

Evaluationsbericht zur Anwendbarkeit des TU Graz Verschleissfaktors bei den Meterspurbahnen

Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug – Fahrweg Meterspur
Projekt: 4 Fahrbahnsteifigkeit
Modul: 2 Dynamisches Fahrbahnmodell

Technischer Bericht



ID: RAILPlusSF-00036

Datum / Status: 25.01.2024 / Freigegeben

Seitenanzahl 44

Verfasser: Stefan Marschnig / Technische Universität Graz,
Jackson Buckner / MGBahn

Geprüft: Martin Siegen / MGBahn

Freigegeben: Claudio Häni / RBS

Zitierweise: Marschnig Stefan & Buckner Jackson, RAILplus / Matterhorn Gotthard Bahn:
Evaluationsbericht zur Anwendbarkeit des TU Graz Verschleissfaktors bei den Meterspurbahnen.
Technischer Bericht, RAILPlusSF-00036, 25.01.2024

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Verantwortlich	Beschreibung
0.1	25.01.2024	Marschnig	Erster Entwurf
0.2			Bereinigter Entwurf.
0.3			Bericht redigiert und finalisiert.
1.0			Schlussbereinigung und Freigabe durch Projektleiter

Freigabe durch die Systemführerschaft

Version	Verantwortlich	Datum
1.0	Technical Board	04.02.2024
1.0	Management Board	22.02.2024

Öffentlichkeitsgrad

Öffentlich

Management Summary

Der an der TU Graz entwickelte "Verschleissfaktor" ist eine Sammlung von Modellen, die dazu dienen, den Einfluss verschiedener Fahrzeuge auf die Unterhaltskosten der Fahrbahn analytisch zu beschreiben. Da dieser Faktor auch die Unterhaltskosten nach Fahrzeugeigenschaften aufschlüsselt, stellt er einen zentralen Baustein in Gesamtwirtschaftlichkeitsberechnungen für verschiedene Fahrzeug- und Fahrwegstrategien dar. Aus diesem Grund werden im Rahmen des Projekts P4 (Fahrbahnsteifigkeit) diese Modelle speziell auf die Meterspur angepasst.

Bei der Entwicklung des Verschleissfaktors für Meterspurbahnen stellen gewisse Erfordernisse die Machbarkeit des Modellaufbaus in Frage. Die grösste Herausforderung besteht in der Verfügbarkeit der erforderlichen Daten. Im Zusammenhang mit der Entwicklung von Standardelementen und durch Anfragen bei ausgewählten Bahnen wurde die Datenverfügbarkeit überprüft. Wo keine durchgehende Datenreihen vorhanden sind, wird versucht, mittels Alternativen die Datenlücken zu schliessen. Siehe dazu die folgende Tabelle:

Tabelle 1: Übersicht der Datenverfügbarkeit bei ausgewählten Bahnen (AB, MGB, MOB, RBS, TPF, RhB & ZB)

<i>Datensatz</i>	<i>Verfügbarkeit</i>	<i>Alternativen</i>
Fahrwegzustand (Anlagendaten)	Mehrheitlich vorhanden	Erfahrung Verantwortlicher Fahrbahn
Instandhaltungshistorie	Mehrheitlich vorhanden	Erfahrung Verantwortlicher Fahrbahn
Fahrzeugeigenschaften	Teilweise vorhanden	Eigenschaften von Fahrzeugen, die aktuell im Einsatz sind, sind bekannt. Für historische Fahrzeuge werden Annahmen getroffen
Betriebshistorie	Teilweise Vorhanden	Genauere Betriebsdaten existieren nur seit ca. 5 Jahren. Ältere Betriebsdaten werden anhand historischer Angebotskonzepte und Fahrzeugkonzepte interpoliert
Kostenkalibrierung	Vorhanden	

Abgesehen von der Datenverfügbarkeit gibt es drei weitere Machbarkeitsfragen, die behandelt werden müssen:

- **Schlupfwellen:** Da Schlupfwellen häufig zu Instandhaltungsbedarf bei Meterspurbahnen führen, ist der Verschleissfaktor um diese Schadensform zu ergänzen. Dies wird mithilfe der Simulation des K2-Projekts realisiert.
- **Datenqualität bei «kleineren» Bahnen:** Erfahrungen zeigen, dass kleinere¹ Bahnen die oben genannten Daten nicht in ausreichender Qualität oder Menge bereitstellen können. Daher wird die Strategie verfolgt, den Verschleissfaktor auf Basis der Daten der grösseren Bahnen zu berechnen. Es wird dabei angenommen, dass die Kostenmechanismen bei den übrigen Bahnen ähnlich sind.
- **Unterschiedliche Fahrbahnunterhaltstrategien:** Erst während der Bearbeitung des Verschleissfaktors wird deutlich, ob die Kostenmechanismen zwischen den Bahnen tatsächlich ähnlich sind. Sollte sich diese Annahme als falsch erweisen, müssen separate Verschleissfaktoren berechnet werden.

Die Machbarkeitsfragen bezüglich der Erstellung eines Verschleissfaktors für die Meterspur sind handhabbar, und somit ist die Entwicklung durchführbar.

Die nächsten Schritte umfassen die Herleitung der Standartelemente für die Meterspur, die Vervollständigung der oben genannten Datensätze und die Berechnung des Verschleissfaktors. Der Verschleissfaktor wird anhand von Daten der folgenden Bahnen berechnet:

AB, MGB, MOB, RBS, TPF, RhB & ZB

¹ Kleinere Bahnen: < 50km Streckennetz

Inhalt

1	Einleitung	5
2	Nötige Daten und Verfügbarkeit	7
2.1	Grundannahmen	7
2.2	Standardelemente	7
2.2.1	<i>Fahrwegstatusdaten</i>	7
2.2.2	<i>Instandhaltungsdaten</i>	8
2.3	Fahrzeugdaten	8
2.4	Betriebsdaten	9
2.5	Kostenkalibrierung.....	9
3	Offene Punkte und Fragestellungen	10
3.1	Schädigungsterm für Schlupfwellen	10
3.2	Datenqualität kleinerer Bahnen	10
3.3	Unterschiedliche Fahrbahnstrategien	10
3.4	Historische Fahrzeuge	10
4	Anwendbarkeitsurteil	11
5	Weiteres Vorgehen	12
6	Verzeichnisse	13
6.1	Referenzen	13
6.2	Abbildungen	13
6.3	Tabellen	13
7	Anhang	14

1 Einleitung

Die Methodik Verschleissfaktor verknüpft Fahrbahnschädigungen mit massgebend verursachenden Fahrzeugkenngrössen und somit in weiterer Folge Schädigungsinkremente mit Fahrbahnunterhaltskosten. Die Methodik basiert auf komponentenspezifischen Schädigungsmechanismen, die ausgehend von definierten Fahrzeugkenngrössen wie Radaufstandskräften, ungefederten Massen oder Reibarbeiten in Kombination mit der Fahrzeuggeschwindigkeit oder des Bogenradius des Gleises Teilschädigungen je Fahrzeug beschreiben. Die Summation dieser Teilschädigungen aller Fahrzeuge über den Zeitraum zwischen zwei – bekannten – Fahrbahnunterhaltsmassnahmen ermöglicht den Link zwischen Fahrzeugkenngrössen und Unterhaltskosten. Zur Klarstellung sei vorab festgehalten, dass es sich nicht um einen «Faktor» handelt, wie der Name vermuten liesse – das Ergebnis sind zugeordnete Fahrbahnunterhaltskosten je spezifischem Fahrzeugkilometer. Die Bezeichnung rührt aus dem von der SBB abgearbeiteten Trassenpreisprojekt her, in dessen Rahmen ein vom BAV vorab veröffentlichter «Faktor» zur Modulation des Bruttotonnenkilometerpreises im Trassenpreis erarbeitet werden sollte. Das Ergebnis ist bekannt und seit 2017 implementiert: (zehn) Fahrzeugkilometerkostensätze in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und des Trassierungsradius.

Wie aus Abbildung 1 ersichtlich, sind dafür einige Prozesse notwendig, bevor es am Schluss zu den Ergebnisgrössen kommt: zum einen sind die Gleisstandhaltungsfrequenzen zu erheben. Diese müssen nach Radienbereichen («Bändern») spezifiziert vorliegen. Dies ist am einfachsten über die Methodik «Standardelemente» erzielbar. Da der Fahrbahnunterhalt ja nicht nur von der Belastung bzw. Beanspruchung des Gleises getrieben ist, sondern vielmehr auch durch Unterbausituation und verwendete Oberbaustoffe massgeblich gesteuert wird, sind diese technischen Randbedingungen in den Standardelementen abzubilden. Welche Standardelemente letztlich für die Kostenkalibrierung des Verschleissfaktors verwendet werden, ist dabei nicht von Belang. Zum anderen ist das Schädigungsmodell der Ausgangspunkt für die abschnittsweise Ermittlung der Schadensinkremente.

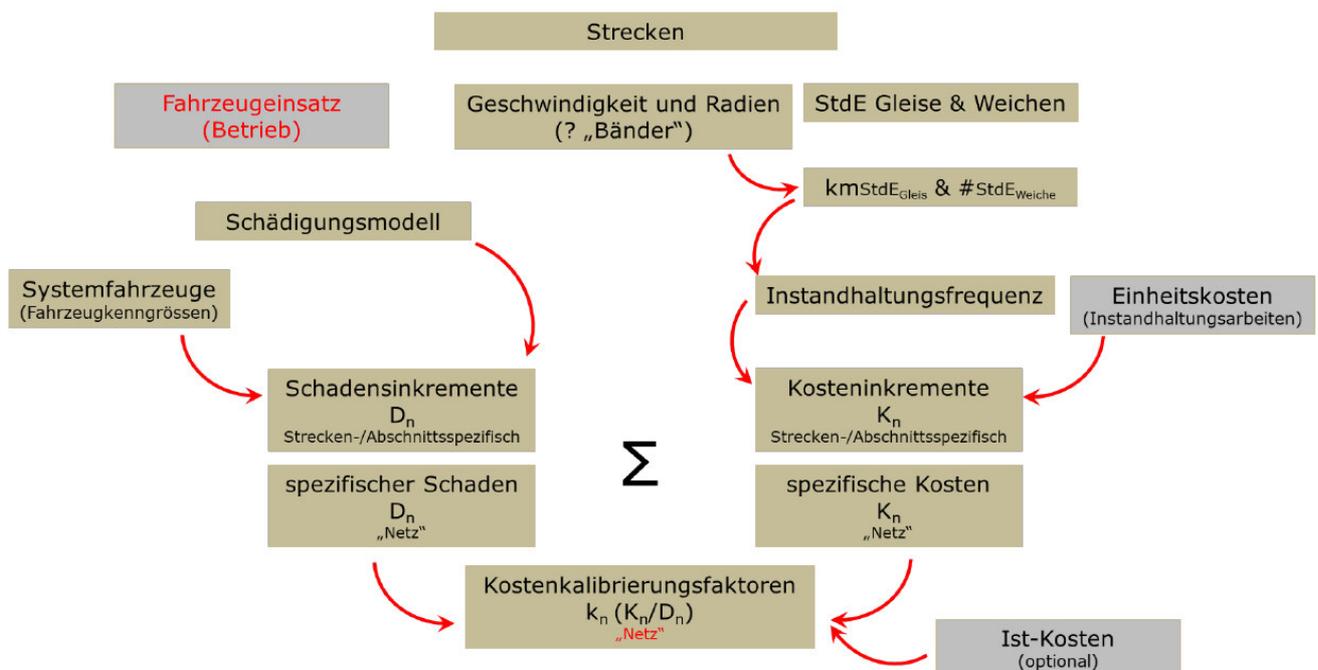


Abbildung 1: Bauplan des Verschleissfaktors

Eine detaillierte Beschreibung der Methodik liegt im bereits erstellten Bericht «Verschleissfaktor Meterspur» vor.

Im Rahmen der Systemführerschaft soll die Methodik Verschleissfaktor zwei Themen unterstützen:

1. Er soll das Verständnis der – sich durch den Einsatz neuer Fahrzeuge ändernden – Fahrbahnschädigungen schärfen. Bei den meisten Betreibern von Infrastrukturen wird der Fahrbahnunterhalt auf Basis einer Kombination aus Erfahrung der Fahrbahningenieure und Messdaten festgelegt. Beide Zugänge sind beschreibende (deskriptive) Ansätze, die die Veränderung des Fahrbahnzustandes bzw. den Verschleiss der einzelnen Fahrbahnkomponenten über der Zeit als Entscheidungsgrundlage verwenden. Es werden Daten und Erfahrungen aus der Vergangenheit und der Gegenwart für den Aufbau einer Erwartungshaltung für bzw. einer Prognose des künftigen Anlagenzustandes und damit der notwendigen Unterhaltmassnahmen herangezogen. Wenn sich nun Randbedingungen massgeblich ändern, wie das durch den Einsatz neuer Fahrzeugflotten gegeben ist, so können deskriptive Zugänge nur noch bedingt helfen. Hier sind analytische Methoden gefragt, die den zukünftigen Bedarf kalkulieren oder simulieren.
2. Des Weiteren soll die Methodik die Betrachtung der Gesamtwirtschaftlichkeit (P6) unterstützen, in der letztendlich die Fahrzeuge (P5) und die Infrastruktur (P4) über die Gleisinstandhaltung verknüpft werden können, um zu ermittelt, welcher der beiden Berührpartner im Sinne der günstigsten Lösung adaptier oder optimiert werden soll.

Da das Erstellen des Verschleissfaktors einiges an Vorarbeit benötigt, insbesondere das Erfassen der Gleisinstandhaltung mittels Standardelementen, wird darauf hingewiesen, dass im ersten Schritt das Thema Weichen ausgespart wird.

2 Nötige Daten und Verfügbarkeit

Um das Modell Verschleissfaktor aufsetzen zu können, braucht es Vorarbeiten, da weder das Schädigungsmodell ohne Änderungen, noch die Kostenkalibrierungsfaktoren aus dem Vollbahnbereich übernommen werden können. Standardelemente müssen erst mit den Daten der Meterspurbahnen erstellt werden. Dieser Prozess benötigt gute, abgesicherte Daten, sowie Diskussion und Festlegungen der Fahrbahningenieure, um ein robustes Fundament für die weiteren Schritte zu bieten.

2.1 Grundannahmen

Das Verschleissmodell hinterlegt die Grundannahme, dass Instandhaltung nur dort gemacht wird, wo Schäden bzw. Verschleiss auftreten. Unabhängig davon, auf welchem Eingriffsniveau gearbeitet wird (reaktiv oder präventiv), bedarf es einer randbedingungsspezifischen Instandhaltung. Flachendeckend durchgeführte Unterhaltsmassnahmen verunmöglichen es, die Kosten unterschiedlicher Schäden auf bestimmte Fahrzeuge, Fahrbahnaufbauten oder Geschwindigkeiten zurückzuführen. Andererseits sollte ein solches Unterhaltsregime eigentlich nicht existieren, da es bedeuten würde, entweder in einigen Netz- oder Streckenteilen viel zu viel oder deutlich zu wenig zu unterhalten. Bei einigen sehr kleinen, abgeschlossenen Betreibern könnten solche Instandhaltungsstrategien auftreten, wenn ausschliesslich die Verfügbarkeit von Instandhaltungsmaschinen den Einsatz steuert. Solche Instandhaltungsdaten dürfen dann nicht mit betrachtet werden.

2.2 Standardelemente

So genannte Standartelemente sind ein Werkzeug, um die Fahrbahn in homogene Abschnitte zu diskretisieren, die ähnliche Instandhaltungsaufwände benötigen und ähnliche Nutzungsdauern aufweisen. Es gibt einige Randbedingungen, die Nutzungsdauer und Instandhaltungsfrequenzen stark beeinflussen. Diese Randbedingungen und ihre Ausprägungen werden angewendet, um letztlich einzelne Standardelemente zu definieren:

- Gleisbelastung (in Gesamtbruttotonnen)
- Längsneigung
- Bogenradius
- Schwellentyp
- Schienenprofil und -stahlgüte
- Unterbau
- Entwässerungszustand

Um die Standardelemente zu entwickeln, braucht es verschiedene Daten von der Meterspurbahnen:

2.2.1 Fahrwegstatusdaten

Die Erarbeitung der Arbeitszyklen (Nutzungsdauer und Instandhaltungsfrequenzen) benötigt Daten aus dem Feld. Um hier die richtigen Daten abgreifen zu können, müssen die Strecken auch in die Parameter der Standardelemente zerlegt werden. Die Datenquellen existieren bei den grösseren Meterspurbahnen:

- Daten zur Belastung sind als Bruttotonnen pro Streckenabschnitt bekannt.
- Die Längsneigung und Bogenradien sind aus Trassierungsdaten (Topo-Rail) verfügbar.
- Daten zu den Oberbaukomponenten, d.h. Einbaujahr und Bauart von Schienen und Schwellen werden aus den Netzzustandsberichten entnommen und sind für mehrere Jahren verfügbar.
- Spezifische, verortete Daten bezüglich des Unterbaus und der Entwässerung existieren leider nicht durchgängig. Dies ist aber im Prozess der Erstellung der Standardelemente abfederbar: Mit den bestehenden Informationen werden im ersten Wurf Standardelemente für «guten

Unterbau» erstellt. Wie die Fahrbahn auf unzureichende Qualität des Unterbaus reagiert, wird mit Hilfe der Erfahrung der Bahnmeister und Anlagenmanager erhoben und in die Standardelemente als Abweichungsszenario eingearbeitet.

2.2.2 Instandhaltungsdaten

Wenn die Segmentierung der Strecken einmal vorliegt, kann die Erstellung der Arbeitszyklen beginnen. Hierfür braucht es eine Instandhaltungshistorie in der Auflösung der Standardelemente. Dies ist der kritische Pfad bei der Erstellung der Standardelemente: grössere Bahnen dürften eine Zeitreihe der durchgeführten Instandhaltung von ca. 10 Jahren abgelegt haben, in unterschiedlicher Form und Auflösung. Lücken und Inkonsistenzen werden mit der Erfahrung der Bahnmeister und Anlagenmanager behoben werden.

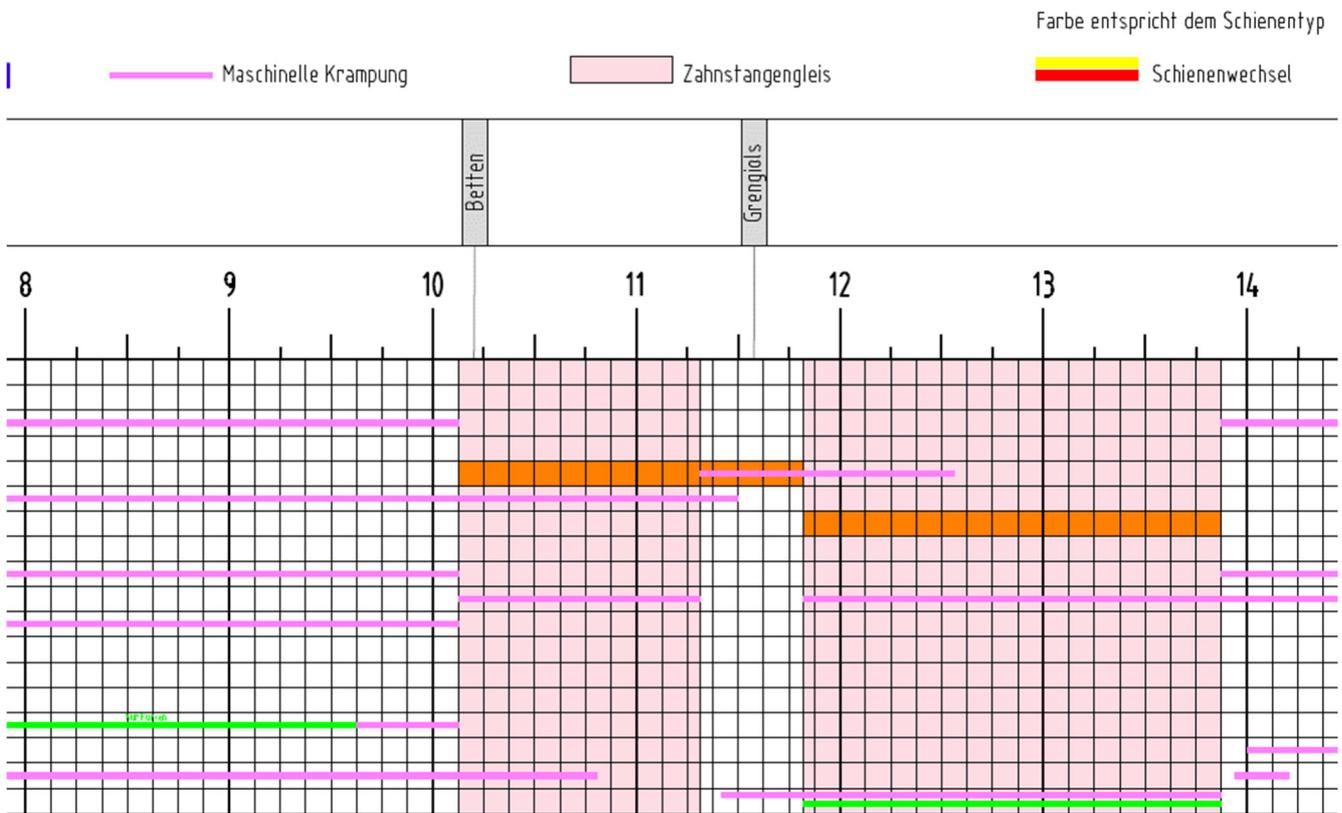


Abbildung 2: Graphische Dokumentation der Instandhaltung bei der MGB

Liegen diese Daten einmal digitalisiert und segmentiert für mehrere Strecken und Bahnen vor, wird ein erster Wurf für die Standardelemente erstellt, der dann in Workshops mit den Fahrbahningenieuren diskutiert wird.

(Der Erhebungsprozess läuft, wenn auch schleppend. Die TU Graz stellt zusätzliche Ressourcen zur Verfügung, da diese bei den Bahnen nicht vorhanden sind.)

2.3 Fahrzeugdaten

Die Ermittlung der Fahrzeugkenngrößen (P2-Kräfte, TPV, Reibarbeit & Führungskräfte) obliegt dem Teilprojekt P5. Für neuere Fahrzeuge liegen diese aufgrund der in P5 schon getanen Arbeit vor. Für historische Fahrzeuge, die zu einem Teil für den historischen Fahrbahnunterhalt verantwortlich sind, müssen Annahmen und/oder Simulationen weiterhelfen.

2.4 Betriebsdaten

Um die notwendigen Fahrzeugkollektive und damit Schädigungskollektive erfassen zu können, braucht es auch ein valides Betriebsdatenset. Es muss, historisiert, bekannt sein, welche Fahrzeuge mit welcher Quantität die Streckenbelastung aufgebracht haben. Die Umlaufdaten des Betriebs sind meist nur beschränkt verfügbar. Zum Beispiel bei der MGB werden diese Daten von RailOpt behoben, aber diese Quelle geht nur bis ins Jahr 2017 zurück. Betriebsdaten weiter in der Vergangenheit werden anhand historische Angebotskonzepte angenähert.

Die Geschwindigkeit über den Streckenlauf wird ebenfalls benötigt, diese sind aber definitiv verfügbar.

2.5 Kostenkalibrierung

Die Kosten der unterschiedlichen Instandhaltungsmassnahmen werden anhand von Marktpreisen und historischen Aufzeichnungen hergeleitet.

3 Offene Punkte und Fragestellungen

Ausser der Verfügbarkeit von Daten gibt es einige offene Punkte und Fragen, die im Rahmen der Entwicklung des Verschleissfaktors zu behandeln sind.

3.1 Schädigungsterm für Schlupfwellen

Schlupfwellen treten bei Meterspurbahnen häufig auf und sind die primäre Form der Schienenschädigung bei den Schweizer Meterspurbahnen. Es ist daher wichtig, für diesen Schaden einen entsprechenden Schädigungsterm zu entwickeln, da ein solcher bei den Vollbahnen bisher nicht abgebildet ist. Dies sollte auf Basis der Simulationen des K2-Projekts erfolgen.

3.2 Datenqualität kleinerer Bahnen

Es wird davon ausgegangen, dass kleinere Bahnen eventuell die in Abschnitt 2 aufgelisteten Daten nicht oder nicht vollumfänglich zur Verfügung stellen können. Es wird die Strategie verfolgt, die Daten der grösseren Bahnen für die Entwicklung und Kalibrierung zu verwenden und zu postulieren, dass die Kostenmechanismen bei den kleineren Bahnen ähnlich sind.

3.3 Unterschiedliche Fahrbahnstrategien

Unterschiedliche Unterhaltsstrategien führen zu unterschiedlichen Nutzungsdauern und umgekehrt. Die Kalibrierung erfordert jedoch genau eine Strategie. Sollte es unter den Bahnen zu erheblichen Auffassungsunterschieden hinsichtlich der durchzuführenden oder durchgeführten Instandhaltung kommen, kann nicht mit ein und demselben Modell operiert werden.

3.4 Historische Fahrzeuge

Das Fokus der Systemführerschaft liegt auf aktuellen Fahrzeugen und auf Fahrzeugen, die in der unmittelbaren Zukunft bestellt werden. Die Schäden der letzte Jahrzehnten sind aber zum überwiegenden Teil durch historische Fahrzeuge verursacht, die höchstwahrscheinlich nie modelliert wurden. Dennoch sind die schädigungsrelevanten Fahrzeugkenngrössen dieser Fahrzeuge notwendig, um den Verschleissfaktor zu kalibrieren. Es braucht daher einen qualifizierten Zugang, diese Kenngrössen zu ermitteln. Das ist eine Aufgabenstellung für P5 und ist daher auch so abzustimmen.

4 Anwendbarkeitsurteil

Grundsätzlich spricht nichts gegen eine erfolgreiche Anwendung des Modells Verschleissfaktor bei den Meterspurbahnen. Es sind einige Adaptionen notwendig, die aber absehbar und umsetzbar sind.

Dennoch sind einige Risiken zu beachten:

- Die Erstellung der Grundlagen für die Fahrbahninstandhaltung (Standardelemente) ist zeitaufwändig und bedarf valider Daten. Die bisherigen Arbeiten zeigen, dass die Erarbeitung der Standardelemente aufgrund fehlender oder nur schwer abrufbarer Daten schleppend vorankommt. Insbesondere die fehlenden zeitlichen Ressourcen bei den Bahnen behindern ein rascheres Vorankommen.
- Die Daten der historischen Fahrzeuge sind unbedingt notwendig, um das Modell zu erstellen bzw. zu kalibrieren. Hier gibt es eine Abhängigkeit zu den Möglichkeiten und Ressourcen von P5.
- Auch die Ermittlung bzw. Aushebung der Betriebs- und Kostendaten wird Manpower benötigen, die seitens der Bahnen zu stellen sind.

Ob es gegebenenfalls mehrere Kalibrierungen für unterschiedliche Instandhaltungsstrategien braucht, wird sich erst mit dem Vorliegen von Standardelementen zeigen.

5 Weiteres Vorgehen

Es wird die Strategie verfolgt, die Daten der folgenden Bahnen für die Entwicklung und Kalibrierung zu verwenden. Dabei wird die Annahme getroffen, dass die Kostenmechanismen bei den übrigen Bahnen ähnlich sind.

- Appenzeller Bahnen (AB)
- Matterhorn Gotthard Bahn (MGB)
- Montreux Oberland Bahn (MOB)
- Regionalverkehr Bern-Solothurn (RBS)
- Rhätische Bahn (RhB)
- Transports publics fribourgeois (TPF)
- Zentral Bahn (ZB)

Die Entwicklungsschritte sind:

- Schritt 1: Erstellen von Standardelemente (läuft)
- Schritt 2: Ermittlung der Einheitskosten
- Schritt 3: Aufbau Verschleissmodell
- Schritt 4: Gggfs. Erweiterung des Verschleissmodells durch einen Schädigungsterm für Schlupfwellen
- Schritt 5: Erheben der Verkehrskollektive der einzelnen Strecken/Bahnen
- Schritt 6: Verschneiden der Fahrzeugkenngrößen mit den Verkehrskollektiven und Streckencharakteristika
- Schritt 7: Kalibrierung des Modells

6 Verzeichnisse

6.1 Referenzen

[1] Marschnig, S., et.al., TU Graz: *Verschleissfaktor Meterspur*. Projektbericht, 2022

6.2 Abbildungen

Abbildung 1: Bauplan des Verschleissfaktors.....	5
Abbildung 2: Graphische Dokumentation der Instandhaltung bei der MGB	8

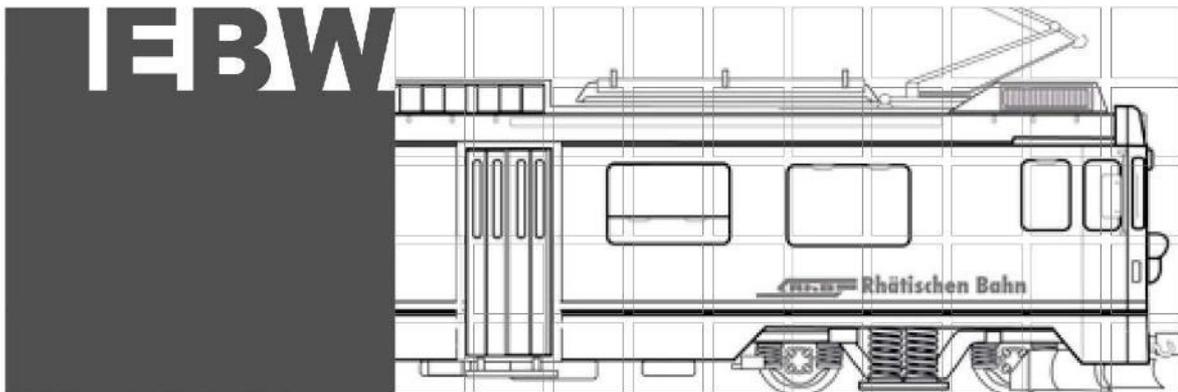
6.3 Tabellen

Tabelle 1: Übersicht der Datenverfügbarkeit bei ausgewählten Bahnen (AB, MGB, MOB, RBS, TPF, RhB & ZB).....	3
---	---

7 Anhang



Technische Universität Graz
Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft



Verschleissfaktor Meterspur

2022



Stefan Marschnig
Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.
+43 664 60 873 6717
stefan.marschnig@tugraz.at

Ursula Ehrhart
Dipl.-Ing.
+43 316 873 4992
ursula.ehrhart@tugraz.at

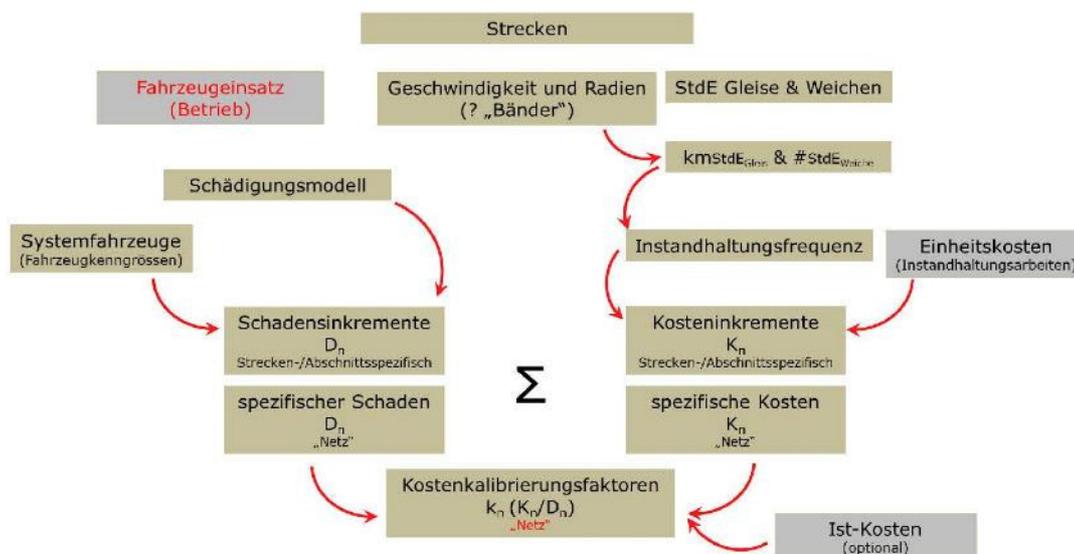
Dieter Knabl
BSc.
+43 316 873 6219
dieter.knabl@tugraz.at



► www.ebw.TUGraz.at

Bauplan Verschleissfaktor

Der Verschleissfaktor Fahrbahn folgt einem relativ einfachen Bauplan:



Notwendige Eingangsdaten:

- Instandhaltungskosten Fahrbahn in der Granularität von Standardelementen (siehe Dokument), das bedeutet in der Auflösung verschiedener Instandsetzungsarbeiten, unterschiedlicher Trassierung (Radien), unterschiedlicher Belastung, ggfs. unterschiedlicher Oberbaustoffe und Unterbauverhältnisse
- Die Auflösung des „Netzes“ (ggfs. der Strecke) in Abschnitte mit unterschiedlicher Geschwindigkeit (Gerade) und Bögen: die Anzahl dieser „Bänder“ ist auf Basis der Fahrbahninfrastruktur (Standardelemente) zu diskutieren
- Die Fahrzeuge: Der Verschleissfaktor ist ein Allokationsmodell, das die Fahrbahnkosten vorab verschiedenen Fahrzeugen und dann deren Fahrzeugkenngrößen zuordnet. Es braucht daher nicht notwendigerweise alle Fahrzeuge am „Netz“, aber zumindest jene, die 80-90% der Verkehrsleistung erbringen („(System)Fahrzeuge“). Von allen diesen Fahrzeugen sind die Fahrzeugkenngrößen (siehe Dokument) zu erheben bzw. simulieren.
- Die Betriebsdaten in Fahrzeugauflösung: wie viele Fahrzeuge welchen Typs verkehren je Tag (eigentlich Jahr, das könnte sich bei einem festen Fahrplan vereinfachen lassen) mit welcher Geschwindigkeit wo. Aus diesem Fahrzeugkollektiv können anschliessend die kumulierten Schädigungssummen errechnet werden.

Das nachstehende Dokument erklärt diese Punkte näher. Basis ist dabei der Verschleissfaktor in Version „2.0“ (nicht der „originale“ VF SBB) mit den ergänzten Schädigungstermen D6 für Weichenherzstücke bzw. D7 für die verschleissgetriebene Erneuerung. Es ist zu diskutieren, ob diese Version oder die Version „SBB“ zur Anwendung kommen soll.

Die in diesem Dokument türkis markierten Abschnitte bilden einen wesentlichen Diskussionspunkt: welche Radien und Geschwindigkeitsbänder in einem Verschleissfaktor Meterspur zu berücksichtigen sind, ist mit den Fachexperten Fahrbahn der Bahnen zu klären.

Inhaltsverzeichnis

1	Verschleissfaktor	5
1.0	Prozedere	5
1.1	Schädigungsmodell	6
1.1.0	Verschleissformel	6
1.1.1	Teilschädigungen	7
1.1.1.1	D1: Gleislageverschlechterung	7
1.1.1.2	D2 und D3: Schienenoberflächenschädigung (im geraden Gleis)	7
1.1.1.3	D4: Schienenoberflächenschädigung (im Bogengleis)	8
1.1.1.4	D5: HZV-Verschleiss & Kleininstandhaltungen von Weichen	8
1.1.1.5	D6: Herzstückschädigung von Weichen	9
1.1.1.6	D7: Komponentenschädigung – Gleis- & Weichenerneuerung	9
1.1.2	Fahrwegdaten	10
1.1.3	Fahrzeugdaten	12
1.1.3.1	Dynamische vertikale Radkraft P_1 und P_2	12
1.1.3.2	Traktionsleistung TPV	13
1.1.3.3	Reibarbeit W_s	15
1.1.3.4	Horizontale Führungskraft Y_R	15
1.2	Kostenkalibrierung	16
1.2.1	Ermittlung der schädigungsspezifischen Kosten K_n	16
1.2.1.1	Massnahmenscharfe Instandsetzungskosten – Standardelemente	17
1.2.2	Ermittlung der Gesamtschädigungen	21
1.2.2.1	Fahrzeuge, Fahrzeugparameter und (System)Fahrzeuge	21
1.2.2.1.1	Fahrzeugdaten & -parameter	21
1.2.2.2	Betriebsdaten	22
1.2.2.3	Ermittlung der Gesamtschädigung	22
1.2.2.3.1	Fahrzeugschadensinkremente D_n	23
1.2.2.3.2	Teilschädigungssummen D_n^* je Strecke(-abschnitt)	24
1.2.2.3.3	Gesamtschädigungen im „Netz“ $D_{n,SUM}$	25
1.2.2.4	Ermittlung der Kostenkalibrierungsfaktoren	26
1.3	Kostengewichtetes Verschleissmodell	27
	Abbildungsverzeichnis	28
	Tabellenverzeichnis	28
	Quellenverzeichnis	29

1 Verschleissfaktor

Dieser Abschnitt beschreibt die (Kosten)Kalibrierung des Verschleissfaktors dem schon gezeigten Bauplan folgend.

1.0 Prozedere

Als Ordnungsrahmen für die Teilschritte der Modellkalibrierung dienen Strecken oder ein Netz bzw. eine Anzahl von Strecken. Die Fahrzeugläufe, damit die Teilschädigungen und die zugehörigen Schädigungskosten, werden jedoch auch in deutlich tieferen, detaillierteren Ebenen modelliert. Die Darstellung der Strecken in Geschwindigkeits- und Radienbändern bilden hier die Grundlagen sowohl für die Berechnung der eingetragenen Teilschädigungen als auch für die Ermittlung der Kosten. Die nachfolgenden zwei Kapitel behandeln die zwei zentralen Themen, das Schädigungsmodell und die Verknüpfung der Schädigungen mit den Fahrwegkosten. Das Schädigungsmodell (Kapitel 1.1) erfasst dabei die massgeblichen Fahrwegschädigungen und stellt den physikalischen Zusammenhang zwischen den verursachenden Fahrzeugeigenschaften und den entstehenden Fahrwegschädigungen her. Die Kostenkalibrierung (Kapitel 1.2) verlinkt die einzelnen Schädigungsmechanismen mit den Fahrweginstandsetzungs- und auch Teilen der Fahrwegerneuerungskosten. Diese Verlinkung bedarf einer Erfassung aller Fahrzeuge und deren Betriebsläufe in einem repräsentativen Netzteil und die zugehörigen Fahrwegkosten. Das dann vorliegende kostenkalibrierte Verschleissmodell (Kapitel 1.3) ermöglicht es, für Fahrzeuge abhängig von den Betriebsbedingungen Kostensätze zu errechnen, die die inkrementellen Fahrwegkosten widerspiegeln. Dabei ist herauszustreichen, dass dies dann auch für Fahrzeuge möglich ist, die nicht oder noch nicht verkehren (Neufahrzeuge).

1.1 Schädigungsmodell

Die hier verwendete Verschleissformel ist eine Weiterentwicklung des Grundkonzepts der SBB für den Verschleissfaktor SBB, welcher 2017 erstmals im Trassenpreismodell implementiert wurde [1].

1.1.0 Verschleissformel

Die Verschleissformel setzt sich aus 7 Schädigungstermen zusammen (D1 bis D7, D für Damage). Die Terme D1 bis D5 sind ident zu jenen des VF SBB, während D6 und D7 eine Weiterentwicklung des Verschleissansatzes darstellen. Jeder der 7 Schädigungsterme beschreibt jeweils eine Teilschädigung, die bei einer Fahrt eines Fahrzeuges entsteht. Die Verschleissformel ist dabei vom Fahrzeug (Fahrzeugparameter), der maximal zulässigen Fahrzeuggeschwindigkeit bzw. der Streckengeschwindigkeit und dem Bogenradius abhängig. In Formel 1 ist die Verschleissformel $VF_{\text{SBB}2.0}$ angeführt.

$$KS_{Fzgv,R} = k_1 \times P_{2,v}^3 + k_2 \times P_{2,v}^{1,2} + k_3 \times TPV + k_4 \times W_{br} + k_5 \times \sqrt{(0.5 \times P_{2,40km/h}^2 + 0.5 \times Y_R = 190m^2)} + k_6 \times P_{1,v}^3 + k_7 \times \sqrt{(f_{71,R} \times P_{2,v}^2 + f_{72,R} \times Y_R^2)} \quad \text{Formel 1}$$

- $KS_{Fzgv,R}$ Kostensatz je Fahrzeugkilometer in €/km
- k_n Kostenkalibrierungsfaktoren (mit n=1 bis 7) in €/(Schädigungstermeinheit*km)
- $P_{2,v}$ dynamische vertikale geschwindigkeitsabhängige Radkraft (in kN)
- $P_{1,v}$ dynamische vertikale geschwindigkeitsabhängige Radkraft - Schlagbeanspruchung (in kN)
- Y_R horizontale Führungskraft (Querkraft) im Radius R (in kN)
- TPV Traction Power Value (in kW/mm²)
- W_{br} spezifische Reibarbeit (in Nm/m)
- $f_{71,R}$ radiusabhängiger Gewichtungsfaktor für den Schädigungsanteil der vertikalen Kraft
- $f_{72,R}$ radiusabhängiger Gewichtungsfaktor für den Schädigungsanteil der horizontalen Kraft

1.1.1 Teilschädigungen

1.1.1.1 D1: Gleislageverschlechterung

Der Schädigungsterm D1 beschreibt die Gleislagegeometriever schlechterung bzw. die Schotterzerstörung anhand der dynamischen vertikalen geschwindigkeitsabhängigen Rad-aufstandskraft P_2 (siehe 1.1.3.1) mit dem Exponenten 3. Der Ansatz des überlinearen Einflusses der repräsentativen Achslast basiert auf dem ORE Bericht 4 zur Frage D 161.1 [2]. Bei der Berechnung des Schädigungsterms D1 wird jeder Radsatz als schädigungsrelevant eingestuft.

1.1.1.2 D2 und D3: Schienenoberflächenschädigung (im geraden Gleis)

Die Schädigung der Schienenoberfläche in der Geraden wird in den Schädigungstermen D2 und D3 eruiert. Die auftretenden Ermüdungserscheinungen in Form von Head Checks und Squats sind einerseits durch das einwirkende gesamte Achslastkollektiv zufolge Zugfahrten (dynamische vertikale Lastkomponente) begründbar. Andererseits ist die Traktionsleistung in Längsrichtung (longitudinale Lastkomponente) als eine der Hauptursachen für die Schienenoberflächenschädigung in der Geraden zu nennen. Die im Schädigungsterm D2 ange-setzte Radkraft P_2 entspricht jener aus D1. Der Ansatz des Exponenten in der Höhe von 1,2 gründet auf den ORE-Berichten zu den Fragen D161 [2] und D141 [3], welche sich zu diesem Thema mit dem Einfluss der Achslast befassen. In D2 ist wiederum jeder Radsatz schädigungsrelevant. Für die Ermittlung des Terms D3 wird die aufgebrauchte Traktionsleistung herangezogen. Die Dauerleistung angetriebener Achsen wird auf die Berührfläche zwischen Rad und Schiene bezogen, weshalb keine Multiplikation mit den Radsätzen notwendig ist [4]. Effektive Zugkräfte oder ähnliches werden nicht miteinbezogen. Der Schädigungsterm D3 bezieht sich lediglich auf angetriebene Radsätze.

Der Schädigungsanteil der vertikalen und longitudinalen Lastkomponenten an der Schienenoberfläche wurde basierend auf einer Auswertung der SBB in ein Verhältnis gestellt. Die SBB hat bei der Auswertung der Schienenoberflächenfehler die Grundgesamtheit in Flachstrecken (wenig Traktionsbedarf) und geneigte Strecken (Traktionsbedarf für eine Steigung $s > 7\%$) geteilt. Ein (Kosten)Verhältnis von 64% für D2 zu 36% für D3 wurde aus dem Kostendelta errechnet und im Modell der SBB angesetzt [5]. Dieses Verhältnis wurde näherungsweise für das vorliegende Verschleissmodell übernommen – der Schädigungsanteil der vertikalen Lastkomponente wird mit 65% und jener der horizontalen Lastkomponente mit 35% angesetzt.

1.1.1.3 D4: Schienenoberflächenschädigung (im Bogengleis)

Der vierte Schädigungsterm setzt sich aus zwei Schienenteilschädigungstermen zusammen, welche lediglich für Bogengleise gültig sind. Der Teilschädigungsterm D4.1 beschreibt Schienenoberflächenrisse (Rolling Contact Fatigue RCF) im Bogen, während D4.2 den Schienenseitenverschleiss im Bogen eruiert. Die angesetzte empirische T_γ -Funktion [6] nach Burstow definiert Teilbereiche, in welchen es a) zu keinem Verschleiss, b) zu Schienenoberflächenrisse (RCF) und c) zu Materialabtrag kommt (siehe Abbildung 1). Des Weiteren ist anzumerken, dass die T_γ -Funktionen Schienenschädigungen für die Materialgüte R260 beschreibt. Je nach eingebrachter Reibarbeit W_b eines Fahrzeuges (abhängig vom Bogenradius), sind unterschiedliche Teilbereiche der T_γ -Funktion für die Schädigungsterme D4.1 und D4.2 massgebend. Die Formeln für die Schädigungsterme D4.1 und D4.2 sind in Abbildung 1 einsehbar.



Abbildung 1 T_γ -Funktion nach Burstow

Das Gesamtschädigungspotential D4 eines (System)Fahrzeuges ergibt sich aus der Multiplikation der Terme D4.1 und D4.2 mit der Anzahl aller führenden Radsätze eines gemeinsamen Fahrwerkrahmens, denn nur diese gelten als schädigungsrelevant.

1.1.1.4 D5: HZV-Verschleiss & Kleinstandhaltungen von Weichen

Der Schädigungsterm D5 beschreibt den Verschleiss von Weichenbauteilen und die erforderlichen Kleininstandsetzungen an Weichen ohne Herzstückschädigung. Die Schädigung des Herzstückes wird eigens im Term D6 behandelt. Mit Blick auf die ORE-Berichte D161 [2] und D141 [3] wird für D5 ein linearer Schadenseintrag gewählt. Des Weiteren sollten die betroffenen Arbeiten (Kosten) wie Auftragserschweissen, Entgraten, HZV-Tausch, Kleininstandsetzungen usw. nicht über die Schadensfunktion mit der dritten Potenz (D7) angenähert werden. Der Schädigungsterm D5 wird anhand von vertikalen (P_2 , analog zu D1) und lateralen Kräften (Y_R) beschrieben. **Als Bezug wird eine Fahrt durch den engsten Abzweigradius in der Höhe von 190 m ($Y_{R=190m}$) bei einer Geschwindigkeit von 40 km/h ($P_{2,V=40km/h}$) definiert.** Der dynamische Lasteintrag ist bei Weichen über das Verhältnis von Abzweigradius und Geschwindigkeit gesteuert: bei grösseren Abzweigradien gilt auch eine höhere zulässige Abzweiggeschwindigkeit. Für die Berechnung des Schädigungsterms D5

wird für die vertikale Beanspruchung jeder Radsatz, für die Lateralbeanspruchung die Anzahl der führenden Achsen eines Drehgestells, bei der Berechnung angesetzt.

1.1.1.5 D6: Herzstückschädigung von Weichen

Die Herzstückschädigung von Weichen wird im sechsten Schädigungsterm (D6) anhand der P_1 -Kraft (1.1.3.1) berücksichtigt. Im Unterschied zu den Schädigungstermen D1, D2, D5 und D7 wird für das Herzstück einer Weiche die P_1 -Kraft statt der P_2 -Kraft angesetzt. Dieser Kraftansatz ist durch die Tatsache begründet, dass es bei einer Radüberfahrt der Herzstückspitze zu einer unmittelbaren Schlagbeanspruchung kommt. Die Schädigung der Herzstückspitze ist damit weniger durch einen Lagefehler begründbar. Der Schädigungseinfluss der P_1 -Kraft ist überlinear mit dem Exponenten drei zu bewerten und diesbezüglich mit dem Schädigungsterm D1 vergleichbar (ORE-Berichten D161 [2] und D141 [3]). Bei der Berechnung des Schädigungsterms D6 wird jeder Radsatz als schädigungsrelevant eingestuft.

1.1.1.6 D7: Komponentenschädigung – Gleis- & Weichenerneuerung

Der Schädigungsterm D7 dient der Beschreibung der Komponentenschädigungen Schotter, Schwelle und Schiene und impliziert die Gleiserneuerung. Die geschwindigkeitsabhängigen Kräfte P_2 (vertikal) und Y_R (lateral) kommen hier ähnlich zum Term D5 zum Ansatz. Auch hier dient die ORE-Auswertung zur Frage D161 [2] als Grundlage für den überlinearen Ansatz (dritte Potenz) der Komponentenschädigung im Term D7. Die Gewichtungsfaktoren ($f_{7,1}$ und $f_{7,2}$) bilden radienabhängig den Schädigungsanteil der vertikalen und lateralen Kräfte ab. In geraden Abschnitten sind die lateralen Kräfte zwischen Rad und Schiene zu vernachlässigen, weshalb in diesen Bereichen lediglich die Vertikalkraft P_2 zur Komponentenschädigung beiträgt. Des Weiteren gilt, je geringer der Bogenradius, desto höher der Anteil der Lateralkraft Y_R (siehe Tabelle 1).

Radienband		$f_{7,1,R}$	$f_{7,2,R}$
R1	$R \leq 250 \text{ m}$	0,5	0,5
R2	$250 \text{ m} < R \leq 400 \text{ m}$	0,6	0,4
R3	$400 \text{ m} < R \leq 600 \text{ m}$	0,7	0,3
R4	$600 \text{ m} < R \leq 1000 \text{ m}$	0,8	0,2
R5	$> 1000 \text{ m}$	1	0

Tabelle 1 Gewichtungsfaktoren für D7

Wieder gilt, dass für die Vertikalbeanspruchung jeder Radsatz, für die Lateralbeanspruchung (im Bogengleis) die führenden Radsätze eines Drehgestells, in der Berechnung angesetzt werden.

1.1.2 Fahrwegdaten

Im Verschleissmodell sind die Teilschädigungen in Abhängigkeit des Bogenradius bzw. der Geschwindigkeit erfasst. Demnach ist der Fahrweg in Abschnitte zu unterteilen, die Änderungen des Bogenradius bzw. Geschwindigkeit reflektieren. Es wird zwischen fünf Radienbändern R1 bis R5 unterschieden.

Die Einteilung in diese fünf Radienbänder erfolgt analog zu den Standardelementen (1.2.1.1), die wiederum auf die Gesetzmässigkeiten von Überhöhung der Aussenschiene sowie den Verschleiss der Aussenschiene bzw. das Auftreten von Schienenoberflächenschäden der Ausprägung Head Checks referenzieren.

Beim fünften Radienband (R5) handelt es sich um ein „gerades“ Gleis mit einem Bogenradius von >1000 m. Dieses Radienband wird wiederum in acht Geschwindigkeitsklassen (V1 bis V8) aufgegliedert. Jedem Radien- bzw. Geschwindigkeitsband ist eine Bezugsgeschwindigkeit zugeordnet, mit der die Fahrzeugparameter berechnet werden. Die Bezugsgeschwindigkeiten der Radienbänder R1 bis R4 stellen jeweils den gerundeten Medianwert der Streckengeschwindigkeiten im betrachteten Radienband dar. Die Bezugsgeschwindigkeit in der Höhe von 60 km/h des Radienbandes R1 besagt damit, dass auf den österreichischen Hauptstrecken in Bögen mit Radien <250 m im Median eine Geschwindigkeit von 60 km/h gefahren wird. Die Berechnung der Bezugsradien erfolgt sinngemäss analog. In Tabelle 2 sind die Radien- und Geschwindigkeitsbänder (V/R-Bänder) mit deren Bezugsradien und -geschwindigkeiten angeführt.

Radienband [m]	Bezugsradius [m]	Geschwindigkeitsband [km/h]	Bezugsgeschwindigkeit [km/h]
R1	$R \leq 250$	V1	60
R2	$250 < R \leq 400$	V2	70
R3	$400 < R \leq 600$	V3	90
R4	$600 < R \leq 1000$	V4	110
R5	$R > 1000$	V5	75
		V6	90
		V7	110
		V8	130
		V9	150
		V10	190
		V11	220
		V12	240

Tabelle 2 V/R-Bänder mit Bezugsradien und Bezugsgeschwindigkeit

Die Bezugsgeschwindigkeit ist eine infrastrukturseitige Bezugsgrösse. In der Berechnung der Fahrzeugparameter wird diese Bezugsgeschwindigkeit genau dann angesetzt, wenn die

zulässige Maximalgeschwindigkeit des Fahrzeugs oder die maximale Betriebsgeschwindigkeit des Zuges diese nicht begrenzt.

Fahrzeuge, die im Güterverkehr eingesetzt werden, werden immer mit einer maximalen Geschwindigkeit von 100 km/h behandelt – sowohl Wagen, als auch Lokomotiven. Für diese Fahrzeuge wird deshalb bei der Berechnung der Fahrzeugparameter in der Gerade (R5) für die Geschwindigkeitsbänder V3 bis V8 jeweils 90 km/h als Rechengeschwindigkeit angesetzt. Die Fahrzeugparameter der Bänder V2 bis V8 sind damit ident. Ähnlich gilt dies für das Radienband R4. Für die Parameterberechnung von Fahrzeugen des Güterverkehrs werden auch hier 90 km/h (anstatt 110 km/h) als Rechengeschwindigkeit angesetzt. Auch im Personenregionalverkehr sind Geschwindigkeiten über 140 km/h i.a.R. nicht zu finden. Viele Fahrzeuge im Regionalverkehr sind auch auf diese oder geringfügig andere Geschwindigkeiten zugelassen. Für Universallokomotiven ist es möglicherweise sinnvoll, nach Verkehrsart (Personenverkehr bzw. Güterverkehr) zu differenzieren.

Liegen die Betriebsdaten zugscharf mit den tatsächlichen Geschwindigkeiten vor, so können diese Geschwindigkeiten verwendet werden.

1.1.3 Fahrzeugdaten

Die beschriebenen Schädigungsformen des Verschleissansatzes in Kapitel 1.1.1 sind Resultate der einwirkenden Interaktionsgrößen (Fahrzeugparameter) und Schädigungstermgewichtungen. Diese Interaktionsgrößen stellen die Eingangsparameter für die Berechnung der Schädigungsterme dar.

Folgende Interaktionsgrößen werden in der Verschleissformel verwendet:

- I dynamische vertikale Radkräfte P_1 und P_2
- I Traktionsleistung (Traction Power Value TPV)
- I Spezifische Reibarbeit W_b
- I horizontale Führungskraft Y_R

In den folgenden vier Unterkapiteln wird auf die vier Interaktionsgrößen genauer eingegangen.

1.1.3.1 Dynamische vertikale Radkraft P_1 und P_2

Für die Berechnung der dynamischen vertikalen Radkräfte P_1 und P_2 dient der Railway Group Standard GM/TT0088 [7] und eine Veröffentlichung aus dem Jahr 1974 von Jenkins H. et al [8] als Grundlage.

Die Radkräfte P_1 und P_2 sind jeweils stark geschwindigkeitsabhängig und werden des Weiteren jeweils anhand des vertikalen Anrampungswinkels (2α), der statischen Radkraft (P_0) und der ungefederten Radmasse (m_u) bestimmt. Während die P_2 -Kraft ausserdem von Gleisparametern (Gleissteifigkeit K_t , Gleisdämpfung c_t und Gleismasse m_t je Rad) abhängig ist, wird die P_1 -Kraft zusätzlich von der effektiven Gleismasse m_e und der linearisierten Hertz'schen Kontaktsteifigkeit K_H je Rad bedingt. Die Hertz'sche Kontaktsteifigkeit K_H unterliegt dabei einer iterativen Berechnung abhängig von der P_1 -Kraft.

Die beiden dynamischen Vertikalkräfte werden nach Formel 2 (P_1 -Kraft) und Formel 3 (P_2 -Kraft) berechnet. Die enthaltenen Konstanten m_t , K_t , c_t und 2α werden gemäss des Railway Group Standard GM/TT0088 angesetzt.

$$P_{1,v} = P_0 + V * 2\alpha * \sqrt{\frac{K_t * m_e}{1 + m_e/m_u}} \quad \text{Formel 2}$$

$$P_{2,v} = P_0 + V * 2\alpha * \sqrt{\frac{m_u}{m_u + m_t}} * \left(1 - \frac{c_t * \pi}{4 * \sqrt{K_t} * (m_u + m_t)}\right) * \sqrt{K_t * m_u} \quad \text{Formel 3}$$

$P_{1,v}/P_{2,v}$	dynamische vertikale Radaufstandskraft in N
P_0	statische vertikale Radaufstandskraft des Fahrzeuges in N
V	Fahrzeug- bzw. trassierungsbedingte Geschwindigkeit in m/s
2α	= 0,02 rad; vertikaler Anrampungswinkel bei Schienenunebenheiten (Schienenstösse)
m_u	ungefederte Radmasse des Fahrzeuges in kg
m_t	= 245 kg; effektive vertikale Gleismasse je Rad
c_t	= 55.400 Ns/m; effektive vertikale Gleisdämpfung je Rad
K_t	= 62.000.000 N/m; effektive vertikale Gleissteifigkeit je Rad
m_e	effektive Gleismasse je Rad (für die Berechnung von P_1) in kg
K_s	linearisierte hertz'sche Kontaktsteifigkeit je Rad in N/m

Die P_2 -Kraft ist damit als Ursache für Schotter- und Schienenoberflächenschäden, Weichenbauteilverschleiss und Gleiserneuerungen in den Schädigungstermen D1, D2, D5 und D7 in kN anzusetzen. Für die Schlagbeanspruchung an der Herzstückspitze von Weichen kann die P_1 -Kraft als repräsentative Ursache herangezogen werden [Jenkins] und ist damit im Schädigungsterm D6 in kN heranzuziehen.

1.1.3.2 Traktionsleistung TPV

Die Traktionsleistung der (System)Fahrzeuge ist aus den Fahrzeugdatenblättern bekannt und wird auf die effektive Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene bezogen. Zur Bewertung des Traktionseinflusses wird die wirksame Kontaktfläche unter den angetriebenen Rädern berechnet. Die Berechnung stützt sich auf die einfachen allgemeingültigen Hertz'schen Theorie ab, wie sie z.B. im Dubbel [9] beschrieben ist. Sie ist aber zur Abbildung systembedingter Unsicherheiten (wie z.B. der Fortentwicklung von Traktionsdichten und Ergebnistüchtigkeit in Bögen mit grossen Radien) um den Faktor 2/3 abgeschwächt. Für die analytische Berechnung der Kontaktfläche wird das Fahrzeug als im geraden Gleis (Schienenkopfradius = 300 mm) stehend betrachtet. Es kann damit ohne Spezialberechnung elastischer Durchdringungen für nichtelliptische Kontakte gerechnet werden. In Formel 4 ist die Berechnung des Traction Power Values und der effektiven Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene angeführt.

$$TPV = \frac{P_{Rad}}{A_{Rad,eff}}$$

Formel 4

$$\text{mit } A_{Rad,eff} = \frac{8,3593707 \cdot \vartheta + 4,1874191}{9^{0,8571601}} \cdot \left(\frac{P_0}{0,3 + R_{Rad}} \right)^{\frac{2}{3}}, \vartheta = \arccos \frac{(R_{Rad} - 0,3)}{(R_{Rad} + 0,3)}$$

TPV	Traction Power Value in kW/mm ²
P _{Rad}	Antriebsleistung eines Rades in kW
A _{Rad,eff}	Effektive Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene in mm ²
P ₀	statische vertikale Radaufstandskraft des Fahrzeuges in kN
R _{Rad}	Hauptkrümmungsradius des Fahrzeugrades in m
ϑ	Hilfswinkel

Der berechnete Wert des TPV in kW/mm² entspricht direkt dem Schädigungsterm D3. Eine Multiplikation mit der Anzahl angetriebener Achsen ist nicht notwendig, da die Dauerleistung der angetriebenen Achsen auf die Berührfläche zwischen Rad und Schiene bezogen wird.

1.1.3.3 Reibarbeit W_b

Die spezifische Reibenergie kann, in Analogie zum Verschleissfaktor SBB [1], über Simulationen mit einem Mehrkörpermodell (MKS) des Fahrzeugs ermittelt und anschließend über eine bewertende Funktion in Teilschädigungsmechanismen aufgeteilt werden. Für die Bestimmung der spezifischen Reibarbeit in den Bezugsradien ist die Simulation in diesen Bogenradien nötig (215 m für R1, 315 m für R2, 500 m für R3 und 800 m für R4, siehe Tabelle 2). Eine detaillierte Spezifikation für das MKS-Modell beschreibt die Anleitung für die Fahrzeugpreisbestimmung der SBB [5]. Aus der Mehrkörpersimulation wird jeweils für angetriebene Achsen und Laufachsen ein Wert für die spezifische Reibarbeit W_b in Nm/m ausgegeben. Dieser Wert wird in die empirischen T_γ -Funktionen nach Burstow eingesetzt (siehe Abbildung 1) und die Schadensinkremente D4.1 und D4.2 berechnet.

1.1.3.4 Horizontale Führungskraft Y_R

Die Querkraft Y_R des führenden bogenäusseren Rades lässt sich ebenso aus der MKS-Simulation einer Fahrt durch einen 190-m-S-Bogen ableiten. Die Berechnung wird in einem S-Bogen mit Radien von 190 m ohne Übergangsbögen und Überhöhung und einer Zwischengeraden von 6 m durchgeführt. Dies stellt den Fall einer typischen Weichenverbindung dar. Eine detaillierte Spezifikation für das MKS-Modell liegt wiederum in der Anleitung für die Fahrzeugpreisbestimmung der SBB [5] vor.

Die horizontalen Führungskräfte fließen in dieser Form in die Formel des Schädigungsterms D5 (HZV-Verschleiss & Kleinstandhaltungen von Weichen) und D7 (Komponentenschädigung Gleis – Gleiserneuerung) ein.

1.2 Kostenkalibrierung

Die in 1.0 gezeigte Formel addiert die Teilschädigungen. Dies ist aufgrund der unterschiedlichen Schädigungsprozesse, den verwendeten Interaktionsgrößen und den damit einhergehenden physikalischen Einheiten nicht möglich. Erst ein Bezug auf die durch die Teilschädigungen entstehenden, auf eine Längeneinheit bezogenen Kosten macht diese Addition möglich. Als Ziel sind in 1.0 die Fahrwegkosten pro gefahrenem Fahrzeugkilometer definiert. Im Rahmen der Kostenkalibrierung müssen die einzelnen Kostengewichte, die so genannten Kostenkalibrierungsfaktoren k_n ermittelt werden. Deren Einheit ist dabei jeweils CHF/[physikalische Einheit],km. Das vorliegende Modell ist ein Kostenallokationsmodell, womit es notwendig ist, die entstehenden Kosten den berechneten Gesamtschädigungen zuzuordnen.

In diesem Kapitel werden die drei Hauptschritte der Kostenkalibrierung

- 1 Ermittlung der schädigungsspezifischen Kosten K_n ,
- 1 Berechnung der Gesamtschädigung D_n und
- 1 Ermittlung der Kostenkalibrierungsfaktoren k_n

abgehandelt.

1.2.1 Ermittlung der schädigungsspezifischen Kosten K_n

Die Grundvoraussetzung an die Kostenermittlung ist der

1. unmittelbare Zusammenhang zwischen Schädigung, Instandsetzung und damit Kosten.

Diese Grundvoraussetzung entspricht auch der in Richtlinie 2012/34 [10] und Durchführungsverordnung 2015/909 [11] getroffenen Definition von im Wegeentgelt anrechenbaren, so genannten „direkten Kosten“. Damit ist das gegenständliche Verschleissmodell auch im Rahmen der Wegeentgelte verwendbar.

Um die Kostengewichte der Einzelschädigungen ermitteln zu können, müssen die Instandsetzungskosten

2. in Massnahmentiefe vorliegen, die auch streckenseitige Randbedingung „Bogenradius“ beinhaltet.

Ein Detaillierungsgrad „Instandsetzungskosten Oberbau“ ist für ein solches Verschleissmodell nicht ausreichend.

Auch wenn eine massnahmenscharfe Kostenverbuchung vorläge, bringt die Verwendung von Ist-Kosten Herausforderungen mit sich:

3. Es muss eine Mittelung der Kosten über mehrere Jahresscheiben erfolgen, da sonst zufällig und auf Grund der mehrjährigen Zyklen verschiedener Instandsetzungstätigkeiten notwendige Kostenspitzen eingerechnet werden. Bei dieser Mittelung ist wiederum zu beachten, dass die Kosten auf das Bezugsjahr valorisierten und etwaige langjährige Trends (Verkehrswachstum) berücksichtigt werden müssen.
4. In den Oberbauinstandsetzungskosten sind in der Praxis auch nicht aktivierte Oberbauerneuerungen enthalten. Da die Kosten nicht massnahmenscharf vorliegen, ist eine entsprechende Herauslösung dieser Kostenanteile nicht möglich.
5. Die variablen Anteile der Oberbauerneuerung sind aus den vorliegenden Datenquellen nicht ableitbar. Die theoretischen Anteile können über die Analyse der kalkulatorischen Abschreibung bei Lebenszykluskostenrechnungen abgeleitet werden (siehe [12]), für die tatsächlich auftretenden bedürfte es einer gemeinsamen Analyse von Erneuerungskosten und Verkehrsbelastung. Bei der ÖBB-Infrastruktur AG werden Erneuerungen aktiviert, die Kosten liegen in der Buchhaltung damit als konstante Jahresquoten vor, die mittels der buchhalterischen Nutzungsdauer bestimmt werden. Diese Nutzungsdauer ist jedoch ein belastungsunabhängiger Durchschnittswert und kann somit die gewünschten Anteile nicht liefern.

Diesen Aspekten wird im Bauplan des Verschleissfaktors mit der Definition von Standardelementen begegnet, die in den folgenden Kapiteln aufgearbeitet sind.

1.2.1.1 Massnahmenscharfe Instandsetzungskosten – Standardelemente

So genannte Standardelemente (StdE) liefern oberbauspezifisch, radien- und belastungsabhängig durchschnittliche Instandsetzungsfrequenzen und Nutzungsdauern. Multipliziert man diese Instandsetzungsfrequenzen mit den entsprechenden Einheitskosten, ergeben sich mittlere Instandsetzungskosten. Als Parameter sind dabei zu berücksichtigen:

- I Tägliche Belastung in Gesbt
- I Gleisradius
- I (Gleisanzahl)
- I Schienenprofil
- I Schienengüte
- I Schwellenart
- I Schottermaterial
- I Unterbauqualität und
- I Drainagequalität

Weichen werden analog erfasst. Die Segmentierung der Weichen erfolgt anhand der elf Eigenschaften

- I Tägliche Belastung in Gesbt
- I Weichenart
- I Zweiggleisradius
- I Gleisanzahl
- I Schienenprofil
- I Schienengüte
- I Herzstück
- I Schwellen
- I Schotterqualität
- I Unterbauqualität *und*
- I Drainagequalität

Die Parameterausprägungen von Normalspurweichen sind in Tabelle 4 angeführt.

jährliche Belastung in Gesbt [1]	Weichenart [2]	Zweiggleisradius [3]	Gleisanzahl [4]	Schienenprofil [5]
>25 mio.	EW	R190	1-gleisig	Xa
15 - 25 mio.	IBWs	R300	2-gleisig	49E1
10 - 15 mio.	ABWs	R500	sonst	54E1
5 - 10 mio.	IBWh	R760		54E2
3 - 5 mio.	ABWh	R1200		60E1
1 - 3 mio.		R1600 2600		60E2
<1 mio.				46E1

Schienengüte [6]	Herzstück [7]	Schwellen [8]	Schotterqualität [9]	Unterbauqualität [10]	Drainage [11]
R200	Composite fix	Holz	gut	gut	gut
R260	Mangan fix	Beton	mittel	schlecht	schlecht
R320Cr	Mangan beweglich	Stahl	schlecht	Neubau	
R350HT		Brückenhözer	-		
R400		andere			
		Beton beschlitt			
		feste Fahrbahn			
		Beton HDS USP			
		FFU			

Tabelle 4 StdE Code - Weichen

Bei Weichen wurden ebenso Vereinfachungen, insbesondere was Unterbau, Weichengeometrie und die Herzstückart betrifft, vorgenommen. Die nicht verwendeten Parameterausprägungen sind wiederum ausgebleicht.

Durch die Zuordnung der jeweiligen Standardelemente können für das „Netz“/die Strecken über die Frequenz durchschnittliche Mengen für alle in den Standardelementen erfassten Gleisarbeiten ermittelt werden. Die Gleisarbeiten bzw. deren Kosten werden den Schädigungsmechanismen gemäss Tabelle 5 zugeordnet (der Index der K_n korrespondiert mit dem Index der Schädigungsterme D_n). Um von den Mengen auf die Kosten zu kommen, wird mit den Einheitskosten multipliziert.

Eine Besonderheit stellt dabei der Kostenterm K_7 dar, der die Kosten der Neulage anspricht: der Schädigungsterm D_7 beschreibt radienabhängig den Schädigungsprozess, der auf die Hauptkomponenten Schienen, Schwellen und Schotter wirkt. Diese Komponenten werden jedoch in aller Regel nicht getrennt erneuert bzw. ersetzt, sondern – gemäss den Überlegungen des Life Cycle Managements hinsichtlich nachhaltiger Anlagenbewirtschaftung zu den optimalen Lebenszykluskosten – im Zuge einer generellen Gleis- oder Weichenneulage – ersetzt. Dies bedingt, dass nicht alle Komponenten am Ende ihrer spezifischen Nutzungsdauer angelangt sind und somit die Darstellung des unmittelbaren Zusammenhangs zwischen Belastung bzw. Beanspruchung und Verschleiss bzw. Kosten nicht möglich ist. Dennoch, Komponenten, die mehr Belastung erfahren, werden früher getauscht. Dies ist auch aus den Standardelementen ersichtlich. Die Ermittlung der so entstehenden „variablen kalkulatorischen Abschreibung“ wurde bereits methodisch abgehandelt [12] und auch für die Zuschreibung der variablen und fixen Infrastrukturkosten auf Zugfahrten angewandt. Eine hauptsächlich komponentenabhängige, maximale mittlere Nutzungsdauer (bspw. 35 Jahre für Holzschwellen) dient als Berechnungsgrundlage für die geringstmögliche kalkulatorische Abschreibung. Sinkt – belastungsabhängig – die Nutzungsdauer, so steigt die kalkulatorische Abschreibung. Die Differenz zur minimalen kalkulatorischen Abschreibung sind somit aus Jahresscheiben dargestellte variable Anteile der Reinvestition. Auch diese Anteile können im Referenznetz belastungs- und oberbauabhängig ermittelt werden.

Gleisarbeit	K_n	Weichenarbeit	K_n	
Gleisstopfung	K1	Weichenstopfung	K1	
Schotterbettreinigung		Schotterbettreinigung/-ersatz		
Schienenwechsel - Dauerfestigkeit		Weichenschleifen	K5	
Schienenstoßpflege		HZV-Wechsel		
Zwischenlagenwechsel		Radlenkertausch		
sonstige Instandsetzung		K2 K3	Entgraten	K6
Schienenoberflächenbehandlung (Gerade)			Zwischenlagenwechsel	
Schienenoberflächenbehandlung (Bogen)	K4.1	sonstige Instandsetzung		
Schienenwechsel - Verschleiss	K4.2	Herzwechsel		
Gleisneulage (variabel)	K7	Auftrags-/Reparaturschweißen	K7	
		Weichenneulage (variabel)		

Tabelle 5 Zuordnung der Gleis-/Weichenkosten zu Schädigungstermen

Auf diese Weise können für alle Strecken(-abschnitte) die massnahmenscharfen Instandsetzungskosten bzw. variablen, kalkulatorischen Abschreibungen erfasst und radienabhängig bzw. getrennt für Weichen zu den Kostentermen K_n des Schädigungsmodells zusammengefasst.

1.2.2 Ermittlung der Gesamtschädigungen

Es gilt, für die in 1.2.1 ermittelten Kosten die jeweils äquivalenten Gesamtschädigungen zu ermitteln. Dazu sind folgende Schritte notwendig:

1. Erhebung der Fahrzeugparameter für die am Netz verkehrenden Fahrzeuge
2. Ermittlung der Fahrzeugkollektive auf den Streckenabschnitten
3. Anwendung der Verschleissformel je Fahrzeug und Streckenabschnitt
4. Aufsummieren der Teilschädigungen der Einzelfahrzeuge zu den Gesamtschädigungen je Streckenabschnitt bzw. in der Folge für das Netz

Diese Schritte wurden mit den zur Verfügung stehenden Daten und Ressourcen durchlaufen. Die Schritte 1. und 2. werden nachstehend detailliert beschrieben, da die Datenlage einige Zwischenschritte und Vereinfachungen notwendig machte.

1.2.2.1 Fahrzeuge, Fahrzeugparameter und (System)Fahrzeuge

Da das Modell ein Kostenallokationsmodell ist, erfordert die Kostenkalibrierung eine Ermittlung der Gesamtschädigungen. Dies wiederum bedingt, dass alle Fahrzeuge inklusive ihrer Fahrzeugparameter vorliegen müssen, zumindest aber die (System)Fahrzeuge. Für diese Fahrzeuge wurden auch die notwendigen Fahrzeugparameter ermittelt.

1.2.2.1.1 Fahrzeugdaten & -parameter

Für jedes (System)Fahrzeug müssen die entsprechenden Fahrzeugparameter vorliegen. Bei der Berechnung der Schadensinkremente je (System)Fahrzeug werden die übermittelten Parameter mit der Achsanzahl des jeweiligen Fahrzeuges multipliziert (siehe Kapitel 1.2.2.3.1).

In Tabelle 6 ist beispielhaft ein Parameterdatensatz für eine Lokomotive dargestellt.

Radienband		Geschwindigkeitsband				4-ax Lokomotive <i>im GV</i>								
[m]		[km/h]		V _{Ref}	R _{Ref}	P1 _v	P2 _v	TPV	W _z	Y _p	Y _{p,190}	P2 _{v=40}		
R1	R ≤ 250			60	215	268	181	9	584	45	69	156		
R2	250 < R ≤ 400			70	315	297	193		423	42				
R3	400 < R ≤ 600			90	500	355	217		291	40				
R4	600 < R ≤ 1000			110	90	800	416	355	241	217	216	215	30	27
R5	R > 1000	V1	V ≤ 80	75		311	199							
		V2	80 < V ≤ 100	90		355	217							
		V3	100 < V ≤ 120	110	90		416	355	241	217				
		V4	120 < V ≤ 140	130	90		477	355	265	217				
		V5	140 < V ≤ 160	150	90		541	355	289	217				
		V6	160 < V ≤ 200	190	90		670	355	338	217				
		V7	200 < V ≤ 230	220	90		771	355	374	217				
		V8	230 < V ≤ 250	240	90		839	355	398	217				

Tabelle 6 Beispieldatenblatt für eine Lokomotive

Bei Triebzügen müssen die Fahrzeugparameter sowohl für die angetriebene Achsen als auch für Laufachsen vorliegen.

Die für die Berechnung einiger Fahrzeugparameter notwendigen (System)Fahrzeuggewichte basieren je nach Kategorie auf unterschiedlichen Überlegungen. Die Gewichte der Güterwagen je Achslastklasse sind dabei Durchschnittsgewichte aus den Betriebsdaten. Für die Wagen und Triebzüge des Personenverkehrs werden die Leergewichte der Wagen aus den Fahrzeugdatenblättern herangezogen und mit der Personenzuladung nach der Norm EN15663 (normale Zuladung im Betrieb) addiert. Für Lokomotiven werden die zu erwartenden Dienstgewichte aus den Fahrzeugdatenblättern angesetzt.

1.2.2.2 Betriebsdaten

Informationen über die Anzahl der einzelnen Fahrzeuge bzw. Wagen auf den jeweiligen Strecken müssen ebenfalls vorliegen, am besten in Form abgewickelter Zugfahrten.

1.2.2.3 Ermittlung der Gesamtschädigung

Die für das Modell VF notwendigen

- I Fahrzeugparameter,
- I (System)Fahrzeugmengen und
- I Streckenlängen der durchgehenden Hauptgleise

Bilden gemeinsam alle notwendigen Informationen für eine Berechnung der Fahrzeugschadensinkremente D_n . In diesem Berechnungsteil kommt die Verschleissformel (Formel 1) zum Einsatz. In einem weiteren Berechnungsschritt können die Teilschädigungssummen D_n^* je Strecke(-abschnitt) ermittelt werden. Die Summe dieser D_n^* ergibt die Gesamtschädigungen $D_{n,SUM}$. Diese Gesamtschädigungen $D_{n,SUM}$ werden anschliessend mit den Kosten K_n in ein Verhältnis gesetzt und so die Kostenkalibrierungsfaktoren k_i ermittelt.

Die nachstehende Begriffsdefinitionen von D_n , D_n^* und $D_{n,SUM}$ sollen durch dieses Kapitel führen, wobei sie in den Unterkapiteln 1.2.2.3.1, 1.2.2.3.2 und 1.2.2.3.3 noch weiter präzisiert werden.

Fahrzeugschadensinkremente D_n : Für jedes (System)Fahrzeug wird je Schädigungsterm und V/R-Band ein Schadensinkrement anhand der Verschleissformel berechnet. Jedes (System)Fahrzeug erhält damit **12 D_1 (für jedes V/R-Band), 8 D_2 (für jedes V-Band), 1 D_3 , jeweils 4 $D_{4,1}$ und $D_{4,2}$ (für jedes R-Band im Bogen), 1 D_5 , 8 D_6 (für jedes V-Band) und 12 D_7 (für jedes V/R-Band).**

Teilschädigungssummen D_n^ je Strecke(-abschnitt)*: Der Schädigungseintrag eines (System)Fahrzeuges wird Strecken(-abschnitts)-spezifisch ermittelt. Anhand von D_n , der Fahrzeugmengen und Streckenlängen werden die Teilschädigungen je Schädigungsterm und (System)Fahrzeug berechnet. Eine Aufsummierung dieser Teilschädigungen ergeben die Teilschädigungssummen D_n^* . Jede Strecke hat damit **6 D_1^* (für jedes R-Band und einem Weichenterm¹), 1 D_2^* und D_3^* , jeweils 4 $D_{4,1}^*$ und $D_{4,2}^*$ (für jedes R-Band im Bogen), 1 D_5^* und D_6^* und 6 D_7^* (für jedes R-Band und einem Weichenterm).**

Gesamtschädigungen $D_{n,SUM}$ im „Netz“: Die Summe der einzelnen D_n^* über alle Strecken(abschnitts) des „Netzes“ ergeben die Gesamtschädigungen $D_{n,SUM}$ je Schädigungsterm. Es existieren damit in Summe **24 $D_{n,SUM}$ (6 D_1^* für jedes R-Band und einem Weichenterm, 1 D_2^* und D_3^* , jeweils 4 $D_{4,1}^*$ und $D_{4,2}^*$ für jedes R-Band im Bogen, 1 D_5^* und D_6^* und 6 D_7^* für jedes R-Band und einem Weichenterm).**

1.2.2.3.1 Fahrzeugschadensinkremente D_n

Für jedes (System)Fahrzeug erfolgt eine Berechnung der Fahrzeugschadensinkremente D_n je V/R-Band. Die dafür notwendigen Daten und Informationen je (System)Fahrzeug sind

- I die bereits beschriebenen Fahrzeugparameter aus Kapitel 1.2.2.1.1,

¹ Die Schadensinkremente D_1 werden für 6 V-Bänder des Radlenbandes 5 berechnet. Da jedoch die StdE keine Geschwindigkeitsdefinition enthalten und damit für das Radlenband 5 nur ein StdE existiert, werden die D_1 der V-Bänder im Radlenband 5 summiert.

- I die Anzahl der angetriebenen Achsen und Laufachsen und die Anzahl der führenden angetriebenen Achsen und Laufachsen eines Drehgestells und
- I die zulässige Fahrzeugmaximalgeschwindigkeit.

Die Grundformel der fahrzeugspezifischen Schadensinkremente D_n ist in Formel 5 ersichtlich. Da die Fahrzeugparameter je Rad angegeben werden, sind diese mit der Achszahl zu multiplizieren (angetriebene Achsen und Laufachsen).

$$D_{n_{FzG,Vi|Rj}} = \text{Formel für Term1} \left[FP_{n_{FzG,Vi|Rj} \text{ anetr.}(v_{min})} \right] * n_{FzG \text{ anetr.}} + \text{Formel für Term2} \left[FP_{n_{FzG,Vi|Rj} \text{ nicht anetr.}(v_{min})} \right] * n_{FzG \text{ nicht anetr.}} \quad \text{Formel 5}$$

$$\text{mit: } v_{min} = \min[v_{maxFzG}, v_{Vi|Rj\text{-Band}}]$$

$D_{n_{FzG,Vi Rj}}$	Schadensinkrement D_n des betrachteten (System)Fahrzeuges im V-Band i bzw. R-Band j (mit i=1-8 und j=1-4)
n_{FzG}	Anzahl der angetriebenen/ nicht angetriebenen Achsen des betrachteten (System)Fahrzeuges
$FP_{n_{FzG,Vi Rj}(v_{min})}$	Fahrzeugparameter der anetr./nicht anetr. Achsen im V/R-Band, abh. von der massgebenden Geschwindigkeit
v_{maxFzG}	zulässige Fahrzeugmaximalgeschwindigkeit in km/h bzw.
$v_{Vi Rj\text{-Band}}$	Rechengeschwindigkeit des betrachteten V-Bandes i bzw. R-Bandes j in km/h
v_{min}	massgebende Geschwindigkeit für welche der Fahrzeugparameter herangezogen wird in km/h

Bei der Berechnung der fahrzeugspezifischen Schadensinkremente ist darauf zu achten, dass einerseits zwischen angetriebenen Achsen und Laufachsen unterschieden wird. Andererseits ist ein Augenmerk auf die massgebende Geschwindigkeit und den zugehörigen Fahrzeugparameter zu legen. Liegt die Maximalgeschwindigkeit eines Fahrzeugs unter der Streckenhöchstgeschwindigkeit, so ist die Fahrzeuggeschwindigkeit massgebend.

1.2.2.3.2 Teilschädigungssummen D_n^* je Strecke(-nabschnitt)

Die Teilschädigungssummen D_n^* geben Auskunft über die Schädigungswirkung eines (System)Fahrzeuges auf einer spezifischen Strecke. Die bereits errechneten Fahrzeugschadensinkremente D_n der (System)Fahrzeuge werden mit der Länge des entsprechenden V/R-Bandes und der (System)Fahrzeuganzahl multipliziert. Formel 6 zeigt die allgemeine Berechnungsweise.

$$D_{n,Strecke_j}^* = \sum_i D_{n,i} * Länge_{V/R\text{-Band},Strecke_j} * Fahrzeuganzahl_{Strecke_j} \quad \text{Formel 6}$$

$D_{n,Strecke_j}^*$	Teilschädigungssumme der Strecke, mit der Einheit Schädigungstermeinheit ^{km}
D_n	Fahrzeugschadensinkrement
$Länge_{V/R\text{-Band},Strecke_j}$	Länge im entsprechenden V/R-Band der betrachteten Strecke
$Fahrzeuganzahl_{Strecke_j}$	Anzahl der (System)Fahrzeuge der betrachteten Strecke

Für die Schädigungsterme D_{1w} , D_6 und D_{7w} ist eine zusätzliche Überlegung notwendig, da sich diese Terme auf Weichen und nicht auf das freie Streckengleis beziehen. Im Modell werden keine Überfahrten über spezifische Weichen behandelt, da in diesem Fall für jede

Weiche die Lage und die Befahrungsgeschwindigkeit separat erfasst werden müssten. Aus diesem Grund wird je Strecke eine mittlere gewichtete Streckengeschwindigkeit (V_m) berechnet. Jenes Fahrzeugschädigungsinkrement $D_{1W,V}$, $D_{6,V}$, bzw. $D_{7W,V}$, welches die errechnete V_m enthält, wird als Teilschädigungsterm angesetzt. Am Ende werden die Weichenschädigungen über die gesamte Strecke (und nicht V/R-Band abhängig) gerechnet.

1.2.2.3.3 Gesamtschädigungen im „Netz“ $D_{n,SUM}$

Der finale Berechnungsschritt, bevor die Schädigungssummen mit den Kostensätzen in ein Verhältnis gesetzt werden können, ist die Ermittlung der Gesamtschädigungssummen $D_{n,SUM}$ über alle Strecken(-abschnitte) aus den Teilschädigungssummen. In Formel 7 ist der allgemeine Berechnungsvorgang der Gesamtschädigungssummen dargestellt.

$$D_{n,SUM} = \sum_i D_{n,Strecke_i}^* \quad \text{Formel 7}$$

$D_{n,SUM}$ Gesamtschädigungssumme aller Strecken(-abschnitte) im „Netz“ mit der Einheit Schädigungstermeinheit* km
 $D_{n,Strecke_i}^*$ Teilschädigungssumme der Strecken (Streckenabschnitte) mit der Einheit Schädigungstermeinheit* km

Diese Gesamtschädigungssummen werden zusammen mit den Kosten je Strecke und Verschleissterm für die Berechnung der Kostenkalibrierungsfaktoren angesetzt.

1.2.2.4 Ermittlung der Kostenkalibrierungsfaktoren

Die im „Netz“ berechneten Gesamtschädigungen werden nun den ermittelten zugehörigen Gesamtkosten gegenübergestellt. Die Gesamtkosten sind

- I auf Basis der Standardelemente ermittelt und
- I möglicherweise auf ein Einnahmziel skaliert und

Die Zuordnung der Kosten zu den Schädigungen liefert die Kostenkalibrierungsfaktoren, die inkrementellen Kosten je Schädigungseinheit und Kilometer darstellen und damit jeweils die Einheit [CHF/Schädigungstermeinheit,km], also beispielsweise [CHF/kN³,km] annehmen.

Somit ist die Kostenkalibrierung abgeschlossen.

1.3 Kostengewichtetes Verschleissmodell

Das nun vorliegende kostengewichtete Verschleissmodell kann die aus Sicht des Fahrwegs resultierenden inkrementellen Kosten je Schädigungspunkt darstellen.

Anhand der Fahrzeugschadensinkremente D_n und der berechneten Kostenkalibrierungsfaktoren k_n können andererseits für die (System)Fahrzeuge jeweils **12 Kostensätze KS_n (12 V/R-Bänder)** je Fahrzeugkilometer berechnet werden, die alle Schädigungsfunktionen unter den jeweiligen Randbedingungen umfassen. Dazu werden in einem ersten Schritt die **45** Fahrzeugschadensinkremente (D_n) je (System)Fahrzeug errechnet, in einfacher Weise mit den zugehörigen Kostenkalibrierungsfaktoren k_n multipliziert und dann die entsprechenden Teile zum Kostensatz addiert.

KS (R5/V1-V8):

$$KS_{Fzg,Vi} = KS_{D1,Vi} + KS_{D1,W} + KS_{D2,Vi} + KS_{D3} + KS_{D5} + KS_{D6} + KS_{D7,Vi} + KS_{D7,W}$$

Formel 8

- $KS_{Fzg,Vi}$ Kostensatz je Fahrzeugkilometer in €/km für die Geschwindigkeitsklasse V_i des Radienbandes R5 (mit $i = 1-8$)
- $KS_{D1,Vi}$ Kostensatz je Fahrzeugkilometer des Schädigungsterms D1 in der Geschwindigkeitsklasse V_i
- $KS_{D1,W}$ Kostensatz je Fahrzeugkilometer des Schädigungsterms D1w
- $KS_{D2,Vi}$ Kostensatz je Fahrzeugkilometer des Schädigungsterms D2 in der Geschwindigkeitsklasse V_i
- KS_{D3} Kostensatz je Fahrzeugkilometer des Schädigungsterms D3
- KS_{D5} Kostensatz je Fahrzeugkilometer des Schädigungsterms D5
- KS_{D6} Kostensatz je Fahrzeugkilometer des Schädigungsterms D6
- $KS_{D7,Vi}$ Kostensatz je Fahrzeugkilometer des Schädigungsterms D7 in der Geschwindigkeitsklasse V_i
- $KS_{D7,W}$ Kostensatz je Fahrzeugkilometer des Schädigungsterms D7w

KS (R1-R4):

$$KS_{Fzg,Rj} = KS_{D1,Rj} + KS_{D1,W} + KS_{D3} + KS_{D4,1,Rj} + KS_{D4,2,Rj} + KS_{D5} + KS_{D6} + KS_{D7,Rj} + KS_{D7,W}$$

Formel 9

- $KS_{Fzg,Rj}$ Kostensatz je Fahrzeugkilometer in €/km für das Radienband R_j (mit $j = 1-4$)
- $KS_{D1,Rj}$ Kostensatz je Fahrzeugkilometer des Schädigungsterms D1 im Radienband R_j
- $KS_{D1,W}$ Kostensatz je Fahrzeugkilometer des Schädigungsterms D1w
- KS_{D3} Kostensatz je Fahrzeugkilometer des Schädigungsterms D3
- $KS_{D4,1,Rj}$ Kostensatz je Fahrzeugkilometer des Schädigungsterms D4.1 im Radienband R_j
- $KS_{D4,2,Rj}$ Kostensatz je Fahrzeugkilometer des Schädigungsterms D4.2 im Radienband R_j
- KS_{D5} Kostensatz je Fahrzeugkilometer des Schädigungsterms D5
- KS_{D6} Kostensatz je Fahrzeugkilometer des Schädigungsterms D6
- $KS_{D7,Rj}$ Kostensatz je Fahrzeugkilometer des Schädigungsterms D7 im Radienband R_j
- $KS_{D7,W}$ Kostensatz je Fahrzeugkilometer des Schädigungsterms D7w

Die aus Formel 8 und Formel 9 berechneten **12** KS je (System)Fahrzeug in der Einheit CHF/Fzg-km sind in dieser Form anwendbar.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 T γ -Funktion nach Burstow.....	8
Abbildung 2 StdE – Gleis	18

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Gewichtungsfaktoren für D7.....	9
Tabelle 2 V/R-Bänder mit Bezugsradien und Bezugsgeschwindigkeit	10
Tabelle 3 StdE Gleise	18
Tabelle 4 StdE Code - Weichen.....	19
Tabelle 5 Zuordnung der Gleis-/Weichenkosten zu Schädigungstermen	20
Tabelle 6 Beispieldatenblatt für eine Lokomotive	22

Quellenverzeichnis

- [1] Marschnig, S.; Holzfeind, J.; Nerlich, I.; Giger, M.: *Verschleissabhängige Komponente im Trassenpreissystem der Schweiz – ein Anreiz zur Rückbesinnung auf ein Gesamtoptimum*, ZEVrail (2015) 6/7, 2015
- [2] ORE: D 161.1 RP4 The Dynamic Effects due to Increasing Axle Loads from 20 to 22.5 t, Utrecht (Niederlande), 1987
- [3] ORE D141: Einfluss der Erhöhung der Radsatzlast von 20 auf 22 t auf den Oberbau. RP5: Untersuchung der technischen und wirtschaftlichen Auswirkungen einer Erhöhung der Radsatzlast von 20 auf 22 t, Utrecht (Niederlande), 1982
- [4] Pointner, P.: *Schienenschädigung verstehen – ein pragmatischer Ansatz*, Präsentationsfolien-satz, 19.07.2007
- [5] SBB: *Basispreis Verschleiss - Fachliche Konzeption*, unveröffentlicht (auf Anfrage erhältlich), 2018
- [6] Burstow, M.C.: *A Whole Life Rail Model Application and Development for RSSB – Continued Development of an RCF Damage Parameter*, AEATR-ES-2004-880 Issue 2
- [7] *Group Standards Railway Technical Centre: Group Standard GM/TT0088 Permissible Track Forces for Railway Vehicles*, Derby (United Kingdom), 1993
- [8] Jenkins, H.H.; Stephenson, J.H.; Claxton, G.A. et al.: *The Effect of Track and Vehicle Parameters on Wheel/Rail Vertical Dynamic Forces*, REJ (1974) 1, 1974
- [9] Grote, K.; Feldhusen, J.: *Dubbel –Taschenbuch für den Maschinenbau*, Ausgabe 21, ISBN: 3540221425, Springer Verlag, 2004
- [10] European Parliament and Council of the European Union: Directive 2012/34/EU of the European Parliament and the Council of the European Union of 21 November 2012 establishing a single European railway area (recast), Brüssel (Belgien), 14.12.2012
- [11] European Commission: Commission implementing Regulation (EU) 2015/909 of 12 June 2015 on the modalities for the calculation of the cost that is directly incurred as a result of operating the train service, Brüssel (Belgien), 13.06.2015
- [12] Marschnig, S.: *ITAC – innovative Track Access Charges*, Habilitationsschrift, 2016

WISSEN ▪ TECHNIK ▪ LEIDENSCHAFT



Institut für Eisenbahnwesen
und Verkehrswirtschaft
Technische Universität Graz
Rechbauerstrasse 12/II
8010 Graz
+43 316 873 6216
office.ebw@tugraz.at
▶ www.ebw.tugraz.at