe von etwa 0,060 CHF je Kilometer. Bei einer jährlichen Laufleistung von 140.000 km halbiert sich dieser Wert auf etwa 0,030 CHF je Kilometer.

6.1.2 Unterschiedliche Verschleißraten und Lebensdauern bei GG-Sohlen und deren monetäre Auswirkungen

Die Betriebs- und Rahmenbedingungen haben einen großen Einfluss auf das Verschleißverhalten aller Bremsbauarten. Abbildung 8 zeigt die angegebenen Laufleistungen bis zur Reprofilierung der Räder bei Verwendung von GG-Sohlen im TIS-Tool und im Projekt „Dolomite Shuttle“. Während im TIS-Tool mit einer Laufleistung von 250.000 km gerechnet wird, wurde im Projekt „Dolomite Shuttle“ eine Laufleistung von 350.000 km bestimmt. Dies sind 40 % mehr. In ähnlicher Weise verhalten sich die in den Projekten „Dolomite Shuttle“ „EuropeTrain“ gemessenen Raddurchmesserverschleißraten bei den GG-gebremsten Rädern. Diese Ergebnisse finden sich in Abbildung 9. Hier zeigt sich im Projekt

„EuropeTrain“ eine um 60 % höhere Durchmesserverschleißrate der GG-gebremsten Räder als im Projekt „Dolomite Shuttle“.

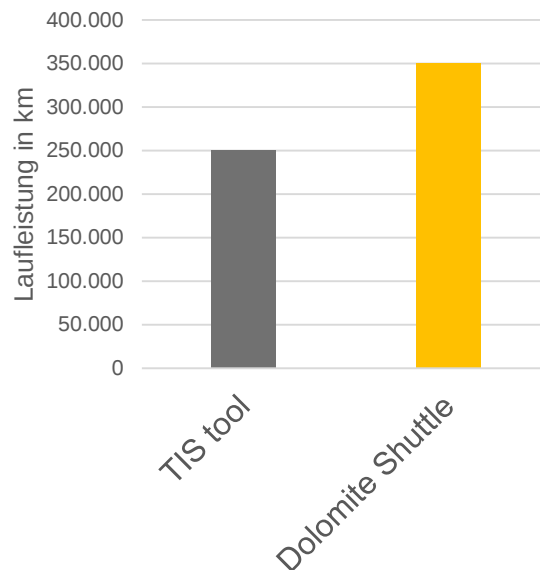


Abbildung 8: Laufleistung bis Reprofilierung der Räder bei GG-Sohlen in km. Eigene Darstellung mit Daten aus [11] und [4]

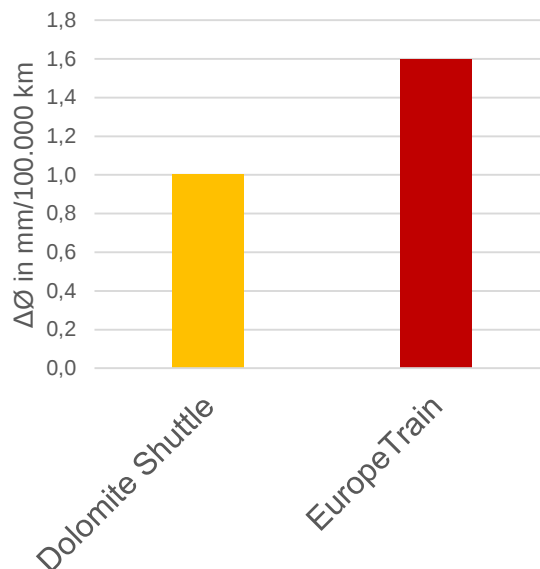


Abbildung 9: Raddurchmessererschleißraten bei GG-Sohlen in mm/100.000 km. Eigene Darstellung mit Daten aus [4] und [2]

Abbildung 10 zeigt schließlich die Lebensdauer in km der GG-Sohlen, wie sie im TIS-Tool und in den Projekten „Dolomite Shuttle“ und „EuropeTrain“ angegeben ist. Während die Werte der beiden letztgenannten Projekte mit 75.000 km respektive 78.000 km sehr

ähnlich sind, wird im TIS-Tool mit einer Lebensdauer von nur 45.000 km gerechnet. Dieser Wert ist 40 % kleiner als im Projekt „EuropeTrain“.

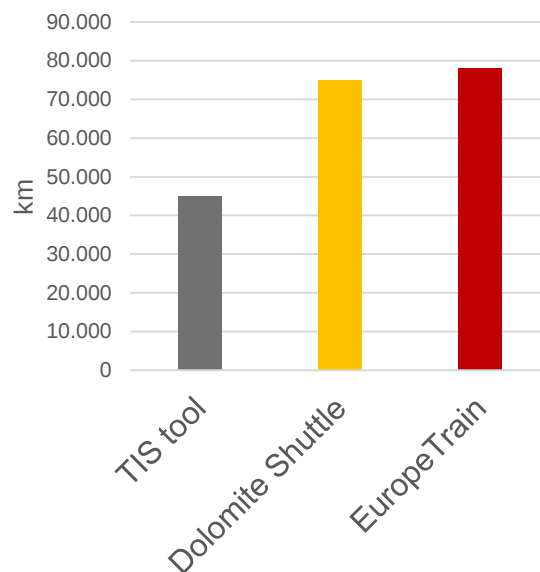


Abbildung 10: Lebensdauer der GG-Sohlen in km. Eigene Darstellung mit Daten aus [11], [4] und [2]

Diese Ergebnisse zeigen, dass auch bei der konventionellen GG-Sohle große Unterschiede im Verschleißverhalten je nach Anwendungsfall und Randbedingungen auftreten. Folglich kommt es auch bei den GG-Sohlen zu unterschiedlichen LCC. Diese Unterschiede der LCC, hervorgerufen durch die Betriebs- und Randbedingungen, müssen bei der Bewertung der zusätzlichen LCC bei Verbundstoffsohlen und Scheibenbremsen im folgenden Abschnitt unbedingt berücksichtigt werden.

Abbildung 11 zeigt exemplarisch die monetären Auswirkungen der höheren Laufleistung der Räder bis zur Reprofilierung sowie der höheren Lebensdauer der Sohlen im Projekt „Dolomite Shuttle“ im Vergleich zu den Standardwerten im TIS-Tool in Analogie zu Abbildung 7. Es zeigt sich, dass die LCC des Laufwerks mit den Werten aus dem Projekt „Dolomite Shuttle“ über alle jährlichen Laufleistungen niedriger sind als mit den Standardwerten des TIS-Tools. Die Differenz bewegt sich stets zwischen 0,0020 und 0,0035 CHF/km. Dies entspricht 5 % bis 9 % der LCC je Kilometer des TIS-Standard-Falls. Dieses Ergebnis ist vor dem Hintergrund der um 40 % niedrigeren Laufleistungen bis zur Reprofilierung und der um 40 % niedrigeren Lebensdauern der GG-Sohlen bemerkenswert. Es ist jedoch zu beachten, dass alle Kosten im Bereich des Laufwerks, wie

beispielsweise die Anschaffungskosten des Drehgestellrahmens und die der Fristarbeiten berücksichtigt werden.

Insgesamt kann daraus geschlussfolgert werden, dass es auch innerhalb einer einzigen Bremsbauart (in diesem Fall Grauguss-Klotzbremsen) zu verschiedenen LCC in Abhängigkeit der Randbedingungen kommt. Dies zeigt, dass die Randbedingungen bei der Angabe von (zusätzlichen) LCC bei Verbundstoffbremssohlen und Scheibenbremsen in jedem Fall beachtet werden müssen und die Angabe von universell gültigen LCC unabhängig von den Randbedingungen höchstens einen groben Richtwert darstellen kann.

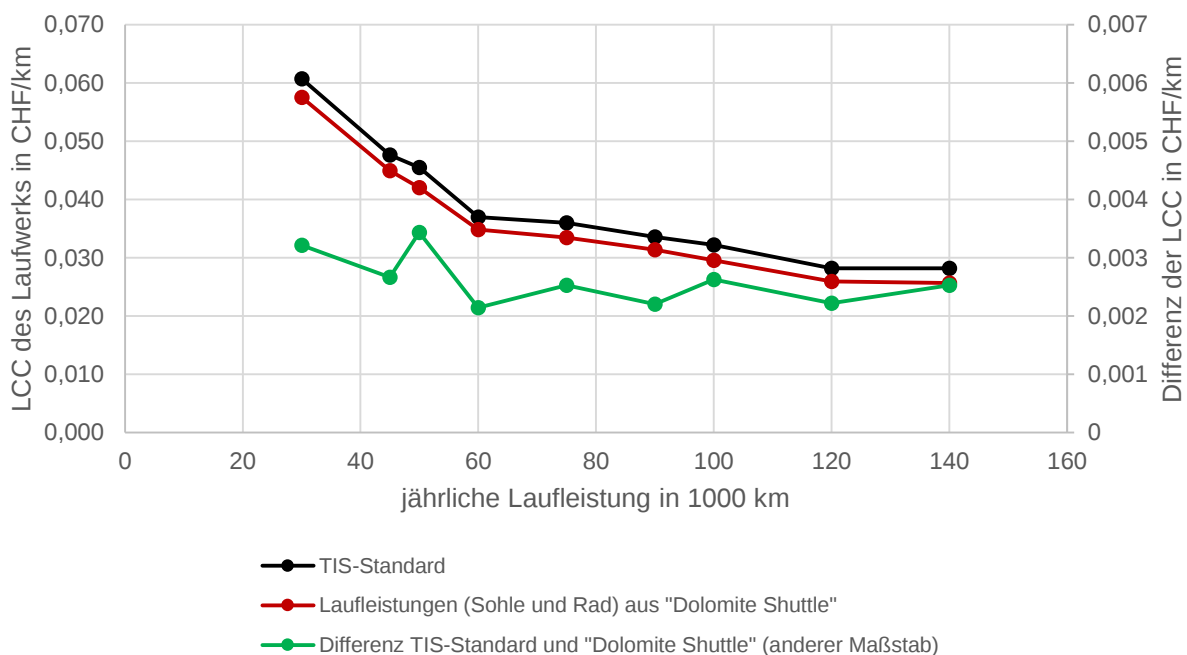


Abbildung 11: LCC des Laufwerks eines GG-gebremsten vierachsigen Güterwagens in Abhängigkeit der jährlichen Laufleistung bei einem Betrachtungszeitraum von 20 Jahren. Eigene Darstellung mit Daten aus [11] und [4]

6.2 Zusätzliche LCC der Verbundstoffsohlen und Scheibenbremsen

Abbildung 12 zeigt die Zusammenfassung aller im Abschnitt 5 vorgestellten zusätzlichen Kosten je Kilometer eines vierachsigen Wagens der jeweiligen Bremsausrüstung im Vergleich zu einem Wagen mit GG-Bremse. Dreiecke stehen dabei für Kostensätze, die sich explizit auf eine bestimmte jährliche Laufleistung beziehen. Quadrate beziehen sich ebenfalls explizit auf eine bestimmte jährliche Laufleistung und berücksichtigen außerdem einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren und Zinseffekte. Durchgezogene Linien

mit Kreisen berücksichtigen ebenfalls einen Betrachtungszeitraum von 20 Jahren sowie Zinseffekte und wurden mit Hilfe des LCC-Tools für verschiedene jährliche Laufleistungen bestimmt. Gestrichelte Linien mit Kreisen oder Rauten stehen für Werte bei denen keine Angaben zu Zinseinflüssen oder Laufzeiten gemacht wurden und für die keine bestimmte jährliche Laufleistung als Grundlage angegeben wurde.

In den Legenden der einzelnen Datensätze sind außerdem jeweils das Projekt, aus dem die Daten stammen, sowie die Randparameter des jeweiligen Datensatzes angegeben.

Es zeigen sich insgesamt drei verschiedene Kostenbereiche, in denen sich die ermittelten zusätzlichen Kosten bewegen.

Der höchste Kostenbereich befindet sich zwischen etwa 0,032 CHF/km und 0,036 CHF/km. Dieser Bereich ist zu vernachlässigen, weil die beiden Werte unwahrscheinliche Szenarien darstellen. Der obere Wert (hellblaues Dreieck), der mit Daten aus dem Projekt „Leiser Rhein“ bestimmt wurde, berücksichtigt die Umrüstkosten auf die K-Sohle. In Zeiten der zugelassenen LL-Sohlen ist jedoch nicht mehr von einer Umrüstung bestehender Wagen auf K-Sohle zu rechnen, sondern nur noch mit dem Einbau der K-Sohle in Neubaufahrzeuge. In diesem Fall sind die Beschaffungskosten des Bremssystems jedoch nur 350 EUR / 366 CHF teurer als das GG-Bremssystem [11]. Dieser Unterschied wirkt sich über die Lebensdauer eines Wagens nicht bemerkenswert aus. Daher ist nur mit den erhöhten Kosten im Betrieb zu rechnen, die sich im zweiten Kostenbereich befinden (dunkelblaues Dreieck). Der zweite Eintrag im oberen Kostenbereich ist die LL-Sohle C952 bei einer zulässigen äquivalenten Konizität von 0,23 (gelb gestrichelte Linie) im Projekt „Whispering Train“. Da mittlerweile die zulässige Grenze der äquivalenten Konizität 0,40 beträgt, ist dieser Wert sehr restriktiv. Zusammen mit den zu wenig restriktiven Werten mit der zulässigen äquivalenten Konizität von 0,60 im niedrigsten Kostenbereich (siehe unten) ergibt sich so jedoch ein Streuband der Kosten.

Der mittlere Kostenbereich erstreckt sich von etwa 0,017 CHF/km bis 0,024 CHF/km. In diesem Kostenbereich befinden sich insbesondere die Kosten, die im Rahmen des Projekts „Leiser Rhein“ ermittelt wurden. Außerdem befinden sich hier die von der ehemaligen Eisenbahnforschungseinrichtung ERRI ermittelten Kosten für die K-Sohle.

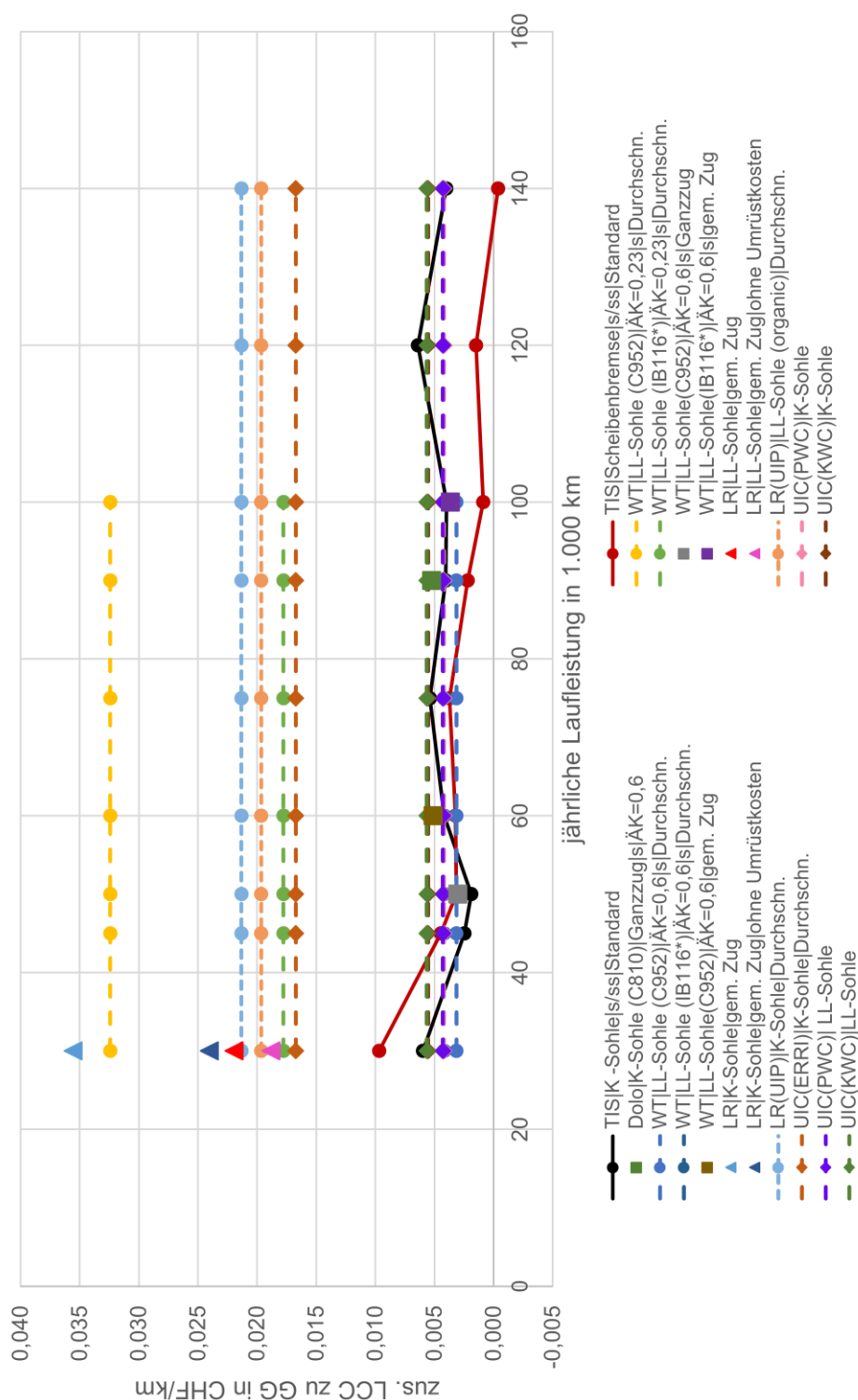
Der untere Kostenbereich schließlich erstreckt sich von knapp unter 0 CHF/km bis etwa 0,010 CHF/km. In diesem Kostenbereich befinden sich die mit dem TIS LCC-Tool berechneten Kosten (sowohl K-Sohle zweiseitig als auch Scheibenbremse), die in den Studien von kwc und pwc ermittelten Kosten sowie die im Projekt „Whispering Train“ ermittelten Kosten für eine zulässige äquivalente Konizität von 0,60.

Bemerkenswert in diesem Kostenbereich ist, dass die Scheibenbremse nach den Berechnungen mit dem TIS LCC-Tool ab etwa 55.000 km jährlicher Laufleistung wirtschaftlicher ist als die zweiseitige K-Sohle, die mit demselben Programm berechnet wurde. Mit Ausnahme der C952-Sohle bei einer zulässigen äquivalenten Konizität von 0,60 ist die Scheibenbremse nach diesen Berechnungen damit ab 55.000 km jährlich günstiger als alle untersuchten Verbundstoffsohlen. Ab 135.000 km jährlicher Laufleistung ist die Scheibenbremse sogar wirtschaftlicher als die GG-Bremse.¹²

Abbildung 13 zeigt in Analogie zu Abbildung 12 nur die im Rahmen dieser Studie genannten zusätzlichen Kosten eines Wagens mit K-Sohlen. Abbildung 14 zeigt in Analogie zu Abbildung 12 nur die im Rahmen dieser Studie genannten zusätzlichen Kosten eines Wagens mit LL-Sohlen.

Auch in diesen beiden Abbildungen finden sich die drei angesprochenen Kostenbereiche wieder.

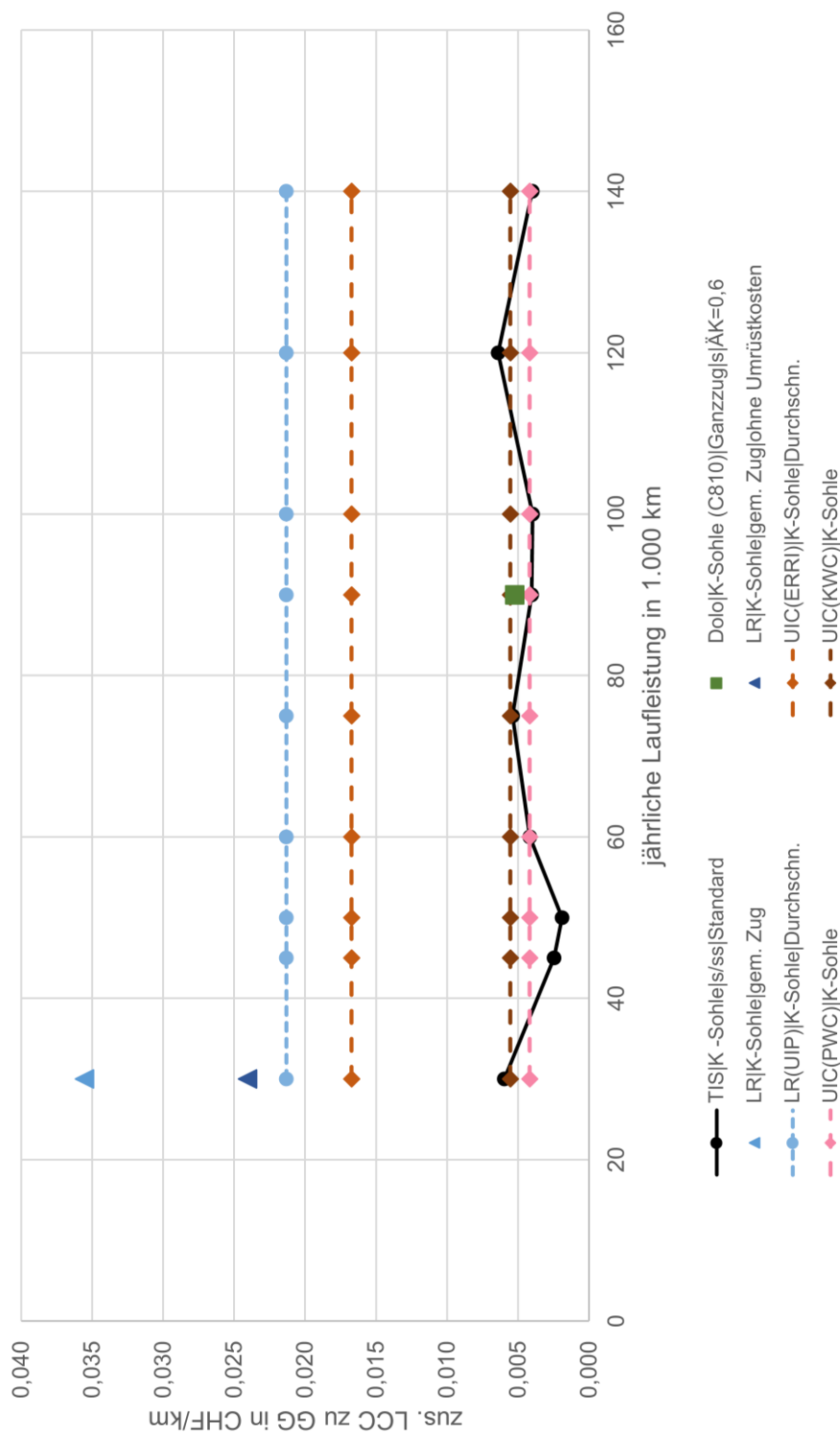
¹² In der Dokumentation des TIS LCC-Tools [12] wird von einer jährlichen Laufleistung von 90.000 km und den Grundeinstellungen des LCC-Tools gesprochen, ab der die Scheibenbremse wirtschaftlicher sei. Im Rahmen dieser Studie wurde jedoch auch mit den Grundeinstellungen des LCC Tools gerechnet. Warum es zu den Abweichungen bei diesem Schnittpunkt kommt, ist nicht bekannt. Möglicherweise haben sich die Grunddaten des Tools seit Erstellung der Dokumentation und Veröffentlichung des Tools nochmals geändert.



TIS = TIS LCC-Tool
 Dolo = Dolomite Shuttle
 WT = Whispering Train
 LR = Leiser Rhein
 LR(UIP) = Daten der UIP aus „Leisem Rhein“
 UIC(xxx) = Daten aus UIC Studie

Daten mit durchgezogenen Linien — oder quadratischen Punkten ■ berücksichtigen ausdrücklich einen Zeitraum von 20 Jahren und einen Zinseinfluss.
 Andere sind Durchschnittswerte ohne ausdrücklich genannten Zeitraum oder Zinseffekte.

Abbildung 12: Zusätzliche LCC eines vierachsigen Wagens mit Verbundstoffsohlen / Scheibenbremse im Vergleich zu einem GG-gelagerten Wagen

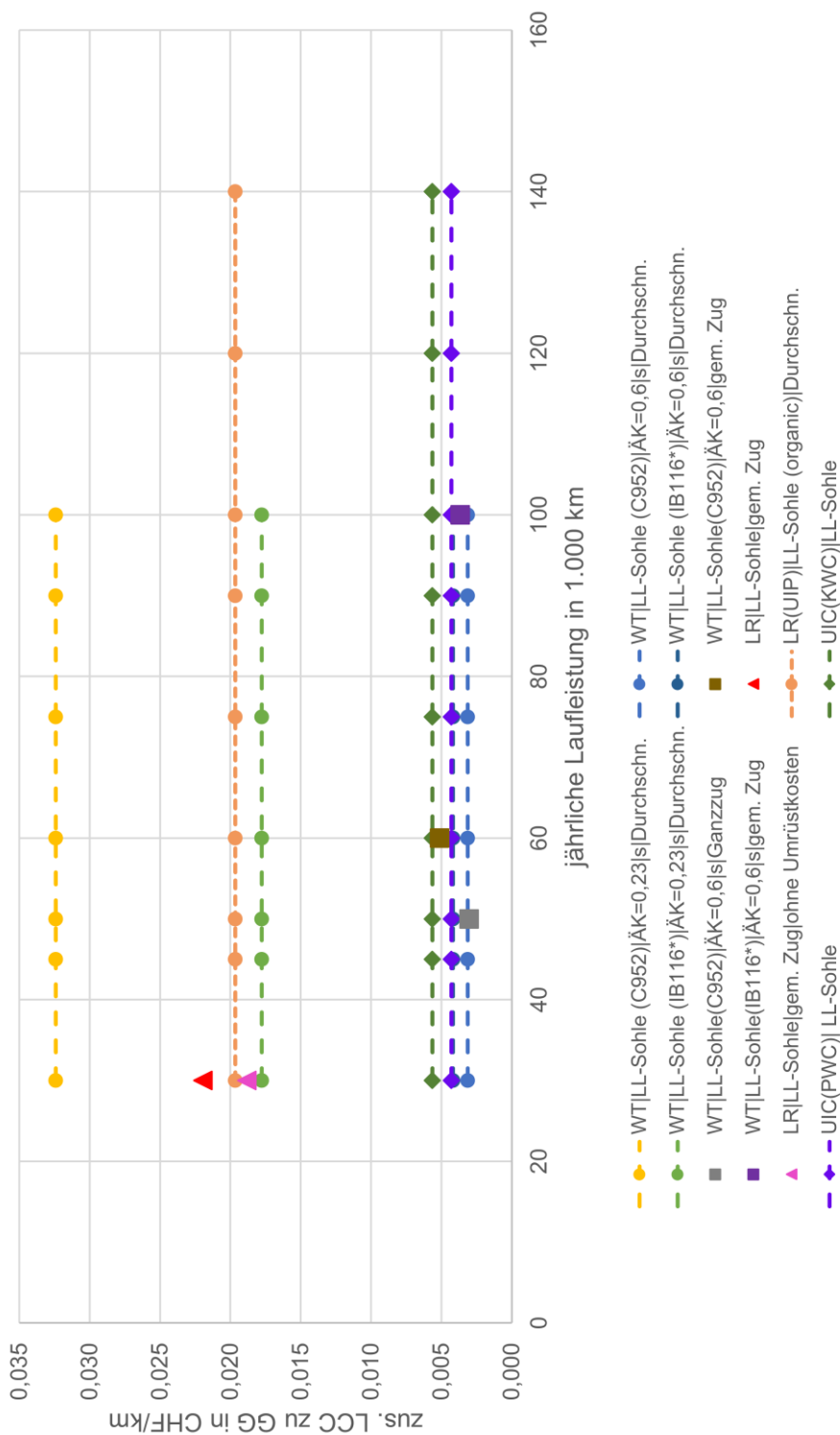


Daten mit durchgezogenen Linien  oder quadratischen Punkten  berücksichtigen ausdrücklich einen Zeitraum von 20 Jahren und einen Zinseinfluss.

Andere sind Durchschnittswerte ohne ausdrücklich genannten Zeitraum oder Zinseffekte.

TIS = TIS LCC-Tool
 Dolo = Dolomite Shuttle
 WT = Whispering Train
 LR = Leiser Rhein
 LR(UIP) = Daten der UIP aus „Leisem Rhein“
 UIC(xxx) = Daten aus UIC Studie

Abbildung 13: Zusätzliche LCC eines vierachsigen Wagens mit K-Sohlen im Vergleich zu einem GG-gebremsten Wagen



TIS = TIS LCC-Tool
 Dolo = Dolomite Shuttle
 WT = Whispering Train
 LR = Leiser Rhein
 LR(UIP) = Daten der UIP aus „Leisem Rhein“
 UIC(xxx) = Daten aus UIC Studie

Daten mit durchgezogenen Linien oder quadratischen Punkten berücksichtigen ausdrücklich einen Zeitraum von 20 Jahren und einen Zinseinfluss.
 Andere sind Durchschnittswerte ohne ausdrücklich genannten Zeitraum oder Zinseffekte.

Abbildung 14: Zusätzliche LCC eines vierachsigen Wagens mit LL-Sohlen im Vergleich zu einem GG-gebremsten Wagen

6.3 Mögliche Maßnahmen zur Verringerung der LCC

Wie in den verschiedenen Quellen im Abschnitt 5 ersichtlich, sind die erhöhten LCC bei Verwendung der Verbundstoffbremssohlen insbesondere dem Verschleißverhalten der Räder zuzuschreiben. Ein Radverschleiß tritt bei der Verwendung der Scheibenbremse kaum auf, weshalb dieses Bremssystem mit Hinblick auf die Reduktion der alleinigen Betriebskosten vorteilhaft ist (siehe Abbildung 12). Nachteilig sind bei der Scheibenbremse jedoch die vergleichsweise hohen Investitionskosten, sodass die Scheibenbremse bisher erst bei hohen bis sehr hohen jährlichen Laufleistungen wirtschaftlich ist. Eine Möglichkeit, diesen Nachteil abzuschwächen, könnten beispielsweise zinsfreie Kredite über eine mehrjährige Laufzeit sein. Damit könnten Scheibenbremsen auch schon bei niedrigeren jährlichen Laufleistungen gegenüber den Klotzbremsen wirtschaftlich vorteilhaft werden.

Grundsätzlich für alle Bremssysteme kann festgehalten werden, dass die Reduktion der Bremsvorgänge mit der Druckluftbremse, bzw. der mit der Druckluftbremse abgeführte Energieanteil zu einer deutlichen Minderung der LCC des Bremssystems führt. Im Abschnitt 5.4.2.2 ist der Zusammenhang der Bremsenergie pro Strecke mit dem Verschleiß der Bremskomponenten aufgezeigt. Außerdem wird gezeigt, dass es landesspezifisch deutliche Unterschiede der Häufigkeit und Intensität der pneumatischen Bremsungen gibt.

Die Reduktion dieser Häufigkeit und Intensität von pneumatischen Bremsungen kann über verschiedene Maßnahmen erreicht werden:

- **Durch die Nutzung von elektrodynamischen Bremsen.** Hierbei wird ein Teil der Bremsenergie nahezu verschleißfrei von den Fahrmotoren in elektrische Energie umgewandelt, die je nach Fahrzeug und Fahrleitungsnetz sogar wieder zurückgespeist werden kann (regenerative Bremse). Um diese Art der Bremsung in Zukunft stärker nutzen zu können, sollten die bestehenden **Grenzen für die zulässigen ertragbaren Längsdruckkräfte** von Güterzügen überprüft und angepasst werden. Außerdem sollte die Verwendung von **automatischen Kupplungen** überprüft werden, die signifikant höhere Längsdruckkräfte zulassen. Mit diesen Maßnahmen wäre es möglich, die vom Triebfahrzeug aufgebrachte Bremskraft zu erhöhen und den Anteil der durch die pneumatische Bremse aufgebrachten Bremskraft zu reduzieren oder bei Betriebsbremsungen ganz auf diese zu verzichten.

- **Durch die flächendeckende Einführung von ETCS Level 2.** Durch die Erhöhung der (elektronischen) Signalsichtweite, kann der Triebfahrzeugführer bei fahrt-einschränkenden Signalbegriffen die Geschwindigkeit bereits frühzeitig durch Ausrollen und elektrodynamischen Bremsungen reduzieren.
- **Durch intelligente Echtzeit-Dispositionssysteme** wie beispielsweise die „Adaptive Lenkung“ (ADL) in der Schweiz. Durch diese Systeme wird der gesamte Verkehrsfluss optimiert und die Zahl vermeidbarer Halte reduziert. Damit würde ein Zug beispielsweise frühzeitig die Geschwindigkeit leicht reduzieren, um ein Signal später ohne Halt passieren zu können.

Die genannten Maßnahmen reduzieren nicht nur die bremsbedingten LCC der Wagen, sie sorgen auch dafür, dass eine nennenswerte Energiemenge und damit auch ein nennenswerter Kostenbetrag eingespart werden kann.

Berlin, 09. September 2015

Prof. Dr.-Ing. Markus Hecht

Daniel Jobstfinke M.Sc.

IV Literaturangaben

- [1] Bing, D. u. Hecht, M.: Der Einfluss von Grauguss- und Verbundstoffsohlen auf die Längsdynamik beim Bremsen im Schienengüterverkehr. ZEVrail 138 (2014) 8, S. 276–281
- [2] UIC B 126/RP 43. Fragen des Bremswesens - Synthese des EuropeTrain-Betriebs mit LL-Bremssohlen - Schlussbericht, Internationaler Eisenbahnverband, Paris 2013
- [3] Anwendungsrichtlinie V-BKS (LL). 10. Ausgabe, Internationaler Eisenbahnverband, o. O. 2013
- [4] Pos, P. u. Peen, J.: Der leise Dolomit-Shuttle. Lärmreduzierende Maßnahmen durch K-Sohlen und Radabsorber. EI – Eisenbahningenieur 58 (2007) 2, S. 30–34
- [5] The Whispering Train Programme. Final report LL-block pilots for the Noise Innovation Programme, Lloyd's Register Rail Europe B.V., Utrecht 2010
- [6] Pilot- und Innovationsprogramm "Leiser Güterverkehr". Abschlussbericht der Vorsitzenden der Arbeitsgruppe 3 – Wagenverfolgung und Trassenpreisgestaltung, Otte, C. u. Jaecker-Cüppers, M., o. O. 2011
- [7] Klocksinn, J.: Lärmschutz an der Schiene. Leverkusen 2013
- [8] Railway Noise in Europe. A 2010 report on state of the art, Internationaler Eisenbahnverband, Paris 2010
- [9] Studie zur Ermittlung von Transaktionskosten verschiedener Anreizmodelle für die Umrüstung der Güterwagen-Bestandsflotte auf Verbundstoff-Bremssohlen, KCW GmbH, Berlin 2011

[10] Wirtschaftliche Auswirkungen der neuen Regelungen. Schlussbericht, UIP Arbeitsgruppe „Economic Impact“, Brüssel 2011

[11] hwh Gesellschaft für Transport- und Unternehmensberatung mbH: Excel-Tool "LCC-Modell Drehgestelle". 2014

[12] Dokumentation Excel-Tool "LCC-Modell Drehgestelle", hwh Gesellschaft für Transport- und Unternehmensberatung mbH, 2014