

# Die Auswirkung von Schienenflankenschmierung auf den Schienenverschleiß im engen Bogen

Masterarbeit  
2013

Lukas Prettner, Bsc  
Matrikelnummer: 0731106

Betreuer:  
Stefan Marschnig  
Ass.Prof. Dipl.Ing. Dr. techn.  
+43 873 6717  
stefan.marschnig@tugraz.at



## Danksagung

Diese Arbeit entstand am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft.

Ich bedanke mich bei Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Veit für seine Unterstützung.

Mein großer Dank gilt auch meinem Betreuer Herrn Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Marschnig, der mir immer hilfreich zur Seite stand.

Außerdem bedanke ich mich bei den Herren Dipl.-Ing. Georg Neuper, Dipl.-Ing. Armin Berghold, Dipl.-Ing. Dr.techn. Markus Enzi, Dipl.-Ing. Matthias Landgraf und Dipl.-Ing. Fabian Hansmann für deren Beiträge und Anregungen.

Außerdem bedanke ich mich bei meinem Vorgesetzten Herrn Dipl.-Ing. Gregor Girsch MBA und bei meinen Arbeitskollegen im technischen Kundendienst der voestalpine Schiene, insbesondere bei den Herren Dipl.-Ing. Dr.techn. Albert Jörg und Dipl.-Ing. Dr.mont. Richard Stock für deren Zeit und Unterstützung.

Für die Expertengespräche und das bereitwillige Beisteuern von Informationen bedanke ich mich bei den Herren der Schweizer Bundesbahnen Dipl.-Ing. Alexander Strauch, Dipl.-Ing. Ingolf Nerlich und Msc ETH Masch.-Ing. Rolf Renggli.

Weiters bedanke ich mich bei Herrn Richard Gunacker, dem Geschäftsführer der Fa. Hypower, für seine Zeit und Unterstützung.

Herr Dipl.-Ing. Dr.techn. Florian Auer war mir ebenfalls bei der Erstellung dieser Arbeit behilflich.

Ich möchte mich auch bei meiner Freundin Birgit Hörbinger für ihre Ideen und die moralische Unterstützung und bei meinen Eltern Kurt und Barbara Prettnner für die Ermöglichung meines Studiums bedanken.

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Kobenz, am 01.03.2013

---

Lukas Prettnner

## Kurzfassung

Die Hauptziele dieser Arbeit sind es das Verschleißverhalten von Schienen im engen Bogen zu beschreiben und die Auswirkungen von Schienenflankenschmierung auf den 45°-Seitenverschleiß der Außenschiene (W3a) zu klären.

Im ersten Teil der Arbeit werden die Grundlagen in Form von Literaturstudien und Expertengesprächen erörtert. Der zweite Teil der Arbeit beschreibt die Methodik der Untersuchungen und zeigt deren Ergebnisse.

Die Arbeit basiert auf Messdaten der Österreichischen Bundesbahnen und beschränkt sich auf das Untersuchungsgebiet „Semmering“, das Teil der Südbahn ist.

### Untersuchungen zum Verschleißverhalten von Schienen im engen Bogen:

Zur Auswertung der Messdaten wurde ein Auswertungstool auf Basis von Visual Basic programmiert. Im Allgemeinen zeigte sich ein wellenförmiger Verlauf der Verschleißkurve, mit einer mittleren Wellenlänge von 7 bis 15 Metern und einer Amplitude von teilweise mehr als einem Millimeter. Weiters zeigte sich, dass das Bogenende in fast allen Fällen die höchste Verschleißrate aufwies. Das Wachstum des 45°-Seitenverschleißes der Außenschiene kann mit guter Näherung als linear beschrieben werden, wobei auf eine „Einspielphase“ am Beginn des Beobachtungszeitraumes zu achten ist. Parameterstudien zu Spurweite und Längsneigung konnten keine allgemein gültigen Aussagen zum Verschleißverhalten von Schienen liefern, da lokale Einflüsse die Ergebnisse zu stark beeinflussen.

### Untersuchungen zur Wirksamkeit von stationärer Schienenflankenschmierung

In dieser Untersuchung konnte die Wirksamkeit von stationären Schienenflankenschmieranlagen, im Bezug auf den 45°-Seitenverschleiß der Außenschiene (W3a) im Untersuchungsgebiet, verifiziert werden.

Für sieben untersuchte Bögen beträgt die Reduktion des 45°-Seitenverschleißes (W3a) zwischen 30% und 56%.

## Abstract

The primary objectives of this work are to describe the wear-mechanisms of rails in tight curves and the effect of rail flank lubrication on 45°-wear of the high-rail (W3a).

The first part of this paper discusses the fundamental knowledge which is necessary to run further experiments. For this purpose literature has been studied and expert-interviews have been conducted. The second part shows the methods used for the experiments and their results.

This work is based on measurements of the Austrian Federal Railways and restricted to the „Semmering“ area, which is part of the southern main line.

### Investigation of wear-mechanisms of rails in tight curves:

In order to analyse the measurements, a softwaretool, based on Visual Basic, was designed. Generally a wave-shaped wear curve appeared, which can be described by a wavelength between 7 and 15 meters and an amplitude of partly more than one millimetre. Furthermore, it appeared that the end of a curve turned out to have the highest rate of rail wear in most of the cases. The 45°-wear rate of the high-rail (W3a) can be considered to grow linearly but of a higher wear rate, shortly after the installation of the rail, care has to be taken. Investigations of parameters like gauge and longitudinal gradient could not deliver general statements on rail wear mechanisms because the influence of local impacts was too big.

### Investigation of the effect of rail flank lubrication:

This investigation was able to verify a diminishing effect of rail flank lubrication on the 45°-wear rate of the high-rail (W3a) in the area under investigation.

For seven curves that have been investigated, a reduction of the 45°-wear rate of the high-rail (W3a) between 30% and 56% was observed.

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	2
Eidesstattliche Erklärung .....	3
Kurzfassung .....	4
Abstract .....	5
1 Problemstellung .....	9
1.1 Ziel der Arbeit .....	9
1.2 Forschungsfragen .....	10
2 Theorie .....	11
2.1 Der Fahrweg .....	11
2.1.1 Aufbau des Gleises - Zusammenspiel Schiene-Schwelle- Schotter .....	12
2.1.2 Kräfte am Gleis.....	13
2.1.3 Elemente des Oberbaus, Oberbautypen, Befestigungskonzepte, Steifigkeiten .....	18
2.2 Die Schiene .....	31
2.2.1 Profile.....	31
2.2.2 Schienengüten.....	32
2.2.3 Schienenlängen .....	35
2.2.4 Technische Liegedauer auf Grund der Dauerfestigkeit .....	36
2.2.5 Schienen im Bogen .....	37
2.2.6 Stöße und Schweißstellen und deren Auswirkung auf den Verschleiß .....	38
2.3 Verschleißverhalten der Schiene .....	40
2.3.1 Verschleißarten.....	41
2.3.2 Grenzen des Verschleißes .....	44
2.3.3 Auswirkung des Radius auf den Seitenverschleiß der Schiene .....	45
2.3.4 Auswirkung der Spurweite auf den Verschleiß.....	47
2.4 Schmieranlagen .....	51
2.4.1 Stationäre Schienenschmierung.....	51
2.4.2 Spurkranzschmierung .....	53
2.4.3 Das Fast Experiment .....	53

2.5	Das Netz der ÖBB .....	54
2.5.1	Strecken .....	54
2.5.2	Belastungen .....	55
2.5.3	Verkehrszusammensetzung .....	55
2.5.4	Schmieranlagen und Referenzbögen .....	56
2.6	Statistische Grundlagen .....	57
2.6.1	Messdaten .....	57
2.6.2	Kenngößen von Daten und Darstellungsarten .....	58
3	Expertengespräche .....	63
3.1	Einleitung .....	63
3.2	Expertengespräch zum Thema Verschleißverhalten von Schienen .....	63
3.3	Expertengespräch zum Thema Schienenschmieranlagen .....	66
3.4	Expertengespräch zum Thema Wirkungslänge von Schmieranlagen .....	70
4	Untersuchungen .....	71
4.1	Einleitung .....	71
4.2	Überlegungen und Maßnahmen im Vorfeld der Untersuchungen .....	72
4.2.1	Untersuchungsgebiet .....	72
4.2.2	Untersuchungsklassen .....	73
4.2.3	Nomenklatur .....	74
4.2.4	Eingangsdaten .....	75
4.2.5	Ausleseprogramm .....	77
4.3	Untersuchung zum Verschleißverhalten von Schienen im engen Bogen .....	83
4.3.1	Ziel der Untersuchungen .....	83
4.3.2	Rahmenbedingungen der Untersuchung .....	83
4.3.3	Untersuchung zur Beschreibung des Verschleißverhaltens .....	86
4.3.4	Parameterstudien zu Einflussfaktoren des Schienenverschleißes .....	90
4.4	Untersuchung zur Auswirkung der Installation von Schienenschmieranlagen auf das Verschleißverhalten in einem Bogen .....	92
4.4.1	Verschleißreduktion durch Einbau einer stationären Schmieranlage .....	92
4.4.2	Untersuchung zur Wirkungslänge des Schmiermittels .....	94
4.4.3	Verlängerung der Liegedauer von Schienen auf Grund stationärer Schienenschmierung .....	97
4.5	Untersuchung zur Auswirkung von Schienenschmierung auf das Verschleißverhalten mittels Vergleich mit Referenzbögen .....	99

5	Auswertung .....	100
5.1	Verschleißverhalten.....	100
5.1.1	Schwankungen der Messwerte- Sinuslauf.....	100
5.1.2	Änderung des Verschleißverhaltens im Laufe der Zeit .....	102
5.1.3	Entwicklung einzelner Punkte – Position-in-Curve-Effect .....	106
5.2	Parameterstudien - Das Verschleißverhalten von Schienen im engen Bogen .....	112
5.2.1	Spurweite - Erste Teiluntersuchung .....	112
5.2.2	Spurweite - Zweite Teiluntersuchung.....	118
5.2.3	Spurweite - Dritte Teiluntersuchung .....	122
5.2.4	Längsneigung .....	126
5.3	Untersuchung zur Auswirkung der Installation von Schienenschmieranlagen auf das Verschleißverhalten in einem Bogen .....	129
5.3.1	Verschleißreduktion durch Einbau einer stationären Schmieranlage .....	129
5.3.2	Untersuchung zur Wirkungslänge des Schmiermittels .....	133
5.3.3	Verlängerung der Liegedauer von Schienen auf Grund stationärer Schienenschmierung .....	134
5.4	Untersuchung zur Auswirkung von Schienenschmierung auf das Verschleißverhalten mittels Vergleich mit Referenzbögen.....	136
6	Zusammenfassung .....	138
	Literatur- und Quellenverzeichnis .....	141
	Abbildungsverzeichnis .....	143
7	Tabellenverzeichnis.....	146
8	Anhang .....	147

# 1 Problemstellung

Auf den Fahrweg wirken bei jeder Überfahrt Kräfte, welche sich aus Vertikalkräften, Längskräften und Querkräften zusammensetzen. Die Radlasten verursachen die auftretenden Vertikalkräfte auf das Gleis. Unregelmäßigkeiten im Fahrkantenverlauf der Schienen regen die Fahrzeuge zu einem dynamischen Fahrzeuglauf an, wodurch eine Wechselwirkung zwischen zusätzlicher Belastung und Entlastung auftritt.

Der Verschleiß des Schienenkopfes im engen Bogen ist durch das Anlaufen des Spurkranzes um ein Vielfaches größer als auf einem geraden Gleisabschnitt oder großen Bogen. Durch diese Gesetzmäßigkeiten wird die Nutzungsdauer einer Schiene sehr stark von der vorherrschenden Belastung, vom Zugmix und der Krümmung beeinflusst.

Bei der vorliegenden Masterarbeit wird das Verschleißverhalten verschiedener Schienenprofile und Schienengüten in unterschiedlichen Radien im Netz der ÖBB über eine Zeitperiode dargestellt. Hierfür stehen Messdaten über den Schienenverschleiß vom Messwagen EM 250 der ÖBB zur Verfügung. Daraus soll der Einfluss von Schienenschmierungen auf das Verschleißverhalten im Bogen ermittelt werden.

## 1.1 Ziel der Arbeit

Auf Basis der Messdaten des Messwagens EM250 der ÖBB soll das Verschleißverhalten von Schienen in engen Bögen über eine Zeitperiode dargestellt werden. Hierbei soll geklärt werden, welche Parameter einen Einfluss auf den Schienenverschleiß haben.

Anschließend soll die Auswirkung von stationären Schienenflankenschmieranlagen auf den Verschleiß der Schienen geklärt werden. Hierbei soll nicht nur die Verschleißminderung, mit der einhergehenden Verlängerung der Lebensdauer beschrieben werden, sondern es soll auch versucht werden, Aussagen über die Reichweite des Schmiermittels und die Einsatzkriterien von Schmieranlagen zu treffen.

## 1.2 Forschungsfragen

Aus der oben genannten Problemstellung abgeleitet, gilt es die folgenden Forschungsfragen zu klären:

- I Wie wirken sich unterschiedliche Einflussfaktoren auf den Schienenverschleiß im engen Bogen aus?
- I Wie groß ist die Reduktion des Schienenverschleißes auf Grund von Schienenschmierung im engen Bogen?
- I Welche Auswirkungen auf die Verlängerung der Lebensdauer von Schienen im engen Bogen lassen sich durch die Verwendung von Schienenschmieranlagen erwarten?
- I Für welche Radien ist ein Aufbringen von Schmiermitteln sinnvoll?
- I Wie groß ist die Einflusslänge der installierten Schmieranlagen, bzw. hat eine Schienenschmieranlage auch noch Einfluss auf darauffolgende gleichsinnige Bögen?

## 2 Theorie

Um in weiterer Folge Schlüsse aus dem Vergleich von Gleisbögen ziehen zu können, ist es unabdingbar einige theoretische Grundlagen zu verstehen. Aus diesem Grund soll dieses Kapitel auf die benötigten theoretischen Grundlagen eingehen, sich jedoch noch nicht mit der Untersuchung und Auswertung der Messdaten selbst beschäftigen.

### 2.1 Der Fahrweg

Dieses Kapitel soll einen kurzen Überblick über den Aufbau des Gleises und das Zusammenwirken der einzelnen Gleiskomponenten geben. Detaillierter wird hier nur auf Aspekte eingegangen, die tatsächlich Auswirkungen auf das Verschleißverhalten der Schiene haben. An dieser Stelle wird auch darauf hingewiesen, dass dieses Kapitel ausschließlich den Oberbau beleuchtet. Dem Autor ist bewusst, dass auch Unterbau, Drainageverhältnisse, etc. Einfluss auf die „Funktion“ des Gleiskörpers haben. Es wird aber davon ausgegangen, dass bei Einhaltung der Normen und Vorschriften, die Auswirkung auf den Schienenverschleiß gering bleibt.

Die Aufgaben des Gleises sind [1]

- I die Fahrzeuge entgleisungssicher zu führen,
- I die vertikalen und horizontalen Fahrzeugkräfte aufzunehmen,
- I diese Kräfte über Gleisrost und Schotterbett in den Untergrund abzuleiten und
- I einen guten Fahrkomfort sicherzustellen und eine hohe Verfügbarkeit für die Produktion gewährleisten.

Prof. Veit unterteilt im Skriptum Eisenbahnwesen [2] die Funktionen des Gleises in ein Trag- und ein Führungssystem:

- Tragsystem dient zur Aufnahme der Vertikalkräfte aus:
  - o Masse von Fahrzeug und Ladung (statische Vertikalkraft)
  - o Richtungsänderungen in der Trassenführung
  - o Störstellen (Lagefehler in der Fahrbahn)
  - o Anfahr- bzw. Bremsbeschleunigung
  - o Bewegung der Ladung
  - o das umgebende Medium Luft wie:
    - Seitenwind
    - Zugsbegegnungen
  - o Form des Fahrzeuges
- Das Führungssystem dient zur Aufnahme der Horizontalkräfte aus:
  - o Bogenfahrt (quasistatisch)
  - o Dynamik der Querbewegung
  - o Gleisunregelmäßigkeiten und Eigenbewegungen
  - o Seitenwind

### 2.1.1 Aufbau des Gleises - Zusammenspiel Schiene-Schwelle- Schotter

Im Wesentlichen können zwei Gleisbauarten unterschieden werden. Es gibt „Schottergleis“ und „Feste Fahrbahn“. [1]

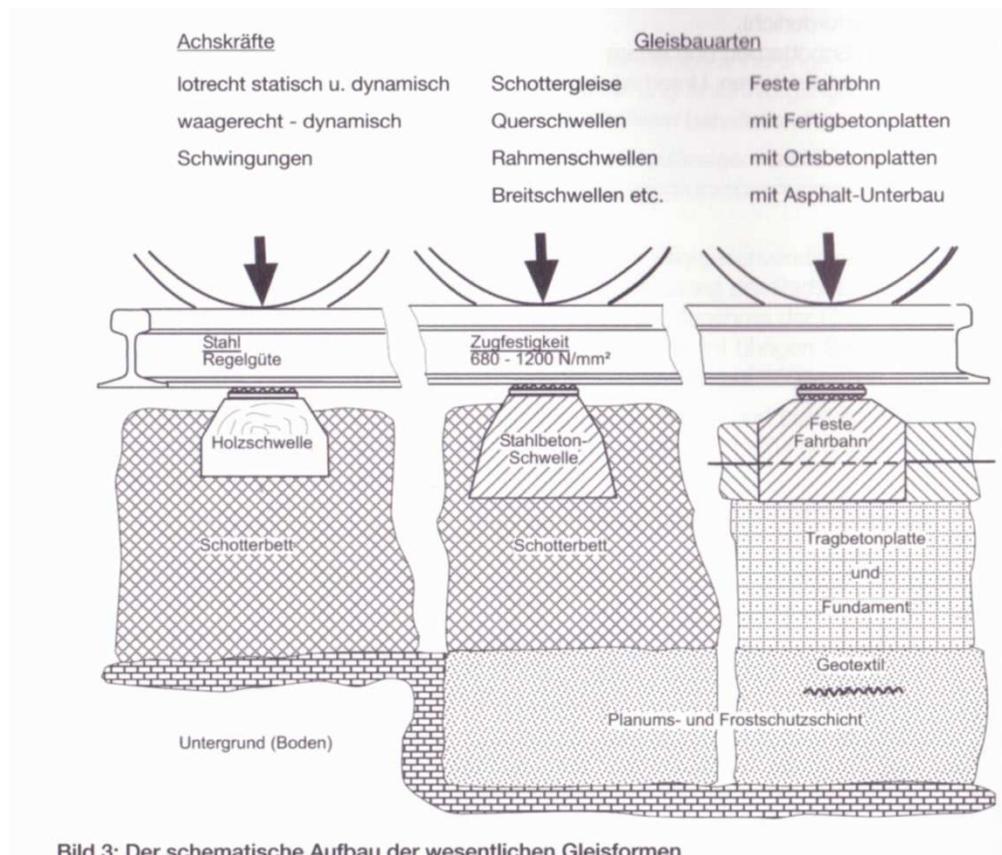


Bild 3: Der schematische Aufbau der wesentlichen Gleisformen

Abbildung 1: Schematischer Aufbau der wesentlichen Gleisformen [1]

Da sich in den zu untersuchenden Bögen keine Feste Fahrbahn befindet, wird in weiterer Folge nur mehr das Schottergleis näher behandelt.

Wie Abbildung 1 zeigt besteht der Oberbau eines Schottergleises im Wesentlichen aus folgenden Komponenten:

- I Schotterbett
- I Schwelle
- I Schiene

Nicht im Bild ersichtlich sind elastische Elemente und Befestigungselemente.

In den nachfolgenden Kapiteln sollen die Aufgaben der einzelnen Oberbaukomponenten und ihr Einfluss auf den Schienenverschleiß dargestellt werden.

## 2.1.2 Kräfte am Gleis

Um in weiterer Folge die Wirkungsweise der Gleiskomponenten verstehen zu können, müssen hier alle Kräfte, die auf den Gleiskörper einwirken, kurz zusammengefasst werden.

Lichtberger [1] unterscheidet:

### I Statische Kräfte:

- Vertikalkräfte auf Grund von Wagenlasten
- Schienenlängskräfte bedingt durch:
  - Temperaturschwankungen
  - Brems- und Beschleunigungskräfte
  - Schieneneigenspannungen sowie Schrumpfspannungen nach Schweißarbeiten
  - Sogenanntes Schienenwandern
- Querkräfte

### I Dynamische Kräfte am Gleis:

- Radlastverlagerungen
- Schwingungserscheinungen durch Schwingungsanregung
- Schwingungserscheinungen durch Eigenschwingungen der Fahrzeuge und des Gleises

## Führungskraft Y:

Abbildung 2 zeigt das Entstehen der Führungskraft Y durch das Anlaufen des bogenäußeren Vorderrades.

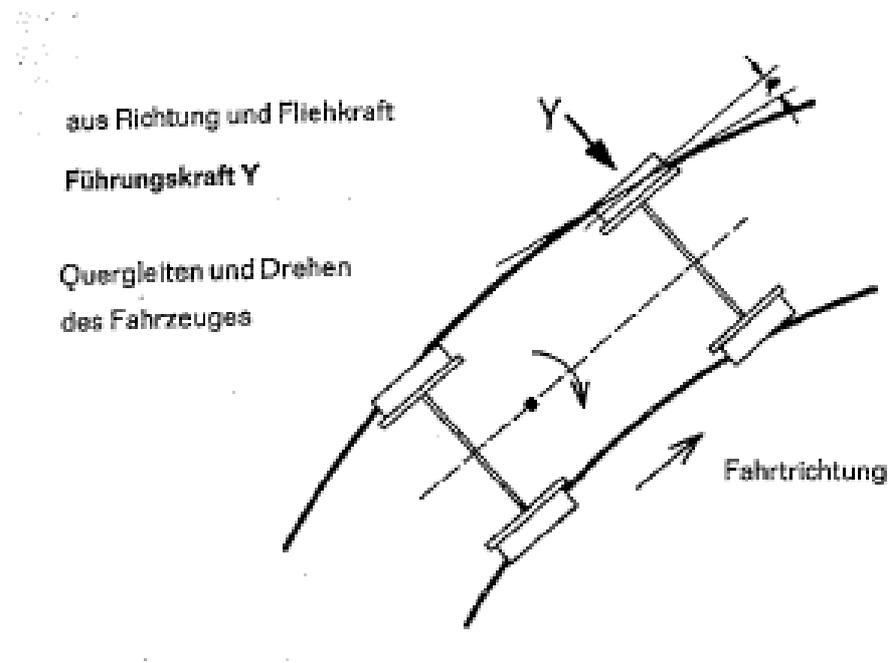


Abbildung 2: Die Führungskraft Y [3]

„Fährt ein Fahrzeug in den Bogen, so läuft mindestens ein äußeres Rad gegen die Außenschiene an. Der waagrechte Anteil der zwischen Spurkranz und Schiene entstehenden Kraft, welche die Bogenfahrt erzwingt, heißt Richtkraft. Diese Kraft wirkt jedoch nicht stetig, sondern schwankt infolge der Schwingungen während der Fahrt ständig.“

In horizontaler Richtung wirken weiters Massenkräfte zufolge der horizontalen Drehbewegung, sowie Reibungskräfte. Die Reibungswiderstände entstehen durch das Quergleiten zwischen Rad und Fahrfläche der Schienen, sowie zwischen anlaufendem Spurkranz und der abgerundeten Fahrfläche (Spurkranz-Gleitwiderstand). Die waagrechten Anteile der Reibungskräfte wirken der Richtkraft entgegen und müssen von ihr überwunden werden. Man nennt die resultierende Kraft Führungskraft.“ [2]

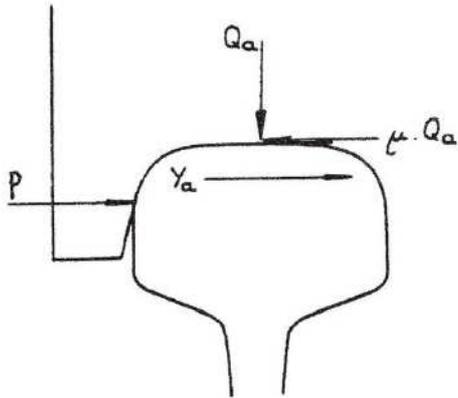


Abbildung 163: Führungskraft

**Führungskraft = Richtkraft - Eigenreibung**

$$Y_a = P - \mu_a \cdot Q_a$$

mit

- $Y_a$  ... Führungskraft der Außenschiene
- $P$  ... Richtkraft
- $\mu_a$  ... Reibungsbeiwert
- $Q_a$  ... Maßgebliche Vertikalkraft auf der Außenschiene

Abbildung 3: Führungskraft  $Y$  [2]

„Die Richtkraft  $P$  und die Reibkraft  $\mu \cdot Q_a$  beanspruchen die Schiene in den Berührungspunkten und bewirken die Abnutzung. Die Resultierende  $Y_a = P - \mu \cdot Q_a$  beansprucht die Schiene auf Biegung um die Längsachse.“ [2]

Abb. 4 zeigt das Ergebnis von Messungen aus den 1960er Jahren und lässt deutlich erkennen, wie die Führungskraft  $Y$  mit kleiner werdendem Radius zunimmt.

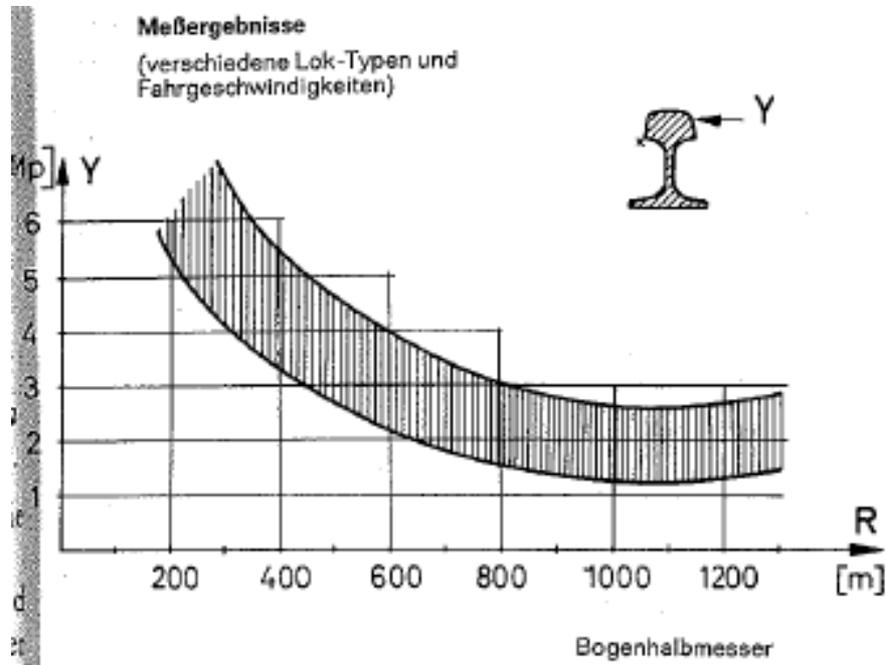


Abbildung 4: Seitliche Krafteinwirkung auf die Schiene in Abhängigkeit vom Radius [3]

Stephanides [4] zeigt auf Basis von Messungen der Messstelle Breitenstein ( $R=184\text{m}$ ,  $D=135\text{mm}$ ,  $V_{\text{zul}}=60\text{km/h}$ ) im Zeitraum von 12.5.2009 bis 11.6.2009, dass 4084 Achsen eine Führungskraft  $Y_{\text{dyn}} > 80\text{kN}$  aufwiesen.

### Vertikalkräfte

„Die statischen Achskräfte ergeben sich aus den Gewichtsberechnungen der Fahrzeuge und werden auch als Radsatzkräfte bezeichnet. Diese betragen für Güterwagen bis 225 kN, Lokomotiven ebenfalls max. 225 kN und für Reisezugwagen zwischen 70 und 120 kN.“ [2]

„Der Einfluss der Dynamik und Fliehkräfte kann eine Veränderung der statischen Achslast um bis zu  $\pm 20\text{--}25\%$  ergeben.“ [2]

Für das einzelne Rad errechnet sich also die Kraft Q aus der Hälfte der oben genannten statischen Achskräfte und beträgt somit maximal 112,5 kN. Unter Berücksichtigung der Dynamik errechnet sich somit Q auf knapp über 140 kN.

Kräfte im Querschnitt:

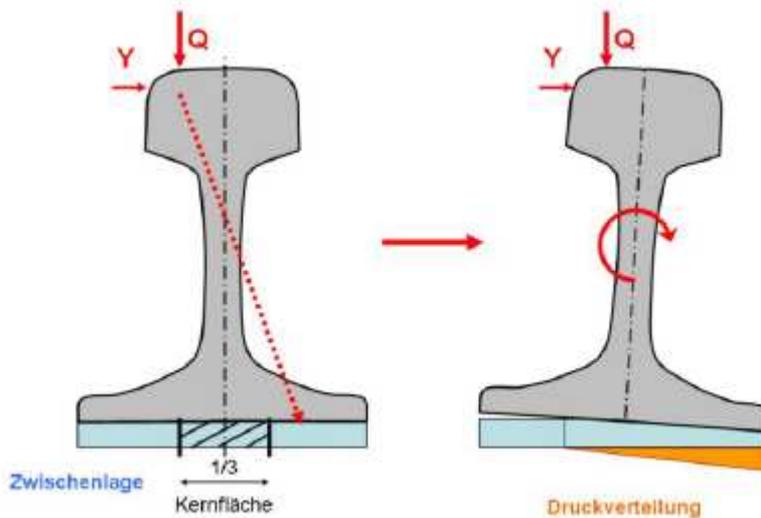


Abbildung 5: Einwirkende Kräfte im Querschnitt [5]

Das in Abbildung 5 ersichtliche Moment, welches auf Grund der einwirkende Kräfte Y und Q entsteht, beträgt laut Auer [5] etwa 10kNm und führt zu einer Verkipfung der Schiene.

Lichtberger stellt die angreifenden Kräfte wie folgt dar:

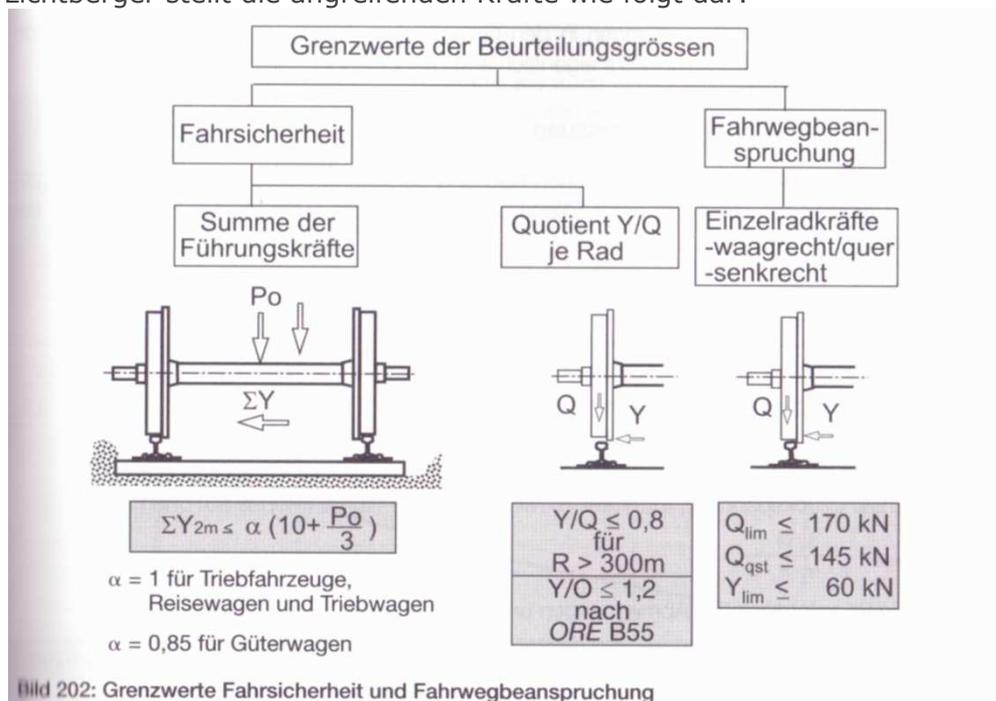


Abbildung 6: Grenzwerte Fahrsicherheit und Fahrwegbeanspruchung [1]

### Zusammenfassung:

Zwischen Schiene und Gleis wirken also im Wesentlichen folgende Kräfte:

- I Führungskraft  $Y_{dyn}$ :  $>80\text{kN}$
- I Vertikalkraft  $Q_{dyn}$ :  $\sim 140\text{ kN}$
- I Moment: ca.  $10\text{ kNm}$

Es sei darauf hingewiesen, dass diese Werte für das österreichische Bahnnetz gelten, da sowohl die Messstation in Österreich liegt, als auch die Achslasten von den in Österreich zulässigen Achslasten abgeleitet wurden.

### 2.1.3 Elemente des Oberbaus, Oberbautypen, Befestigungskonzepte, Steifigkeiten

Damit später ein Vergleich von Bögen überhaupt möglich ist, muss geklärt werden, welchen Einfluss die einzelnen Komponenten des Oberbaus auf den Schienenverschleiß haben. Außerdem soll in diesem Kapitel ein Überblick über die im Netz der ÖBB verwendeten Komponenten gegeben werden. Näher untersucht werden Schwellen, Schienenbefestigungen, Zwischenlagen und das Schotterbett. Der Schiene bzw. dem Schienenverschleiß wird später ein eigenes Kapitel gewidmet, stellt sie doch den Kernpunkt der Untersuchungen dieser Masterarbeit dar.

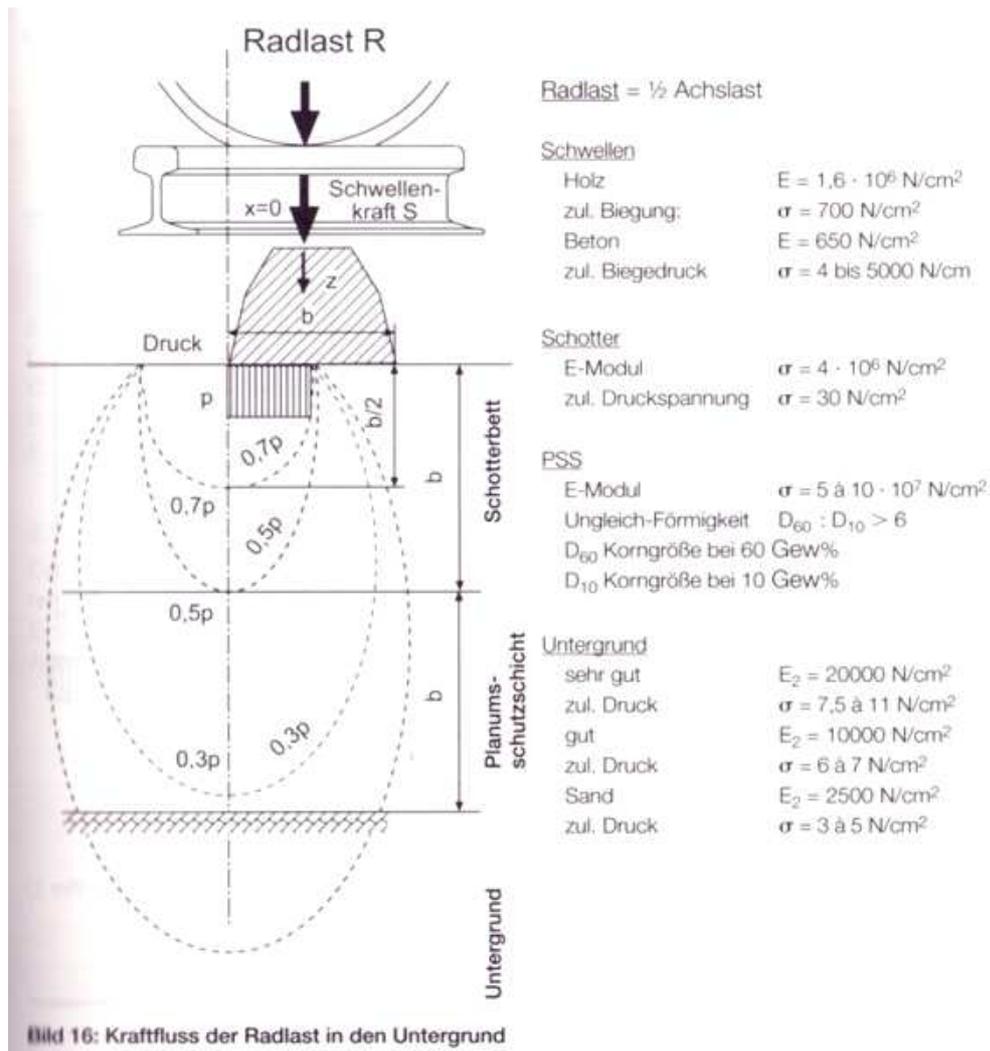


Abbildung 7: Kraftfluss der Radlast in den Untergrund [1]

Abbildung 7 zeigt den Kraftfluss von der Radlast in den Untergrund und soll die Funktion der einzelnen Gleiskomponenten unterstreichen.

## Die Schienenbefestigung

„Die Schienenbefestigung hat die Aufgabe die Spurweite zu halten und die auf die Schienen und in diesen wirkenden Kräfte auf die Unterschwellung (Quer-, Längsschwellen, Betonplatten u.a.m.) zu übertragen.“ [1]

Folgende Schienenbefestigungen kommen in Abhängigkeit von Schwelle und Schienenform beim Neubau zum Einsatz [6]:

Schienenform	Schwellentyp	Schienenbefestigung	RZ-Nummer
60 E1	Be – K1	Skl 14	2743/7
60 E1	Be – L2	Skl 14	2743/10
54 E2	Be – K1	Skl 14	2743/8
54 E2	Be – L2	Skl 14	2743/11
49 E1	Be – K1	Skl 14	2743/9
49 E1	Be – L2	Skl 14	2743/12
60 E1	H mit Rph 6	Skl 12	2703/10
60 E1	H mit Rph 6	Kpo 9	17139/2, 2427/3
54 E2	H mit Rp C (1:40)	Skl 12	2703
49 E1	H mit Rp B (1:20) <sup>1)</sup>	Skl 12	2703
54 E2	H mit Rp C (1:40)	Kp 6	2703, 16077
49 E1	H mit Rp B (1:20) <sup>1)</sup>	Kp 6	2703, 16077

Tabelle 1: Schienenbefestigung [6]

In Gleisen mit  $R \leq 600$  m sind bei Beton-Schwellen verstärkte Befestigungen vom Typ Skl 28 einzubauen. [6]

Zur Zeit sind im Österreichischen Bahnnetz folgende Schienenbefestigungen eingebaut. Es wird hier auch auf ältere Modelle eingegangen, weil diese unter Umständen noch im Gleis vorhanden sind:

### I Die Rippenplattenbefestigung mit Klemmplatte :

„Die Rippenplattenbefestigung mit Klemmplatte war von 1938 bis 1988 die Standardbefestigung für Holzschwellengleise im Netz der ÖBB. Aus dieser Einsatzdauer kann man bereits schließen, dass das System robust und zäh ist. Eine Änderung war jedoch anzustreben, weil man erkannte, dass die Befestigung bei leichter Lockerung der Hakenschraube viel an Durchschubwiderstand einbüßt. Die Klemmplatte verhindert zwar ein Kippen der Schiene, nicht aber Schienenwanderungen in Längsrichtung, vor allem auf Bergstrecken.“ [7]

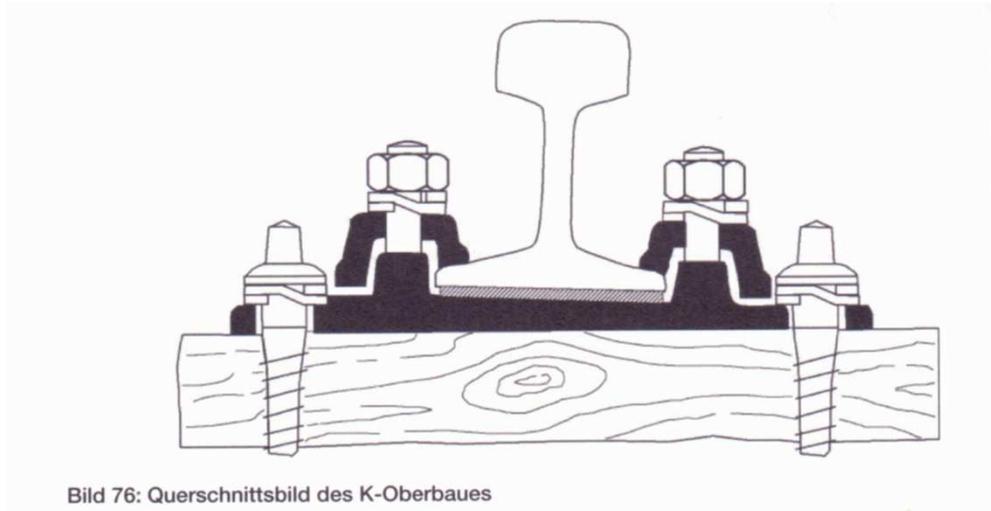


Bild 76: Querschnittsbild des K-Oberbaues

Abbildung 8: Querschnittsbild des K-Oberbaues [1]

Wie Auer [7] zeigt, kam die Rippenplattenbefestigung sowohl mit Zwischenlagen aus Pappelholz sowie mit Zwischenlagen aus Kunststoff zum Einsatz.

*„In engen Gleisbögen treten im Laufe der Zeit einseitige Einpressungen in das Schienenaufleger auf. Der Einsatz von Kunststoffkeilplatten ermöglicht eine Korrektur der Fehlneigung“ [7]*

I Die Rippenplattenbefestigung mit Spannklemme:



Abbildung 9: Rippenplatte mit Spannklemme [7]

Um einen höheren Durchschubwiderstand zu erzielen, wurde seit 1988 die Rippenplattenbefestigung mit Spannklemme für Holzschwellengleise verwendet. Es zeigte sich, dass es in engen Bögen häufig zu einem Einarbeiten des Schienenfußes in die Rippenplatte kam. Dies führt sowohl zu einer Spurerweiterung als auch zu einem Vorbeigreifen der Feder am innenseitigen Schienenfuß der bogenäußeren Schiene. Dem

zweiten Umstand wurde durch Einsatz anderer Federklemmen Abhilfe verschafft. Der Einsatz der Spannklemmen führte aber zu einem einseitigen Verschleiß der Zwischenlagen. Die dadurch entstehende Verdrehung der Schiene hat eine Vergrößerung der Spurweite zur Folge. [7]

#### I Rippenplatte mit Klemmplatte - K-Oberbau:

Die Rippenplatte mit Klemmplatte wurde auch erfolgreich auf Betonschwellen angebracht. Wie bei Holzschwellen kommt es auch hier zu einer Einarbeitung der Schiene in die Rippenplatte, aber auch einer Einpressung der Rippenplatte in die Betonoberfläche. [7]

#### Pandrol-Befestigung

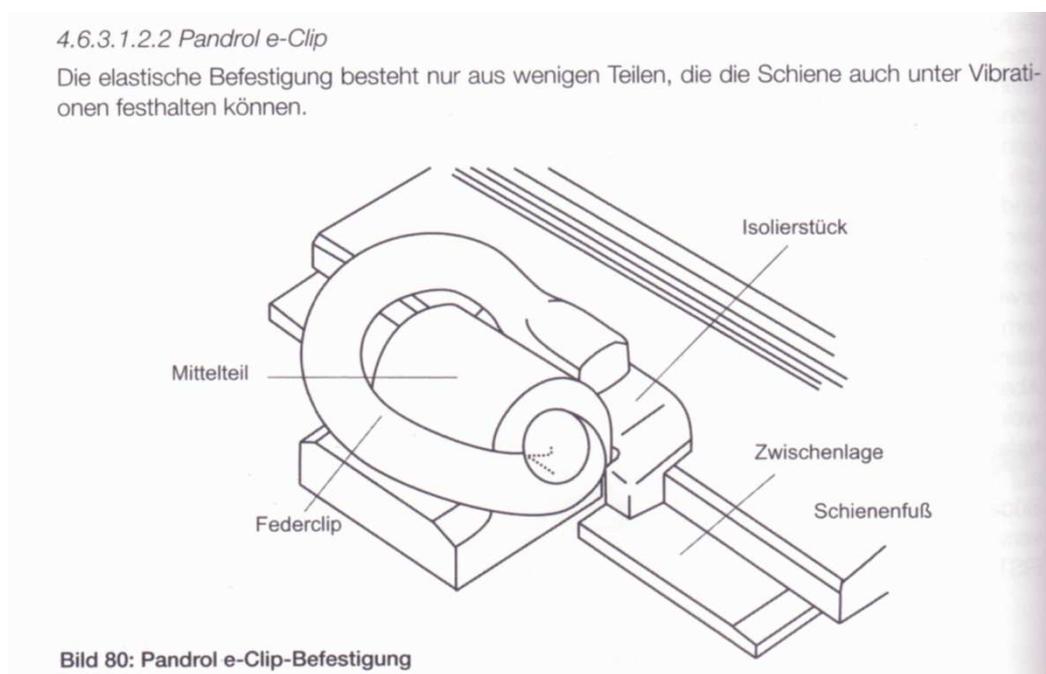


Abbildung 10: Pandrol e-Clip [1]

Wie Abbildung 10 zeigt, besteht das System nur aus sehr wenigen Komponenten, die bereits im Schwellenwerk auf die Schwelle aufgebracht werden. [1]

Der Pandrol e-Clip wurde ab 1966 auf Betonschwellen in Österreich eingebaut. Der Grund für den Einbau des e-Clips anstatt des K-Oberbaus lag im billigeren Anschaffungspreis. Schwachstelle des Systems ist, dass die Schiene ihre seitliche Führungskraft durch Anschlag des Schienenfußes am Bügelhalter erhält. Im engen Bogen kommt es auf Grund der hohen Seitenbeanspruchung häufig zu einer Überbeanspruchung des Bügelhalters, welche zu Dauerbrüchen führt. [7]

#### I W-Befestigung:

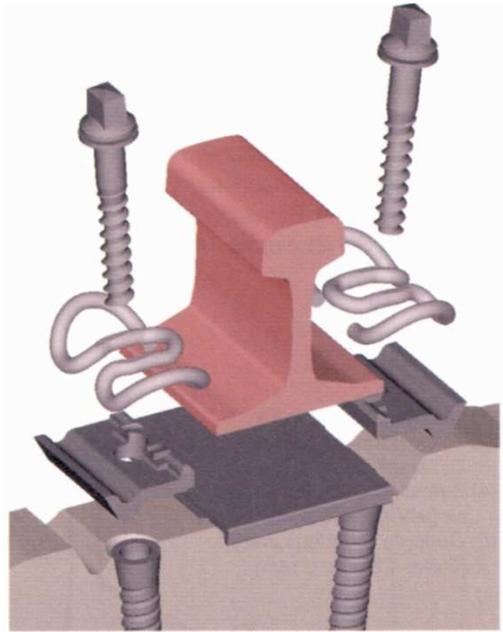


Abbildung 11: Vossloh W14 Befestigung [1]

Die in Abbildung 11 dargestellte W-Befestigung ist seit 1976 in Österreich eingeführt und mit Modifikationen noch heute die Regelbefestigung der ÖBB. Die Feder presst die Schiene nach unten. Die W-Befestigung wurde mit 3 verschiedenen Spannklemmen der Skl1, der Skl14 und der Skl28 ausgeführt, wobei sich letztere als optimal für den engen Bogen erwies und heute das Standardbefestigungskonzept für Bögen mit  $R < 600\text{m}$  darstellt. [7]

Der Federweg der Spannklemmen beträgt ca. 13mm, wobei die Mittelschleife die Kippbewegungen der Schiene abfängt. [1]

Dieser beschriebene Federweg ermöglicht es der Schiene seitlich auszuweichen und muss sich somit auf Grund einer sich ändernden Berührgeometrie auch auf den Schienenverschleiß auswirken.

## Fazit

Es zeigt sich, dass die einzelnen Befestigungskonzepte unterschiedliche Einflüsse auf die Spurweite bzw. auf ein Ausweichen der Schiene unter der Last haben. Da dem Autor jedoch zum aktuellen Zeitpunkt keine Datenquellen zu den Befestigungen bekannt sind und außerdem der Zustand der Befestigungssysteme eine zu große Unbekannte in der gesamten Untersuchung darstellen würde, muss die gemessene Spurweite für weitere Untersuchungen genügen.

## Zwischenlagen

*„Ein weiteres wichtiges Element des Gleises ist die Zwischenlage. Diese dient in erster Linie dem Einbringen einer definierten Elastizität in das Gleis. Weiche Zwischenlagen erhöhen die Elastizität und Einsenkung des Gleises und vermindern damit die Beanspruchung des Schotterbetts. Die Schlagbeanspruchung der Schienen durch Flachstellen an den Rädern wird ebenfalls reduziert. Neben den elastischen Anforderungen kommen in Bögen Anforderungen an den Zwischenlagen-Materialverschleiß und der Einfluss auf die Schlupfwellenbildung hinzu.“ [7]*

*„Die Zwischenlagen dienen als elastisch dämpfendes Element zur Entkopplung von Vibrationen. Wegen der mit der Elastizität verbundenen Einsenkung der Schienen kommt es zu einer Lastverteilung über mehrere Schwellen“ [1]*

*„Hinsichtlich des Verhaltens in Bogengleisen kommt der Zwischenlage eine spezielle Aufgabe zu. Durch Einbringen einer elastischen Zwischenschicht werden die Kantenpressungen vermindert. Eine Kerbbildung im Schienenauflagerbereich wird verhindert.“ [7]*

Im Netz der ÖBB wurden folgende Zwischenlagen verwendet:

- I Fichtenholzplättchen:
  - o Einsatz in den 1950er und 1960er Jahren
  - o Gebrauchsdauer zwischen vier bis acht Jahren
  - o Elastizität rasch verschwunden (Verdichtung der Holzfasern)
- I Zwischenlagen aus Gummi
  - o Ab 1960ern
  - o Starker Materialverschleiß, vor allem im Bogen
  - o Zwischenlagen aus Kunststoffpolyethylen
  - o Zu steif → Probleme
- I Zwischenlagen aus Kunststoff- EVA
  - o Ebenfalls relativ steif
  - o Verschleiß in Bögen war zufriedenstellend.
  - o Einarbeiten in den Auflagerbereich war Folge
- I Zwischenlagen aus Gummi
  - o Ab 1990ern Rückkehr zu weichen Gummizwischenlagen auf Grund von „weißen Stellen“ im Gleis
  - o Einsenkung der Zwischenlage beträgt 0,65mm unter 22 t Achslast

[7]

Nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die im Neubau zu verwendenden Zwischenlagen:

Schienen	Schwellen	Zw	RZ
60 E1	Be – K1, Be – L2	Zw 700 <sup>1)</sup>	17207/1
54 E2, 49 E1	Be – K1, Be – L2	Zw 700 <sup>1)</sup>	17207/1
60 E1	Bu 1, Skl 12	Zw – K2b oder Zw – K11	17205/4 oder 16971/1
54 E2, 49 E1	Bu 1, Skl 12	Zw – K8 oder Zw – K8a	16971/1 oder 17205/3

Tabelle 2: Zwischenlagen im Neubau [6]

Generell kommen bei den ÖBB Zwischenlagen aus

- I Elastomeren Werkstoffen (Gummi)
- I Compound Gummi-Kunststoff
- I Kunststoff (EVA)

zur Anwendung, wobei die Materialparameter variieren. [8]

Auer zeigt in seiner Arbeit [7], dass die Verwendung unterschiedlicher Zwischenlagensteifigkeiten einen Einfluss von etwa 1mm auf die Schienenauslenkung haben.

### Fazit

Schon aus den unterschiedlichen verwendeten Materialien ist ersichtlich, dass unterschiedliche Steifigkeiten bei den Zwischenlagen vorliegen können.

Da jedoch sogar bei weichen Zwischenlagen nur Einsenkungen von 0,65mm zu erwarten sind, sollte der Effekt auf die Spurweite und somit auf die äquivalente Konizität sehr gering bleiben.

Wie Auer [7] zeigt, kann es jedoch auf Grund von Zwischenlagenverschleiß zu einer Schienenneigung von 1/20 nach außen kommen. Dies wirkt sich sehr wohl auf die Spurweite aus.

Wie bereits bei den Befestigungskonzepten vorgeschlagen, wird es auch mit den Zwischenlagen am einfachsten sein, die reale Spurweite für weitere Untersuchungen heranzuziehen, da der Fortschritt des Zwischenlagenverschleißes aus diversen Gründen nicht mitbetrachtet werden kann.

## Schwelle

Veit [2] fasst die Aufgaben der Schwelle wie folgt zusammen:

- I „Übertragung der vertikalen und horizontalen Kräfte in die Bettung
- I Spurhaltung und Standfestigkeit der Schiene
- I Lagesicherheit gegenüber dynamischen Belastungen und temperaturbedingten Spannungen.“

Weiters unterteilt Veit [2] die Schwellen nach ihrem Material in:

- I Holzschwellen
- I Stahlschwellen
- I Betonschwellen

Folgende Tabelle stellt jene Schwellen dar, die beim Neubau im Netz der ÖBB verwendet werden:

Schwelle	Werkstoff	Bezeichnung
Gleis- schwelle	Be	K1
		L2
	H	Bu 1
		Ei 1
Weichen- schwelle	Be	gem. RZ
	Ei	gem. RZ

Tabelle 3: Schwellenbezeichnungen im Neubau [6]

Abmessungen und Charakteristika sind in nachfolgender Tabelle dargestellt :

RZ	Name	Länge [m]	Gewicht [kg]	für Schienen- fußbreite [mm]	Befestigung
17 202	Be 19	2,5	280	125	Skl
17 205	Be 19a	2,6	288	125 + 150	
17 206	L1	2,5	290	125	
17 208	L2	2,6	320	125 + 150	
17 207	K1	2,6	282	125 + 150	
17 210	Be/S1	1,5	103	110	

Tabelle 4: Abmessungen Schwellen [9]

## Versuch

Da im untersuchten Gebiet keine Stahlschwellen vorhanden sind, wird hier nur auf Holz- und Betonschwellen näher eingegangen. Nachfolgend soll gezeigt werden, warum es notwendig ist, bei einer Betrachtung des Verschleißverhaltens der Schiene auch zwischen den einzelnen Schwellentypen zu unterscheiden.

Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen Querschnitte von typischen Holz- bzw. Betonschwellen. Es soll nun in einem sehr vereinfachten Versuch das unterschiedliche Biegeverhalten der Schwellen dargestellt werden.

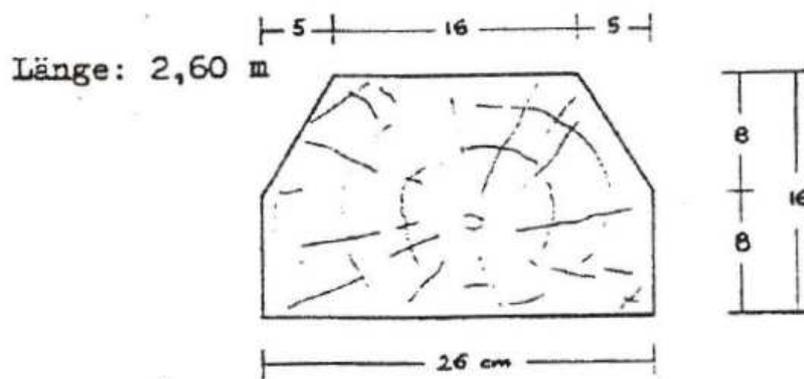


Abbildung 133: Querschnitt einer Holzschwelle

Abbildung 12: Querschnitt einer Holzschwelle [2]

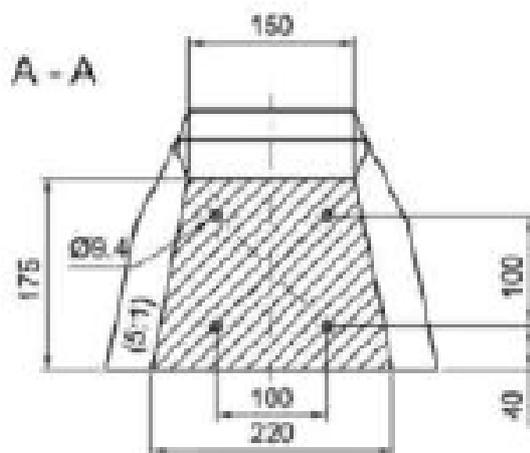


Abbildung 13: Querschnitt einer Betonschwelle in Schwellenmitte, Länge= 2600mm [2]

Aus den gezeigten Abbildungen ergeben sich die Querschnittsflächen wie folgt:

- I Holzschwelle:  $376 \text{ cm}^2 = 37600 \text{ mm}^2$
- I Betonschwelle:  $323,75 \text{ cm}^2 = 32375 \text{ mm}^2$

Die Flächenträgheitsmomente errechnen sich wie folgt:

- I  $I_y \text{ Beton} = 8,16379 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$
- I  $I_y \text{ Holz} = 7,48259 \cdot 10^7 \text{ mm}^4$

Die Berechnung des Flächenträgheitsmomentes ist einfach, da hierfür nur die Formel für das Flächenträgheitsmoment eines Trapezquerschnitts verwendet werden muss. Die Berechnung des Trägheitsmomentes der Holzschwelle ist im Anhang dargestellt.

Weiters sind für die Untersuchung die statischen E-Moduln der Schwellen von Bedeutung:

- I Mittlerer statischer E-Modul von Einblockschwellen:  $E = 42.000 \text{ N/mm}^2$  [1]
- I E-Modul Buchen-Holz:  $14.000 \text{ N/mm}^2$  [10] =  $14000000 \text{ kN/m}^2$  [10]

Es wird der E-Modul für Buche verwendet, da dieser um  $1000 \text{ N/mm}^2$  höher ist als jener von Eichenholz.

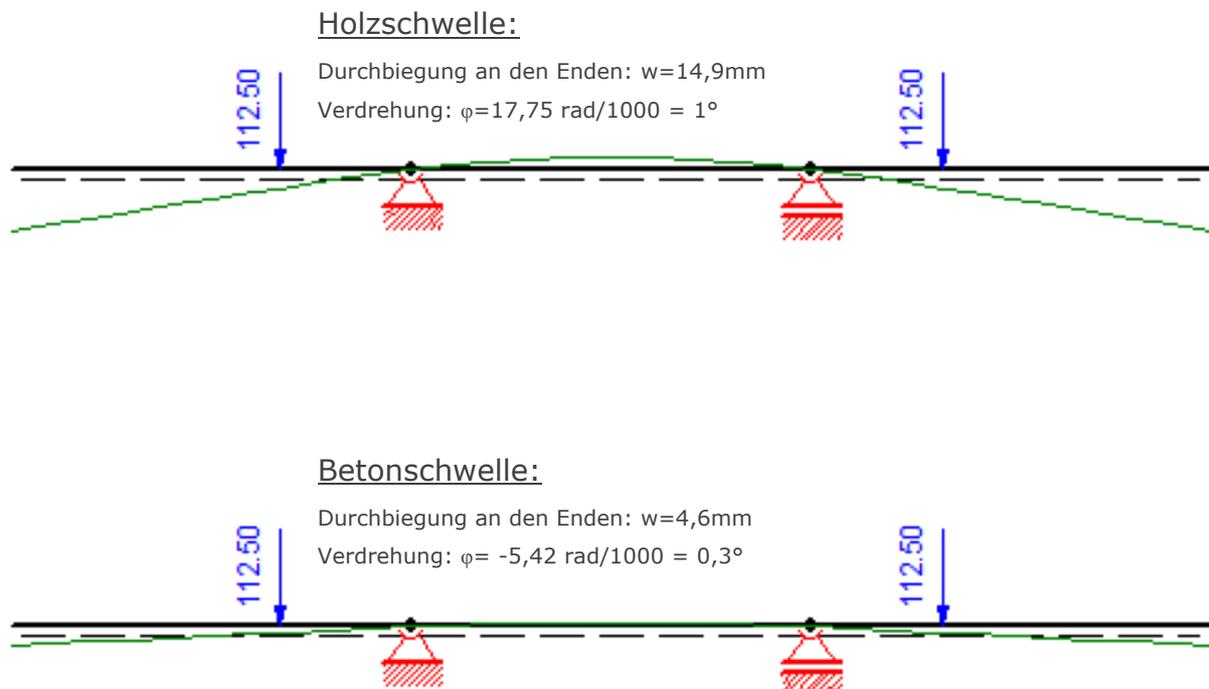


Abbildung 14: Vergleich des Biegeverhaltens von Holz und Betonschwellen

Der in Abbildung 14 gezeigte Versuch stellt sehr vereinfacht das Verhalten von Holz- und Betonschwellen unter Belastung dar, für den Fall, dass sich Hohllagen unter den Auflagern gebildet haben.

Die einwirkende Vertikalkraft wird mit 112,5 kN, also der gesamten maximalen statischen Radlast, angenommen. Die Übertragung der Last auf andere Schwellen wurde nicht berücksichtigt. Auch auf das Aufbringen einer Horizontalkraft bzw. eines Momentes wurde verzichtet, da dieser Versuch ohnehin keine genauen Werte liefern soll, sondern nur das unterschiedliche Biegeverhalten zwischen Holz und Betonschwelle darstellen soll. Die Auflager befinden sich in den Drittelpunkten der Schwelle. Angemerkt sei auch, dass die Betonschwelle mit ihrem dünnsten Querschnitt gerechnet wurde und sich somit in Wirklichkeit noch wesentlich steifer verhalten würde.

An ihren Enden zeigt die Holzschwelle etwa die dreifache Durchbiegung im Vergleich mit der Betonschwelle. Auch die Verdrehung, gemessen am Schienenaufleger, ist bei der Holzschwelle dreimal so groß.

Wie Auer [7] zeigt, führt eine Schwellenbesohlung bei Betonschwellen zu gleichmäßigeren Auflagerbedingungen, wodurch wiederum ein anderes Verformungsverhalten als bei unbesohlenen Betonschwellen zu erwarten ist.

## **Fazit**

Es zeigt sich, dass Holzschwellen, Betonschwellen und besohlte Betonschwellen ein deutlich anderes Biegeverhalten unter Belastung zeigen. Da ein Vorliegen von Hohllagen im realen Netz nicht ausschließbar ist, müssen für die weiteren Betrachtungen Holz- und Betonschwellengleise getrennt voneinander betrachtet werden.

## Schotter

Generell kommt im Netz der ÖBB

- I Schotter I: 31,5/63 mm und
- I Schotter II: 16/31,5 mm

zum Einsatz. Für lückenlos verschweißte Gleise ist Hartgestein-Schotter der Körnung I zu verwenden, sofern diese nicht regelmäßig für Arbeiten betreten werden müssen. [11] Auf weitere Anforderungen zum Schotter wird hier nicht eingegangen. Der Autor verweist hier auf die BH700 - Technische Lieferbedingungen „Oberbauschotter“ der ÖBB-Infrastruktur.

Neben der Lastabtragung in den Untergrund ist das Einbringen von Elastizität in den Gleiskörper eine der Grundaufgaben von Gleisschotter. [1] Eine Veränderung der Qualität des Schotters durch Abnutzung, mangelnde Drainage, etc. lässt somit vermuten, dass die Schiene auf Grund der höheren Beanspruchung ebenfalls einen höheren Verschleiß aufweisen sollte.

Jörg weist in seiner Diplomarbeit [12] nach, wie wichtig die Gleislagequalität auf die Liegedauer ist.

### **Fazit:**

Da dem Autor keine Daten über Qualität und Herkunft des Schotters zur Verfügung stehen, wird hier nicht weiter auf Schotter und dessen Einfluss auf den Schienenverschleiß eingegangen. Des Weiteren wäre es kaum möglich in Österreich im Untersuchungsgebiet idente Kurven mit identem Schottermaterial zu finden anhand derer eine Charakteristik zur Beschreibung des Einflusses auf den Schienenverschleiß erstellt werden könnte. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass der Verschleiß unterschiedlich weit fortgeschritten sein kann und andererseits selbst bei Verwendung von Schotter aus dem gleichen Schotterwerk durch Stopfarbeiten häufig anderer Schotter eingebracht wird.

Für die weiteren Untersuchungen kann bzw. muss also auf ein Einbeziehen sämtlicher Schottereigenschaften verzichtet werden.

## 2.2 Die Schiene

### 2.2.1 Profile

Folgende Schienenprofile kommen im Regelfall bei Neubaustrecken zur Anwendung:

Schienenform	Zulässige $V_{\max}$ [km/h]
60 E1	> 160
54 E2	160
49 E1	140
VA 71B	> 160 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> bei Verwendung aus lärmschutztechnischen Gründen sind höhere Geschwindigkeiten als 120 km/h kontraproduktiv (siehe auch Pkt. 4.4.1).

Tabelle 5: Schienenprofile in Abhängigkeit von  $V_{\max}$  [6]

Die Profile weisen nicht nur ein unterschiedliches Laufmetergewicht, sondern auch eine unterschiedliche Geometrien und Verschleißreserven auf. [7] Die einzelnen Profile werden hier nicht dargestellt. Diese können der EN-13674 entnommen werden.

#### Fazit:

Da die unterschiedlichen Schienenprofile eine unterschiedliche Geometrie und somit auch eine unterschiedliche Berührgeometrie zwischen Rad und Schiene aufweisen, ist eine Unterscheidung der Bögen hinsichtlich ihrer Schienenprofilformen notwendig.

### 2.2.2 Schienengüten

Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die verwendeten Schienengüten bei den ÖBB.

Neu	alt	„uralt“	Erklärung		
Stahlsorte der Schienen	Schienengüte		Härte Brinell [HB]	Zugfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Walzzeichen
R 200 <sup>1)</sup>	S 700	RG	200	700	kein Symbol
R 260	S 900 A	VG	260	900	≡
R 260 Mn <sup>1)</sup>	S 900 B	VG	260	900	≡≡
R 320 Cr <sup>1)</sup>	S 1100	SG	320	1100	≡≡≡
R 350 HT	HSH	---	350	1300	≡≡≡≡

Tabelle 6: Verwendete Schienengüten ÖBB [6]

Seit 2001 werden im Netz der ÖBB in Bögen zuerst, R<350m, dann R<600m, Schienen der Güte R350HT eingebaut. Darüber wird die Standardgüte R260 verbaut. Der Grund hierfür liegt in der Verschleißreduktion. [7]

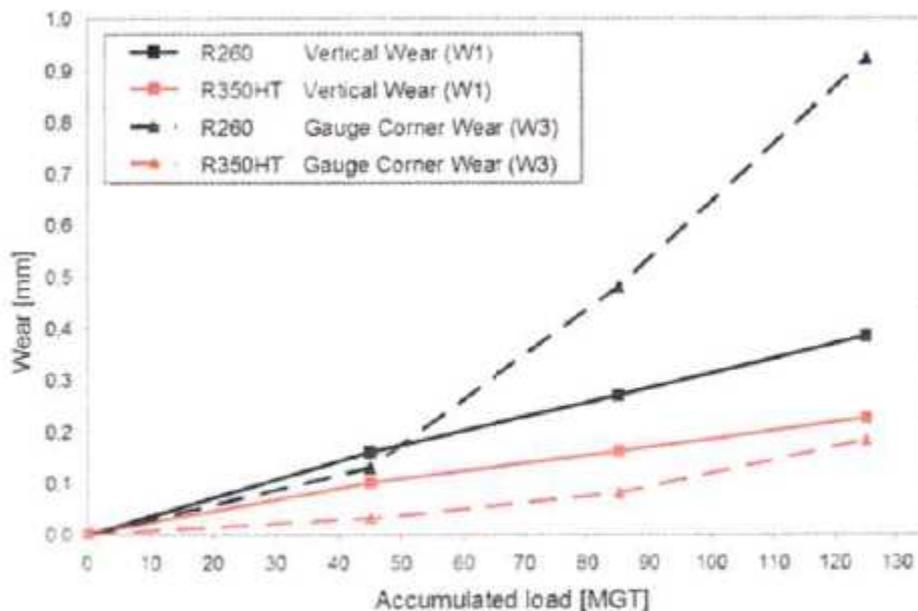


Fig. 3: Wear data over accumulated load obtained from the test section near Kerzell

Abbildung 15: Verschleißverhalten zweier verschiedener Schienengüten im Bogen [13]

Abbildung 15 zeigt das Ergebnis eines Versuchs, der in Deutschland in Kerzell stattgefunden hat. Die Messung erfolgte in einem Bogen mit 1400m Radius bei Mischverkehr mit 160 km/h Höchstgeschwindigkeit. Es wurden verschiedene Stahlsorten im Bogen eingebaut.

Es ist deutlich erkennbar, dass der Seitenverschleiß für die Güteklasse R260 mit 0,9 mm (nach 125MGT) dreimal so hoch ist wie der Seitenverschleiß für kopfgehärtete Schienen der Güteklasse R350HT, welche nach 125 MGT einen Seitenverschleiß von unter 0,3 mm erreichten. Ersichtlich ist auch, dass bei R260-Schienen ab etwa 45 MGT der Verschleiß deutlich schneller wächst als zuvor. Das Verschleißverhalten für R350HT Schienen bleibt hingegen annähernd linear. [13]

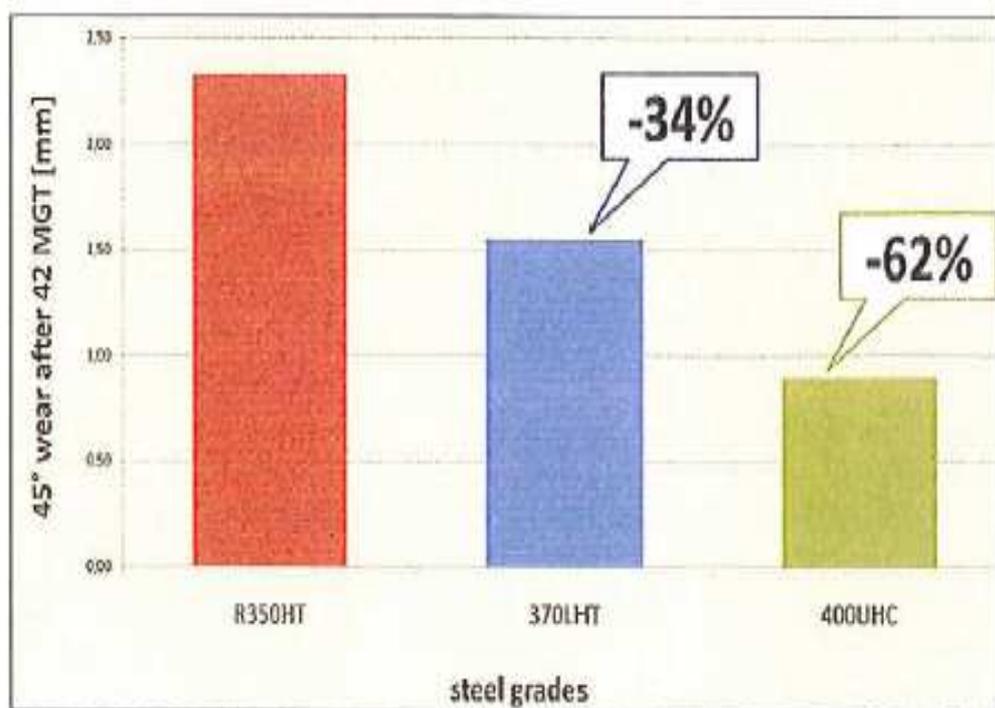


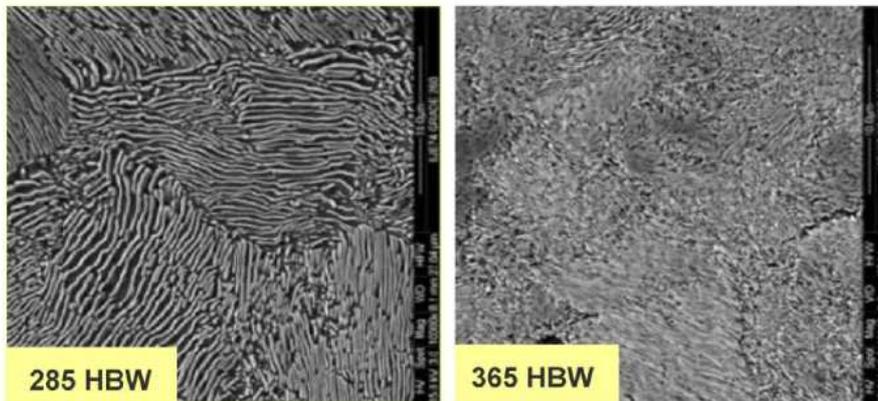
Fig 3. The results of recent wear resistance tests on a mixed-traffic line in Austria.

Abbildung 16: Verschleißfestigkeit von kopfgehärteten Schienengüten im Vergleich [14]

Wie in Abbildung 16 ersichtlich wird, zeigen auch die kopfgehärteten Schienengüten ein sehr unterschiedliches Verschleißbild. Dabei zeigen Schienen der Güte 370LHT einen um 34% verminderten Seitenverschleiß und Schienen der Güte 400UHC einen um 62% verminderten Seitenverschleiß im Vergleich zu den Schienen der Güte R350HT. [14]

Jörg zeigt in einem Vortrag in der Vorlesung OberbauVA, dass die Schienenhärte in erster Linie mit dem Schaffen eines feineren perlitischen Gefüges einhergeht, welches der eigentliche Grund für erhöhten Verschleißwiderstand ist. [12]

## Überblick Schienenstähle Perlit (Gefüge)



- Der Lamellenabstand bestimmt die Widerstandsfähigkeit.  
*Je geringer der Lamellenabstand, desto härter ist der Stahl.*

Abbildung 17: Gefüge zweier Stahlgüten [12]

## Wärmebehandelte Premiumschienen Beispiel Gleistest (ÖBB / Semmering II / R = 185m)

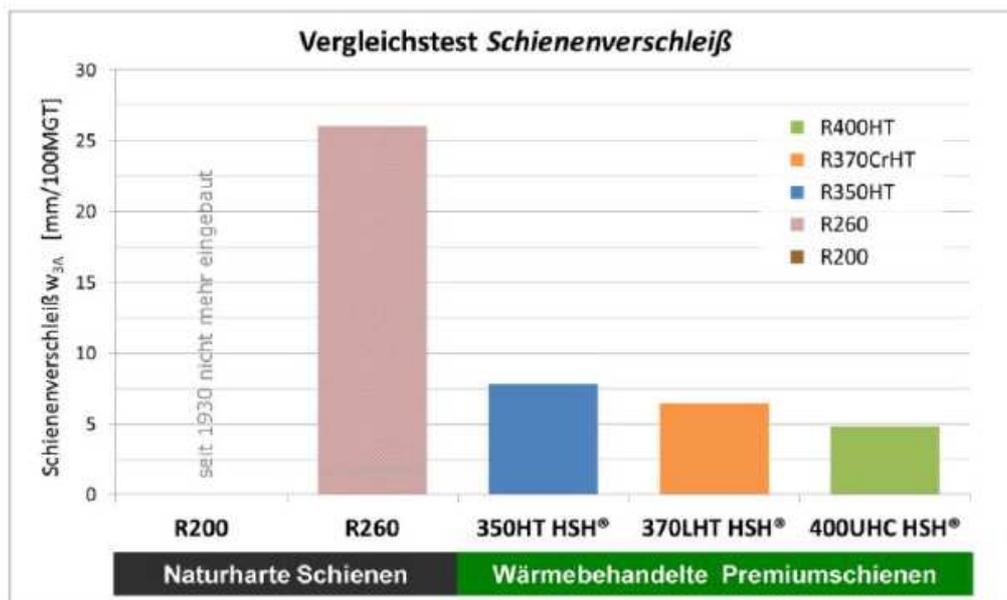


Abbildung 18: Verschleißfestigkeit verschiedener Stahlgüten in einem Bogen R=185m [12]

Der in Abbildung 19 dargestellte Versuch am Semmering (R=185m) zeigt dieselben Ergebnisse wie oben angeführt.

**Fazit:**

Das unterschiedliche Verschleißverhalten unterschiedlicher Schienengüten macht eine Unterscheidung der Bögen nach ihren Schienengüten zwingend erforderlich.

**2.2.3 Schienenlängen [6]:**

Es werden die Schienen folgender Hersteller verwendet und in folgenden Längen ausgeliefert:

Hersteller	Regellänge für Lv-Gleise [m]	Regellänge für Stoßlückengleise [m]	Passschienen und Sonderlängen	Herstellerzeichen
voestalpine	120 <sup>1)</sup>	30	nach Schienenband	DO
Corus	80 <sup>2)</sup>	30	nach Schienenband	CORUS HY

Tabelle 7: Schienenlängen und Hersteller [6]

Die Schienen der voestalpine Schienen GmbH werden bis zu 120m (außer VA 71B: 105m) ab Werk geliefert und können in allen oben genannten Schienengüten hergestellt werden.

Die Corus-Schienen aus dem Walzwerk Hayange bei Metz werden in Längen von 80m geliefert und müssen im OW Zeltweg ggf. abbrennstumpfgeschweißt werden und können dann mit einer Länge von 120m auf die Baustelle geliefert werden. Diese Schienen werden nur in der Schienengüte R260 geliefert.

## 2.2.4 Technische Liegedauer auf Grund der Dauerfestigkeit [15]

<b>Schienenform</b>	<b>Gesamtbruttotonnen [t]</b>
49 E1	ca. 280 Mio.
54 E2	ca. 380 Mio.
60 E1	> 1000 Mio.

Abbildung 19: Liegedauer auf Grund Dauerfestigkeit [15]

Die bereits von Jörg [16], für die Güten R200 (49E1) und R260 (54E2 und 60E1), ermittelten Liegedauern auf Grund der Dauerfestigkeit finden sich in Form obiger Abbildung in der ÖBB-Oberbauvorschrift B\_50\_Teil3 wieder. Dort jedoch ohne Angabe der Stahlgüte.

## 2.2.5 Schienen im Bogen [6]

Für Schienen der Streckenränge S und 1 im Gleisrang a sind für Radien größer 250m Schienen der Form 60E1 einzubauen und lückenlos zu verschweißen.

In engen Bogen können auch leichtere Schienen verwendet werden: 49E1 und 54E2, da dort nicht die Ermüdung maßgebend ist.

Auf zweigleisigen Strecken mit vorwiegendem Richtungsbetrieb und Neigung starker Rollkontaktermüdung gilt für die zu verwendenden Schienengüten:

- I  $R \leq 1200$  m: R350HT („HSH“)
- I  $R > 1200$  m: R 260 (900 N/mm<sup>2</sup>)

Auf 1-gleisigen Strecken:

- I  $R \leq 600$  m: R350HT („HSH“)
- I  $R > 600$  m: R 260 (900 N/mm<sup>2</sup>)

Wie bereits in vorhergegangenen Kapiteln gezeigt wurde, ist der Einsatz von Schwellen und Schienenbefestigungen in erster Linie abhängig von der Schienenform. Dies wird hier nicht noch einmal angeführt.

## 2.2.6 Stöße und Schweißstellen und deren Auswirkung auf den Verschleiß

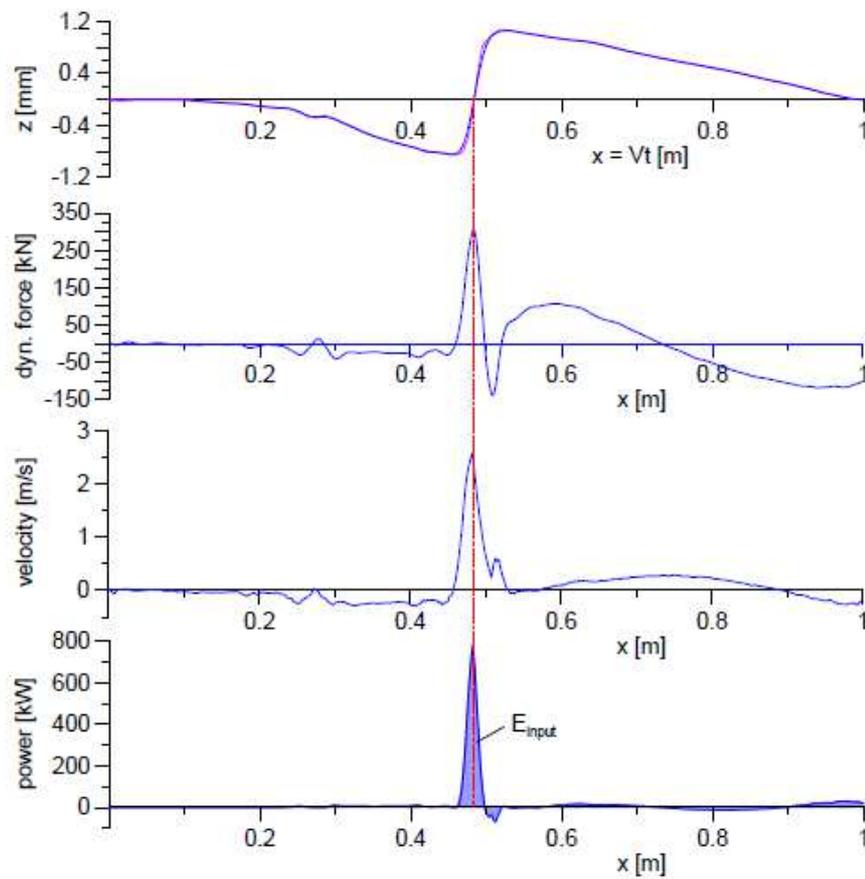


Fig. 4.62 Power input into the track for the welds depicted in Fig. 4.40 at 140 km/h

Abbildung 20: Ergebnis einer Überfahrt über einen Schweißstoß bei 140km/h [17]

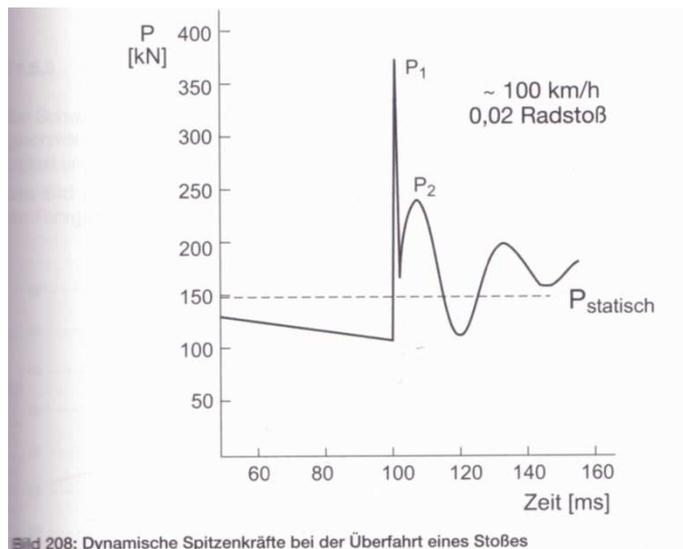


Abbildung 21: Dynamische Spitzenkräfte bei der Überfahrt eines Stoßes [1]

Beide Bilder lassen enorme dynamische Kräfte an Schienenstößen erkennen. Im zweiten Bild beträgt die dynamische Spitzenkraft sogar mehr als 350 kN.

In Abbildung 21 ist auch erkennbar, dass nicht nur beim Stoß selbst eine erhöhte dynamische Kraft einwirkt, sondern dass diese Initialkraft offenbar das System zum Schwingen anregt und somit auch das Gleis hinter dem Stoß beeinflusst wird.

Diese hohen, punktuellen Lasten können sich nur in einem erhöhten Verschleiß auswirken. Somit muss dies bedeuten, dass sowohl Schweiß- als auch Laschenstöße nicht für die Untersuchung herangezogen werden. Ferner sollte ein Gebiet von plus minus 2 Meter um den Schweißstoß nicht betrachtet werden, um einen seriösen Vergleich der Bögen zu ermöglichen.

## 2.3 Verschleißverhalten der Schiene

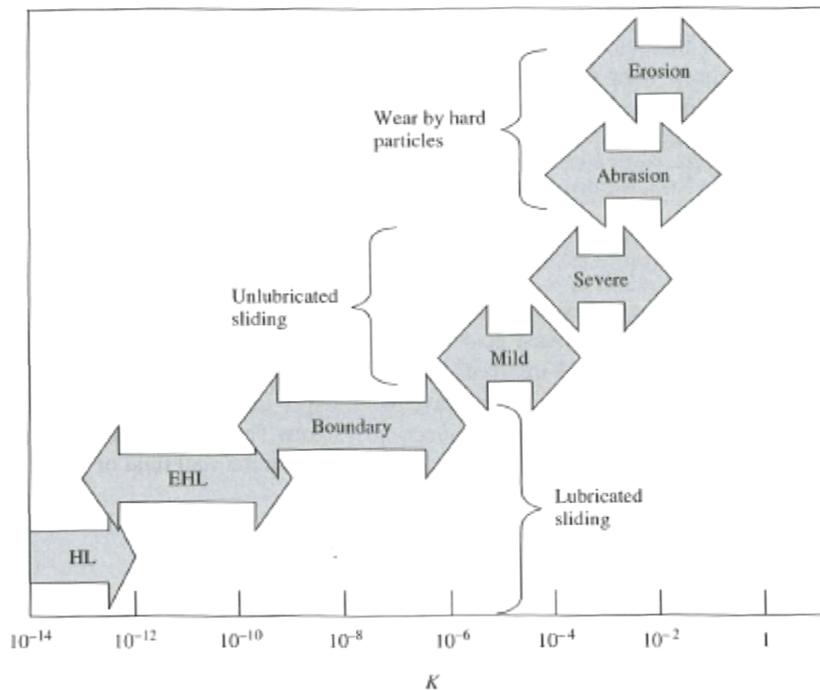


Abbildung 22: Arten des Verschleißes [18]

Wie in der Abbildung zu ersehen ist, ist der Verschleiß zwischen zwei Materialien am höchsten, wenn sich Partikel zwischen den beiden Reibpartnern befinden. Diese Verschleißformen werden als Abrasion und Erosion bezeichnet. Weniger schwer, aber dennoch für die meisten technischen Anwendungen zu groß, fällt der Verschleiß aus, wenn die beiden Reibpartner ungeschmiert aneinander reiben. Ersichtlich ist auch der Einfluss von Schmiermitteln auf den Verschleiß. [18]

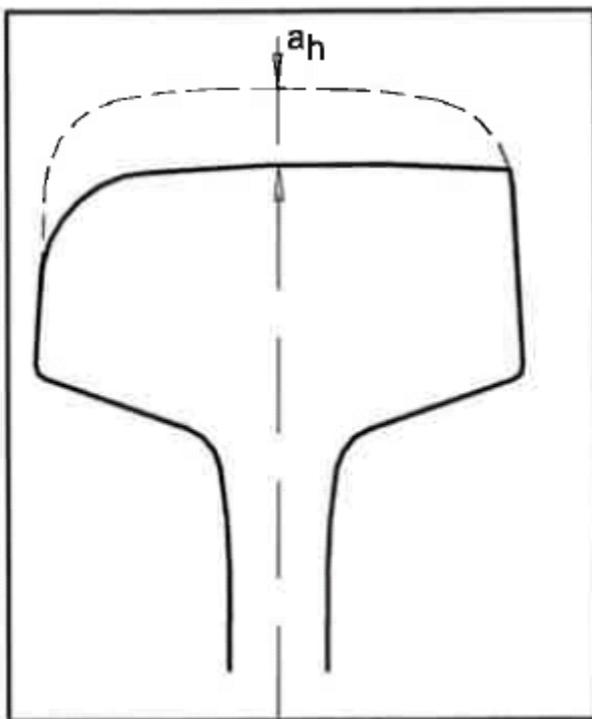
Generell wird zwischen adhäsivem und abrasivem Verschleiß unterschieden. Beim abrasiven Verschleiß erfolgt ein Abrieb bzw. eine Mikroszerspannung des Materials auf Grund von Fremdpartikeln. Beim adhäsiven Verschleiß werden die beiden Berührflächen fest aufeinander gepresst und haften auf Grund der Adhäsion aneinander. Wird diese Haftreibung überwunden, so werden auf Grund der Adhäsionskräfte Teile der Oberfläche eines Berührpartners vom anderen herausgerissen. Übrig bleiben Löcher und schuppenartige Materialteilchen. [19]

### 2.3.1 Verschleißarten

Die Vorschrift „B50-Teil 3 Oberbauberechnung“ der ÖBB-Infrastruktur AG befasst sich unter anderem mit dem Schienenverschleiß. Im Folgenden wird gezeigt, welche Verschleißarten dort definiert sind. An dieser Stelle wird angemerkt, dass dem Autor nur ein Entwurf der Norm vom August 2010 vorliegt.

#### Höhenabnützung

„Die Höhenabnützung  $a_h$  ist die senkrechte Verminderung der Höhe des Schienenkopfes. Sie wird in der Achse des Schienenquerschnittes nach Abb.1.1 gemessen.“ [15]

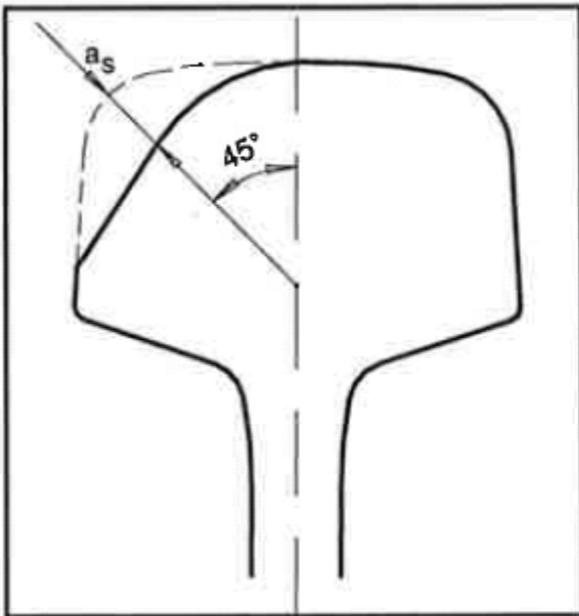


**Abb. 1.1: Höhenabnützung  $a_h$  einer Schiene**

Abbildung 23: Höhenabnützung einer Schiene [15]

## Seitenabnützung

„Die Seitenabnützung  $a_s$  ist die Veränderung der Schienenkopfflanke an der Fahrkantenseite. Sie wird unter einem Winkel von  $45^\circ$  zur Achse des Schienenquerschnittes in der Mitte der Schienenkopfausrundung der neuen Schiene nach Abb.1.2 gemessen.“ [15]



**Abb. 1.2: Seitenabnützung  $a_s$   
einer Schiene**

Abbildung 24: Seitenabnützung einer Schiene [15]

## Definition „vergleichener Verschleiß“

Bei mehr als geringer Abnützung treten immer Höhen- und Seitenverschleiß gleichzeitig auf. [15]

„Für die Beurteilung der Tragfähigkeit des Oberbaues ist die gemessene Seitenabnützung in eine fiktive Höhenabnützung nach Abb.4.1 umzuwandeln. Diese wird dann als vergleichene Höhenabnützung  $a_v$  bezeichnet.“ [15]

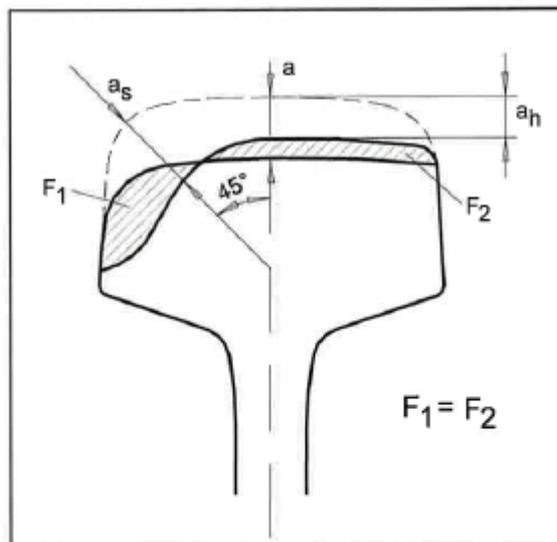


Abb. 4.1 Vergleichene Höhenabnützung

$$\text{Diese errechnet sich zu: } a_v = a_h + \frac{1,08 \cdot (a_s - 0,52 \cdot a_h + 5,8)^2}{b_K}$$

$a_v$  = Vergleichene Höhenabnützung (mm)

$a_h$  = Höhenabnützung (mm)

$a_s$  = Seitenabnützung (mm)

$b_K$  = Schienenkopfbreite (mm)

Abbildung 25: Vergleichene Höhenabnützung [15]

„Für die Beurteilung der Tragfähigkeit abgenützter Schienen (die nach Punkt 4 gemeint sind) ist ausschließlich die „vergleichene Höhenabnützung“ maßgebend.“ [15]

## Fazit

Da die Schienenprofile 49E1, 54E2 und 60E1 nicht unter Punkt 4 fallen der Oberbauvorschrift B50-Teil3 fallen, sondern in Punkt 3 behandelt werden, ist die vergleichene Höhenabnützung für diese Untersuchung nicht von Bedeutung. Sie wird hier nur der Vollständigkeit halber angeführt.

### 2.3.2 Grenzen des Verschleißes

Die Grenzen des Schienenverschleißes sind in der Oberbauvorschrift B50-Teil3 der ÖBB-Infrastruktur AG definiert. Es finden sich Tabellen für die maximal zulässigen Höhen- und Seitenabnützungen verschiedener Schienenprofile und Schienengüten in Abhängigkeit von Oberbau und Achslastklassen. Es soll hier nur eine Tabelle beispielhaft angeführt werden:

Schienenform	$a_{s, zul}$ (mm)
VA 71B, 60 E1, 54 E2, 49 E1	18
35 E1	12

Tabelle 8: Größte zulässige Seitenabnutzung [15]

*„Die größte zulässige Seitenabnutzung ist auch erreicht, wenn die Abnutzung bis zur Unterkante des Schienenkopfes gemäß Abb. 4.2 reicht.“* [15]

Für lückenlos verschweißte Gleise mit einer Liegedauer unter 10 Jahren kann in engen Radien ( $R < 300\text{m}$ ) diese zulässige Seitenabnutzung auch um 2mm vergrößert werden. [15]

### 2.3.3 Auswirkung des Radius auf den Seitenverschleiß der Schiene

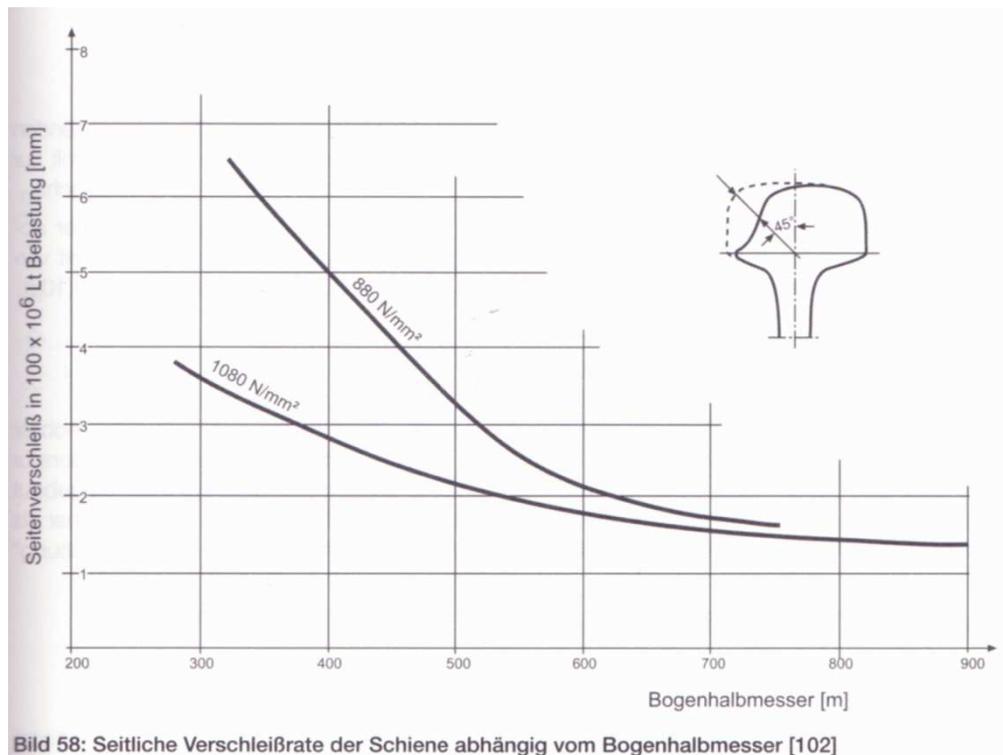


Abbildung 26: Seitliche Verschleißrate der Schiene abhängig vom Bogenhalbmesser [20]

Abbildung 26 lässt erkennen, wie sich der Bogenradius auf den Seitenverschleiß der Schiene auswirkt. Erkennbar ist, dass mit enger werdendem Radius die Verschleißrate deutlich zunimmt. Weiters ist erkennbar, dass sich eine bessere Stahlgüte im engen Bogen deutlich besser verhält als eine niedrigere Stahlgüte. [1] Dies soll aber im Kapitel Schiene genauer erörtert werden.

Deutlich wird, wie wichtig der Einfluss des Radius auf den Verschleiß ist. Somit erweist es sich als unumgänglich für die Untersuchung nur Bögen zu vergleichen, welche den gleichen Radius haben.

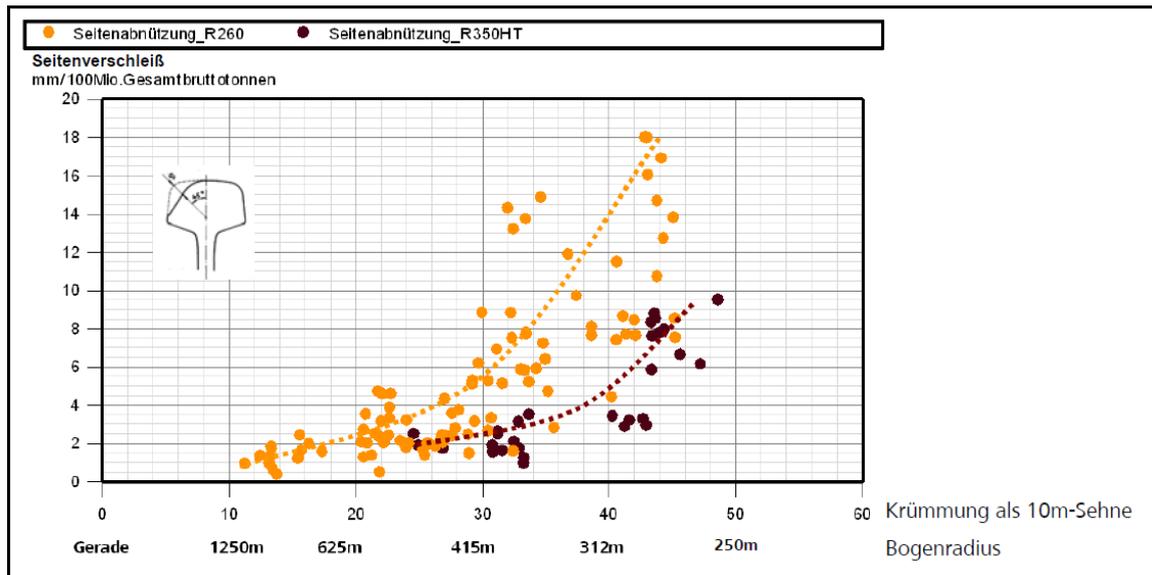


Abbildung 27: Seitenabnutzung in Abhängigkeit des Radius für die Schienengüten [21]

Diese Abbildung entnommen aus „Info Head Checks“ der ÖBB Infrastruktur zeigt deutlich die Auswirkungen von Radius und Schienengüte auf die Seitenabnutzung. Je kleiner der Radius wird, umso größer ist die Verschleißrate. In dieser „Technischen Info“ wird auch gezeigt, dass bei einem Radius größer 600 Meter der Seitenverschleiß so gering wird, dass er durchaus mit dem geraden Gleis verglichen werden kann. [21]

### 2.3.4 Auswirkung der Spurweite auf den Verschleiß

Um die Auswirkung der Spurweite auf den Verschleiß deutlich zu machen, muss zunächst der Begriff der „äquivalenten Konizität“ beschrieben werden.

*„Sie gibt die genäherte Kegelneigung für ein nicht kegeliges Radprofil an (bei einer seitlichen Auslenkung des Radsatzes von der Mittenposition um 3mm), bei der ein kegeliges Radprofil mit dieser Neigung ein sehr ähnliches kinematisches Laufverhalten aufweisen würde.“ [1]*

Während bei kegeligen Profilen die Differenz der Laufradien (Außenrad und Innenrad) durch folgende lineare Beziehung dargestellt werden kann:

$$I \quad (r_1 - r_2) = 2 \cdot \tan \gamma \cdot y,$$

so wird sie für nicht kegelige Profile folgendermaßen beschrieben:

$$I \quad (r_1 - r_2) = f(y) \quad [1]$$

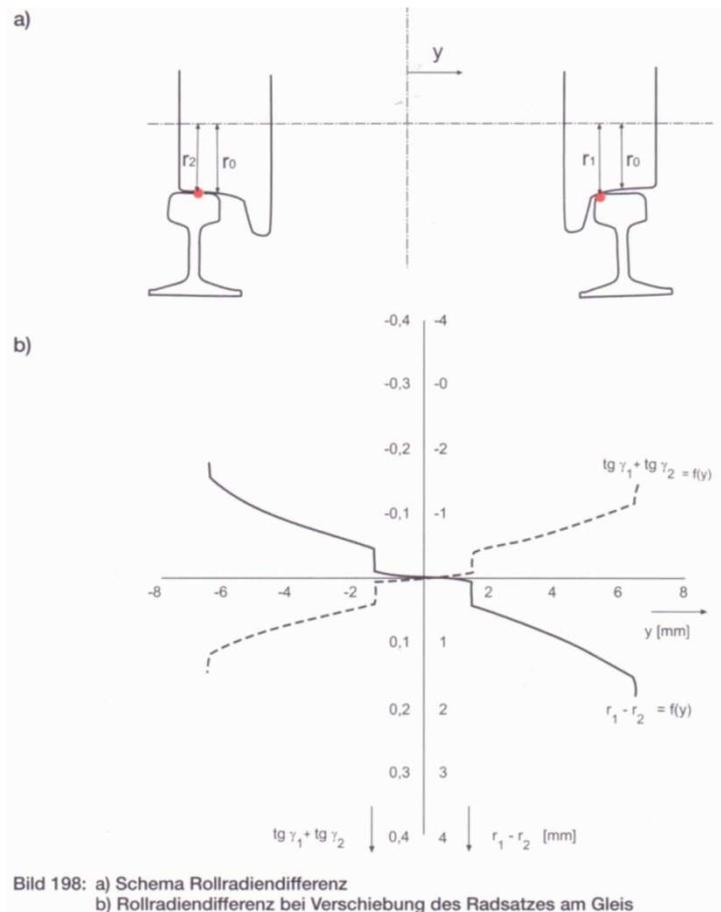


Abbildung 28: Rollradiendifferenz [1]

Die äquivalente Konizität beschreibt also, wie steil ein Radprofil nach außen hin konisch zusammenläuft.

Kalousek [22] zeigt, dass sich Räder mit einer hohen Konizität mit weniger Verschleiß durch enge Bögen bewegen, weil sie leichter eine größere Rollradiendifferenz aufbauen können und so das Außenrad das Innenrad überholen kann. In der Geraden wirkt sich eine hohe Konizität aber durch starke Laufunruhe aus.

Es wird des Weiteren gezeigt, dass Radsätze mit dem halben Raddurchmesser bei gegebenem  $\Delta r$  doppelt so enge Kurven befahren können, ohne mit dem Spurkranz anzulaufen.

Abbildung 29 stellt den Zusammenhang zwischen Spurweite und äquivalenter Konizität dar. Die äquivalente Konizität nimmt mit steigender Spurweite ab. Abbildung 30 zeigt die Abhängigkeit der äquivalenten Konizität von der Spurweite und der Einbauneigung. Man erkennt deutlich, dass bei einer Einbauneigung von 1:40 die größte Streuung vorliegt, wobei die Konizität mit steigender Spurweite abnimmt. Eine enge Spur hat also eine hohe Konizität zur Folge. [1]

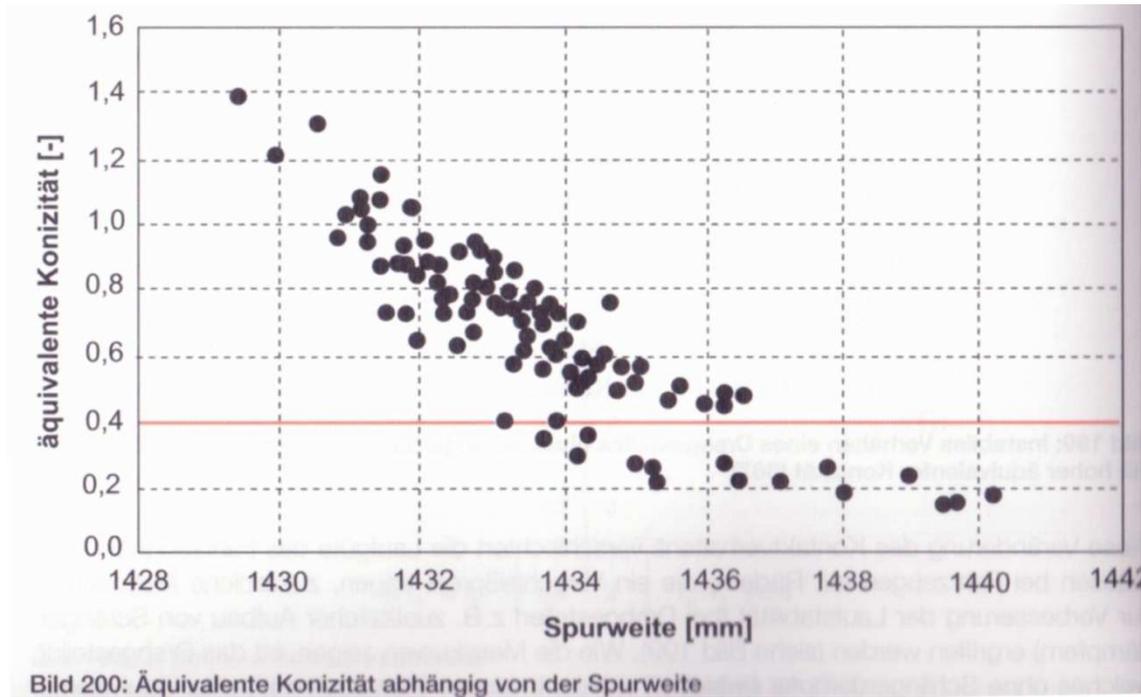


Abbildung 29: Äquivalente Konizität abhängig von der Spurweite [1]

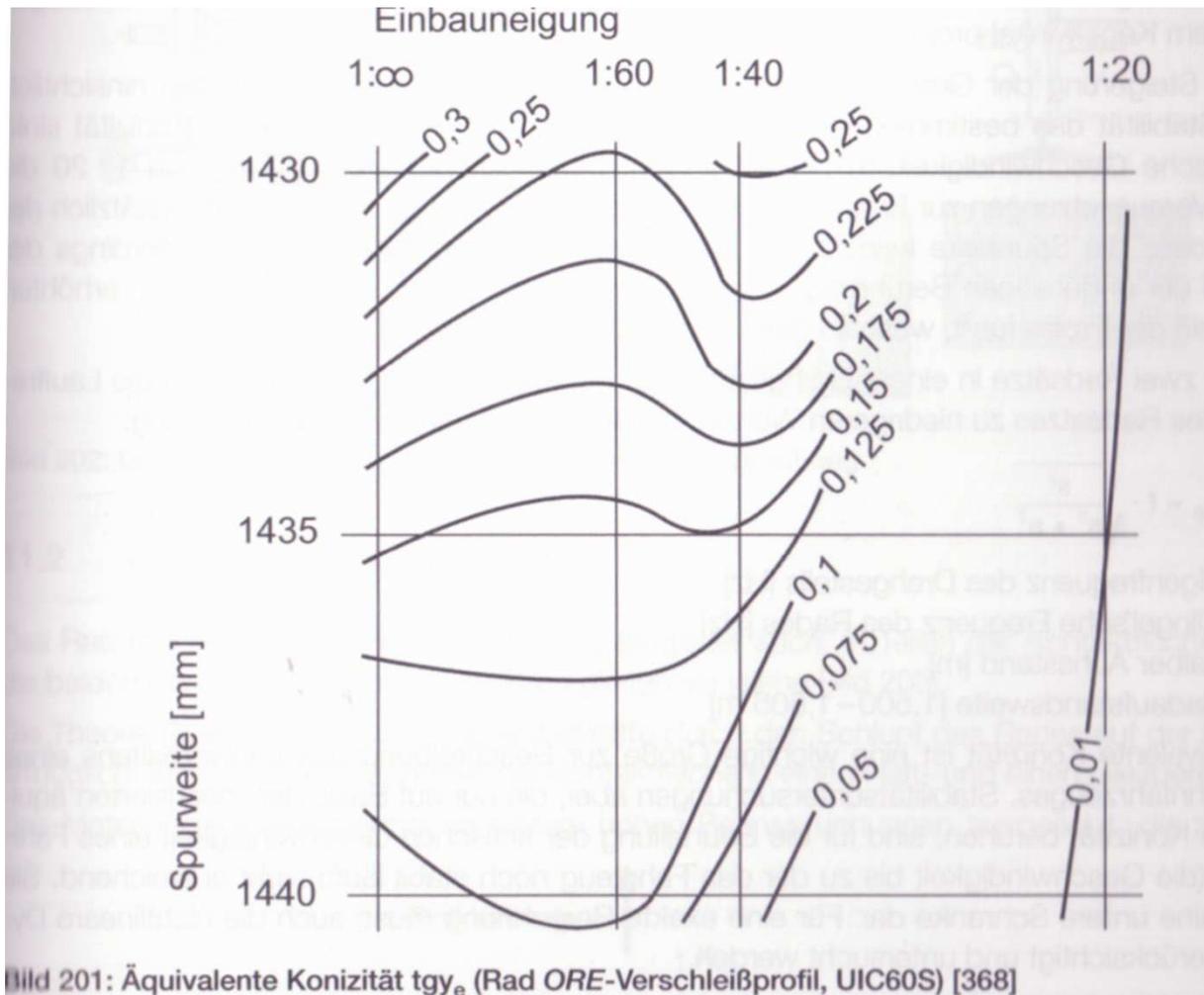


Abbildung 30: Äquivalente Konizität [1]

### Zusammenfassung

Für die Untersuchung muss also jedenfalls sichergestellt sein, dass nur Bögen mit gleicher Spurweite verglichen werden. Der Einfluss der Radprofilform auf den Verschleiß darf bei der Untersuchung nicht außer Acht gelassen werden. Als problematisch wird sich der unterschiedliche Verschleißzustand verschiedener Lokomotiven und Wagen darstellen.

## 2.4 Schmieranlagen

### 2.4.1 Stationäre Schienenschmierung

Bei stationären Schienenschmieranlagen muss zwischen Schienenflankenschmierung am Außenstrang und Schienenkopfkonditionierung am Innenstrang unterschieden werden. In dieser Arbeit soll nur die Auswirkung der Schienenflankenschmierung untersucht werden. Nachfolgende Graphik zeigt die geschmierten Kontaktflächen für Schienenflankenschmierung und Schienenkopfkonditionierung.

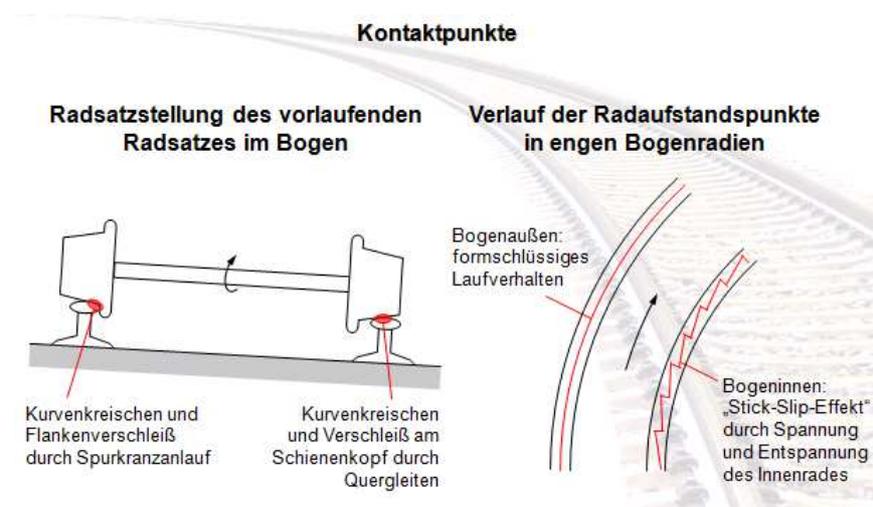


Abbildung 31: Flankenschmierung und Schienenkopfkonditionierung [23]

Generell soll Schienenschmierung folgende drei Effekte abdecken [23]:

- Kurvenkreischen minimieren
- Verschleißreduktion
- Entgleisungssicherheit: Verhindern von Aufklettern des Spurkranzes

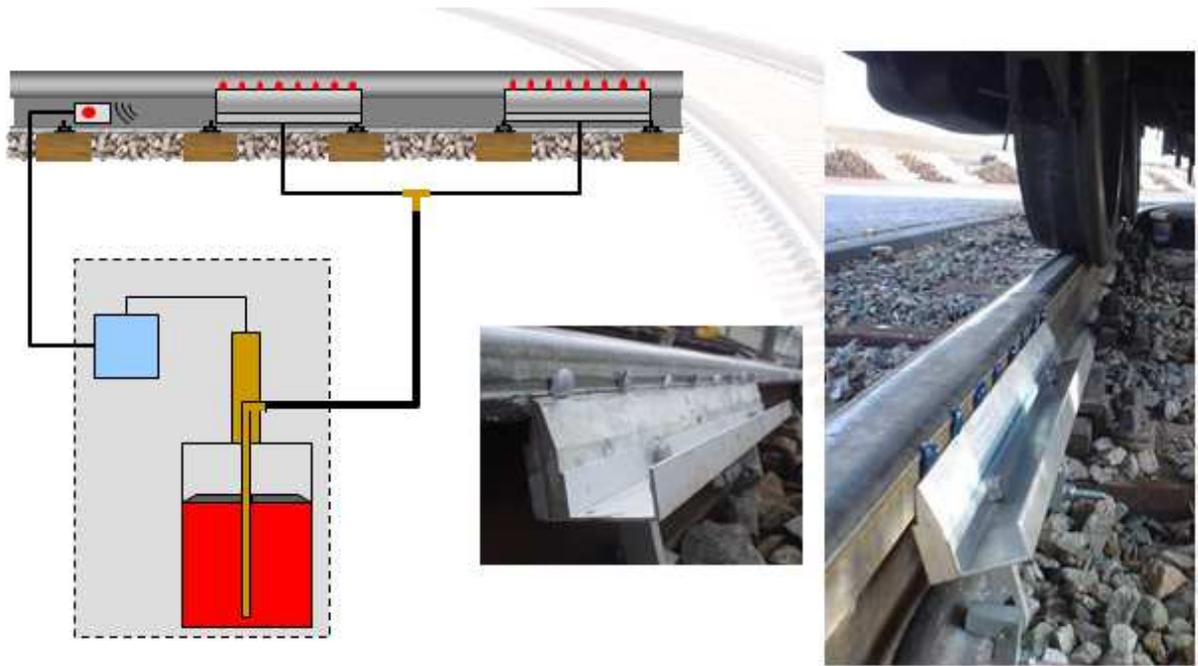


Abbildung 32: Funktionsprinzip einer Schmieranlage der Fa. Hypower [23]

Obige Abbildung stellt beispielhaft das Funktionsprinzip einer Schienenflankenschmieranlage dar. Ein Sensor meldet die Zugüberfahrt an das eingebaute Steuermodul. Dieses veranlasst eine Pumpe, das Schmiermittel auf die Schiene zu pumpen. Bei Überfahrt verteilt das Wagenrad das Schmiermittel entlang der Fahrkante.



- Anlage
  - Standardfass
  - Pumpe
  - Steuerung
  - Akkus oder Trafo



- Schmierleisten
  - VL-Leiste mit Fräsungen
  - Schmiermittelzuleitung



- Sensor
  - Sensorgehäuse mit Zuleitung

Abbildung 33: Hauptteile einer Schmieranlage [23]

Abbildung 33 zeigt die Hauptteile einer Schmieranlage. Die Stromversorgung ist über Netzstrom (230V, 50Hz), Solarpaneel oder über Standard-Akkus möglich. [23]

### 2.4.2 Spurkranzschmierung

Die fahrzeugseitige Spurkranzschmierung erfüllt im Prinzip dieselben Zwecke wie die stationäre Schienenschmierung. Diese sind Verschleiß- und Geräuschminderung, Energieeinsparung und Erhöhung der Entgleisungssicherheit. Dabei kann die Steuerung zeit- oder wegabhängig erfolgen. [24]

### 2.4.3 Das Fast Experiment [25]

Das Fast Experiment wurde auf einem 4,8 Meilen langen Testring durchgeführt. Der darauf verkehrende Zug fährt typischerweise 41mp/h und legt so 120 Runden pro Tag zurück. Das entspricht etwa einer Belastung von 1MGT pro Tag. Der Zug besteht aus 4 Triebfahrzeugen mit jeweils 2000 PS Zugkraft und 99 Wagen, von denen 98 Wagen 100 Tonnen wiegen. Der Testring hat 5 Bögen, wobei ein Bogen den anderen entgegengesetzt orientiert ist. Der Start des Experiments war im Jahr 1976 und unter anderem wurde auch die Verschleißreduktion auf Grund von Schienenschmierung untersucht.

Im Bericht wird auch der so genannte „position-in-curve-effect“ beschrieben, der das unterschiedliche Verhalten einzelner Bereiche des Bogens beschreibt.

Betreffend Schmieranlagen zeigte sich im Experiment eine Verschleißreduktion um den Faktor 8 bis 10 für Standardgüten und eine Verschleißreduktion um den Faktor 4 bis 5 für Premiumgüten. Im Gegensatz zu dieser Arbeit wurde in diesem Bereich aber der Head-Loss [ $\text{mm}^2/\text{MGT}$ ] und nicht der  $45^\circ$ -Seitenverschleiß (W3a) als Kenngröße herangezogen.

## 2.5 Das Netz der ÖBB

### 2.5.1 Strecken

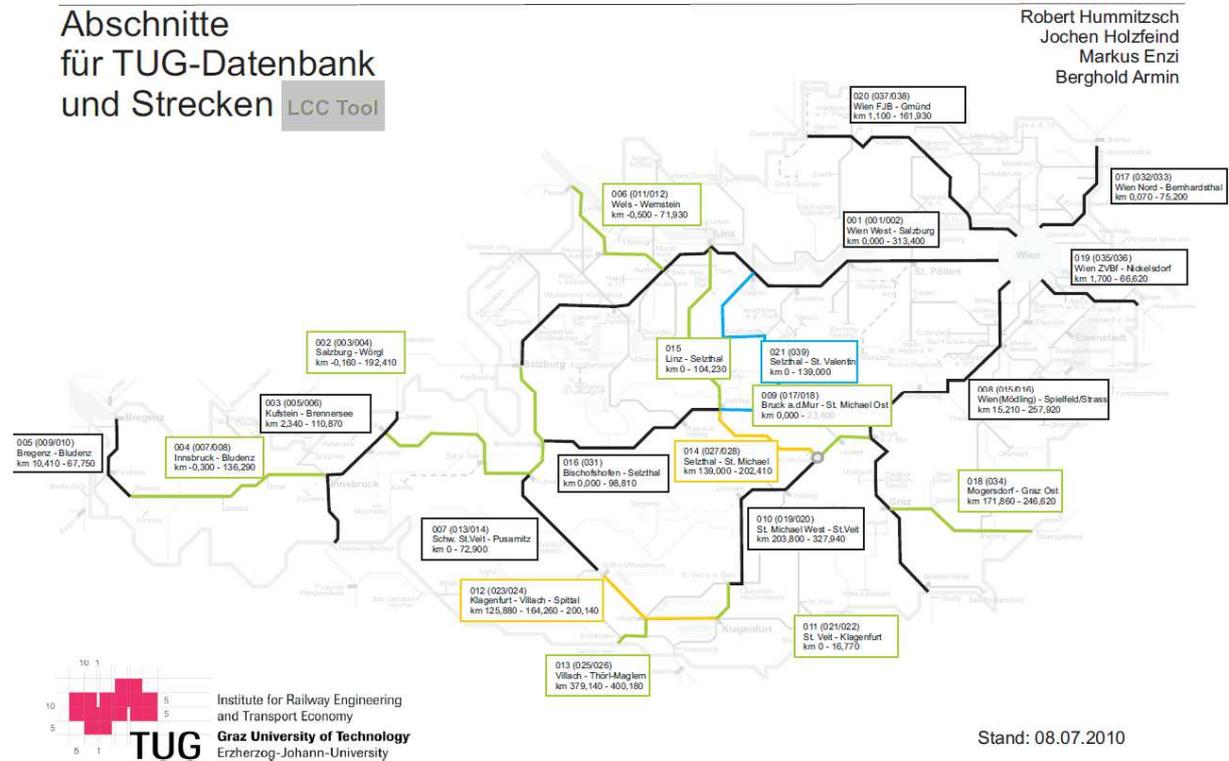


Abbildung 34: [26]

Abbildung 34 zeigt jene Strecken, die im Jahr 2010 bereits in die TUG-Datenbank des Institutes für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft eingespielt wurden. Aus dieser Datenbank können diverse Informationen über das österreichische Eisenbahnnetz abgerufen werden.

## 2.5.2 Belastungen

Aus der in Kapitel 2.5.1 beschriebenen Datenbank können auch Belastungsdaten für die oben gezeigten Strecken abgerufen werden.

Der folgende Auszug ist Teil einer Abfrage und zeigt die Gesamtbelastung (Gleis 1 und Gleis2) für TUG-Abschnitt008, der Strecke über den Semmering, in Gesamtbruttotonnen/Tag:

	A	B	C	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	Nr	Bf_Name_von	Bf_Name_bis	km_bis	Länge	Belastung_2010	Belastung_2007	Belastung_2006	Belastung_2002	Belastung_2001	Belastung_2000	Bt
20	19	Wiener Neustadt Hbf	Wiener Neustadt Ausfahrhf	49800.000	1680.000	115519	87871		90652	94201	101565	
21	20	Wiener Neustadt Ausfahrhf	Wiener Neustadt Einfahrhf	49900.000	100.000	115519	87871		90652	94201	101565	
22	21	Wiener Neustadt Einfahrhf	St. Egidien	56950.000	7050.000	115519	87871		90652	94201	101565	
23	22	St. Egidien	Neunkirchen N.O.	82570.000	5620.000	115519	87871		90652	94201	101565	
24	23	Neunkirchen N.O.	Ternitz	67050.000	4480.000	115519	87871		90652	94201	101565	
25	24	Ternitz	Pottschach Hst	69890.000	2840.000	115519	87871		90652	94201	101565	
26	25	Pottschach Hst	Gloggnitz	74900.000	5010.000	115519	87871		90652	94201	101565	
27	26	Gloggnitz	Schläglmühl Hst	77800.000	2900.000	120280	87871		112794	112857	122994	
28	27	Schläglmühl Hst	Payerbach-Reichenau	81960.000	4160.000	120280	87871		112794	112857	122994	
29	28	Payerbach-Reichenau	Küf Hst	84900.000	2840.000	104940	85845		100031	99836	108720	
30	29	Küf Hst	Eichberg	85220.000	3450.000	104940	85845		100031	99836	108720	
31	30	Eichberg	Klamm-Schottwien	92280.000	4060.000	104940	85845		100031	99836	108720	
32	31	Klamm-Schottwien	Breitenstein	97570.000	5290.000	104940	85845		100031	99836	108720	
33	32	Breitenstein	Wolfsbergkogel Hst	102100.000	4530.000	104940	85845		100031	99836	108720	
34	33	Wolfsbergkogel Hst	Semmering	103410.000	1310.000	104940	85845		100031	99836	108720	
35	34	Semmering	Steinhaus Hst	107690.000	4280.000	105138	85845		100031	99836	108720	
36	35	Steinhaus Hst	Spital am Semmering	110490.000	2800.000	105138	85845		100031	99836	108720	
37	36	Spital am Semmering	Murzzuschlag	116730.000	6240.000	105138	85845		100031	99836	108720	
38	37	Murzzuschlag	Hönigsberg Hst	120610.000	3880.000	110686	85845		94963	100742	109845	

Abbildung 35: [27]

Wie aus der Abbildung ersichtlich wird, handelt es sich hierbei um Jahresdurchschnittswerte, wobei keine Daten für die Jahre 2003, 2004, 2005, 2006 und 2008 verfügbar sind.

## 2.5.3 Verkehrszusammensetzung

Über die genaue Aufteilung zwischen Güter- und Personenzügen konnten keine Informationen in Erfahrung gebracht werden. Aus den vorangegangenen Kapiteln ist jedoch klar ersichtlich, dass unterschiedliche Zugzusammensetzung einige Einflussgrößen mit sich bringen, die deutliche Auswirkungen auf den Verschleiß haben müssen. Diese Einflussgrößen sind unter anderem unterschiedliche Radprofile, unterschiedliche Achslasten sowie unterschiedliche Drehgestelle und unterschiedliche Fahrgeschwindigkeiten. Weiters geht aus dem Expertengespräch mit Rolf Renggli hervor, dass im Gegensatz zu Personenzügen bei Güterzügen nur die Triebfahrzeuge geschmiert werden und die Wagen somit einen höheren Verschleiß erzeugen.

## 2.5.4 Schmieranlagen und Referenzbögen

Eine Liste von Schmieranlagen wurde dem Autor vom Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft vor allem durch die Initiative von Armin Berghold zur Verfügung gestellt. Diese beinhaltet Daten zu Schmieranlagen in folgenden Abschnitten der TUG-Datenbank:

I TUG 008 (Südbahn- mitSemmering):	48 Schmieranlagen
I TUG 002:	12 Schmieranlagen
I TUG 004:	6 Schmieranlagen
I TUG 007:	4 Schmieranlagen

## 2.6 Statistische Grundlagen

### 2.6.1 Messdaten [28]

Daten können hinsichtlich ihrer Skalierung in folgende Kategorien eingeteilt werden:

Nominalskala:

- Es handelt sich um Daten qualitativer Art, die klassifiziert, also in Klassen eingeteilt werden können. Eine Wertung ist nicht möglich.
- Beispiel: Postleitzahl
- Kenngröße: Häufigkeit

Ordinalskala:

- Diese Daten sind ebenfalls qualitativer Art, können jedoch ihrer Größe nach gereiht werden. Diese Daten sind diskret.
- Beispiel: Militärischer Rang
- Kenngröße: Median, Häufigkeit, Quantil-Werte

Intervallskala:

- Diese Daten sind quantitativer Natur und stetig. Eine lineare Transformation ist möglich.
- Beispiele: Temperatur in °C, Spurweite
- Kenngröße: arithmetisches Mittel, Streuung, Abstände

Verhältnisskala:

- Mit diesen Daten wird eine absolute Reihung möglich
- Es können Rechenoperationen wie Summenbildung und Produkt durchgeführt werden.
- Beispiel: Temperatur in °K (abs. Nullpunkt), Seitenverschleiß

## 2.6.2 Kenngrößen von Daten und Darstellungsarten [29]

### Mittelungsmaße:

#### **Arithmetischer Mittelwert:**

„Der arithmetische Mittelwert kann nur an metrischen Daten angewendet werden. Außerdem ist dieser sehr sensibel zu extremen Werten und Ausreißern. Ein einziger Ausreißer kann den Mittelwert erheblich verändern.“ [29]

Der Mittelwert ist wie folgt definiert:

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum a_i = \frac{1}{n} (a_1 + a_2 + \dots + a_n)$$

### Median (Zentralwert):

„Der Median ist der Mittelpunkt der aufgenommenen Stichprobenwerte, wenn sie aufsteigend sortiert sind,  $a_1 < a_2 < \dots < a_n$ . Sobald die Stichprobenwerte aufsteigend sortiert sind, kann der Median wie folgt berechnet werden: [29]

$$Med = \begin{cases} a_{\frac{n+1}{2}} & \text{wenn } n \text{ ungerade} \\ \left( \frac{a_{\frac{n}{2}} + a_{\frac{n}{2}+1}}{2} \right) \div 2 & \text{wenn } n \text{ gerade} \end{cases}$$

### Quantile:

Quantile sind Merkmalswerte einer empirischen Verteilung, die von der unteren oder oberen Grenze der Merkmale aus, einen bestimmten Anteil eines Datenkollektivs umfassen. Beispiel (25%Quantile)

### Variationsmaße

„In der Statistik wird die gesamte durchschnittliche Quadratabweichung jedes Punktes  $a_i$  von  $n$  Stichproben zum Mittelpunkt  $\bar{a}$ , als Varianz  $s^2$  genannt:

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2$$

Da die Varianz eine Quadrateinheit der Merkmalseinheit besetzt, wird in der Praxis statt der Varianz die Standardabweichung  $s$  verwendet. Sie ist die Wurzel der Varianz

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2}$$

und hat die gleiche Einheit wie das Merkmal." [29]

### Boxplot

Der Boxplot ermöglicht es, den Variationsbereich eines stetigen Merkmales in Verbindung mit seinen Quantile anschaulich darzustellen. Er führt fünf Merkmalswerte zusammen:  $X_{\min}$ ,  $q_{0,25}$ , Median,  $q_{0,75}$ ,  $X_{\max}$ .



Abbildung 36: Boxplott [29]

### Schätz- und Testverfahren für Modellbildung [29]

#### Das Konzept der statistischen Hypothesenprüfungen:

Die Statistik befasst sich generell mit Eintretenswahrscheinlichkeiten und somit gilt für das Eintreten eines Ereignisses:

$$0 < p(E) < 1$$

In der Statistik hat es sich als praktisch erwiesen, Hypothesen anzunehmen, welche durch Versuche verifiziert oder falsifiziert werden.

Im Allgemeinen wird eine Nullhypothese aufgestellt, die ein Nichteintreten eines Ereignisses voraussagt. Diese ist zu verwerfen, falls durch ein Experiment mit hoher Aussagekraft das Gegenteil bewiesen wird. Es wird also gezeigt, dass das Eintreten des Gegenteils der Nullhypothese nicht zufällig also signifikant ist. In diesem Fall tritt eine Hypothese  $H_A$  oder  $H_1$  ein.

Ein Beispiel wäre:

$H_0$ : Herr Maier kann nicht Rot von Grün unterscheiden.

$H_1$ : Herr Maier kann Rot von Grün unterscheiden.

Kann Herr Maier in einem Experiment vier rote Proben und vier grüne Proben unterscheiden (70 mögliche Kombinationen), so ist bewiesen, dass die Nullhypothese zu verwerfen ist.

Das bedeutet, Herr Maier beweist in einem einzigen Experiment mit sehr geringer Erfolgswahrscheinlichkeit, dass seine Fähigkeit Rot von Grün zu unterscheiden nicht zufällig ist.

### Das „p-value“ Konzept

In der Statistik ist es üblich Signifikanzniveaus anzugeben. Im Allgemeinen soll Folgendes gelten:

$$\alpha = 0,1 \rightarrow S_i = 90\% \text{ "signifikant"}$$

$$\alpha = 0,05 \rightarrow S_i = 95\% \text{ "sehr signifikant"}$$

$$\alpha = 0,01 \rightarrow S_i = 99\% \text{ "hochsignifikant"}$$

Hier stellt  $\alpha$  die Irrtumswahrscheinlichkeit dar, also jene Wahrscheinlichkeit für das Eintreten der  $H_1$ -Hypothese.

### Einfache lineare Regression [29]

Das Modell der einfachen linearen Regression basiert auf der „Methode der kleinsten Fehlerquadrate nach Gauß“ und ermöglicht die Überprüfung zweier Zufallsvariablen auf ihren linearen Zusammenhang.

Dies bedeutet, dass in eine Menge aus Werten eine Gerade so eingefügt wird, dass die Summe der Differenzen  $\delta_i$  zwischen Schätzgerade und Messpunkten in y-Richtung minimal wird.

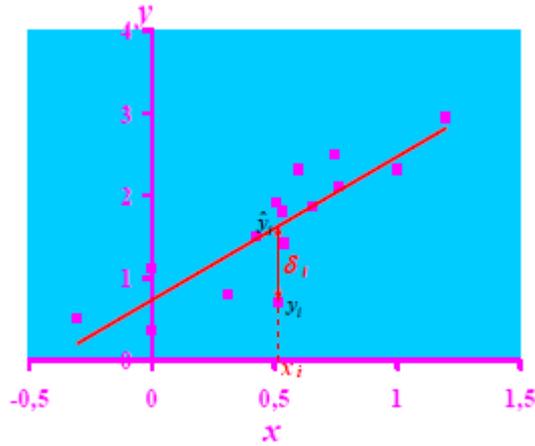


Abbildung 37: lineare Regression [29]

Rechnerisch bedeutet das:

$$Q = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a - b \cdot x_i)^2 \rightarrow \min$$

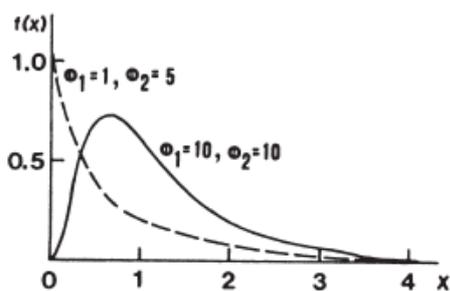
Die Frage nach der Signifikanz der Abweichung von der Realität, also der Güte der Anpassung, kann mittels F-Test ermittelt werden.

Fischer-Verteilung (FV) [29]

„Wenn die Varianz  $s_1^2$  und  $s_2^2$  unabhängiger zufälliger Stichproben des Umfanges  $n_1$  und  $n_2$  aus zwei normalverteilten Grundgesamtheiten mit gleicher Varianz  $\sigma^2$  sind, dann folgt die zufällige Variable

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2}$$

einer Fischer-Verteilung mit dem 1. Freiheitsgrad  $\phi_1 = n_1 - 1$  und 2. Freiheitsgrad  $\phi_2 = n_2 - 1$ . Die FV ist ebenfalls eine stetige, unsymmetrische Verteilung mit einem Variationsbereich von Null bis Unendlich.“ [29]

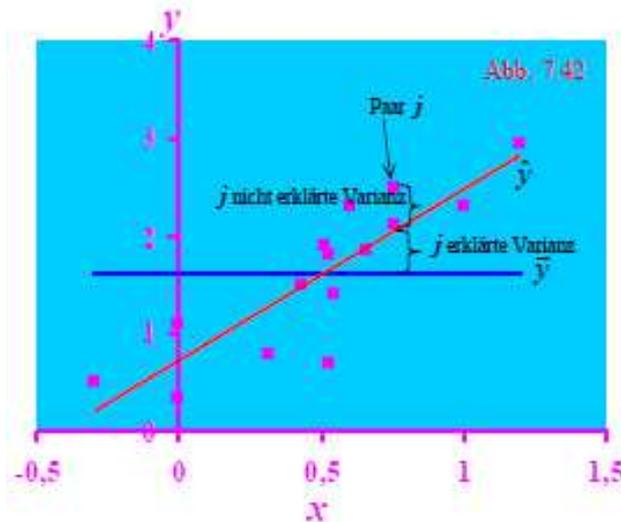


Die FV ist für  $\phi_1 \leq 2$  L-förmig, für  $\phi_1 > 2$  eingipfelig bis glockenförmig.

Abbildung 38: Wahrscheinlichkeitsdichte der Fischerfunktion [29]

Die Fischerfunktion ist sehr schwer zu integrieren. Deshalb gibt es mehrere Tabellen für unterschiedliche Signifikanzniveaus, mit denen statistische Tests durchgeführt werden können. Diese Tests sind abhängig von der Anzahl der Freiheitsgrade.

### F-Test [29]



Falls kein Zusammenhang vorhanden ist, läuft die Tendenzlinie horizontal:  $H_0: b = 0$  vgl. die blaue Linie in Abb. 7.42. Im Gegenteil  $H_A \neq 0$ , vgl. die rote Linie in Abb. 7.42

Das Verhältnis

$$F = \frac{\sum \text{j erklärte Varianz}}{\sum \text{j nicht erklärte Varianz}} = \frac{\sum_{j=1}^n (j_j - \bar{y})^2 / k}{\sum_{j=1}^n (y_j - \bar{y})^2 / (n - k - 1)}$$

folgt einer F-Verteilung mit dem 1. Freiheitsgrad  $k = 1$  und dem 2. Freiheitsgrad  $n - k - 1 = n - 2$ .

Für  $F > F_{\alpha}(1, n-2)$ , vgl. Abb. 7.30, ist  $H_0$  abzulehnen und die lineare Anpassung ist signifikant.

Abbildung 39: Prinzip des F-Test mit Erklärung

Die blaue Linie in obiger Abbildung stellt sich ein, falls kein Zusammenhang zwischen den zu untersuchenden Merkmalen besteht. Die rote Linie stellt den durch die Methode der kleinsten Fehlerquadrate geschätzten Zusammenhang dar. Beim F-Test wird nun die erklärte mit der nicht erklärten Varianz in ein Verhältnis gesetzt, dem sogenannten F-Wert. Dieser Wert, benannt nach der Fischer-Verteilung, der er folgt, kann nun mit einem Wert aus den Integraltabellen verglichen werden. Ist er größer als der, in Abhängigkeit der Freiheitsgrade, zugehörige Tabellenwert, dann kann  $H_0$  verworfen werden und der lineare Zusammenhang ist signifikant. Das Signifikanzniveau hängt von der verwendeten Tabelle ab.

## 3 Expertengespräche

### 3.1 Einleitung

Dieses Kapitel stellt Interviews mit Experten aus der Praxis dar, die der Autor im Lauf der Arbeit geführt hat. Expertengespräche ermöglichen einerseits eine zielgerichtete, kompakte Beantwortung von Fragen, die unter Umständen noch nicht in der Literatur behandelt wurden und andererseits können Erfahrungen und Referenzwerte weitergegeben werden, die beispielsweise für die Modellentwicklung oder für eine Überprüfung auf Plausibilität der Ergebnisse notwendig sein können.

### 3.2 Expertengespräch zum Thema Verschleißverhalten von Schienen

#### Gesprächspartner:

Dipl.-Ing. Ingolf Nerlich

SBB Infrastruktur,

Geschäftsbereich: Anlagen und Technologie,

Abteilung: Fahrbahn und Interaktion

*Wie beeinflussen die Faktoren Traktion/Schlupf, Längsneigung und Spurweite den Seitenverschleiß (45°) der Schienen?*

„Die Längsneigung spielt im Zusammenhang des Abbrandes des Schmierfilms eine entscheidende Rolle. SBB beobachtet eine große Verschleißzunahme innerhalb der Kreiskehrbögen, wobei subjektiv die typische Zunahme des Verschleißmaßes gegen Bogenende an manchen Orten besonders abtrassiv erscheint. Es wird vermutet, dass die Sägezahnbremsungen kurz zuvor oder in den Bögen selbst immer wiederkehrend erfolgten und damit den SKS-Schmierfilmabbrand noch verstärken. Bezgl. dem Einfluss von Traktion auf den Verschleiß liegen derzeit keine Erkenntnisse vor.“

*Wie unterscheiden sich Güterzüge und Personenzüge in ihrer Verschleißverursachung?*

„In erster Linie im Maße des Anlaufwinkels und damit in gleichem Verhältnis wie die Achsstände  $a$  zueinander. P-Fahrzeuge (Personenverkehrsfahrzeuge, Anm. des Autors) 2.5m - Güterwagenstandard 1.8m .. der Bogenunterschied "gleichen Verschleißes" lässt sich einfach über die geometrische Beziehung  $0.5 \cdot a/R$  berechnen.“

Wie wirkt sich eine unterschiedliche Aufeinanderfolge von Bögen und Geraden auf den Verschleiß aus?

„Ja, deutlich - die Vorgeschichte der SKS-Schmierfilmbeanspruchung ist neben der Achsenanzahl (Konsumenten des Zugtypes) entscheidend. Der Bogenverschleiß nimmt bei Einrichtungsbetrieb immer zum Bogenende hin zu. Fastenrath-„die Eisenbahnschiene“ illustrierte das bereits am Gotthard. Dieser Effekt folgt umso mehr je weniger Zeit zuvor war, in der die SKS des Bogenaußenrades im Wechselbogen wieder genügend Schmierfilm aufbauen konnte. Die Kreiskehrbögen sind zu lang, der Schmierfilmabriss stets die Folge. Der Vorgang (auch jener von a) lässt sich entschärfen wenn Lastsymmetrie der Fahrtrichtungen gefahren wird – der Bogenverschleiß sieht dann trapezförmig aus. (Vorausgesetzt spurführungsmechanisch erreicht das bogenaußenfahrende Rad der Gegenrichtung auch die Schienenflanke)“

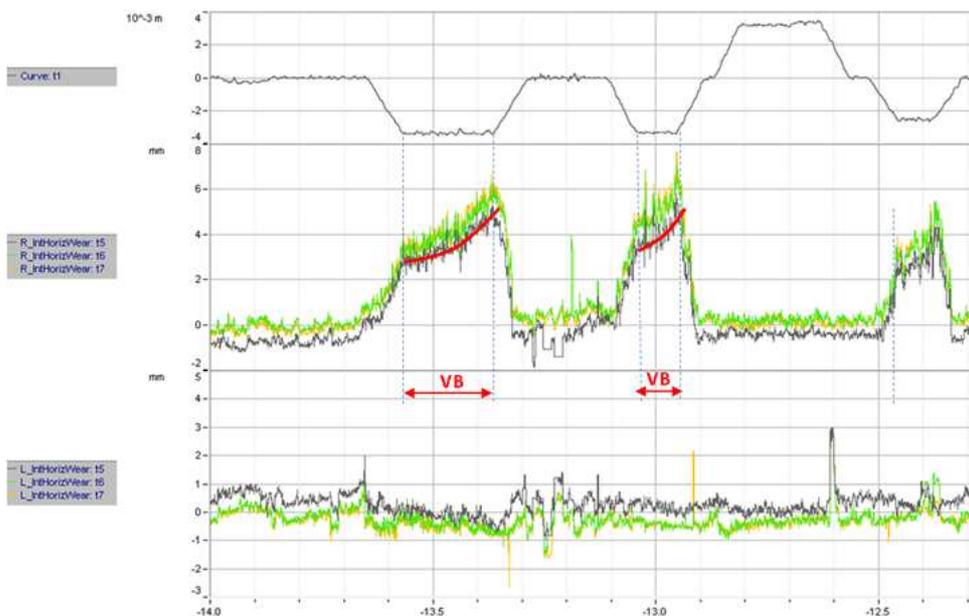


Abbildung 40: Auswertung einer Bogenfolge der SBB [30]

Meine Auswertungen zeigen meist ein lineares Verschleißverhalten über der Belastung. Können Sie das aus Ihren Erfahrungen bestätigen? Wann ist das nicht so?

„Das kommt darauf an, was unter Verschleiß verstanden wird. Bei 45°-Verschleiß an einem Ortsquerschnitt ist dem sicher so. Bei der berührgeometrischen Profil-Formstabilität kann ich mir das nicht vorstellen. Dieses Wachstum hin zum angepassten Kontakt wird, meinem Erachten nach, stark nichtlinear verlaufen. Die Schienenverschleißmaße Seite, Vertikal und 45° sind dafür nicht geeignet, um diese Untersuchung zu fahren. Einen Beweis dieser These muss SBB derzeit noch schuldig bleiben.“

*Welche Bereiche des Bogens verschleiben in der Regel am schnellsten?*

„Bei Einrichtungsbetrieb die Vollbogensektionen des Endes. Gepaart mit lokal moderater Gleislage (Richtungsfehler oder einseitiger Längshöhenfehler) prägt sich diese auch im Verschleiß oder Wachstum von Rollkontaktermüdungen ein. Die Spitzen in der Grafik zeigen solche lokalen Verschleiß-Überhöhungen.“

Anmerkungen des Autors:

- I Sägezahnbremsung: Mehrmaliges Anziehen und Lösen der Bremse bei der Bergabfahrt um die Bremse kühl zu halten.
- I SKS: Spurkranzschmierung

### 3.3 Expertengespräch zum Thema Schienenschmieranlagen

#### Gesprächspartner:

Richard Gunacker,  
Geschäftsführer der Firma Hypower

#### *Wie kam es zur Gründung der Firma Hypower?*

„Ich habe meine Firma im Alter von 20 Jahren gegründet und spezialisierte mich zunächst auf den Handel mit Hydraulikanlagen. Auf Grund einer Ausschreibung seitens der Wiener Linien entwickelte ich gemeinsam mit meinem Bruder ein Schienenschmiersystem mit frequenzabhängiger Steuerung. Es folgte die Anmeldung zahlreicher Patente und Übernahmeveruche seitens multinationaler Konzerne. Heute beschäftigt die Firma Hypower 17 Personen und liefert Schmieranlagen in die ganze Welt.“

#### *Was sind die Ziele der Flankenschmierung?*

„Zweck der Flankenschmierung ist es, den Reibungskoeffizienten zwischen Radspurkranz und der Fahrkante der Schiene so weit als möglich herabzusetzen. Dies ist ein wesentlicher Unterschied zur Schienenkopfkonditionierung, bei der der Reibungskoeffizient genau eingestellt werden muss, um die Traktion der Lokomotiven und die Bremswirkung der Züge nicht zu beeinträchtigen. Durch Flankenschmierung will man folgende Effekte erzielen:

- Verschleißreduktion an der Fahrkante in engen Bögen
- Damit eine Verlängerung der Liegedauer der Schienen in Bögen bewirken
- Lärminderung- Verhindern von Kurvenkreischen
- Verhindern von Aufklettern des Spurkranzes und daraus folgende Erhöhung der Entgleisungssicherheit“

#### *Wie funktionieren Hypower-Schmieranlagen zur Schienenflankenschmierung:*

[Erklärung anhand einer Handskizze vgl. Abbildungen 33 und 34]

„An der Schiene wird eine Leiste so aufgebracht, dass eine Verletzung des vorgegebenen Lichtraumprofils ausgeschlossen werden kann. Während bei Rillenschienen im Nahverkehrsbereich das Anschrauben der Leisten im Schienengrund erlaubt ist, müssen die Leisten bei den Vignolschienen der Vollbahn angeklemt (keine Bohrung) werden. Aus Düsen in diesen Leisten wird das Schmiermittel auf die Schiene gepumpt. Hierfür ist eine Fassungspumpe zuständig, wobei die Portionierung nach Bedarf an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden kann. Das Verteilen des Schmiermittels entlang der

Schienenflanke auf die gewünschte Länge erfolgt dann durch den Spurkranz der Wagenräder.

Die Steuerung der Anlagen am Semmering erfolgt mittels Vibrationssensoren im Gleis, welche die Achs- oder Zugüberfahrten messen (Achsen- oder Zugzählfunktion) können. Je nach Zuglänge können also mehrere Schmiermittelportionen aufgetragen werden. Alternativ wurde auch eine bedarfsorientierte Steuerung entwickelt, welche über eine Geräuschemessung, Schienenkreischen auf Grund der Frequenz erkennt und so die nötige Menge an Schmiermittel aufbringen kann. Die Schmieranlagen werden, sofern Richtungsverkehr vorliegt, am Beginn des Übergangsbogens platziert. Die Begründung hierfür liegt im Sinuslauf der Eisenbahn. Nur am Beginn des Übergangsbogens kann mit Sicherheit davon ausgegangen werden, dass der Spurkranz auf Grund der Fliehkraft an die Schiene anläuft und eine Verteilung des Schmiermittels gewährleistet.

*Welche Schmiermittel werden verwendet?*

„Die verwendeten Mittel sind eigentlich Schmierpasten und keine Öle, wie fälschlicherweise häufig geglaubt wird. Diese Konsistenz gewährleistet, dass der Zug das Schmiermittel auf die gewünschte Länge verteilen kann. Vergleichbar ist das, mit dem Verstreichen von Butter auf ein Brot, was mit Öl nicht gut funktionieren würde. Die Schmiermittel enthalten einen gewissen Anteil an Festschmierstoffen, welche eine Erhöhung der Druckfestigkeit und der Notlaufschmiereigenschaften bezwecken. Die Druckfestigkeit ist von großer Bedeutung, da sonst die Schmiermittel unter der Last der Räder einfach ausweichen würden und es wäre kein Schmiereffekt gegeben. Solche Festschmierstoffe sind zum Beispiel: Kupfer- und Aluminiumblättchen, Teflon, Bentonit und Graphit. Vor allem Graphit ist auf Grund seiner Metallaffinität sehr geeignet für die Notlaufschmiereigenschaft. Sollte nämlich aufgrund von starkem Regen das Schmiermittel abgewaschen werden, bleiben die Metallpartikel dennoch an der Schiene haften und ergeben somit die sogenannte „Notlaufschmiereigenschaft“.

*Sind die verwendeten Schmiermittel biologisch abbaubar?*

„Generell muss in Europa die OECD-Norm 331 eingehalten werden, welche die biologische Abbaubarkeit regelt.“

*Gibt es eine Art Sprengwirkung durch Einpressen der Schmierstoffe in Risse?*

„Die Frage, ob sich die in den Schmierstoffen befindlichen Festschmierstoffe in Schienenrisse einpressen und somit einen Sprengdruck bewirken, oder ob sie die Risse glätten und ein weiteres Aufreißen minimieren ist momentan Gegenstand von Expertendiskussionen in aller Welt und kann momentan noch nicht beantwortet werden. Was das Einarbeiten der Schmiermittel in die Schiene angeht, so ist klar, dass hierfür nur Festschmierstoffe in Frage kommen, weil Fette einfach ausweichen. Aber auch diese Vorgänge sind noch nicht restlos geklärt.“

*Wie gestaltet sich die Wartung und Instandhaltung der Anlagen:*

„In Österreich erfolgt die Wartung der Anlagen in Form einer Kooperation mit der ÖBB-Infrastruktur. Momentan werden die Anlagen auf ein Remote-System umgerüstet, welches Mobilfunknachrichten an das Wartungspersonal sendet, sobald der Schmiermitteltank ein kritisches Niveau erreicht oder Funktionsstörungen der Anlage gegeben sind. Dies erspart Kontrollgänge durch das Wartungspersonal, welche besonders im unwegsamen Gelände, Kosten nach sich ziehen. Eine Amortisation des Systems erfolgt bereits mit der Einsparung des zweiten Kontrollgangs.“

*Gibt es eine Art Konkurrenz durch Onboard-Spurkranzschmierung*

„Auf Grund dessen, dass ein Gleis meist durch mehrere Eisenbahnverkehrsunternehmen befahren wird, die ein Funktionieren der Spurkranzschmierung nicht immer gewährleisten können, veranlasst die meisten Infrastrukturbetreiber dazu, trotzdem stationäre Schmieranlagen zu installieren. Der Fakt, dass der Infrastrukturbetreiber für sein Gleis verantwortlich ist und die Trennung von EVU und Infrastrukturbetreiber schließt also eine Konkurrenz zwischen stationären Schmieranlagen und der Onboardschmierung gewissermaßen aus.“

*Was halten Sie von der Idee des Vergleiches der Verschleißverhaltens von nicht geschmierten Referenzbögen und geschmierten Bögen?*

„Das wäre prinzipiell das Beste, weil man Ergebnisse für Bogenklasse erhalten würde und man für die jeweiligen Parameter eine Voraussage über das Verschleißverhalten treffen kann. Allerdings wird das schwierig werden, weil die örtlichen Gegebenheiten nur sehr schwer zur Gänze beschrieben werden können. Die Firma Hypower hat zum Beispiel eine Schmieranlage an einem Bogen installiert, wobei am Außengleis Flankenschmierung und am Innengleis Schienenkopfkonditionierung vorgesehen war. Nach einiger Zeit wurde aber sehr hoher Verschleiß und Kurvenkreischen beobachtet. Ursache war, dass eine Station nach dem Bogen errichtet wurde und somit die Züge sehr langsam durch den

Bogen fahren. Zusätzlich wurde die Bogenüberhöhung, die auf eine Geschwindigkeit von 60 bis 70 km/h ausgelegt war, nicht verändert. Dies hatte zu Folge, dass die Zuggarnituren gewissermaßen im Bogen „runter“ gerutscht sind. Das heißt, es gab auf beiden Schienenköpfen eine Querverschiebung, die zu den lauten Geräuschen geführt hat. Außerdem lief dadurch der innenliegende Spurkranz an der Schienenkante an und verursachte ein zusätzliches Geräusch an der Flanke der Innenschiene (normalerweise umgekehrt). Man musste also beide Schienenköpfe benetzen und zusätzlich die Fahrkante der Innenschiene und das Problem war gelöst.“

### 3.4 Expertengespräch zum Thema Wirkungslänge von Schmieranlagen

#### Gesprächspartner:

Msc ETH Masch.-Ing. Rolf Renggli,  
SBB Infrastruktur,  
Geschäftsbereich: Anlagen und Technologie,  
Abteilung: Fahrbahn und Interaktion

Über einen Feldversuch zur Schienenflankenschmierung:

*„Im Jahr 2011 schloss die SBB einen Feldversuch zur Untersuchung der Reduzierung des horizontalen Schienenverschleißes auf Grund des Einbaus von stationären Schienenflankenschmieranlagen ab. Dabei kamen Schmieranlagen zweier verschiedener Hersteller zur Anwendung.“*

Wie funktionieren die beiden Anlagen?

*„Bei beiden Schmieranlagen reagiert ein Sensor auf die Zugüberfahrt und aktiviert eine Pumpe, welche Schmiermittel aus einem Behälter via Schläuche zum Verteiler befördert, wo dann das Schmiermittel an die Schienenflanke fließt und von den vorbeifahrenden Zugrädern (Spurkranz & Hohlkehle) aufgenommen und entlang der Schienenflanke verteilt wird. Bei gut eingestellter Schmiermitteldosierung bildet sich bis hinauf zur Fahrkante ein wirkungsvoller Schmierfilm, welcher dem Fahrkanten- und Flankenverschleiß entgegen wirkt.“*

Wie hoch ist der Wirkungsgrad der Anlagen?

*„Im Zuge des Feldversuches konnte eine Verschleißminderung von 40% in einer Entfernung von 200m nach der Anlage festgestellt werden.“*

Wie groß ist die Reichweite des Schmiermittels?

*„Im Versuchsbogen, mit einem Radius von 300 Metern und einem Gefälle von 25%, zeigten sich folgende Erkenntnisse zur Verschleißminderung in Abhängigkeit der Entfernung zur Schmieranlage:*

- 200m : 40% Verschleißminderung
- 500m: 20% Verschleißminderung
- 1000m: 15% Verschleißminderung
- 2000m: keine Verschleißminderung

*Der Bogen wurde mehrheitlich von Güterzügen befahren, bei welchen nur das Triebfahrzeug über eine Onboard-Spurkranzschmierung verfügt.“*

## 4 Untersuchungen

### 4.1 Einleitung

Nachdem nun die theoretischen Grundlagen hinreichend erörtert wurden, soll das Kapitel nun die Methodik der Untersuchungen zum Verschleißverhalten von Schienen und zur Auswirkung von Schienenschmierung auf den Schienenverschleiß im engen Bogen abbilden. Basis hierfür bilden sowohl die Messdaten des Messwagens EM250 der ÖBB als auch Daten aus der Streckendatenbank des österreichischen Bahnnetzes, welche am Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft aufliegt.

Die Untersuchungen werden in vier Unterkapitel unterteilt. Das Kapitel 4.2 schildert die Überlegungen und Eingrenzungen, die im Vorfeld der eigentlichen Untersuchungen stattfinden. In Kapitel 4.3 werden Untersuchungen zum Verschleißverhalten von Schienen in engen Bögen beschrieben. Kapitel 4.4 befasst sich mit der Auswirkung der Installation von Schienenschmieranlagen auf den Schienenverschleiß in einem Bogen. Weiters soll, sofern dies möglich ist, im Kapitel 4.5 der Vergleich von geschmierten Bögen mit ungeschmierten Bögen weiteren Aufschluss über die Auswirkungen von Schienenschmierung auf den Schienenverschleiß im engen Bogen geben.

## 4.2 Überlegungen und Maßnahmen im Vorfeld der Untersuchungen

### 4.2.1 Untersuchungsgebiet

Wie bereits in Kapitel 2 erörtert wurde, zeigt unterschiedliches Wagenmaterial unterschiedliche Auswirkungen auf den Verschleiß. Dies hängt mit den unterschiedlichen Drehgestellen, den unterschiedlichen Achslasten, den unterschiedlichen Geschwindigkeiten und dem Einbau von onboard-Schmiersystemen zusammen. Hier zeigen sich vor allem Unterschiede zwischen Güter- und Personenzügen. Eine Untersuchung wie groß die Unterschiede zwischen verschiedenen Wagen- und Triebfahrzeugstypen sind, ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich.

Die vorhin genannten Unterschiede legen jedoch den Schluss nahe, sich auf ein Gebiet zu beschränken und somit die Variation verschiedener Wagentypen möglichst einzugrenzen. Gesucht ist also ein Gebiet bzw. eine Eisenbahnstrecke, auf der sich das Verschleißverhalten von Schienen im engen Bogen möglichst gut beschreiben lässt. Außerdem soll diese Strecke über eine möglichst große Anzahl von Schmieranlagen verfügen.

Von den in Kapitel 2.6.4 dargestellten Strecken eignet sich die TUG-Strecke 008 die Südbahn von Wien bis Spielfeld, vor allem mit dem Teilstück am Semmering, am besten. Von dieser Strecke stehen Daten zu insgesamt 48 stationären Schmieranlagen zur Verfügung. Außerdem gibt es eine große Anzahl an Referenzbögen, also engen Bögen, die über keine Schmieranlage verfügen und sich für eine Untersuchung des Verschleißverhaltens von Schienen eignen.

## 4.2.2 Untersuchungsklassen

Für die Untersuchungen wurden die Bögen bereits vorab in Klassen eingeteilt, um eine grobe Einteilung hinsichtlich der zu erwartenden Ergebnisse zu erhalten. Berücksichtigt wurden dabei folgende Parameter:

- I Radius
- I Schienengüte
- I Schienenprofil
- I Schwellentyp

Nicht mit aufgenommen wurden die sicherlich ebenso wichtigen Parameter Längsneigung und Spurweite, da sonst die Eingrenzung so stark fortgeschritten wäre, dass keine pauschalen Aussagen mehr möglich wären. Diese Parameter sollen in eigenen Parameterstudien untersucht werden.

Die Einteilung der Untersuchungsklassen befindet sich im Anhang (CD-Rom).

### 4.2.3 Nomenklatur

Damit während der Untersuchung eine einwandfreie Identifizierung einzelner Bögen möglich ist, erfolgt die Bezeichnung der Bögen nach folgenden Gesichtspunkten:

- I Bogentyp
  - o RB... Referenzbogen (keine Schmieranlage)
  - o SB... Bogen mit Schmieranlage
- I Strecke der TUG-Datenbank
  - o z.B. TUG8 für Südbahn
- I Gleis
  - o G1... Gleis 1
  - o G2... Gleis 2
- I Kilometrierung-Abschnittsanfang
  - o Markiert den Anfang des aus der Datenbank ausgelesenen Gleisabschnitts
- I Kilometrierung-Abschnittsende
  - o Markiert das Ende des aus der Datenbank ausgelesenen Gleisabschnitts
- I Radius
  - o  $R = xxx \text{ [m]}$
  - o Positives Vorzeichen = Rechtsbogen
  - o Negatives Vorzeichen = Linksbogen

Die Bogenbezeichnung wird in dieser Reihenfolge zusammengesetzt:

- I Bogentyp\_Strecke TUG-Datenbank\_Gleis\_Abschnittsanfang\_Abschnittsende\_Radius
- I z.B.: RB\_TUG8\_92000\_92312\_R=-300

Für Bögen mit Schmieranlagen wird statt Abschnittsanfang und Abschnittsende nur die Position der Schmieranlage angegeben.

- I z.B.: SB\_TUG8\_93455\_R=184

## 4.2.4 Eingangsdaten

### Messdaten

Vom Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft wurden dem Autor folgende Daten zur Verfügung gestellt. Die oberste Zeile stellt das Datum der Messfahrt dar. Die linke Spalte zeigt die Kilometrierung. Alle Werte, die den Wert „999“ haben, stellen Fehlerwerte dar. Es wurden sowohl Daten zum Seitenverschleiß (45°)- W3a, als auch zur gemessenen Spurweite bereitgestellt.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	km	2001,8083	2002,3083	2002,4417	2002,7278	2003,3083	2003,4778	2003,65	2003,8972	2004,2833	2004,5305	2004,8361	2005,2972	2005,5111
2	86320	999	999	999	999	2,77	2,73	2,77	3,48	2,62	2,89	3,16	3,16	999
3	86322,5	999	999	999	3,44	3,44	2,85	2,73	2,93	2,73	999	999	3,28	999
4	86325	999	999	999	999	3,71	2,7	3,16	3,05	3,32	2,85	2,93	999	999
5	86327,5	999	999	999	999	3,67	3,16	999	3,24	999	3,2	2,81	3,52	999
6	86330	999	999	999	999	999	3,28	999	3,52	3,28	2,85	3,4	2,93	999
7	86332,5	999	999	999	3,32	3,16	3,63	2,97	999	3,24	3,2	3,28	3,4	999
8	86335	999	999	999	999	999	999	3,13	3,36	3,79	3,09	3,13	3,83	999
9	86337,5	999	999	999	999	5,82	3,13	3,4	3,16	2,19	3,36	999	3,13	999
10	86340	999	999	999	999	5,35	3,16	2,58	3,67	3,44	2,7	3,59	999	999
11	86342,5	999	999	999	3,24	6,25	3,01	3,09	2,85	3,48	2,89	2,93	3,71	999
12	86345	999	999	999	999	7,85	2,58	999	3,2	999	3,48	2,81	3,2	999
13	86347,5	999	999	999	999	7,3	3,13	3,24	3,55	2,62	3,05	3,52	3,63	999
14	86350	999	999	999	999	1,33	3,2	3,36	3,13	3,16	3,71	3,05	3,36	999
15	86352,5	999	999	999	3,09	1,13	3,24	2,7	3,63	3,59	2,58	4,41	3,16	999
16	86355	999	999	999	999	1,29	3,28	3,05	3,24	3,28	999	3,09	999	999
17	86357,5	999	999	999	999	0,43	2,62	3,05	3,36	999	2,97	3,2	3,48	999
18	86360	999	999	999	999	0,98	999	3,91	3,55	3,13	2,73	3,55	4,18	999
19	86362,5	999	999	999	4,53	1,17	999	3,55	3,16	3,71	3,75	3,05	4,06	999
20	86365	999	999	999	999	1,25	3,75	3,59	3,87	3,36	3,71	3,28	3,98	999
21	86367,5	999	999	999	999	0,86	4,14	3,09	4,06	3,09	3,79	3,95	3,52	999
22	86370	999	999	999	999	1,33	3,63	2,66	3,98	4,18	999	3,01	2,77	999
23	86372,5	999	999	999	3,05	999	3,48	3,44	3,24	4,02	999	4,45	999	999
24	86375	999	999	999	999	1,17	2,62	3,24	2,7	999	3,09	999	999	999
25	86377,5	999	999	999	999	1,29	999	3,63	3,48	2,81	3,32	3,2	4,02	999
26	86380	999	999	999	999	1,17	3,4	2,93	2,77	2,97	3,67	3,28	3,67	999
27	86382,5	999	999	999	3,83	0,66	3,63	2,66	3,44	3,52	3,13	3,59	3,52	999

Abbildung 41: Gestalt der Messdaten

Die Messwerte zum Seitenverschleiß existieren für alle 2,5 Meter. Die Spurweite hingegen wird alle 50 Zentimeter dargestellt.

Wie aus der Abbildung ersichtlich wird, bestehen die ersten vier Spalten fast ausschließlich aus Fehlerwerten. Dies trifft für nahezu alle Bögen im Beobachtungsgebiet zu. Die ersten gültigen Messwerte liegen somit ab Anfang des Jahres 2003 vor. Dies erweist sich insofern als ungünstig, als dass die meisten Schmieranlagen in den Jahren zwischen 2004 und 2006 eingebaut wurden. Der Beobachtungszeitraum vor Einbau der Schmieranlagen ist somit relativ kurz.

### Belastungsdaten

Die Thematik der Belastungsdaten wurde bereits in Kapitel 2.5.2 diskutiert. Das Fehlen der Daten in den besagten Jahren stellt ein großes Problem dar. Infolge der besagten Problematik wird für zweigleisige Streckenbereiche je Gleis mit einem Durchschnittswert von 52000 Gesamtbruttotonnen/Tag gerechnet.

## Oberbaudaten

Von jedem Bogen können die folgenden Parameter aus der Datenbank abgefragt werden:

- I Gleis (1 oder 2)
- I Bogenanfang (Kilometrierung)
- I Bogenende (Kilometrierung)
- I Radius
- I Schwellentyp
- I Schienenprofil
- I Schienengüte
- I Einbaujahr der Schiene
- I Einbaujahr der Schwelle

Für Schmieranlagen gibt es zusätzlich noch Informationen zu:

- I Einbaudatum
- I Anlagentyp
- I Stromversorgung
- I Standort

## 4.2.5 Ausleseprogramm

Um die vorhin dargestellten Rohdaten verwerten zu können, wurde ein Ausleseprogramm auf Basis von Visual Basic programmiert. Die Funktionsweise des Programms soll hier beschrieben werden, einerseits um die Reproduzierbarkeit der Versuche zu gewährleisten, andererseits um die Problemstellungen zu verdeutlichen, die im Zuge der Untersuchungen aufgetreten sind.<sup>1</sup>

Das Programm kann über das Tabellenblatt „Programmsteuerung“ gesteuert werden. Im Folgenden wird das Programm analog zum Auslesevorgang beschrieben:

### I Einlesen der Rohdaten („Programm ausführen“):

Unter Angabe des Dateipfades kann das Programm Excel-Files öffnen und den gesuchten Inhalt in die Tabellenblätter „Eingangsdaten“, „Seitenabnützung\_links“, „Seitenabnützung\_rechts“ und „Spurweite“ kopieren. Für die erste Berechnung muss außerdem ein Durchschnittsbelastungswert (Standard=52000) eingegeben werden. Die Messdaten werden in den Tabellenblättern „Diagramme\_SA\_links“ und „Diagramme\_SA\_rechts“ graphisch dargestellt. In den ersten 3 Grafiken, die erzeugt werden, sind die Messfahrten übereinander gelegt. Unterhalb werden alle Messfahrten einzeln dargestellt. Nachfolgende Abbildungen sollen veranschaulichen, warum dieser Arbeitsschritt nötig ist:

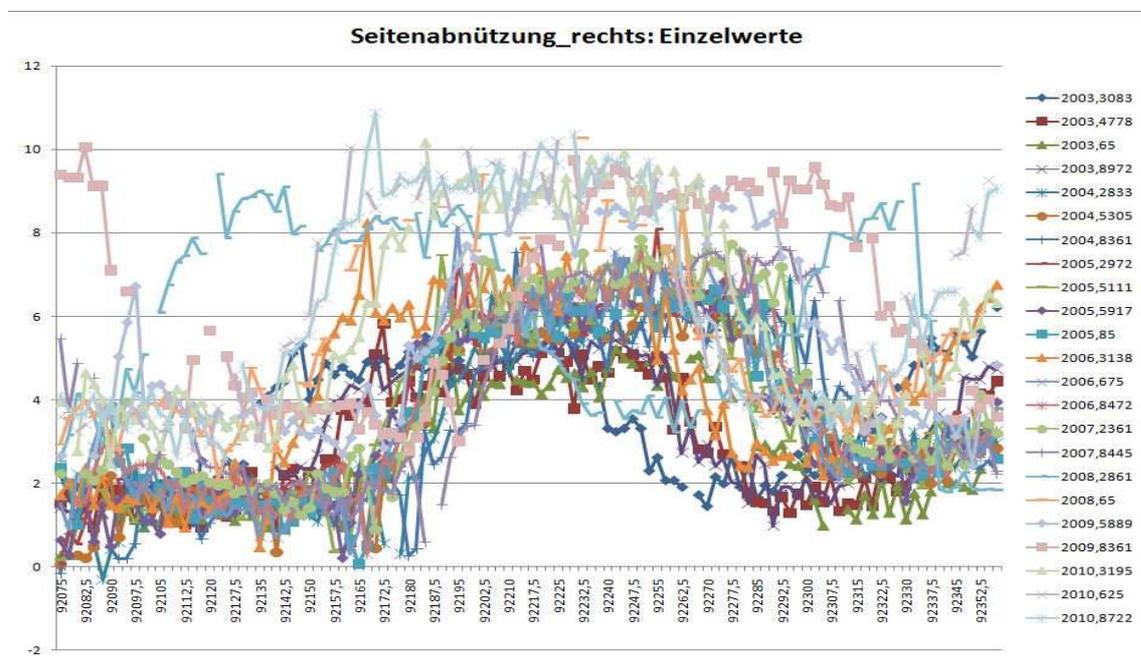


Abbildung 42: Messfahrten übereinander gelegt

<sup>1</sup> Da der Autor die Programmiersprache „Visual Basic“ erst lernen musste und sich das Programm im Laufe der Arbeit immer weiterentwickelt hat, ist es bezüglich Rechenzeit, Einfachheit und Benutzerfreundlichkeit nicht optimal gestaltet. Es erfüllt jedoch die Anforderungen in ausreichendem Maße.

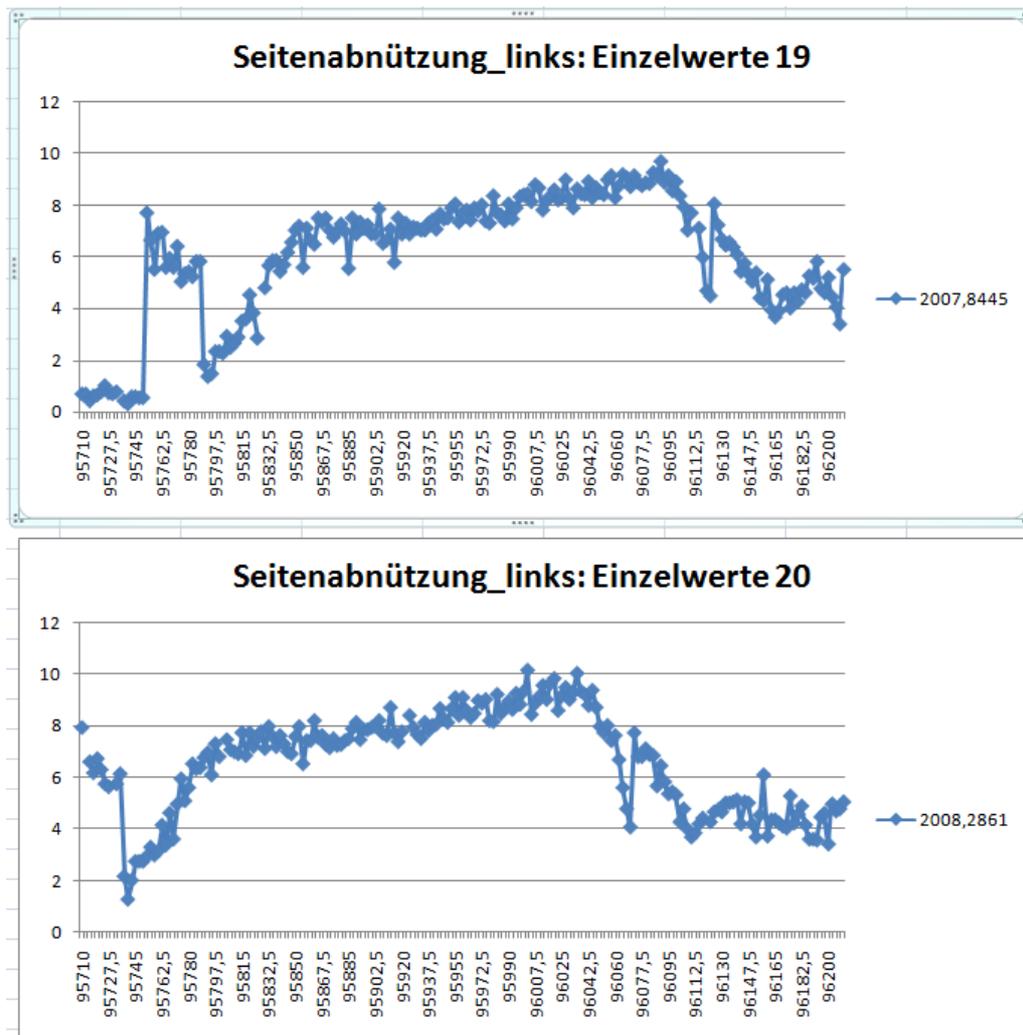


Abbildung 43: Darstellung einzelner Messfahrten

Die beiden Abbildungen stehen beispielhaft für annähernd alle Bögen. Es zeigt sich, dass die Stationierungen der einzelnen Messfahrten teilweise um mehr als 50 Meter abweichen können. Dies stellt insofern ein Problem dar, als dass es notwendig ist, für jede Messfahrt Bogenanfang und Bogenende gesondert einzugeben. Dies wird im nächsten Schritt beschrieben.

Sind die Messfahrten gezeichnet, wird in den Tabellenblättern „SA\_links“ und „SA\_rechts“ eine Vorstatistik erstellt. Dabei wird die Gesamtbelastung der Schienen aufsummiert und der Median über den Verschleiß und die Spurweite über den gesamten Bogen berechnet. Diese Tabellenblätter entstammen ersten Versuchen und könnten auch vereinfacht werden. Da sie jedoch auch die Basis für weitere Berechnungsvorgänge sind, wurden sie in ihrer ursprünglichen Form belassen.

### I Einzelne Messfahrten bearbeiten („Neu berechnen und speichern“)

Nachdem Schritt eins abgeschlossen ist, können in den beiden Tabellenblättern „Verhalten\_links“ und „Verhalten\_rechts“ die Stationierungsdaten der einzelnen Messfahrten eingegeben werden. Das Programm ist so gestaltet, dass die Eingabe von Bogenlänge und Bogenanfang ausreichen um die Berechnung durchzuführen. Die restlichen Werte werden nach Betätigung der Schaltfläche „Neu berechnen und speichern“ automatisch berechnet bzw. ausgelesen.

Wie bereits erwähnt, können auf Grund der fehlerhaften Stationierung der Messfahrten nicht einfach Bogenanfang und Bogenende aus der Datenbank des Institutes für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft übernommen werden. Zum Erkennen von Bogenanfang und Bogenende aus den Tabellenblättern „Diagramme\_SA\_links“ und „Diagramme\_SA\_rechts“ benötigt es ein bisschen Übung. Es hat sich als günstig erwiesen, die letzten Messfahrten zur Auffindung der beiden Punkte heranzuziehen, da deren Stationierung meistens gut mit den Werten der Datenbank übereinstimmt. Darüberhinaus haben sich bei diesen Messfahrten schon eindeutige Verschleißmuster eingestellt, womit sich vor allem das Bogenende sehr gut erkennen lässt.

Abbildung 45 zeigt schematisch die ausgelesenen Bereiche. Deutlich zu erkennen sind an diesem Bogen Bogenanfang und Bogenende. Es ist jedoch darauf zu achten, dass der Knick an den beiden Punkten auch tatsächlich mit der Kilometrierung übereinstimmt. Dies kann über die Länge kontrolliert werden. Für alle drei in der Grafik rot markierten Bereiche wird über eine Länge von 15 Metern der Median der Verschleißwerte errechnet.

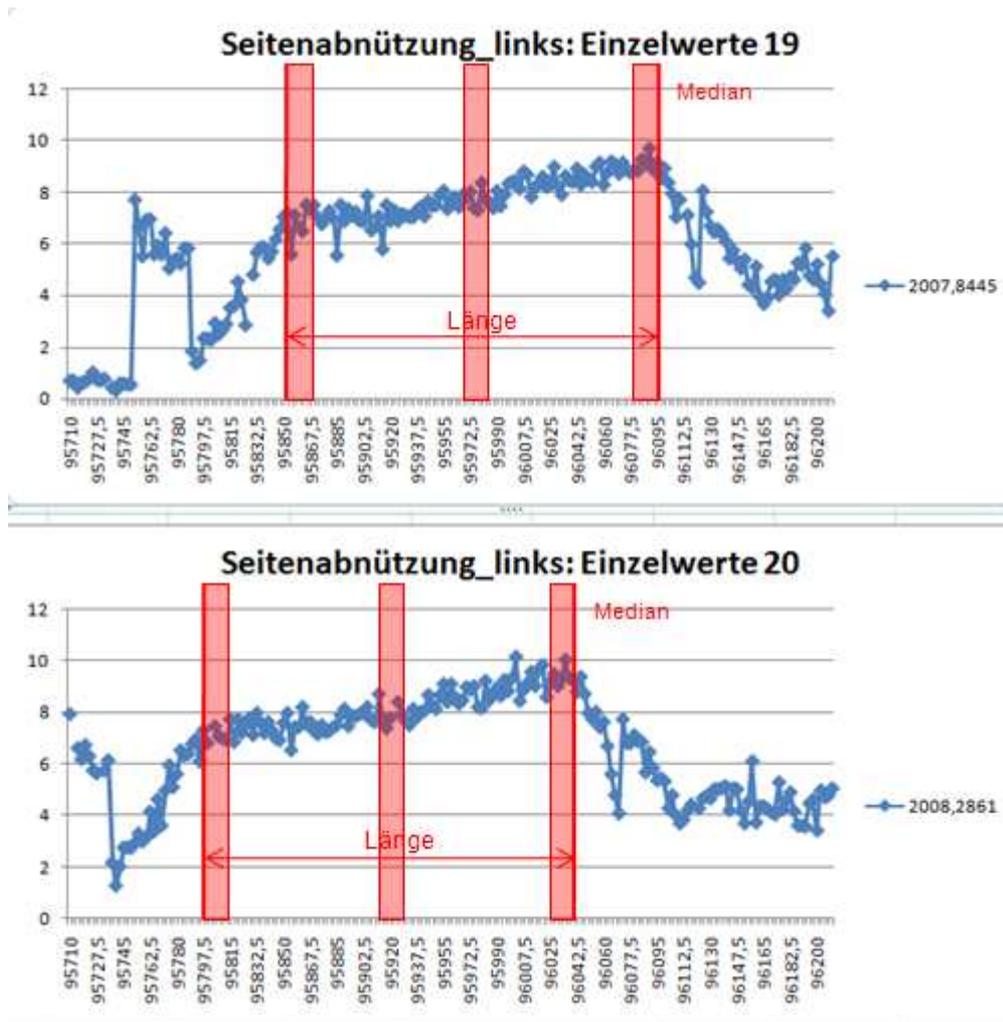


Abbildung 44: Ausleseschema

Ein kurzer Exkurs soll zeigen, warum der Median und nicht das arithmetische Mittel über die Bereiche gebildet wird:

### Exkurs: Median oder Mittelwert

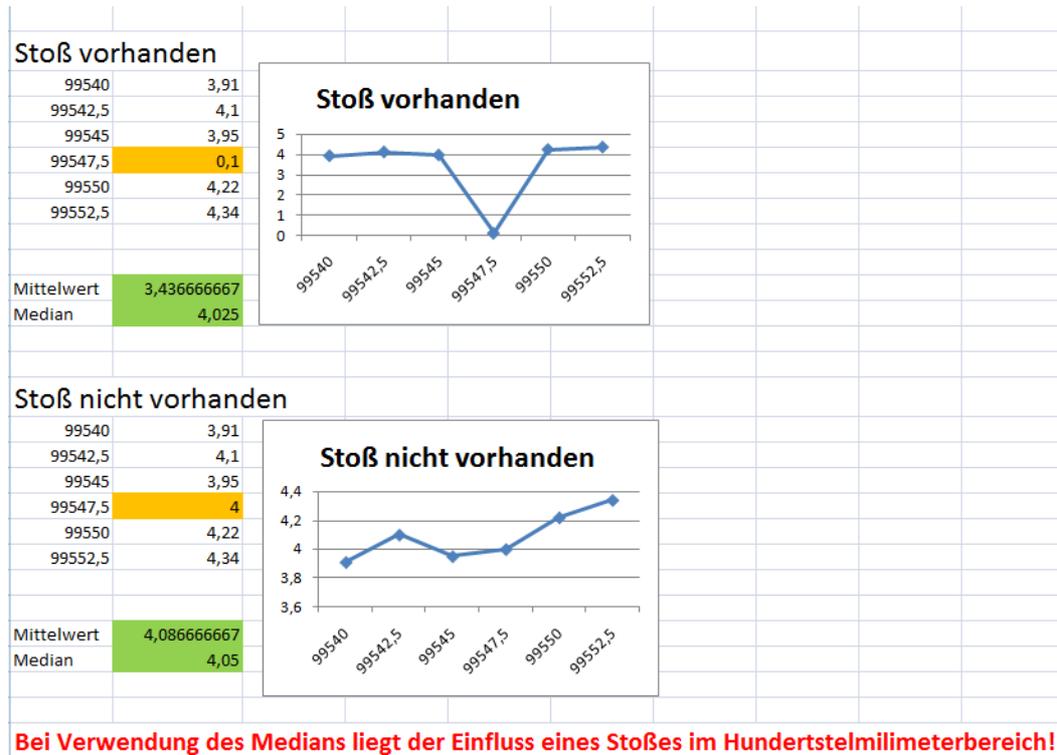


Abbildung 45: Untersuchung eines Gleisstoßes

Für die weiteren Untersuchungen ist relevant, welche statistischen Kenngrößen verwendet werden.

Zu diesem Zweck wurde eine Untersuchung angestellt, welche eine 15m lange Messspur des Seitenverschleißes auswertet. Dies wurde bewusst so gewählt, weil in weiterer Folge ein Bereich dieser Länge für die Beschreibung einzelner Punkte im Bogen (Bogenanfang, Bogenmitte, Bogenende) herangezogen werden soll.

Obige Abbildung spiegelt die Untersuchung wider. Bei Vorhandensein einer Unregelmäßigkeit, wie z.B. eines Gleisstoßes, zeigt sich deutlich der Unterschied zwischen Mittelwert und Median, während Mittelwert und Median bei nicht vorhandenen Unregelmäßigkeiten der Messspur sehr knapp beieinander liegen. Außerdem kann man erkennen, dass das Auftreten einer Unregelmäßigkeit den Mittelwert um mehr als einen halben Millimeter verändert, während sich der Median nur im Hundertstelmillimeterbereich verändert.

### Erkenntnis des Exkurses:

Um in weiterer Folge die Beobachtung einzelner Bereiche des Bogens durchführen zu können, muss also der Median herangezogen werden.

Nachdem nun die Bereiche eingegeben wurden und die Schaltfläche „Neu berechnen und speichern“ aktiviert wurde, berechnet das Programm die zugehörigen Mediane über den Verschleiß und die Spurweite. Dies erfolgt ebenso im Tabellenblatt „Verhalten\_links“ bzw. „Verhalten\_rechts“. Die Werte werden im Tabellenblatt „Diagramme final“ graphisch dargestellt und in das Tabellenblatt „CSV“ kopiert. Für einige Untersuchungen wurde das Programm in diesem Schritt adaptiert und es konnten auch einzelne Messfahrten ausgegeben werden.

#### **I** „CSV-Datei speichern“

Wurden alle Werte auf Richtigkeit und Plausibilität kontrolliert, kann die Schaltfläche „CSV-Datei speichern“ betätigt werden. Ein oder mehrere CSV-Files werden an den Speicherort ausgegeben und können beispielsweise mit der freien Statistik-Software „R-project“ ausgewertet werden. Im Gegensatz zur graphischen Auswertung in Excel, die nur als Kontrolle dienen soll, hat dies abgesehen von diversen Möglichkeiten zur statistischen Untersuchung den Vorteil, dass alle Messpunkte einheitsgetreu aufgetragen werden.

Die einzelnen Untersuchungen werden in den nachfolgenden Kapiteln geschildert. Der Quellcode des Programms bzw. das Programm selbst wird auf einer CD im Anhang abgespeichert.

## 4.3 Untersuchung zum Verschleißverhalten von Schienen im engen Bogen

### 4.3.1 Ziel der Untersuchungen

Im Rahmen dieser Untersuchungen soll das Verschleißverhalten der Schiene im engen Bogen untersucht werden. Der Fokus liegt dabei auf dem 45°-Seitenverschleiß der Außenschiene (W3a), da dieser als ausschlaggebender Parameter für die Wirkung der Schienenflankenschmierung herangezogen wird.

In Kapitel 3.3.2 sollen einige Rahmenbedingungen der Untersuchung dargestellt werden. Kapitel 3.3.3 stellt die Untersuchungen zum Verschleißverhalten dar. Dabei sollen die Bögen auf sinus-förmiges Verschleißverhalten, auf den sogenannten „Position-in-curve-effect“ und auf das Verschleißverhalten in Abhängigkeit der Belastung untersucht werden. Kapitel 3.3.4 stellt eine Parameterstudie dar, bei der durch Variation einzelner Parameter, ihr Einfluss auf den Seitenverschleiß geklärt werden soll.

### 4.3.2 Rahmenbedingungen der Untersuchung

#### Verkehrszusammensetzung

Der bereits im Theoriekapitel erörterte Zusammenhang zwischen der Verkehrszusammensetzung und dem zu erwartenden Verschleiß und das Faktum, dass die genaue Aufteilung zwischen Güter- und Personenzügen dem Autor nicht bekannt ist, führt für die Untersuchung zu folgendem Schluss:

- I In der Untersuchung dürfen nur Bögen verglichen werden, die auf ein und derselben Strecke liegen, sodass angenommen werden kann, dass die Bögen annähernd von denselben Zügen befahren worden sind.

#### Trassierung

Im Theoriekapitel wurde gezeigt, welche Kräfte sich auf Grund veränderlicher Radien ergeben. Außerdem ist ein Einfluss seitens Gefälle auf das Verschleißverhalten zu erwarten.

- I Bögen sind hinsichtlich ihres Radius zu unterscheiden.
- I Der Einfluss der Längsneigung auf den Verschleiß muss untersucht werden.
- I Auch der Einfluss der Bogenlänge muss in die Untersuchungen mit einfließen.

## Fahrdynamik

Es bleibt offen, welchen genauen Einfluss Kräfte, die aus der Fahrdynamik resultieren, auf den Seitenverschleiß haben. Im Speziellen kann nicht gezeigt werden, wie sich Brems- und Beschleunigungsverhalten von Triebfahrzeugen in der jeweiligen Situation auswirken, da diese situationsbedingt anders sein können. Daraus lässt sich folgender Schluss für die Untersuchung ableiten:

- I Wenn sich auf Grund dieser Tatsache überhaupt noch genügend Bögen finden, die eine pauschale Aussage zum Verschleißverhalten zulassen, dann nur unter der Bedingung, dass die Bögen in die gleiche Richtung, bei gleichem Gefälle und bei gleicher Überhöhung befahren werden. Zumindest muss, wie bereits im Unterkapitel „Trassierung“ erwähnt, der Einfluss der oben genannten Parameter vor einem Vergleich untersucht werden.

## Schienenprofil

In Kapitel 2.2.1 wurde bereits erörtert, wie sich unterschiedliche Schienenprofile auf den Seitenverschleiß auswirken. Somit ergibt sich für die Untersuchung:

- I Verschiedene Schienenprofile erfordern eine differenzierte Betrachtung von Bögen im Gleis.

## Schienengüte

Die in Kapitel 2.2.2. gezeigten Untersuchungen zeigen sehr deutlich, welchen Einfluss die Schienengüte auf den Seitenverschleiß hat.

- I Auch auf Grund der Schienengüte müssen Bögen unterschieden werden. Der Einfluss der Schienengüte auf den Seitenverschleiß wurde bereits hinreichend untersucht und bedarf keiner weiteren Studie mehr.

## Schwellen

Auf Grund der im Theoriekapitel dargestellten Unterschiede zwischen verschiedenen Schwellentypen muss auch zwischen unterschiedlichen Schwellentypen differenziert werden. Die vom Institut zur Verfügung gestellten Daten lassen eine Unterscheidung in folgende Schwellentypen zu:

- I Holzschwelle
- I Betonschwelle
- I Betonschwelle besohlt
- I Stahlschwelle

## Spurweite

Wie im Theoriekapitel veranschaulicht wurde, ergibt sich auf Grund unterschiedlicher Spurweite eine andere äquivalente Konizität. Diese sollte auch zu einer Veränderung der Seitenkräfte führen. Für die weiteren Untersuchungen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

- I Unterschiedlicher Verschleiß auf Grund unterschiedlicher Spurweiten ist zu erwarten.
- I Das Ausmaß des Einflusses auf den Verschleiß muss in der Untersuchung geklärt werden.

### 4.3.3 Untersuchung zur Beschreibung des Verschleißverhaltens

#### Methode: Schwankungen der Messwerte – Sinuslauf

Diese Studie ist als Voruntersuchung zu sehen. Sie soll zeigen, ob es überhaupt nötig ist, den Median über einen Teil des Bogens zu bilden, oder ob einzelne Punkte zur weiteren Betrachtung herangezogen werden können. Auf Grund des Sinuslaufs der Eisenbahn liegt der Schluss nahe, dass dieses Phänomen auch im engen Bogen auftritt und Einzelmesswerte somit lokal voneinander abweichen.

Anhand von sechs Bögen unterschiedlichen Bögen soll überprüft werden, ob sich ein Sinuslauf einstellt und welche Charakteristik dieser hat.

Für die Untersuchung wurden folgende Bögen ausgewählt:

- I Klasse 1 (49E1, R 260, Holzschwellen)
  - o RB1\_TUG8\_GI2\_9xxxx\_9xxxx\_R=-220
  - o RB1\_TUG8\_GI2\_9xxxx\_9xxxx\_R=179
  - o RB1\_TUG8\_GI2\_9xxxx\_9xxxx\_R=182
- I Klasse 14 (54E2, R 350HT, Holzschwellen)
  - o RB14\_TUG8\_GI1\_8xxxx\_8xxxx\_R=-262
  - o RB14\_TUG8\_GI1\_8xxxx\_8xxxx\_R=270
- I Klasse 12 (60E1, R260, Betonschwellen)
  - o RB12\_TUG8\_GI1\_11xxxx\_11xxxx\_R=-359

*Anmerkung: Die Kilometrierung wurde in dieser öffentlichen Fassung unkenntlich gemacht.*

#### **Einschränkungen der Untersuchung:**

Es gilt zu beachten, dass die zur Verfügung stehenden Messwerte nur für alle 2,5 Meter bestehen. Das bedeutet, dass das Ergebnis dieser Untersuchung bezüglich des Sinuslaufes verfälscht werden kann. Das Hauptziel der Untersuchung ist jedoch darzustellen, warum eine Mittelung über größere Bereiche notwendig ist. Zeigen die Messwerte in den 2,5 m Bereichen Schwankungen, so muss dies als Argument gesehen werden, das für eine Mittelung spricht.

## Methode: Änderungen des Verschleißverhaltens

Es soll gezeigt werden, ob sich das Verschleißverhalten im Laufe der Zeit ändert. Besonderes Augenmerk soll auf den ersten Teil des Beobachtungszeitraumes gelegt werden, da sich hier eventuell ein „Einschleifen“ der beiden Reibungspartner Rad und Schiene auf einen optimalen Zustand einstellen könnte, wie es von Rad-Schiene-Prüfständen bekannt ist. [31] Auf Grund der verschiedenen Radprofile und unterschiedlichen Achslasten ist zu erwarten, dass sich dieser Effekt aber nicht ganz so extrem wie am Prüfstand ausprägen wird. Außerdem soll gezeigt werden, wie sich Schleifarbeiten im Zuge von Reprofilierungsmaßnahmen auf den 45°-Seitenverschleiß (W3a) der Außenschiene auswirken.

Folgende Abbildung soll die Untersuchung veranschaulichen:

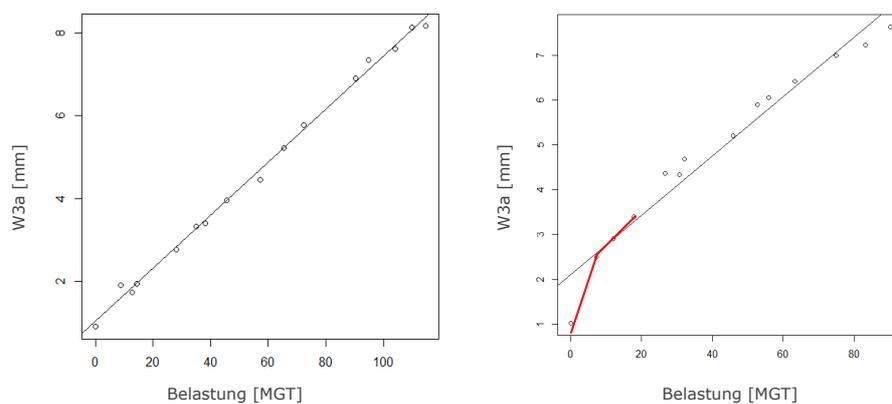


Abbildung 46: Einspielphase

Während im linken Bild ein lineares Verschleißwachstum ersichtlich ist, zeigt sich im rechten Bild ein deutlich steileres Verschleißwachstum zu Beginn des Beobachtungszeitraumes. Dies ist vermutlich auf ein Einspielen der beiden Verschleißpartner Rad und Schiene, hin zu einem besseren Verschleißprofil, zurückzuführen.

Die Ziele sind also,

- I zu beobachten, ob es einen Knick im Verlauf des Verschleißbildes gibt, wie groß dieser ausfällt und wo dieser liegt, sowie
- I die Auswirkung von Schleifarbeiten zu beurteilen.

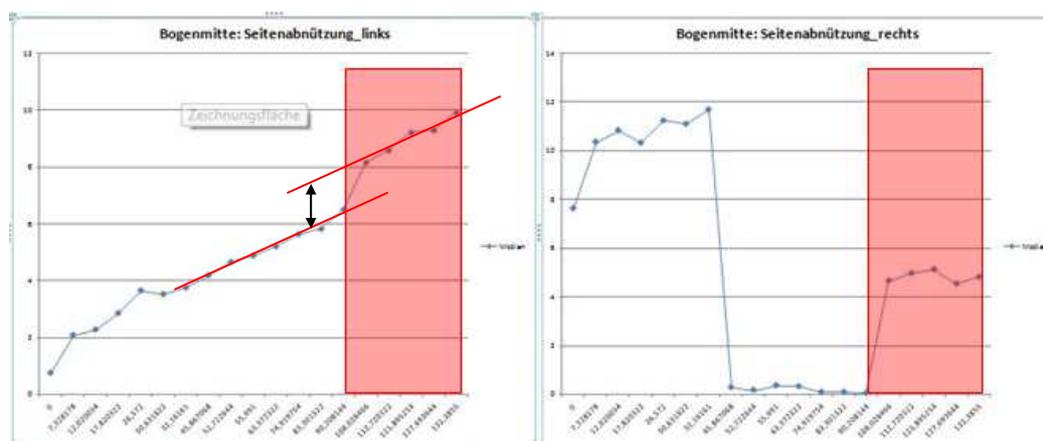


Abbildung 47: Auswirkung von Schleifarbeiten

Schleifarbeiten können bereits im VB-Ausleseprogramm erkannt werden. Obige Abbildung stellt schematisch dar, wie diese zu erkennen sind. Besonders leicht wird man auf Schleifarbeiten aufmerksam, wenn man die Seitenabnutzung des Innenstrangs mitbetrachtet. Da dort der vertikale Verschleiß ( $W1i$ ) dominiert, verursachen Reprofilierarbeiten einen deutlichen Anstieg des  $45^\circ$ -Seitenverschleißes ( $W3i$ ), weil die Fahrkante angepasst werden muss.

Für diese Untersuchung können beliebige Bögen gewählt werden, da es hier darum geht, eine generelle Aussage über Abweichungen zur Linearität zu beschreiben.

### Einschränkungen der Untersuchung:

Da Messwerte kurz nach Schieneneinbau nur für einen geringen Anteil der Schienen vorhanden sind, wird es nicht vermutlich nicht gelingen auf Grund dieser Untersuchung Gesetzmäßigkeiten abzuleiten, unter welchen Bedingungen sich eine Einspielphase besonders stark ausprägt. Diese Untersuchung soll vielmehr dazu dienen, herauszufinden, ob eine Einspielphase oder andere Unregelmäßigkeiten im Verlauf überhaupt auftreten und wie stark sich Schleifarbeiten auswirken. Die Mitbetrachtung des zweiten Schienenstranges gibt keine Garantie alle Schleifarbeiten zu erkennen, soll jedoch nur die Auffindung dieser erleichtern, weil häufig beide Stränge gleichzeitig reprofiliert werden.

## Methode: Entwicklung einzelner Punkte – „Position-in-curve-effect“

Zweck dieser Studie ist es, alle Referenzbögen auf den sogenannten „Position-in-curve-effect“ zu untersuchen, also im Wesentlichen die Entwicklung des Verschleißes unterschiedlicher Bereiche des Bogens zu untersuchen.

Dabei kann theoretisch wie folgt vorgegangen werden:

- I Vergleich der Steigungen der Verschleißkurven von Anfangs- und Endpunkten
- I Darstellung der Differenz des fortgeschrittenen Verschleißes von Anfangspunkt und Endpunkt über die Zeit
- I Vergleich von Anfangs- und Endpunkt im letzten Jahr des Beobachtungszeitraums, da hier davon ausgegangen werden kann, dass der Unterschied am deutlichsten zur Geltung kommt.

In der vorliegenden Arbeit werden die Steigungen der Verschleißkurven der Anfangs-, Mittel- und Endpunkte miteinander verglichen.

### **Einschränkungen der Untersuchung**

Die Darstellung der Verschleißraten der Anfangs-, Mittel- und Endpunkte soll zeigen, wie schnell sich einzelne Bereiche des Bogens entwickeln. Nach Möglichkeit soll dadurch ein Modell abgeleitet werden, das den „Position-in-curve-effect“ beschreibt.

Diese Vereinfachung auf 3 Punkte des Bogens bringt aber auch einen hohen Genauigkeitsverlust mit sich und kann in weiterer Folge den genauen Verlauf des „Position-in-curve-effects“ nicht beschreiben. Trotz dieser Vereinfachung soll es jedoch möglich sein, zu beobachten, ob sich überhaupt eine Gesetzmäßigkeit erkennen lässt oder ob sich die einzelnen Punkte von Bogen zu Bogen unterschiedlich entwickeln.

Es gilt, dass sich die Beobachtungen nur auf das Untersuchungsgebiet beschränken. Auch wenn angenommen werden kann, dass sich unter Umständen ähnliche Muster im gesamten Gleisnetz zeigen, können einzelne Parameter die beobachteten Effekte stark beeinflussen.

### 4.3.4 Parameterstudien zu Einflussfaktoren des Schienenverschleißes

#### Methode: Spurweite - Erste Teiluntersuchung

Ziel dieser Untersuchung ist es, den Einfluss der Spurweite auf den Seitenverschleiß zu beschreiben. Der aus dem Theorieteil der Arbeit abgeleitete Schluss bezüglich dieser Untersuchung müsste sein, dass bei zunehmender Spurweite eine Verschleißminderung eintritt.

In dieser Parameterstudie werden einzelne Bögen mit unterschiedlichen Parametern ausgewählt:

- I Klasse 1 (49E1, R 260, Holzschwellen)
  - o RB1\_TUG8\_GI2\_9xxxx\_9xxxx\_R=-220
  - o RB1\_TUG8\_GI2\_9xxxx\_9xxxx\_R=179
  - o RB1\_TUG8\_GI2\_9xxxx\_9xxxx\_R=182
- I Klasse 14 (54E2, R 350HT, Holzschwellen)
  - o RB14\_TUG8\_GI1\_8xxxx\_8xxxx\_R=-262
  - o RB14\_TUG8\_GI1\_8xxxx\_8xxxx\_R=270
- I Klasse 12 (60E1, R260, Betonschwellen)
  - o RB12\_TUG8\_GI1\_11xxxx\_11xxxx\_R=-359

Die Idee dahinter ist, zu verifizieren, ob in einer Klasse (der Klasse 1), unter ähnlichen Parametern ein signifikanter Zusammenhang zwischen Spurweite und Verschleiß besteht. Anhand der anderen Bögen soll dann überprüft werden, ob der Effekt dort auch auftritt.

Für die beiden anderen Klassen wurde bewusst darauf geachtet, größere Radien zu wählen, um zu sehen, ob sich der Effekt mit dem Radius ändert.

Für alle Messfahrten der genannten Bögen soll die Spurweite in Abhängigkeit vom Seitenverschleiß dargestellt werden. Mittels Korrelationsanalyse und linearer Regressionsanalyse soll versucht werden, einen Zusammenhang zu beschreiben.

#### **Einschränkungen der Untersuchung:**

Da es erst einmal nur darum geht, zu erfassen, ob sich die Auswirkung der Spurweite auf das Verschleißverhalten überhaupt erkennen lässt, bzw. diese gegenüber anderen Einflussfaktoren überhaupt signifikant ist, ist es aus Sicht des Autors ausreichend, den Zusammenhang, so dieser vorhanden ist, vorerst linear zu beschreiben. Zeigt sich, dass der Zusammenhang signifikant ist, müssen weitere Studien angestellt werden, um diesen genauer zu beschreiben.

### Methode: Spurweite - Zweite Teiluntersuchung

In einer zweiten Untersuchung soll die Verschleißrate für den 45° Seitenverschleiß (W3a) in Abhängigkeit der über die Einsatzdauer der Schiene gemittelten Spurweite dargestellt werden. Dies soll für mehrere Bogenklassen durchgeführt werden.

#### **Einschränkungen der Untersuchung:**

Da die Spurweiten über die Jahre gemittelt sind, geht eine etwaige Vergrößerung oder Verkleinerung der Spurweite nicht in die Untersuchung ein. Diese Untersuchung kann somit nur zeigen, wie sich eine im Schnitt große oder kleine Spurweite auf den Verschleiß auswirkt, nicht aber wie sich eine Vergrößerung auswirkt.

### Methode: Spurweite - dritte Teiluntersuchung

Zweck dieser Untersuchung ist es, eine eingebaute Spurerweiterung auf ihre Wirksamkeit zu überprüfen. Hierfür wird im Diagramm die Verschleißrate des 45°-Seitenverschleißes (W3a) über die bei Schieneneinbau vorhandene Spurerweiterung aufgetragen.

#### **Einschränkungen der Untersuchung**

Tritt in den untersuchten Bögen eine Einspielphase, also ein verstärkter Verschleiß nach Schieneneinbau auf, kann diese die Ergebnisse verfälschen. Solche Bögen dürfen also nicht für die Untersuchung herangezogen werden.

### Methode: Längsneigung

Diese Untersuchung soll zeigen, wie stark sich die Längsneigung auf den Verschleiß auswirkt. Dabei sollen möglichst idente Bögen, bei denen nur die Längsneigung variiert, verglichen werden. Es sollte sich somit zeigen, welche Auswirkung die Längsneigung auf den Verschleiß hat.

#### **Einschränkung der Untersuchung**

Es bleiben unbekannte Parameter, wie unterschiedliche Traktion oder eine unterschiedliche Bogenfolge, welche einen beträchtlichen Einfluss haben können. Auf Grund der begrenzten Anzahl von zur Verfügung stehenden Bögen muss sich also nicht zwangsläufig ein Zusammenhang ergeben.

## 4.4 Untersuchung zur Auswirkung der Installation von Schienenschmieranlagen auf das Verschleißverhalten in einem Bogen

### 4.4.1 Verschleißreduktion durch Einbau einer stationären Schmieranlage

#### Methode:

Nachdem die Untersuchungen zum Verschleißverhalten von Schienen abgeschlossen sind, soll diese Untersuchung die Wirksamkeit der Schienenflankenschmierung klären. Dabei soll das Verschleißverhalten der Schienen vor Einbau der Schmieranlage mit dem Verschleißverhalten der Schienen nach Einbau der Schmieranlage erfolgen.

Für diese Untersuchung geeignete Bögen müssen also folgende Kriterien erfüllen:

- I Der Zeitraum zwischen Schieneneinbau und Schmieranlageneinbau soll möglichst groß sein und nicht parallel erfolgt sein.
- I Der Zeitraum zwischen Schmieranlageneinbau und Schienenausbau bzw. einer Reprofilierung soll ebenfalls möglichst groß sein, damit eine möglichst lange Beobachtungszeit der Schiene gegeben ist.
- I Beide Wachstumsraten des 45°-Seitenverschleißes (W3a) müssen sowohl vor als auch nach Einbau der Schmieranlage einem klaren Verhalten folgen, das mittels statistischer Tests als signifikant beschrieben werden kann.
- I Im Verschleißverhalten der Schienen darf sich keine Einspielphase oder ähnliches bemerkbar machen, weil diese das Ergebnis verfälschen würde.

Da ein lineares Verschleißverhalten erwartet wird, wird versucht mit Hilfe der linearen Regressionsanalyse eine passende Verschleißkurve einzupassen. Ein anschließender F-Test soll das Signifikanzniveau der eingepassten Kurve überprüfen.

Aus der Gegenüberstellung der Verschleißraten kann anschließend die Verschleißreduktion dargestellt werden. Abschließend soll ein gepaarter t-Test durchgeführt werden um zu zeigen, ob die Schienenschmierung einen statistisch signifikanten Vorteil bringt (H1-Hypothese) oder ob sie keine Auswirkung zeigt (H0-Hypothese).

### **Einschränkungen der Untersuchung**

Da die Untersuchung auf Messwagendaten beruht und vor allem auf Grund der fehlerhaften Stationierung Ungenauigkeiten entstehen, kann mit diesem Verfahren nicht die Genauigkeit von händischen Messungen erreicht werden.

Kurze Beobachtungszeiten der Schienen von wenigen Megatonnen Belastung beeinträchtigen die Genauigkeit der Analysen.

## 4.4.2 Untersuchung zur Wirkungslänge des Schmiermittels

### Methode:

Mit Hilfe dieser Untersuchung soll versucht werden, die Wirkungslänge einer Schmieranlage abzuschätzen. Dabei sollen folgende Vereinfachungen getroffen werden:

- I Die Abnahme der Verschleißreduktion mit zunehmender Entfernung zur Schmieranlage verhält sich linear.
- I Der sogenannte Position-in-curve-effect verläuft ebenfalls linear

Die folgende Skizze stellt das Prinzip der Untersuchung dar:

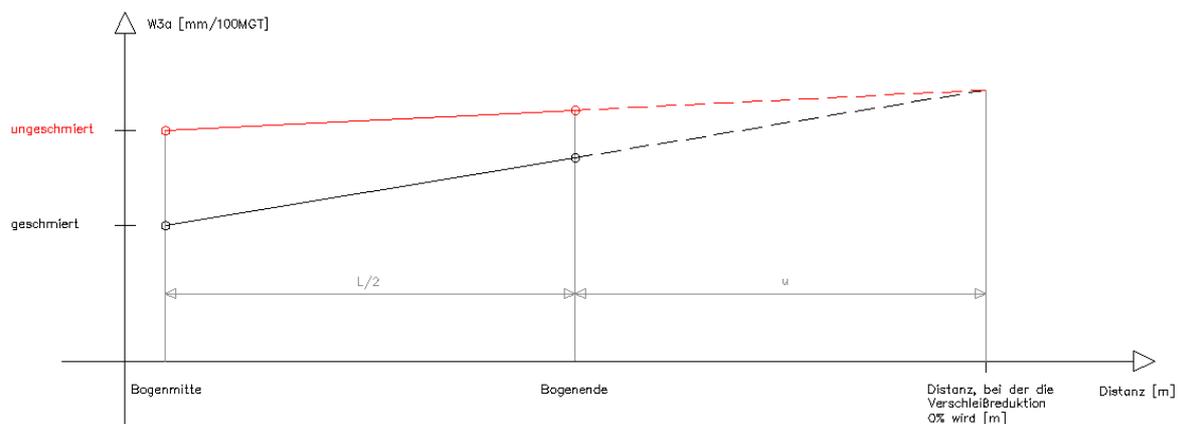


Abbildung 48: Untersuchung zur Wirkungslänge der Schmiermittel

Für alle auswertbaren Bögen mit Schmieranlage soll auf Basis der Verschleißraten (geschmiert und ungeschmiert) die Wirkungslänge ermittelt werden. Dabei wird durch die Werte der jeweiligen Verschleißraten in Bogenmitte und an Bogenende (rote bzw. schwarze Punkte) eine Gerade gelegt. Es musste die Verschleißrate der Bogenmitte herangezogen werden, da für den Bogenanfang zu wenig brauchbare Ergebnisse existieren. Der Schnittpunkt beider Geraden ergibt jenen Punkt, an dem die Verschleißreduktion auf Grund des Schmiermittels 0 wird.

Mathematisch lässt sich das wie folgt beschreiben:

- I Rote Gerade (ungeschmiert):
  - o  $y_1 = k_1 \cdot x + d_1$
- I Schwarze Gerade (geschmiert):
  - o  $y_2 = k_2 \cdot x + d_2$

Die jeweilige Steigung „k“ der Gerade ergibt sich aus der halben Bogenlänge „L/2“ und den ermittelten Verschleißraten. Die beiden Konstanten „d<sub>1</sub>“ und „d<sub>2</sub>“ beschreiben die Verschleißrate am Bogenanfang.

Schneidet man die beiden Geraden, so erhält man für die x-Koordinate des Schnittpunktes:

$$\text{I} \quad x = \frac{d_2 - d_1}{k_1 - k_2}$$

Die Herleitung ist trivial und wird hier nicht extra beschrieben. Die Distanz x entspricht also der halben Bogenlänge plus der unbekannt Distanz „u“ der Skizze.

Um die wahre Distanz zur Schmieranlage zu berechnen, müssen nun noch die halbe Bogenlänge bis zum Bogenanfang und die Distanz von Bogenanfang zur Schmieranlage addiert werden.

$$\text{I} \quad \text{Wirkungslänge} = x + L/2 + \text{Distanz (Bogenanfang bis Schmieranlage)}$$

## Einschränkungen der Untersuchung

Schon der Vergleich von Messfahrten zweier verschiedener Bögen zeigt, wie unterschiedlich sich einzelne Bereiche eines Bogens entwickeln können.

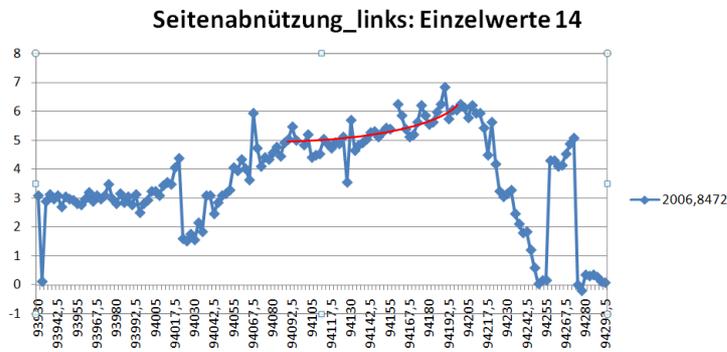


Abbildung 49: Ergebnis einer Messfahrt

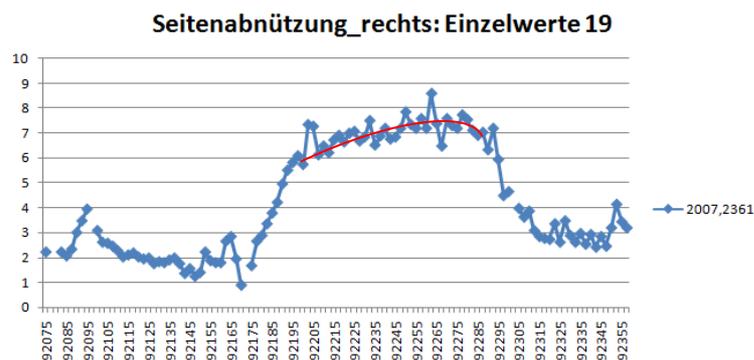


Abbildung 50: Ergebnis einer Messfahrt

Die unterschiedliche Ausprägung des Verschleißes in Bögen und die Tatsache, dass auch in vorhergehenden Untersuchungen kein ausreichendes Modell entwickelt werden konnte, führen dazu, dass mit dem linearen Ansatz das Auslangen gefunden werden muss. Schon allein aus dieser Tatsache wird klar, dass die Methode dieser Untersuchung bestenfalls grobe Richtwerte über die Wirkungslänge von Schmiermitteln liefern kann.

Weiters liegt dieser Untersuchung die Annahme zu Grunde, dass sich der Radius des Bogens nie verändert. Dies wird jedoch akzeptiert, da dies ein konservatives Ergebnis erwarten lässt. Natürlich trifft dies nur zu, sofern sich der Bogenradius nicht verringert. Fraglich bleibt jedoch, ob eine Extrapolation des Verschleißverhaltens über das Bogenende hinaus richtige Ergebnisse liefern kann. Letztlich werden die Ergebnisse zeigen, wie geeignet diese Methode zur Bestimmung der Wirkungslänge von Schmiermitteln ist.

### 4.4.3 Verlängerung der Liegedauer von Schienen auf Grund stationärer Schienenschmierung

#### Methode:

Anhand dieser Untersuchung soll die Verlängerung der Liegedauer von Schienen auf Grund des Einbaus stationärer Schienenflankenschmieranlagen ermittelt werden. Basis für diese Berechnung sind die Ergebnisse der Untersuchung aus Kapitel 3.4.1.

In diese Untersuchung soll nur der verursachte 45°-Seitenverschleiß (W3a) eingehen. Reprofilierungsmaßnahmen und Maßnahmen auf Grund anderer Schienenfehler gehen nicht in die Berechnung ein.

Die Verschleißlimits wurden bereits in Kapitel 2.3.2 dargestellt und betragen für die in dieser Untersuchung vorkommenden Schienen:

- I 18 mm, bzw.
- I 20 mm für Radien unter 300m und einer Liegedauer kleiner 10 Jahren [15]

Für jeden der in Kapitel 3.4.1 untersuchten Bögen soll also

- a) die fiktive Liegedauer, unter der Annahme, dass keine Schmieranlage eingebaut wurde, berechnet werden.
- b) die fiktive Liegedauer, unter der Annahme, dass eine Schmieranlage eingebaut wurde, berechnet werden.

Unter Liegedauer wird die Zeit bis zum Erreichen des Verschleißlimits verstanden. Für die Berechnung soll das Bogenende herangezogen werden, da dieses in der Regel am schnellsten verschleißt und somit maßgebend für einen Schientausch ist.

Die folgende Abbildung stellt das Schema der Berechnung dar:

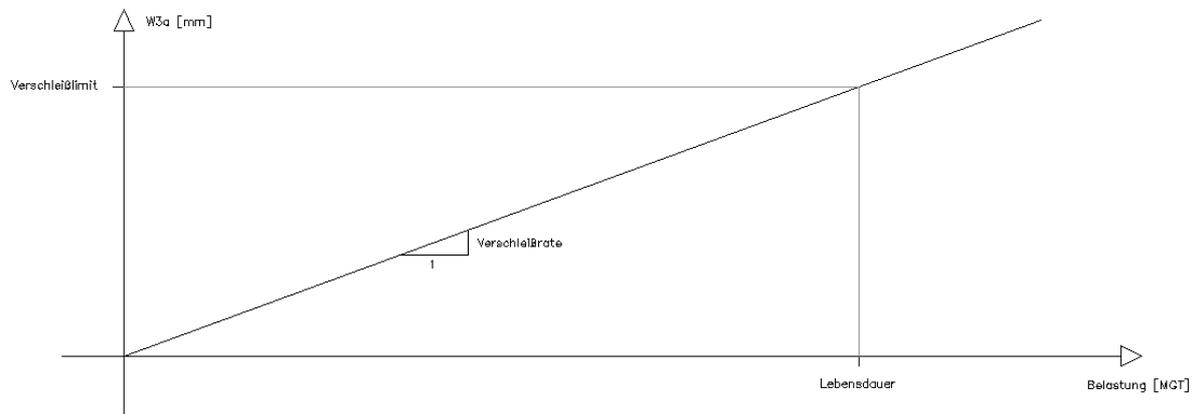


Abbildung 51: Lebensdauerberechnung

Die Lebensdauer  $t$  [MGT] errechnet sich also folgendermaßen:

$$t \text{ [MGT]} = \frac{\text{Verschleißlimit [mm]}}{\text{Verschleißrate} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{MGT}} \right]}$$

### Einschränkungen der Untersuchung

Diese Untersuchung basiert rein auf der Verschleißreduktion durch Schienenschmierung und bezieht keine Reprofilierungsmaßnahmen oder andere Schienenfehler mit ein. Dies kann natürlich zu starken Veränderungen der Lebensdauer führen. Vor allem die Ausbildung von Spalling/Flaking, die teilweise in Bögen mit Schienenschmieranlagen in der Schweiz beobachtet wurde, kann in dieser Masterarbeit nicht untersucht werden und bleibt somit ein weiterer Unsicherheitsfaktor dieser Untersuchung. [32]

Weiters kann eine zukünftige Zunahme der Achslasten oder der Belastung zu erheblichen Änderungen der Lebensdauer führen. Alle für die vorangegangene Untersuchung getroffenen Vereinfachungen und Unsicherheiten fließen durch die Übernahme der Verschleißraten auch in diese Untersuchung mit ein.

Die Ergebnisse beziehen sich nur auf die untersuchten Bögen und können nicht auf andere Bereiche des Netzes umgelegt werden.

## 4.5 Untersuchung zur Auswirkung von Schienenschmierung auf das Verschleißverhalten mittels Vergleich mit Referenzbögen

### 4.5.1 Methode

Die Idee dieser Untersuchung ist es, das Verschleißverhalten von Bögen mit Schmieranlage mit dem Verschleißverhalten von ungeschmierten Referenzbögen zu vergleichen. Dabei sollen die Bögen in Klassen eingeteilt werden. Jede Klasse soll hinsichtlich der bekannten Einflussparameter idente Bögen enthalten. Diese Parameter sind:

- I Radius
- I Schienengüte
- I Schienenprofil
- I Schwellentyp
- I Längsneigung
- I Spurweite
- I Fahrtrichtung (Gleis 1 oder 2)

Im Idealfall kann dann für eine Klasse von Bögen mit den oben genannten Charakteristika eine Aussage über das Verschleißverhalten getroffen werden und anschließend die Verschleißreduktion dargestellt werden.

### **Einschränkungen der Untersuchung**

Wie sich bereits in den Expertengesprächen zeigte, können nicht alle Aspekte erfasst werden. Es kann beispielsweise in manchen Bögen dazu kommen, dass sie mit einer geringeren Geschwindigkeit als der Entwurfsgeschwindigkeit befahren werden. Dies kann das Verschleißverhalten stark ändern. Weiters bleibt der unbekannte Parameter der Traktion bzw. des Radschlupfes, der hier nicht untersucht werden kann.

Die Untersuchung wird zeigen, ob mit den vorhandenen 48 Schmieranlagen genug Datenmaterial vorhanden ist, um für die einzelnen Klassen pauschale Aussagen zum Verschleißverhalten treffen zu können.

## 5 Auswertung

### 5.1 Verschleißverhalten

#### 5.1.1 Schwankungen der Messwerte- Sinuslauf

Es zeigt sich, dass in allen beobachteten Bögen ein **wellenförmiger Verlauf** der Verschleißwerte vorliegt. Dieser entspricht nicht exakt einer Sinusschwingung, was auf externe Schwingungsanregungen wie z.B. Stöße zurückzuführen sein dürfte. Auf Grund des verwendeten Messsystems, welches alle 2,5 m misst, erscheint der Verlauf sehr gezackt.

Die Wellenlänge beträgt in allen betrachteten Abschnitten **ca. 7 bis 15 m**. Die Amplitude ist sehr stark unterschiedlich ausgeprägt und kann in Extremfällen mehr als einen Millimeter betragen. Da hier nur gezeigt werden soll, dass es notwendig ist, die Messpunkte Bogenanfang, Bogenmitte und Bogenende über den Median zu mitteln, wird dem „Sinuslauf“ hier keine weitere Aufmerksamkeit mehr geschenkt.

Beispielhaft wird hier eine Messfahrt dargestellt, die restlichen Messergebnisse sind dem Anhang (CD-ROM) angefügt:

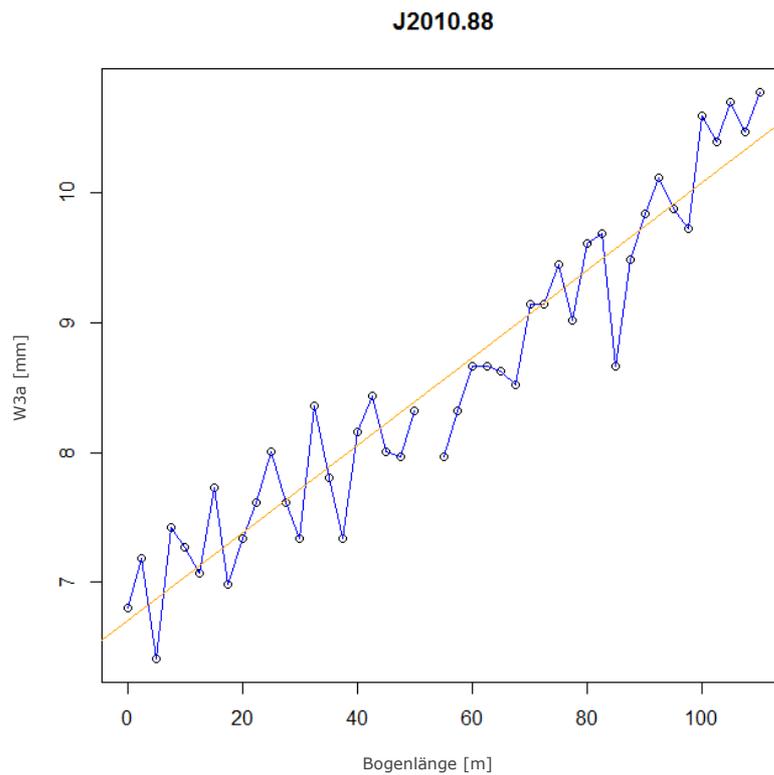


Abbildung 52: Darstellung einer Messfahrt

**Ergebnisse:**

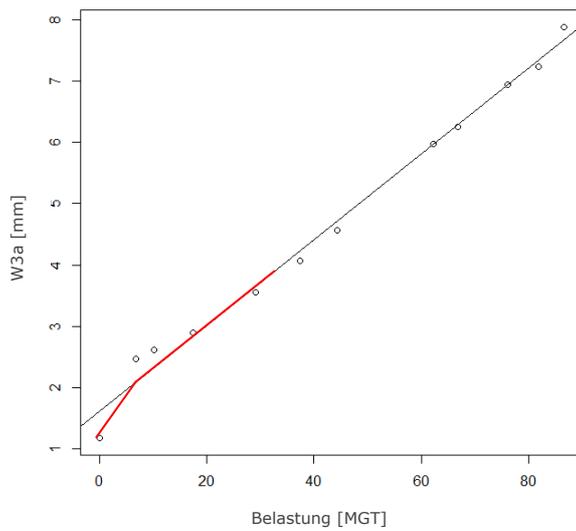
- I Die Bildung des Medians über größere Bereiche des Bogens ist notwendig, weil die Messwerte lokal stark schwanken.
- I Die Wellenlänge schwankt zwischen 7 und 15 Metern
- I Die Amplitude kann in Extremfällen mehr als 1 Millimeter betragen.

## 5.1.2 Änderung des Verschleißverhaltens im Laufe der Zeit

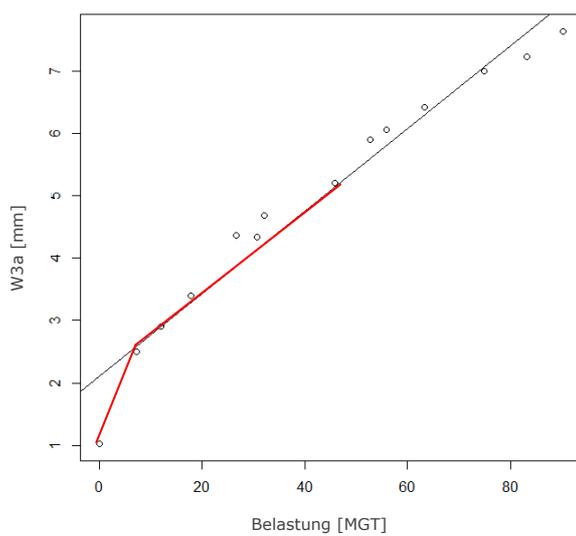
### Einspielphase

Von allen untersuchten Referenzbögen stellte sich in vier Bögen eine Einspielphase ein.

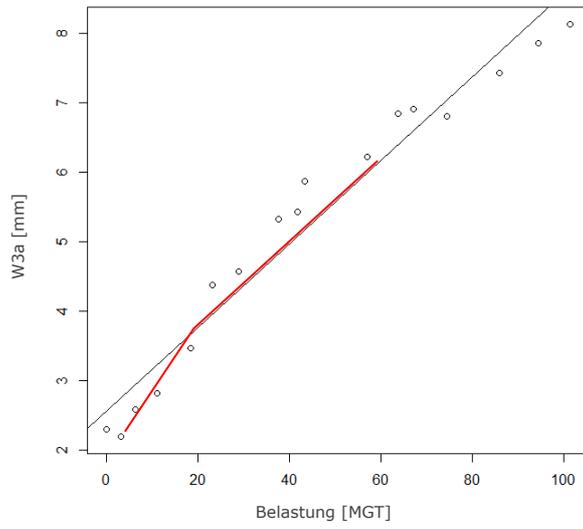
#### I RB5\_TUG8\_GI1\_9xxxx\_9xxxx\_R=203



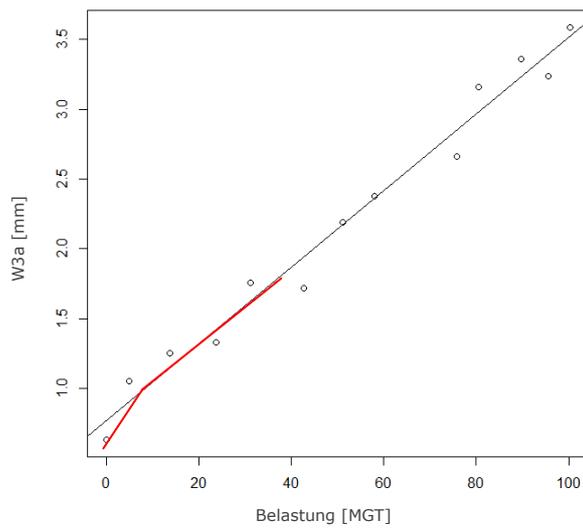
#### I RB5\_TUG8\_GI1\_9xxxx\_9xxxx\_R=192



I RB5\_TUG8\_GI1\_9xxxx\_9xxxx\_R=189



I RB14\_TUG8\_GI1\_8xxxx\_8xxxx\_R=-262



## Schleifarbeiten

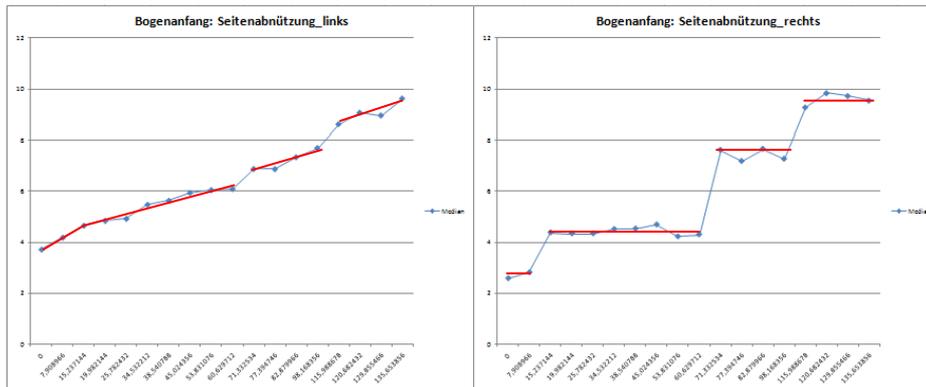


Abbildung 53: Erkennung von Schleifarbeiten

Wie bereits aus dieser einen Abbildung ersichtlich wird, sind Schleifarbeiten nicht immer als Sprung erkenntlich. Nach der Methode, wie sie in Kapitel 3.3.3. beschrieben wird, müsste sich bereits nach dem zweiten Messpunkt ein Sprung im Verlauf zeigen. Dies kann nun bedeuten, dass an jener Stelle entweder nur an der Innenschiene Schleifarbeiten durchgeführt wurden oder dass die Schleifarbeiten an der Außenschiene sehr geringe Auswirkungen auf den 45°-Seitenverschleiß haben. Umgekehrt aber muss ein Knick im Verlauf nicht zwangsläufig kleinere Schleifmaßnahmen bedeuten, da dieser auch auf andere Ursachen zurückzuführen sein kann. Die Methode ist somit nur bedingt geeignet, um die Auswirkungen von Schleifarbeiten zu beschreiben und stellt somit nur eine Hilfe dar, Schleifarbeiten zu erkennen. Zumindest aber wird es dadurch möglich, Schleifarbeiten mit deutlicher Auswirkung auf den Seitenverschleiß zu erkennen. Schleifarbeiten wurden an nahezu allen Bögen erkannt, eine Gesetzmäßigkeit konnte aber nicht gefunden werden.

## Diskussion der Ergebnisse

Mit Ausnahme des Bogens RB5\_TUG8\_GI1\_9xxxx\_9xxxx\_R=189 basiert die Beobachtung jedoch immer auf einem einzigen abweichenden Messpunkt. In diesen drei Fällen bleibt es nicht ausgeschlossen, dass es sich um einen Fehler handelt, der zum Beispiel aus der fehlerhaften Stationierung resultieren kann. Gerade zu Beginn der Beobachtungen ist es besonders schwierig, ohne entsprechende Software, Bogenanfang und Bogenende genau erkennen zu können.

Schleifarbeiten können nicht mit Sicherheit aus den Messergebnissen erkannt werden und stellen weiterhin eine Fehlerquelle dar. Zumindest aber können Schleifarbeiten mit größerer Auswirkung auf den Seitenverschleiß erkannt werden und somit in die zukünftigen Untersuchungen mit einfließen.<sup>2</sup>

## Ergebnisse

Dennoch ergeben sich für die Folgeuntersuchungen folgende Schlüsse:

- I Innerhalb der ersten 40 MGT Belastung kann sich eine Einspielphase einstellen. Auf dieses Faktum ist in den Folgeuntersuchungen Rücksicht zu nehmen.
- I Grobe Schleifarbeiten können erkannt werden und müssen in Folgeuntersuchungen miteinbezogen werden.
- I Schleifarbeiten, die nicht als Sprung im Verschleißbild zu erkennen sind, stellen weiterhin einen Unsicherheitsfaktor für Untersuchungen zur Verschleißrate dar.

---

<sup>2</sup> Zum Zeitpunkt der Untersuchungen war nicht bekannt, dass es bestehende Datensätze von Maschineneinsätzen gibt, in denen auch Schleifmaschinen erfasst werden. Für zukünftige Arbeiten empfiehlt es sich diese Daten heranzuziehen.

### 5.1.3 Entwicklung einzelner Punkte – Position-in-Curve-Effect

#### Ergebnisse

Die Abbildungen der nächsten Seiten zeigen die Ergebnisse dieser Untersuchung.

- I Dabei werden jeweils die Verschleißraten der Bereiche Bogenanfang, Bogenmitte und Bogenende gezeigt.
- I Es kann kein allgemein gültiges Modell zum „Position-in-curve-effect“ geliefert werden.
- I Das Bogenende weist in allen untersuchten Bögen ein höheres Verschleißwachstum auf als der Bogenanfang.
- I Für die nachfolgenden Untersuchungen muss ein lineares Modell des „Position-in-curve-effects“ ausreichend sein.

#### Diskussion der Ergebnisse

Es ist zu beobachten, dass sich der „Position-in-curve-effect“ in jedem Bogen sehr individuell ausprägt. Der einzige Zusammenhang, der beobachtet werden konnte und auch bereits aus der Literatur und Expertengesprächen bekannt war, ist, dass das Bogenende das größte Verschleißwachstum aufweist. In Klasse 13 zeigt sich beispielsweise, dass zwei annähernd idente Bögen ein völlig unterschiedliches Verschleißbild aufweisen. Gründe hierfür können in unterschiedlichen Traktion-Schlupf-Verhältnissen, in einem unterschiedlichen Schmierfilmverbrauch der Spurkranzschmierung und anderen Einflussgrößen liegen, die nicht erfasst werden können.

Es muss deshalb für weitere Untersuchungen ein lineares Modell ausreichen, um überhaupt Aussagen zum „Position-in-curve-effect“ treffen zu können. Diese Vereinfachung ist außerdem notwendig, weil im Rahmen dieser Arbeit, deren Ziel es ist, Auswirkungen der Schienenschmierung zu beschreiben, aus zeitlichen Gründen nur eine beschränkte Anzahl an Bögen untersucht werden kann.

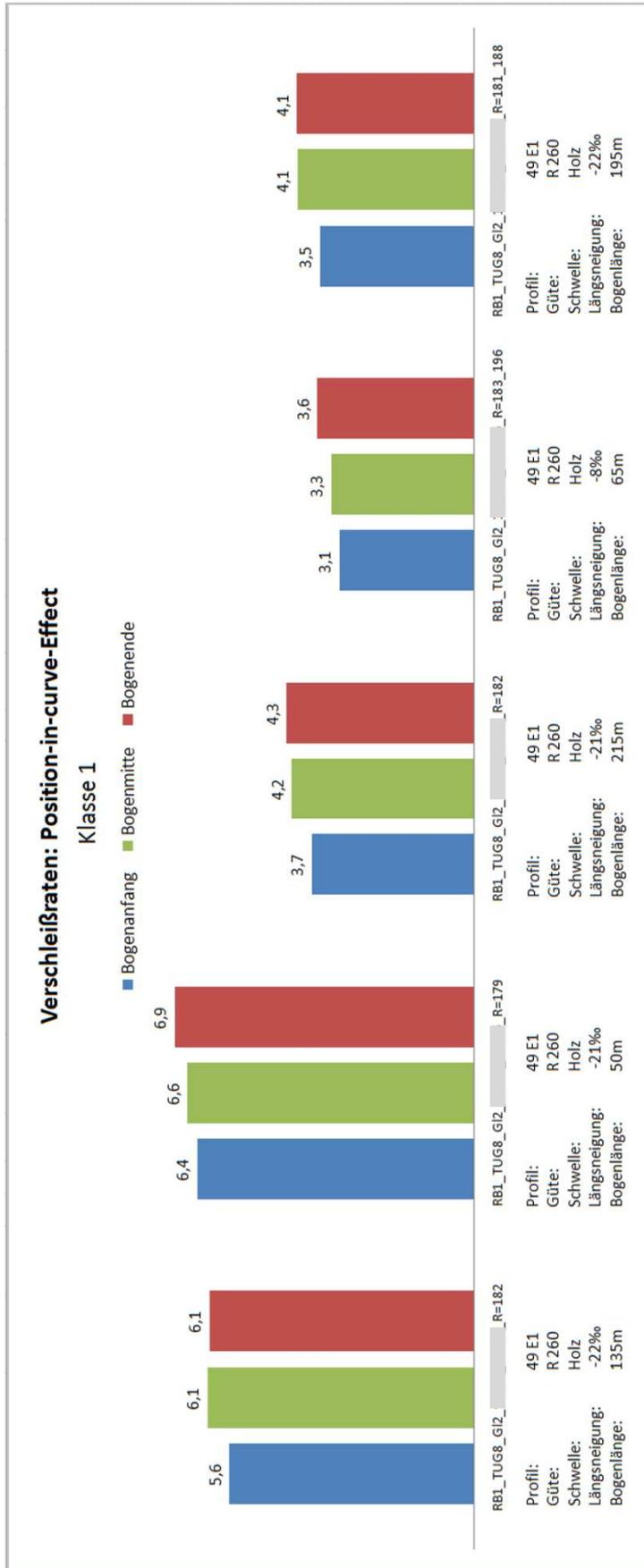


Abbildung 54: Ergebnisse Klasse 1

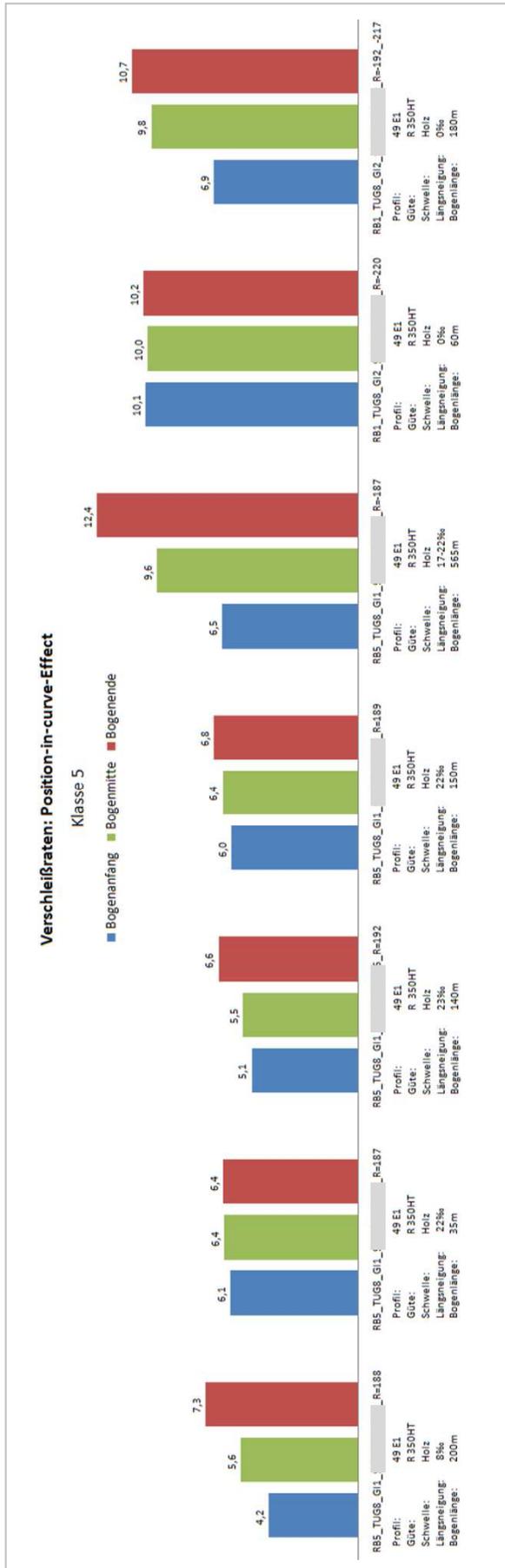


Abbildung 55: Ergebnisse Klasse 5

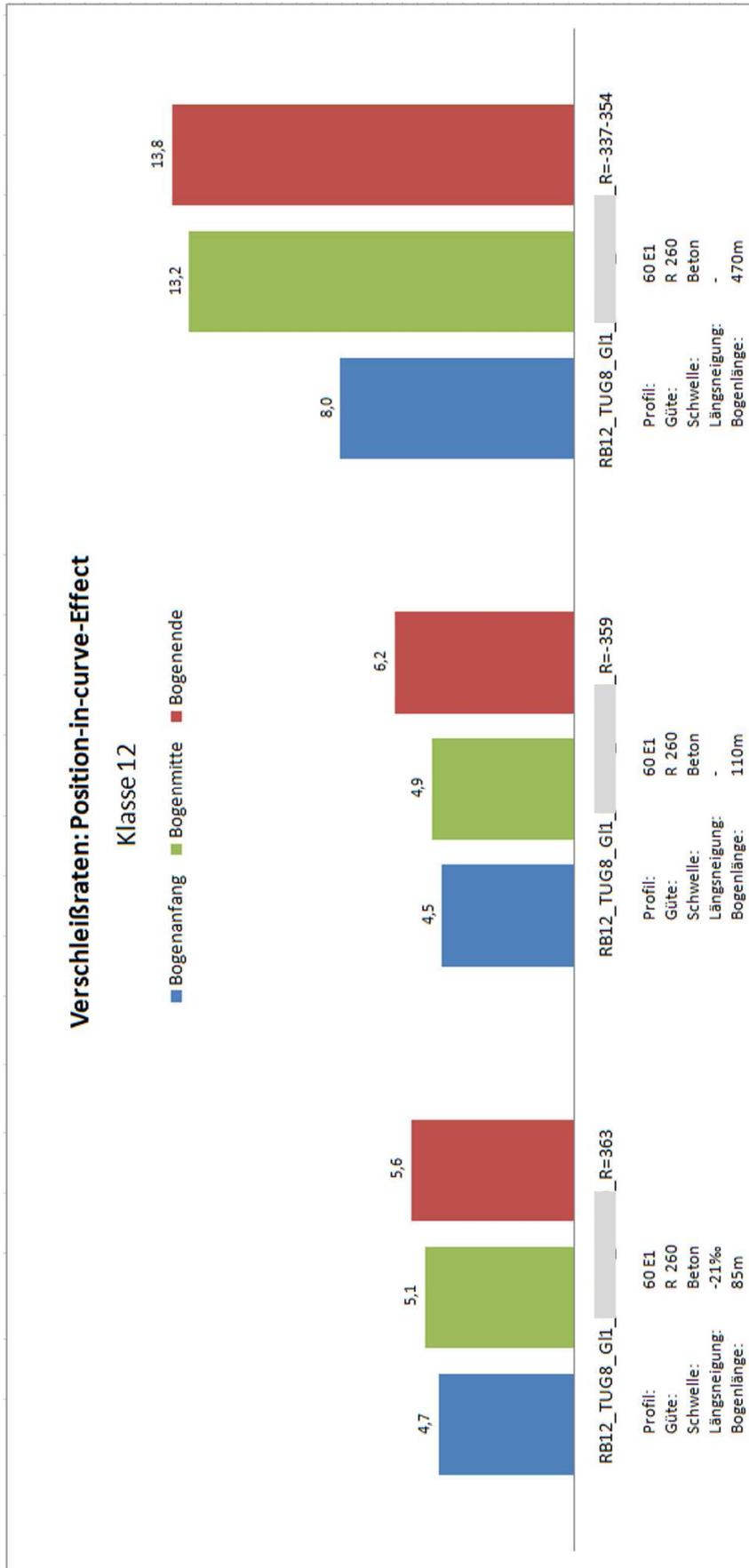


Abbildung 56: Ergebnisse Klasse 12

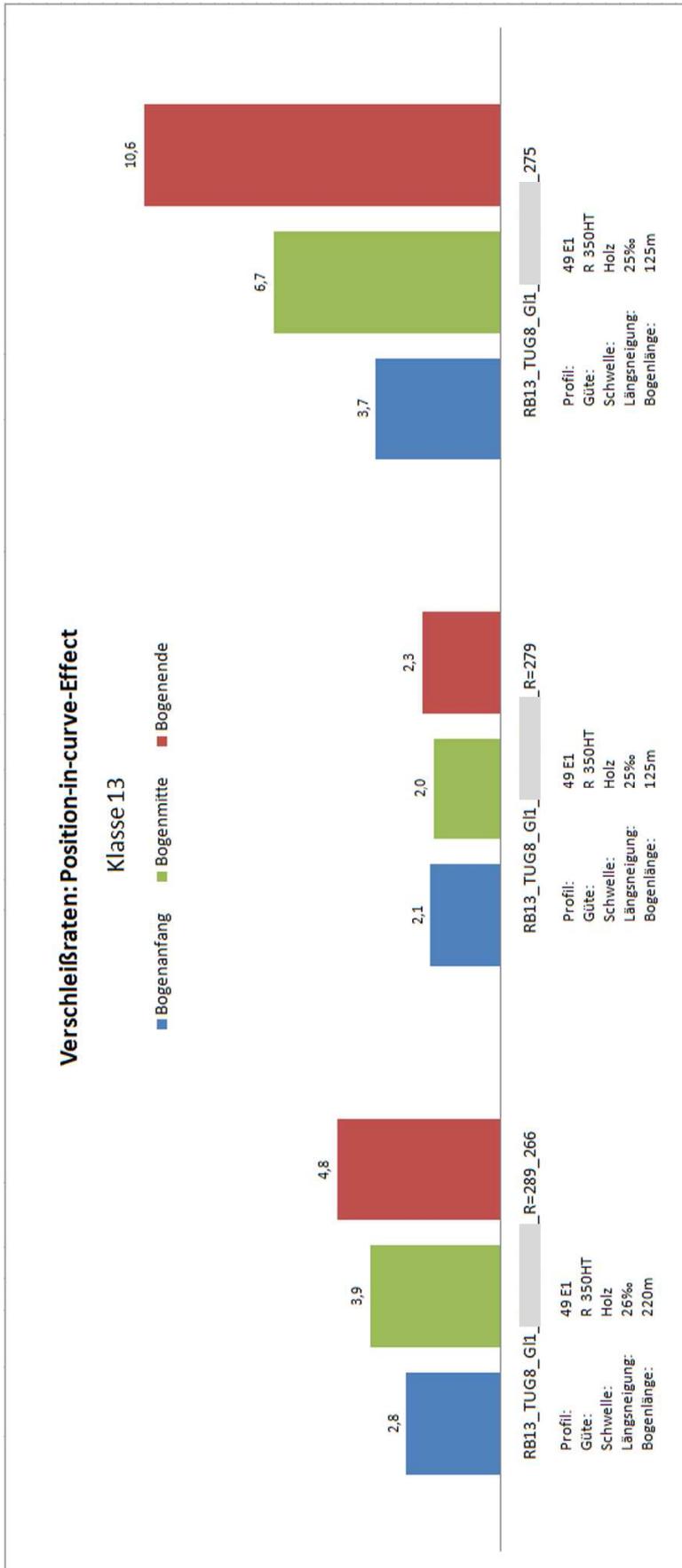


Abbildung 57: Ergebnisse Klasse 13

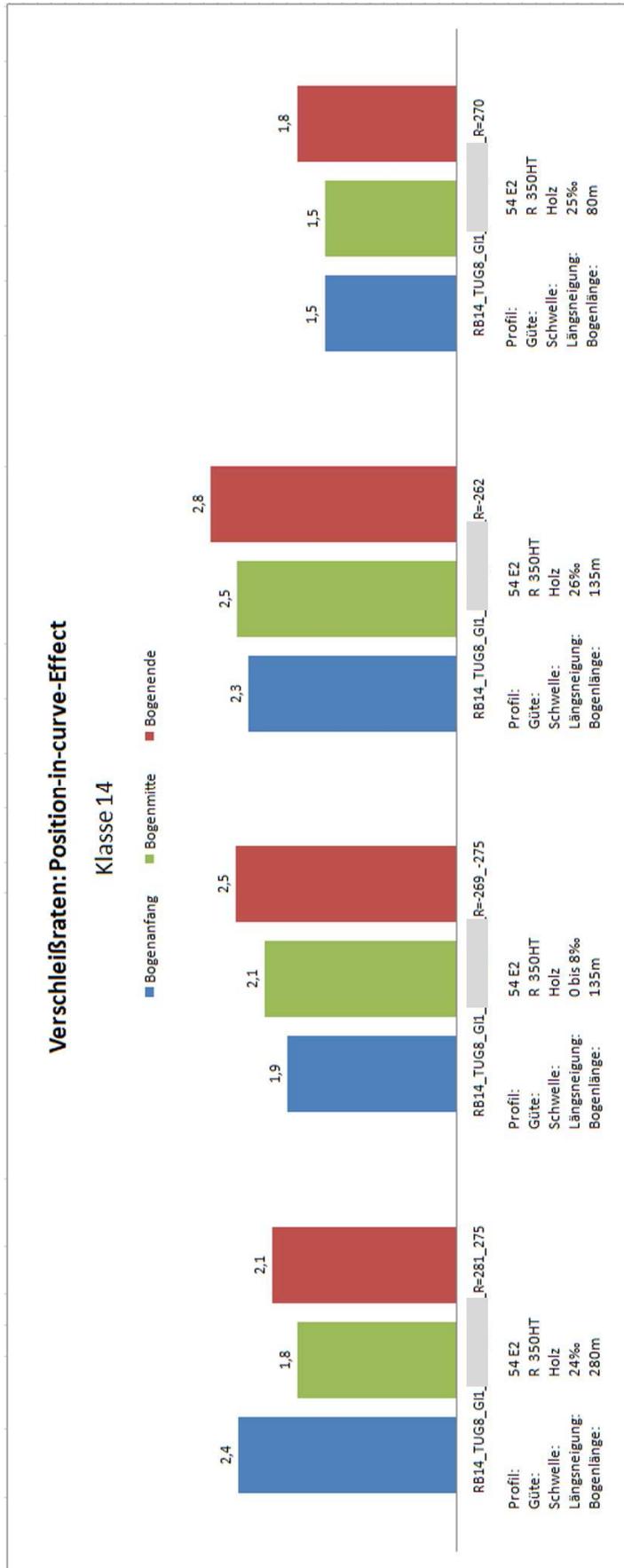


Abbildung 58: Ergebnisse Klasse 14

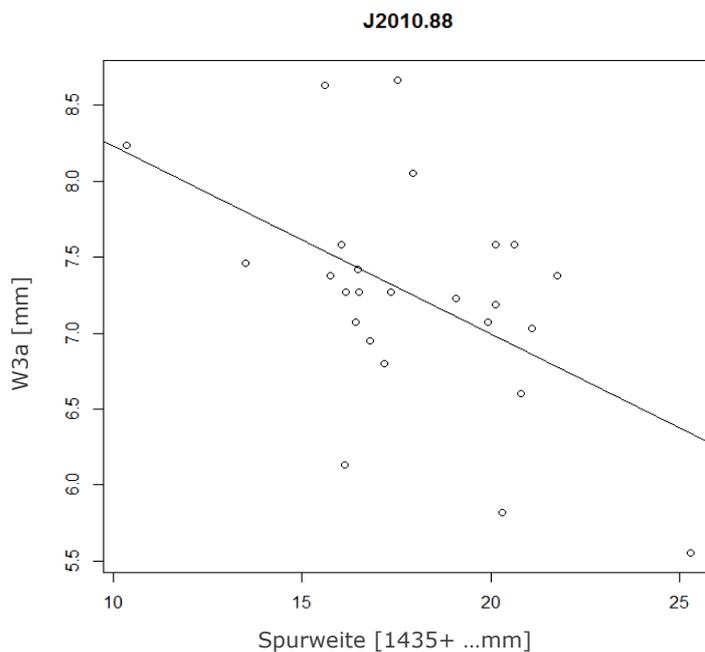
## 5.2 Parameterstudien - Das Verschleißverhalten von Schienen im engen Bogen

### 5.2.1 Spurweite - Erste Teiluntersuchung

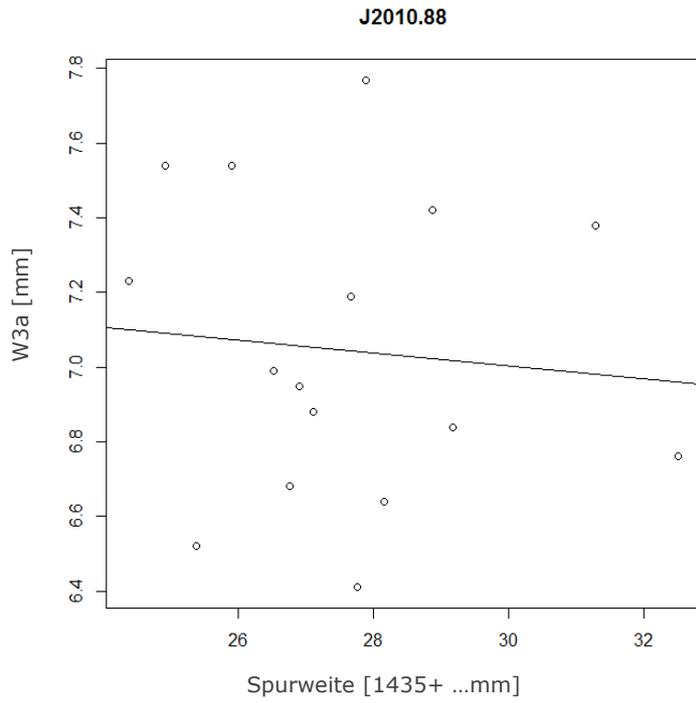
Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass teilweise Tendenzen zu einer negativen Korrelation von Spurweite und Seitenverschleiß gegeben sind, diese jedoch keinesfalls als signifikant erachtet werden können.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Teiluntersuchung im jeweilig letzten Jahr des Beobachtungszeitraumes dargestellt, da davon ausgegangen werden kann, dass dort wo der Verschleiß am größten ist, der Zusammenhang am besten zu erkennen ist:

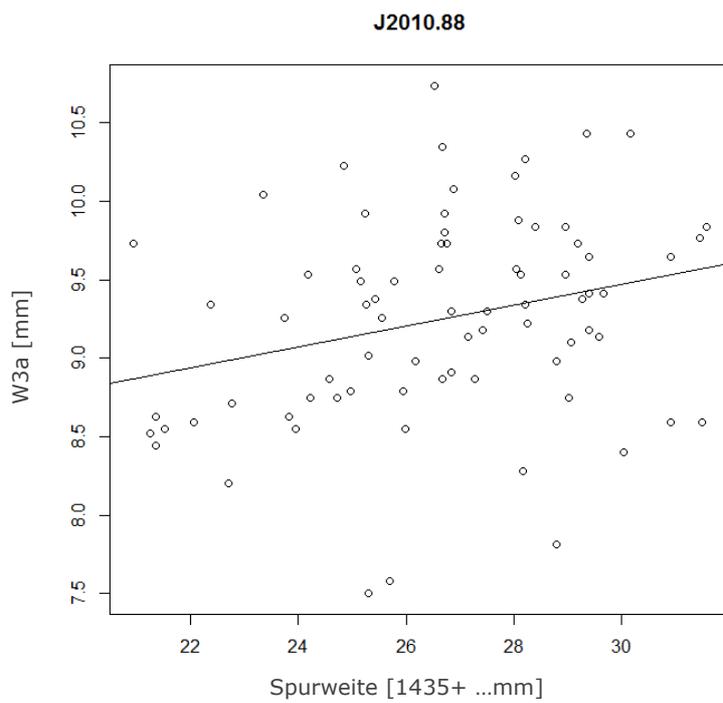
- I Klasse 1 (49E1, R 260, Holzschwellen)
  - RB1\_TUG8\_GI2\_9xxxx\_9xxxx\_R=-220



I RB1\_TUG8\_GI2\_9xxxx\_9xxxx\_R=179

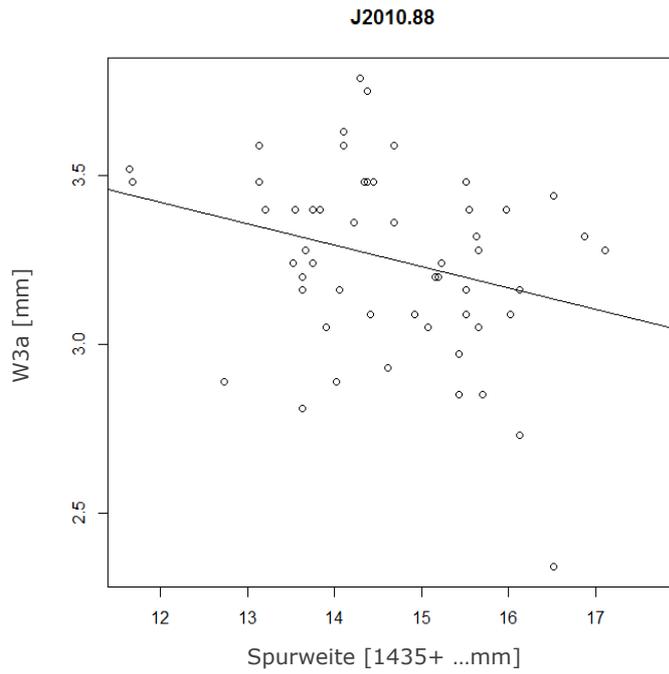


o RB1\_TUG8\_GI2\_9xxxx\_9xxxx\_R=182

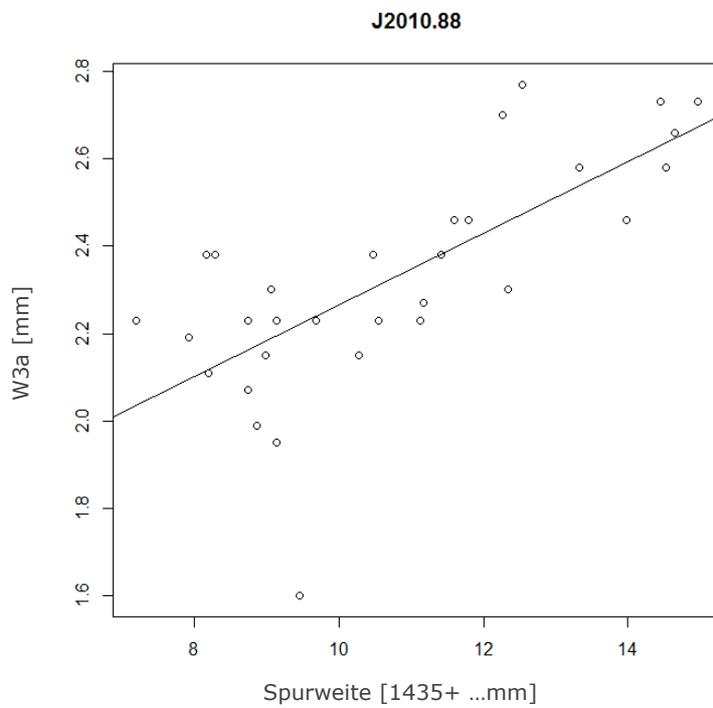


I Klasse 14 (54E2, R 350HT, Holzschwellen)

- B14\_TUG8\_GI1\_8xxxx\_8xxxx\_R=-262

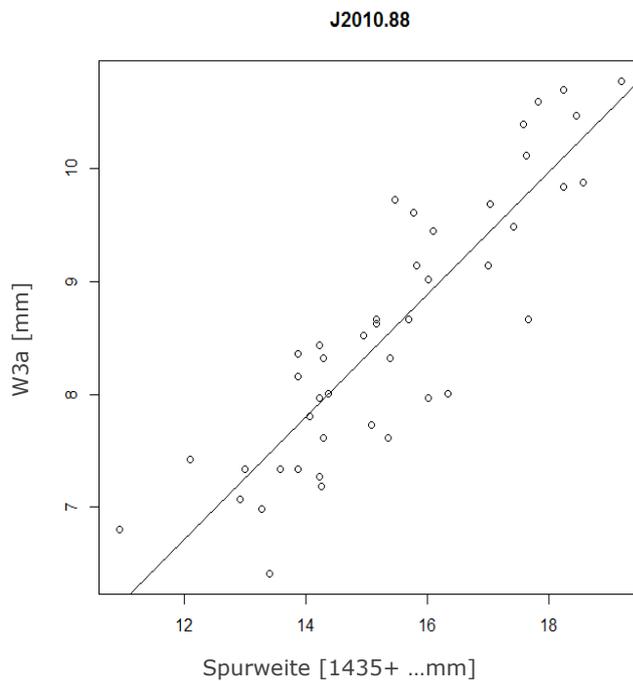


- RB14\_TUG8\_GI1\_8xxxx\_8xxxx\_R=270



I Klasse 12 (60E1, R260, Betonschwellen)

- RB12\_TUG8\_GI1\_11xxxx\_11xxxx\_R=-359



Im Fall des Bogens mit der untersuchungsinternen Bezeichnung RB12\_TUG8\_GI1\_11xxxx\_11xxxx\_R=-359 zeigte sich sogar eine positive Korrelation die laut statistischer Auswertung sogar als signifikant zu erachten ist. Da dieses Ergebnis absolut im Widerspruch zur Theorie steht wurden weitere Untersuchungen durchgeführt. Es zeigte sich, dass ein linearer Zusammenhang zwischen Spurweite und der Position im Bogen besteht. Somit ist nicht gezeigt, dass die Spurweite in diesem Bogen eine positive Korrelation mit dem Verschleiß aufweist, sondern vielmehr lässt dies die Vermutung zu, dass der „Position-in-curve-effect“ hier den Einfluss der Spurweite deutlich übersteigt. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die beschriebenen Zusammenhänge, wobei die Beschriftung „Werte“ für die Messwerte des Seitenverschleißes steht.

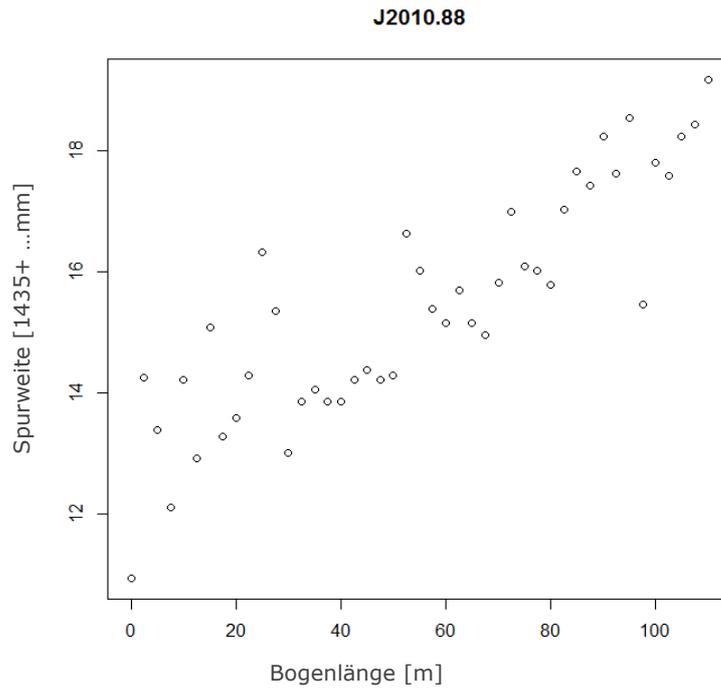


Abbildung 59: Spurweite in Abhängigkeit der Position

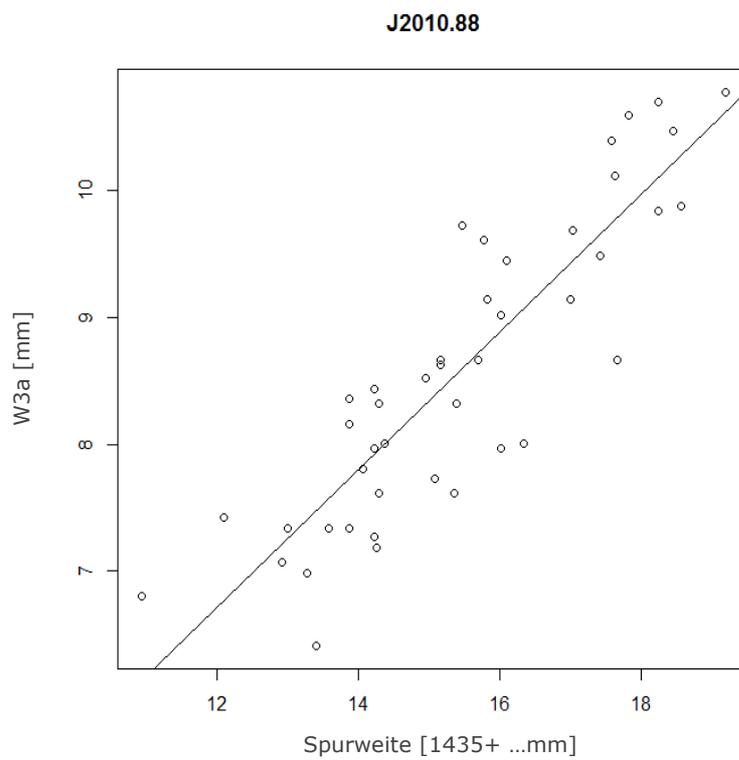


Abbildung 60: Verschleißwerte in Abhängigkeit der Spurweite

### Diskussion der Ergebnisse:

Somit konnte kein Modell für den Zusammenhang von Spurweite und 45°-Seitenverschleiß (W3a) erstellt werden. Es liegt die Vermutung nahe, dass lokale Effekte so starke Auswirkungen zeigen, dass der Effekt einer Spurerweiterung übertönt wird. Wie aus den Expertengesprächen hervorgeht, können solche Effekte, die das Verschleißverhalten einzelner Bögen unterschiedlich beeinflussen, die Folgenden sein:

- I Unterschiedliche Bogen-Historie, die zu unterschiedlich hohem Schmierfilmabbrand der Spurkranzschmierung führt.
- I Unterschiedlicher Zustand des Schotterbettes oder anderer Gleiskomponenten, die nicht in die Untersuchung mit eingehen.
- I Steifigkeitsunterschiede im Gleis auf Grund anderer Ursachen.
- I Abweichung von der Geschwindigkeit für die die Überhöhung konzipiert wurde.
- I Unterschiedliche Traktion/Schlupf

Es ist aber auch möglich, dass sich die Spurweite im Lauf der Zeit durch Komponentenverschleiß genau dort am meisten vergrößert hat, wo auch der Verschleiß am größten ist. Dies klingt schlüssig, weil sich am Ort des größten Verschleißes auch die höchsten Führungskräfte  $Y$  zeigen müssten.

Um den Zusammenhang zwischen Verschleiß und Spurweite dennoch nicht außer Acht zu lassen, wird in weiterer Folge ein Durchschnittswert der Spurweite eines Bogens mit in die Untersuchungen aufgenommen. Diese Ergebnisse werden in der Parameterstudie „Spurweite- Zweite Teiluntersuchung“ diskutiert.

Außerdem soll eine dritte Untersuchung die Wirksamkeit einer Spurerweiterung untersuchen.

## 5.2.2 Spurweite - Zweite Teiluntersuchung

### Ergebnisse:

Nachfolgend sind die Ergebnisse der zweiten Untersuchung zum Einflussfaktor Spurweite graphisch dargestellt:

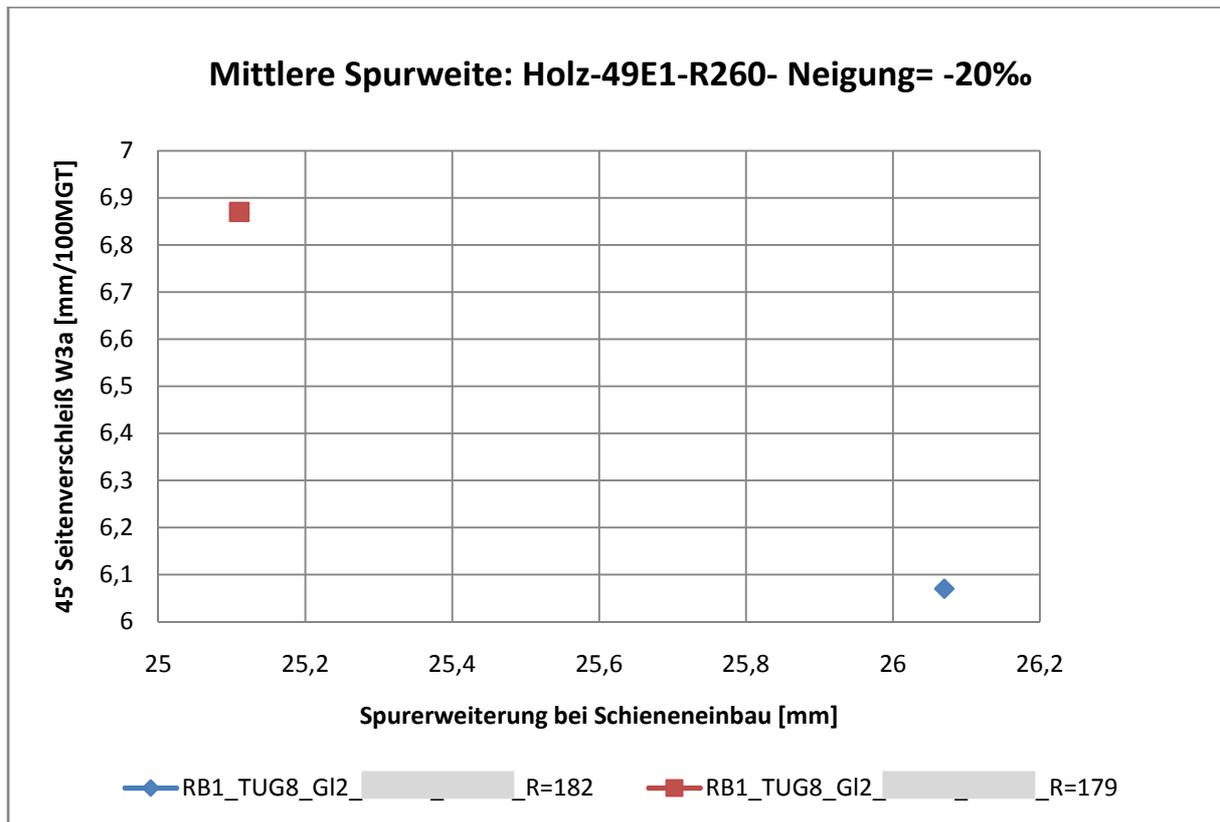


Abbildung 61: Ergebnisblatt 1 der 2. Teiluntersuchung

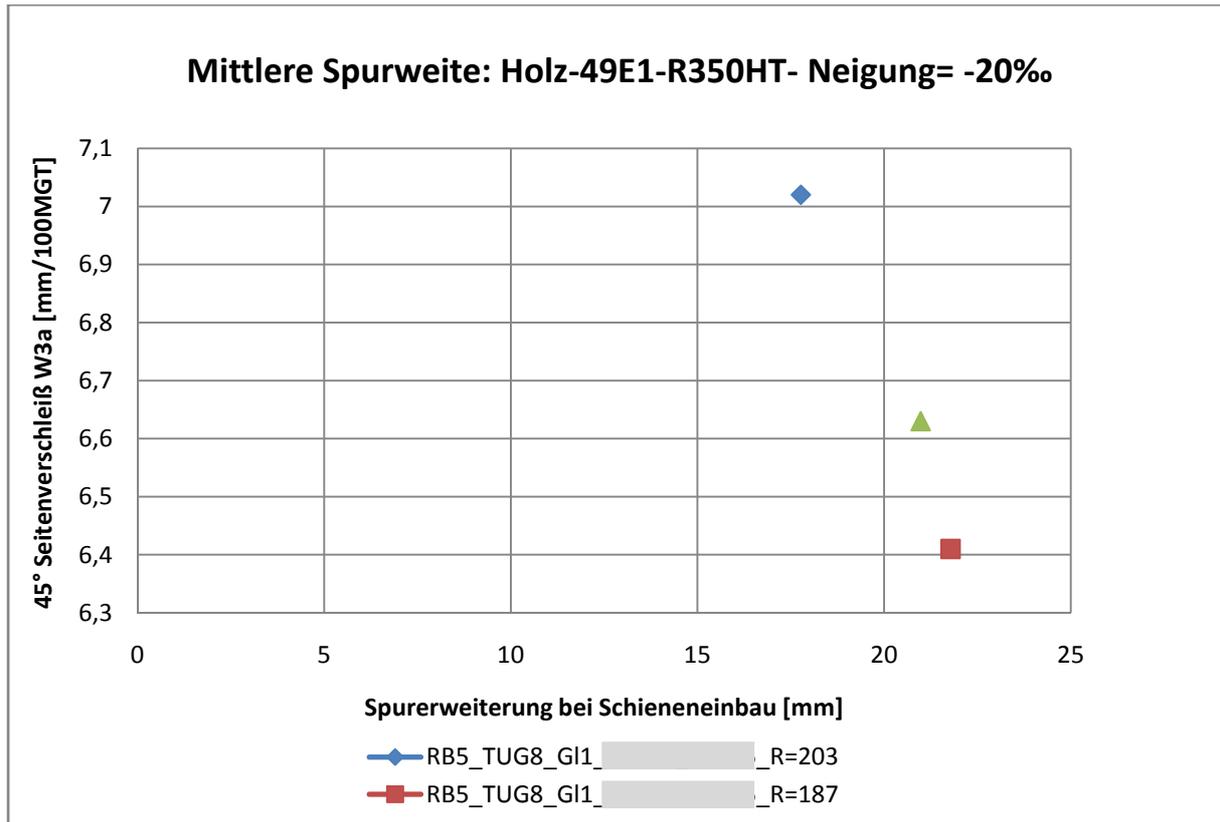


Abbildung 62: Ergebnisblatt 2 der 2. Teiluntersuchung

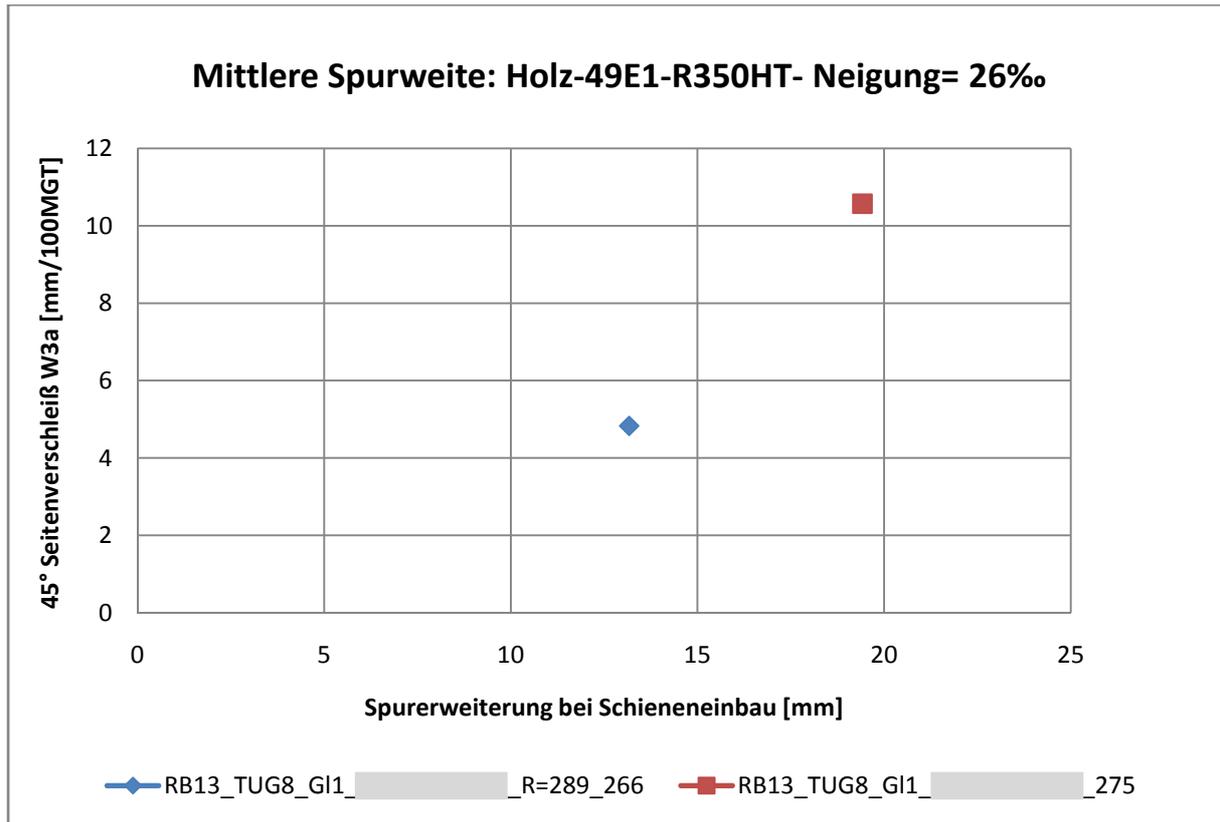


Abbildung 63: Ergebnisblatt 3 der 2. Teiluntersuchung

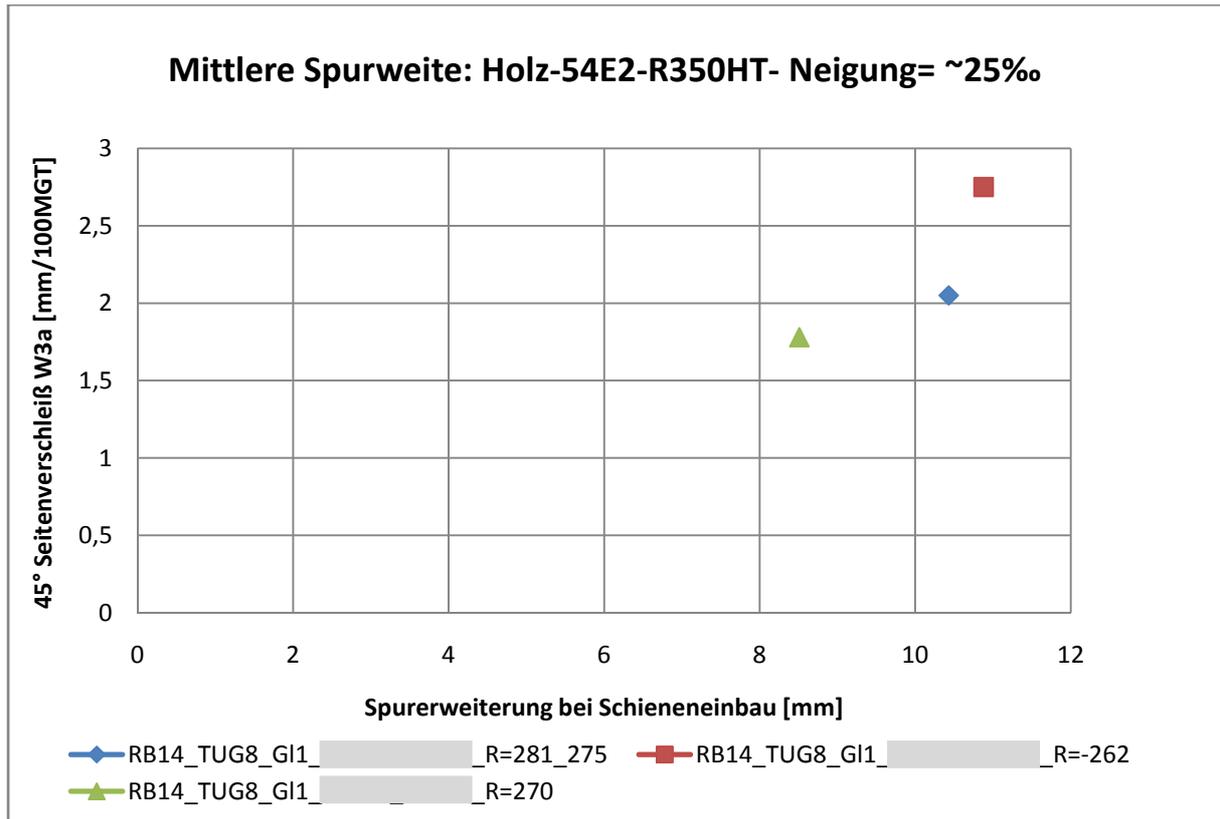


Abbildung 64: Ergebnisblatt 4 der 2. Teiluntersuchung

### Diskussion der Ergebnisse:

Auch die zweite Teiluntersuchung konnte den erwarteten Zusammenhang zwischen Spurweite und 45°-Seitenverschleiß (W3a) nicht beweisen. Wie bereits in der vorherigen Untersuchung beschrieben, liegt der Schluss nahe, dass lokale Einflüsse den Effekt einer vergrößerten Spurweite übertönen.

Ein großes Manko dieser Untersuchung ist sicherlich, die geringe Anzahl an Bögen, die über dieselben Charakteristika verfügen. So konnten für keine Untersuchungsklasse mehr als drei Bögen gefunden werden. Es lässt sich somit vermuten, dass der Effekt einer größeren Spurweite von lokalen Einflüssen übertönt wird.

### 5.2.3 Spurweite - Dritte Teiluntersuchung

#### Ergebnisse:

Nachfolgend sind die Ergebnisse der zweiten Untersuchung zum Einflussfaktor Spurweite graphisch dargestellt:

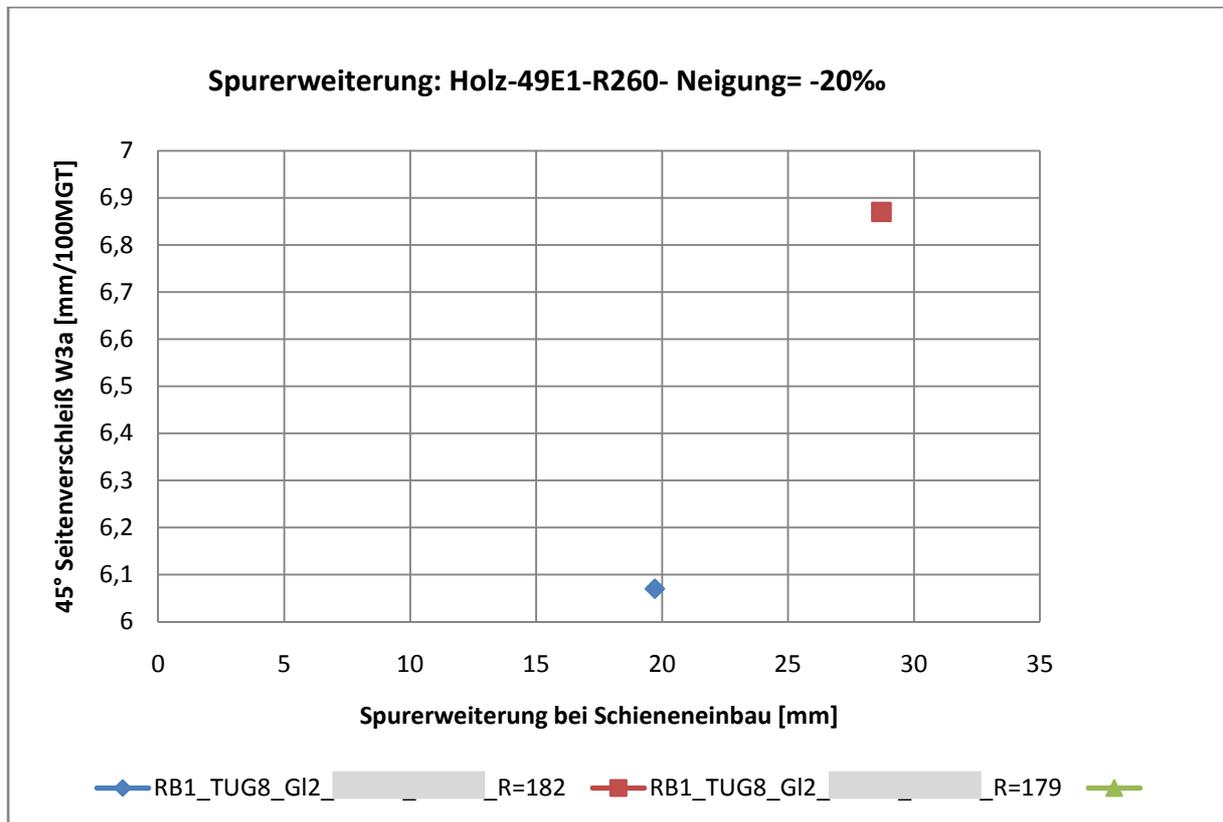


Abbildung 65: Ergebnisblatt 1 der 3. Teiluntersuchung

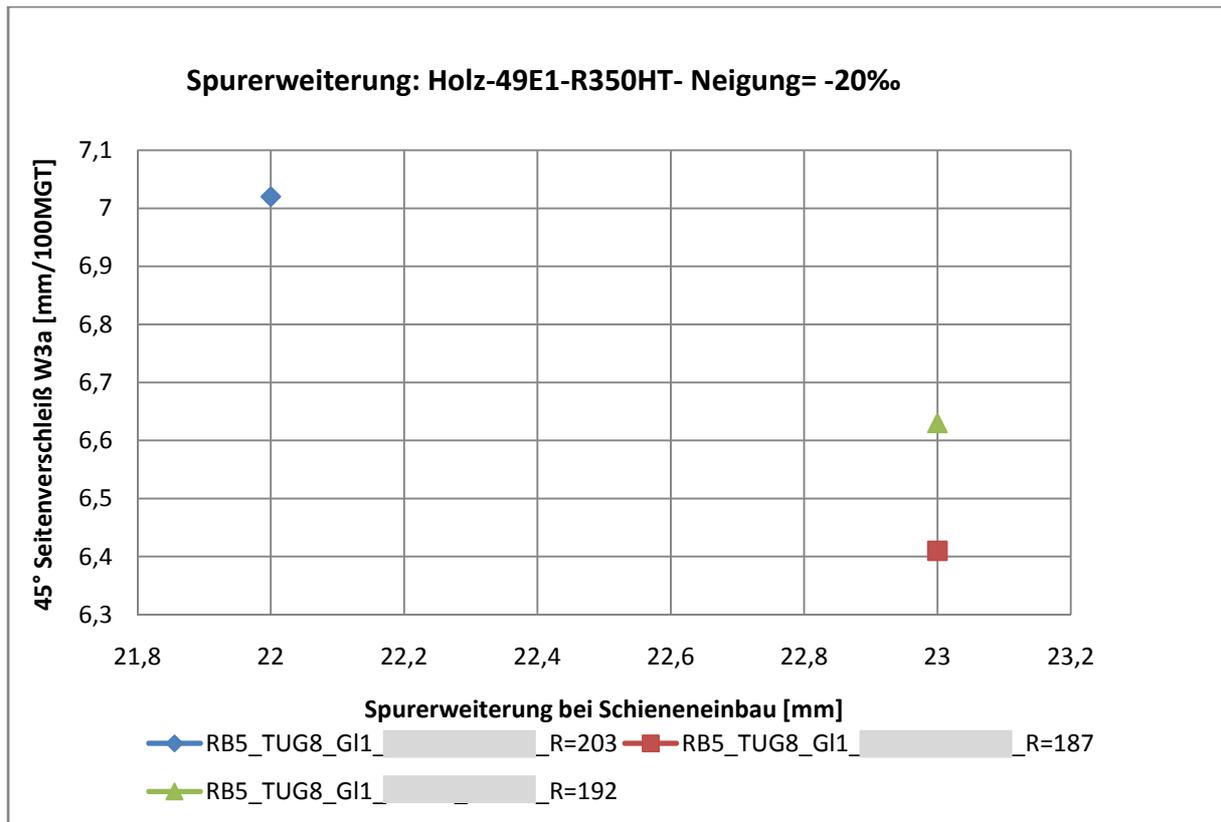


Abbildung 66: Ergebnisblatt 2 der 3. Teiluntersuchung

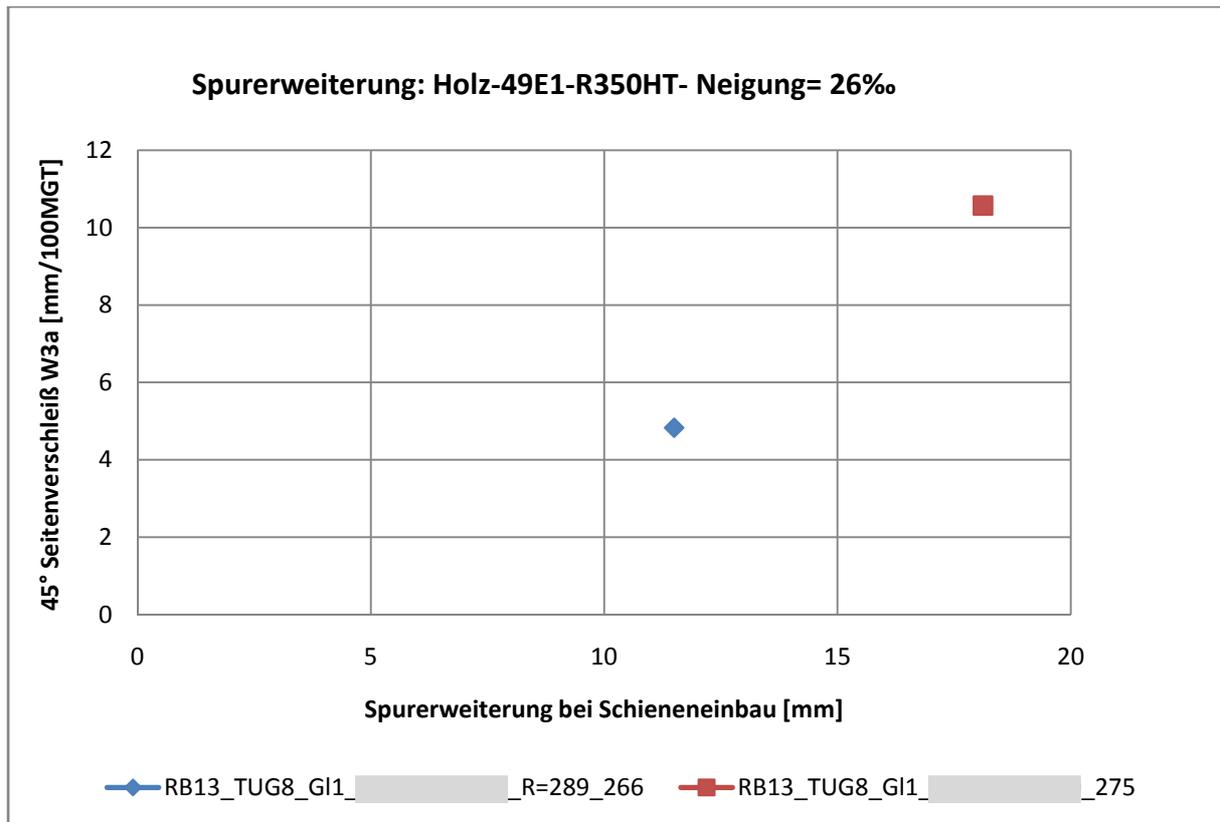


Abbildung 67: Ergebnisblatt 3 der 3. Teiluntersuchung

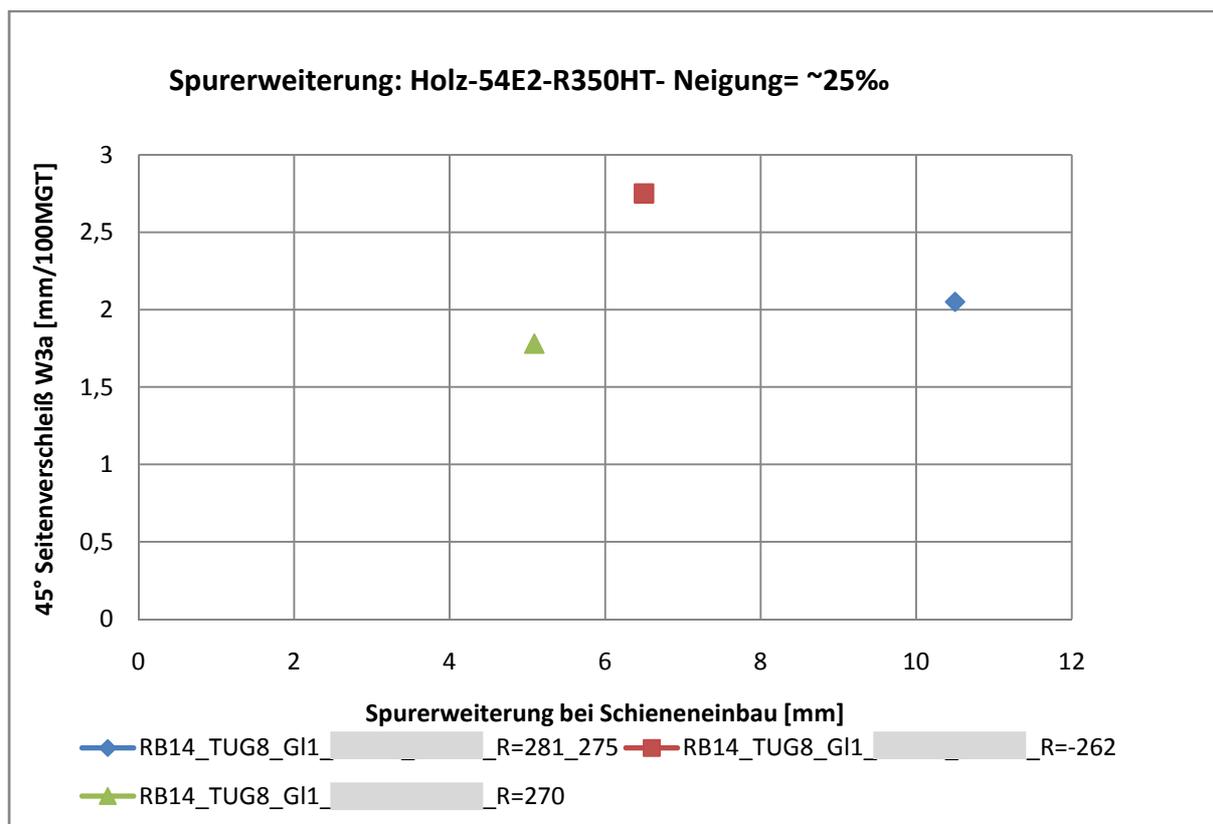


Abbildung 68: Ergebnisblatt 4 der 3. Teiluntersuchung

### Diskussion der Ergebnisse:

Auch diese Untersuchung konnte nicht zeigen, wie sich eine eingebaute Spurerweiterung auf die Verschleißrate auswirkt. Die Gründe hierfür dürften wie schon bei den ersten beiden Teiluntersuchungen in lokalen Einflüssen liegen, die den Effekt der Spurerweiterung übertönen.

### 5.2.4 Längsneigung

#### Ergebnisse:

Nachfolgend sind die Ergebnisse der Untersuchung graphisch dargestellt:

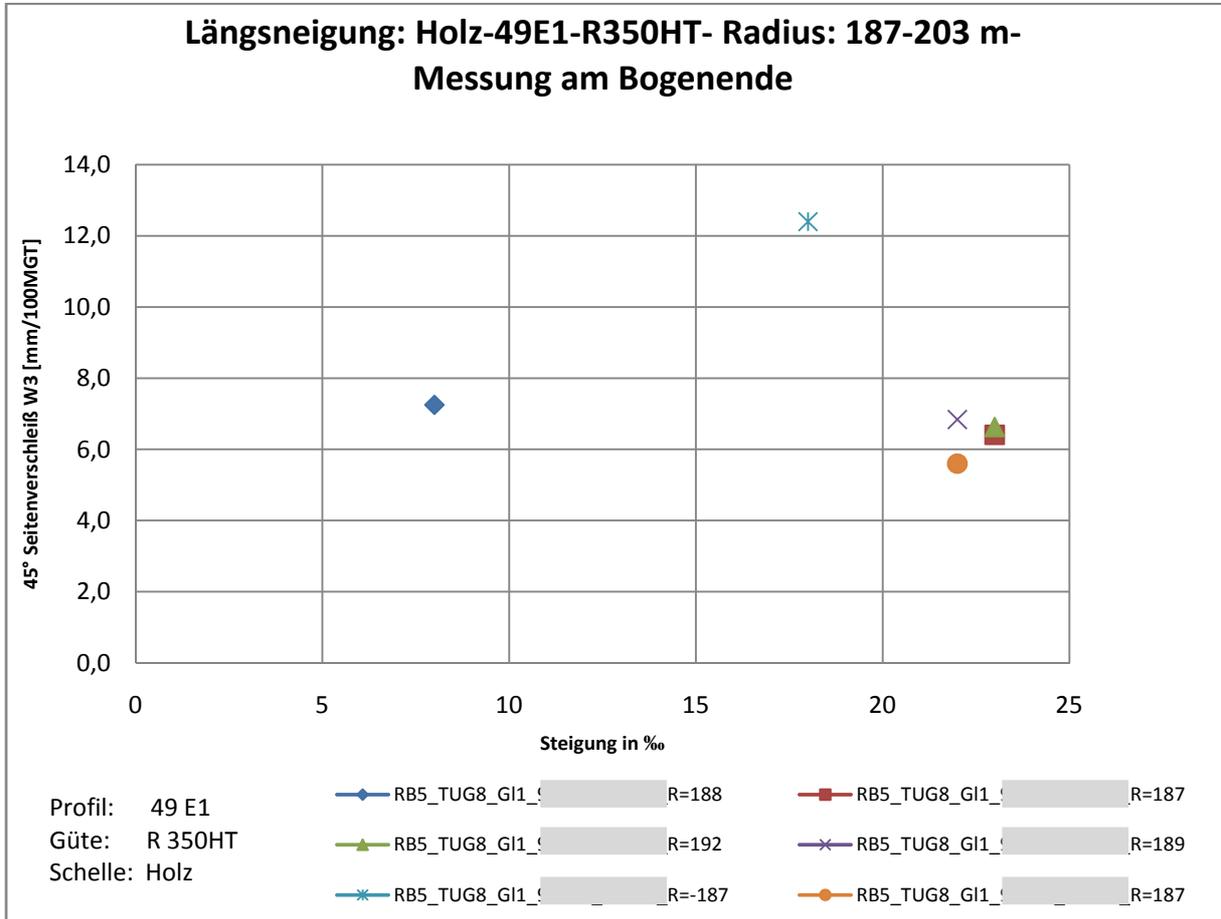


Abbildung 69: Verschleißraten bei unterschiedlichen Steigungen

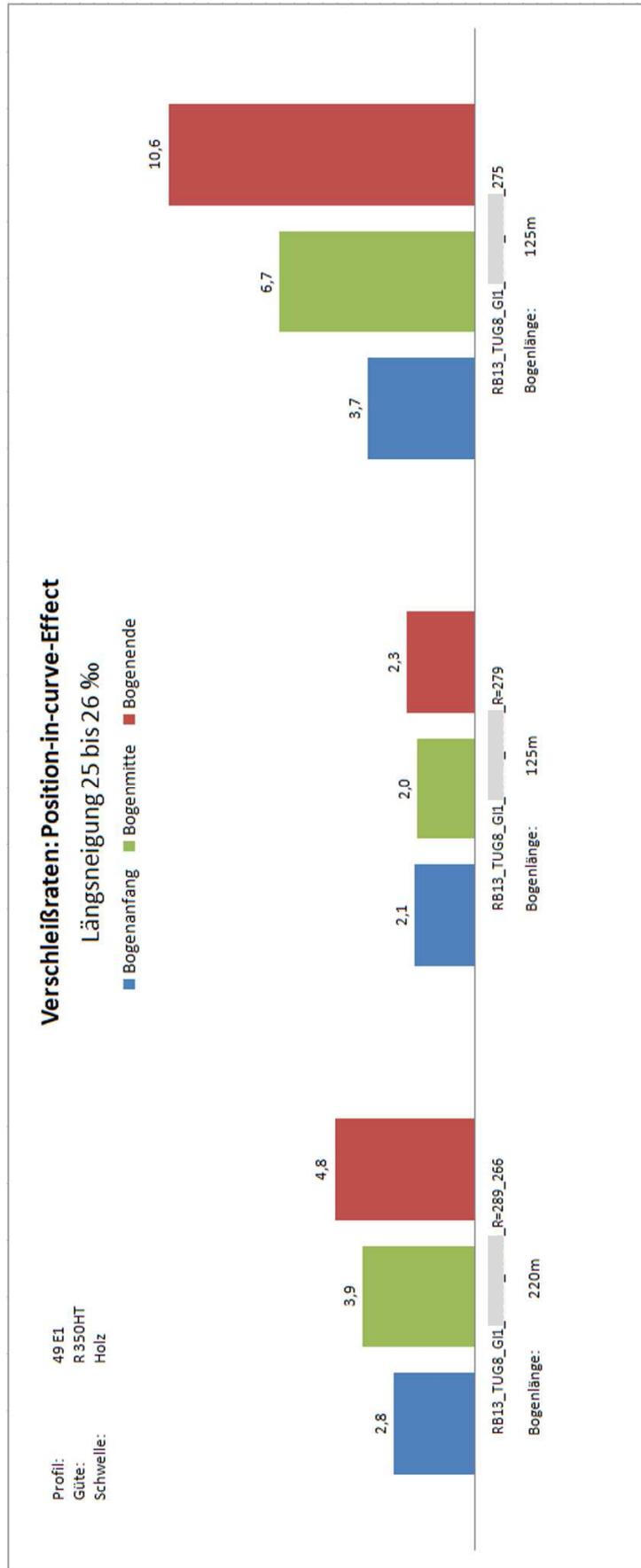


Abbildung 70: Vergleich dreier identer Bögen

## Diskussion der Ergebnisse

Wie schon bei der Untersuchung der Spurweite als Einflussfaktor zeigte sich auch hier der starke Einfluss lokaler Gegebenheiten. Gut ersichtlich wird dies in Abbildung 70, die den Vergleich dreier annähernd identer Bögen zeigt. Auf Grund der geringen Anzahl an Bögen mit gleichen Gegebenheiten konnte auch für den Zusammenhang zwischen Längsneigung und Verschleißverhalten kein Modell entwickelt werden.

Wie im Theoriekapitel erörtert, können sich unter anderem folgende lokale Einflüsse einstellen, die eine Auswirkung auf das Verschleißverhalten haben können:

- I Unterschiedliche Bogen-Historie, die zu unterschiedlich hohem Schmierfilmabbrand der Spurkranzschmierung führt
- I Unterschiedlicher Zustand des Schotterbettes oder anderer Gleiskomponenten, die nicht in die Untersuchung mit eingehen
- I Steifigkeitsunterschiede im Gleis auf Grund anderer Ursachen
- I Die Abweichung der Fahrgeschwindigkeit (Ist-Geschwindigkeit) von der Betriebsgeschwindigkeit (Soll-Geschwindigkeit) zeigt einen Einfluss in Form zu großer oder geringer Überhöhung
- I Unterschiedliche Traktion

## 5.3 Untersuchung zur Auswirkung der Installation von Schienenschmieranlagen auf das Verschleißverhalten in einem Bogen

### 5.3.1 Verschleißreduktion durch Einbau einer stationären Schmieranlage

#### Ergebnisse:

Die Graphik im Anschluss stellt die Ergebnisse dieser Untersuchung dar. Die Auswertung erfolgte am Bogenende, da in den Voruntersuchungen beobachtet wurde, dass dieser Bereich des Bogens am schnellsten verschleißt und somit für einen Schientausch maßgebend wird. Für die untersuchten Bögen zeigten sich folgende Ergebnisse:

- I Die minimale Verschleißreduktion beträgt: 30%
- I Die maximale Verschleißreduktion beträgt: 56%
- I Es konnten nur Bögen der Schienengüte R350HT untersucht werden.
- I Die Verschleißreduktion ist prozentuell gesehen unabhängig von der Höhe der Verschleißrate vor Einbau einer Schmieranlage. Die absoluten Auswirkungen auf die Verschleißrate gemessen in mm/100MGT sind aber natürlich dort am größten, wo besonders hoher Seitenverschleiß auftritt.
- I Ein Zusammenhang zwischen Radius und Verschleißreduktion konnte nicht beobachtet werden.

Ein T-Test für gepaarte Stichproben liefert für folgende Ergebnisse bei den in Kapitel 3 gewählten Hypothesen:

```
> a=c(2.9,3.4,2.1,8.6,11.8,5.5,2.0)
> b=c(1.4,2.2,1.4,5.5,6.2,2.5,1.0)
> t.test(a,b, paired = TRUE)

Paired t-test

data: a and b
t = 3.5017, df = 6, p-value = 0.0128
alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.6927894 3.9072106
sample estimates:
mean of the differences
                2.3
```

Abbildung 71: R-Code des gepaarten T-Tests

Der P-Value von 0.0128 liegt unter einem Wert von  $\alpha=0,05$  und gilt somit als „sehr signifikant“. Der Wert von  $\alpha=0.01$  kann knapp nicht unterschritten werden. Die H<sub>0</sub>-Hypothese ist somit zu verwerfen und die Wirksamkeit der Schmiermittel kann somit statistisch als „sehr signifikant“ angesehen werden.

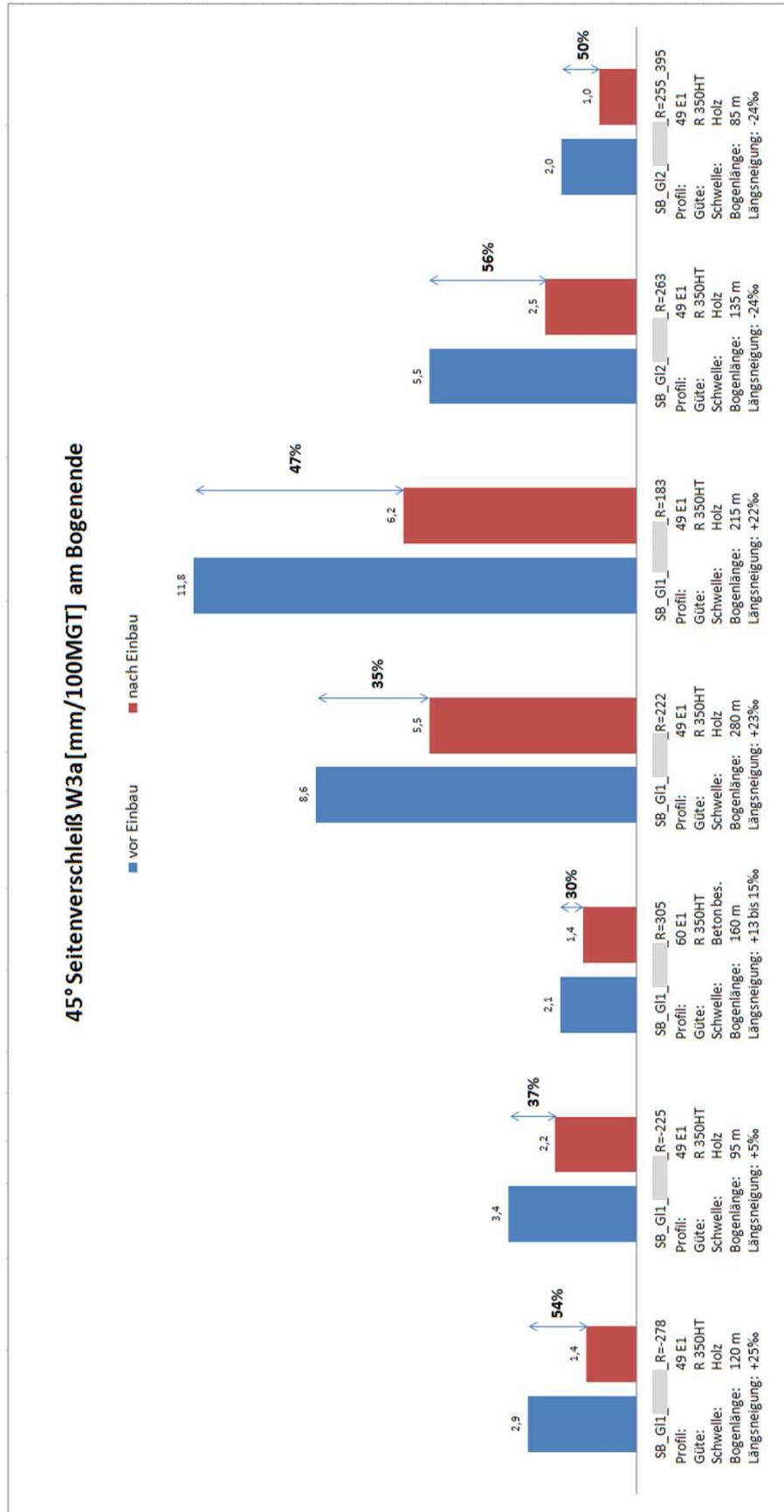


Abbildung 72: Verschleißreduktion durch Schmieranlageneinbau

**45°Seitenverschleißminimierung auf Grund Schienenflankenschmierer**

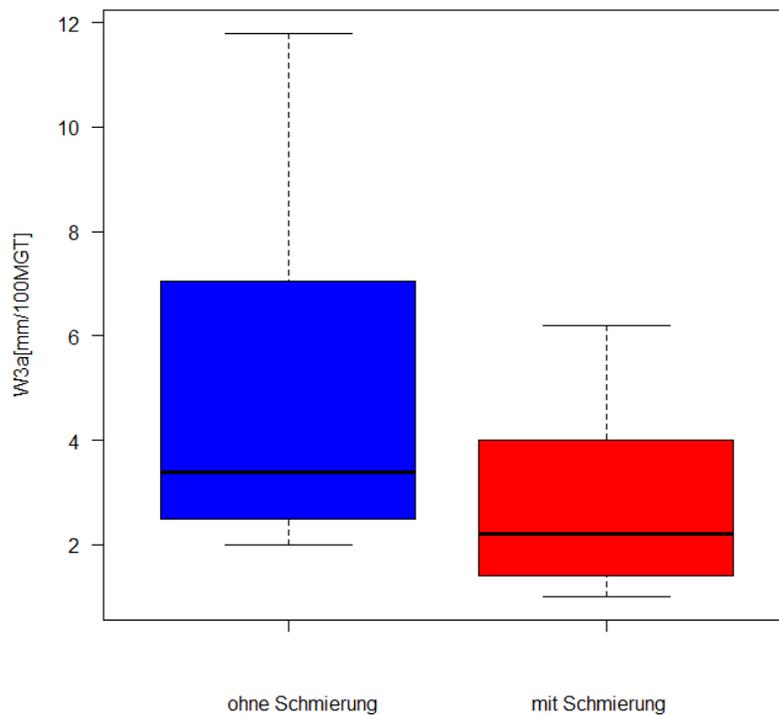


Abbildung 73: Boxplot Verschleißreduktion

Der Boxplot zeigt deutlich die Auswirkung der Installation der Schmieranlagen. Die Auswertung ergab folgende Ergebnisse:

	W3a- Ohne Schmieranlage [mm/100MGT]	W3a- Mit Schmieranlage [mm/100MGT]
Minimum	2,00	1,00
25%-Quantil	2,50	1,40
Median	3,40	2,20
Mittelwert	5,19	2,89
75%-Quantil	7,05	4,00
Maximum	11,80	6,20

Es zeigt sich auch deutlich, dass sich die Streuung der Verschleißwerte bei Installation von Schmieranlagen deutlich verringert.

## Diskussion der Ergebnisse

Da die Beobachtung am jeweiligen Bogenende gemacht wurde, kann sie nicht den maximalen Wirkungsgrad der Schienenschmieranlage darstellen. Sie stellt aber jenen Wirkungsgrad dar, der für die Lebensdauer der Schiene am wichtigsten ist, da das Bogenende jener Teil ist, der die höchste Seitenverschleißrate aufweist. Anzumerken ist hier auch, dass der längste untersuchte Bogen eine Länge von 280 Metern aufweist und somit deutlich kürzer als die übliche Wirkungslänge ist.

Nachteilig auf die Genauigkeit der Untersuchung wirken sich die kurzen Beobachtungszeiten aus, die sich vor allem auf Grund der kurzen Zeitabstände zwischen Schieneneinbau bzw. dem ersten Zeitpunkt brauchbarer Messergebnisse und dem Einbau der Schmieranlagen ergeben. Auch ist die Beobachtungsdauer nach Einbau der Schmieranlage meist durch Schleifarbeiten limitiert. Messergebnisse nach Schleifarbeiten wurden nicht in die Untersuchung miteinbezogen. An dieser Stelle wird jedoch vermerkt, dass alle dargestellten Verschleißraten mittels statistischen Tests, wie sie in Kapitel 2 beschrieben wurden, auf die Güte ihrer Anpassung zum linearen Modell untersucht und als signifikant erachtet wurden. Dies ist aber auch der Grund, warum von den elf untersuchten Bögen nur sieben Bögen verwertbare Ergebnisse zeigen.

Es wird darauf hingewiesen, dass sich die Ergebnisse nur auf die untersuchten Bögen beziehen und nicht uneingeschränkt auf das gesamte Netz umgelegt werden können. Die Verschleißreduktion auf Grund des Einbaus von Schienenschmieranlagen hat sich aber statistisch als „sehr signifikant“ erwiesen. Weiters lies sich beobachten, dass sich die Streuung der 45°-Seitenverschleißraten (W3a) der untersuchten Bögen durch die Installation einer Schienenflankenschmieranlage wesentlich verringert.

### 5.3.2 Untersuchung zur Wirkungslänge des Schmiermittels

Diese Untersuchung lieferte keine verwertbaren Ergebnisse. Das Ergebnis der Berechnung zeigte Wirkungslängen zwischen -104 und 2791 Metern. Die Berechnungsmethode erweist sich somit als ungeeignet und aus diesem Grund werden hier keine weiteren Ergebnisse dargestellt. Die Ergebnisse der Berechnung sind im Anhang (CD-Rom) ersichtlich.

Die einfachste Möglichkeit, die Wirkungslänge von stationären Schmieranlagen zu ermitteln, liegt mit Sicherheit in der Durchführung von Feldversuchen, bei denen man die Schienenflanke auf das Vorhandensein von Schmiermitteln untersucht.

### 5.3.3 Verlängerung der Liegedauer von Schienen auf Grund stationärer Schienenschmierung

#### Ergebnisse:

Die Ergebnisse der Liegedauerberechnung sind auf der nächsten Seite dargestellt. Es zeigte sich, dass theoretisch die Verlängerung der Liegedauer bis zu 125% beträgt. Für die Berechnung wurden ein Verschleißlimit von 18 mm und eine durchschnittliche Belastung von 52000 GBT/Tag herangezogen.

#### Diskussion der Ergebnisse

Diese Ergebnisse basieren auf der Untersuchung in Kapitel 4.3.1 „Verschleißreduktion“. Alle dort getroffenen Einschränkungen sind somit auch für diese Untersuchung gültig. Wie schon vorhin beschrieben, beziehen sich alle Ergebnisse auf das jeweilige Bogeneinde, das in der Regel maßgebend für den Schienentausch ist.

Die errechnete Verlängerung der Liegedauer muss allerdings als theoretischer Wert angesehen werden, da die berechnete Liegedauer in den meisten Fällen höher als die maximale Liegedauer auf Grund der Dauerfestigkeit ist. Diese beträgt laut der ÖBB-Vorschrift B-50-3:

Schienenform	Gesamtbruttotonnen [t]
49 E1	ca. 280 Mio.
54 E2	ca. 380 Mio.
60 E1	> 1000 Mio.

Abbildung 74: Liegedauer auf Grund Dauerfestigkeit [15]

Da diese Werte im Wesentlichen den Ergebnissen von Jörgs Arbeit „Ermüdungsfestigkeit von Eisenbahnschienen“ entsprechen, diese aber nur für naturharte Schienengüten nachgewiesen wurden [16], bleibt die Richtigkeit der Anwendung dieser Richtlinie auf R350-HT Schienen aber zu bezweifeln.

Außerdem bezieht sich die errechnete Liegedauer nur auf den Seitenverschleiß. Andere Schienenfehler und der Schleifabtrag wurden nicht miteinbezogen. Es ist jedoch zu erwarten, dass bei reduziertem Seitenverschleiß auch weniger Reprofilierungsmaßnahmen nötig sind, was sich zusätzlich positiv auf die Verlängerung der Liegedauer auswirken sollte.

In den Untersuchungen zeigte sich außerdem, dass Schienen in der Praxis häufig schon vor dem Erreichen der Grenzwerte des Verschleißes getauscht wurden.

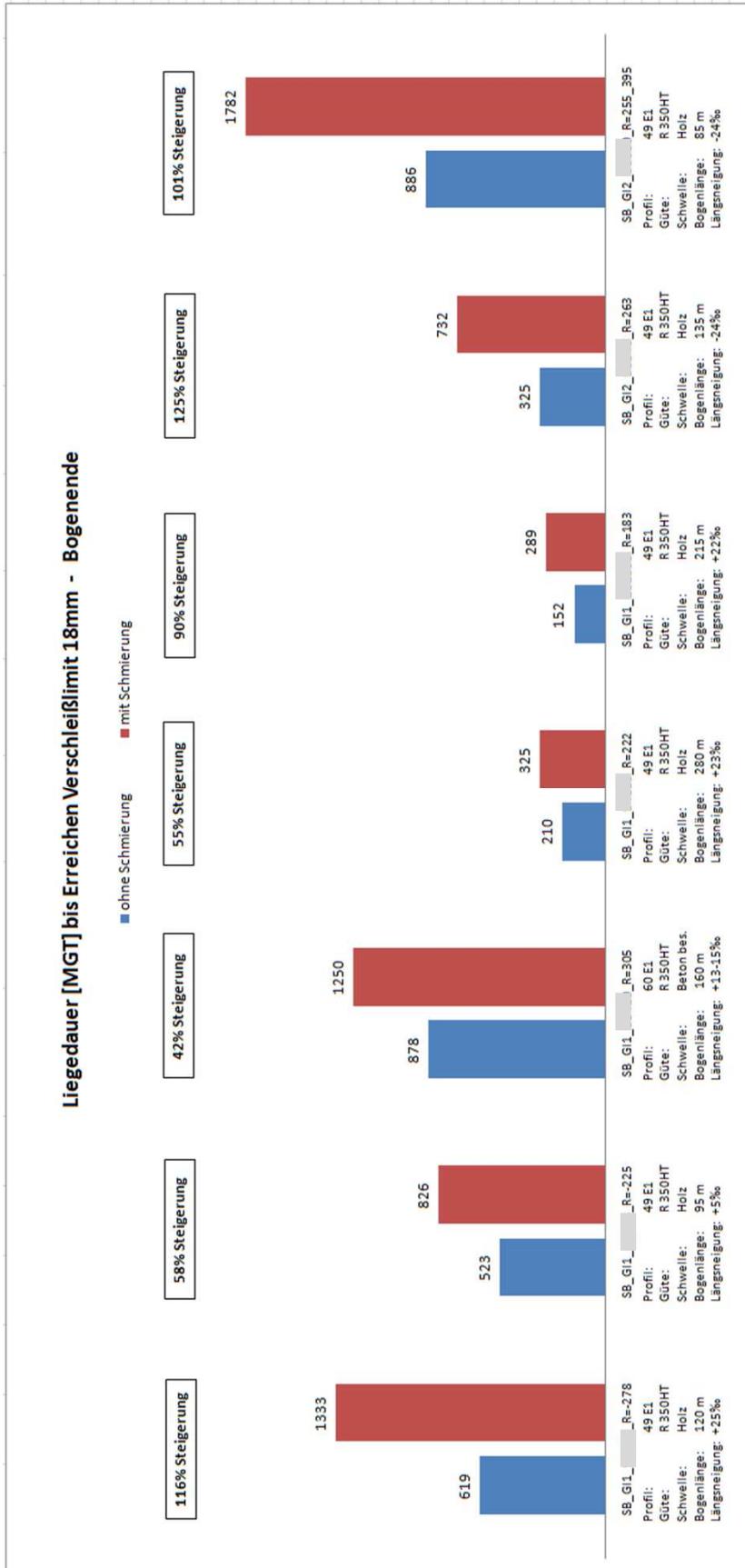


Abbildung 75: Ergebnisse Liegedauerberechnung

## 5.4 Untersuchung zur Auswirkung von Schienenschmierung auf das Verschleißverhalten mittels Vergleich mit Referenzbögen

Die Voruntersuchungen zum Verschleißverhalten von Schienen zeigten folgende Ergebnisse:

- I Der Einfluss von Gefälle und Spurweite konnte nicht ausreichend beschrieben werden.
- I Lokale Einflüsse wie sie in den vorigen Kapiteln beschrieben werden, haben einen großen Einfluss auf das Verschleißverhalten der Schienen einzelner Bögen.
- I Die Unterschiede zwischen Bögen einzelner Klassen sind so groß, dass keine generellen Aussagen zum Verschleißverhalten einzelner Referenzbogenklassen getroffen werden können.
- I Die Bogenklasse 5 weist mit neun Bögen mit Schmieranlagen die größte Anzahl an Bögen auf. Wird nun auch noch nach Längsneigung differenziert, wird auch diese Gruppe noch beträchtlich kleiner werden. Andere Klassen bestehen aus noch weniger Bögen.
- I Schon der Vergleich zweier Bögen mit ähnlicher Charakteristik zeigt, wie stark unterschiedlich sich die Verschleißraten ausprägen können:

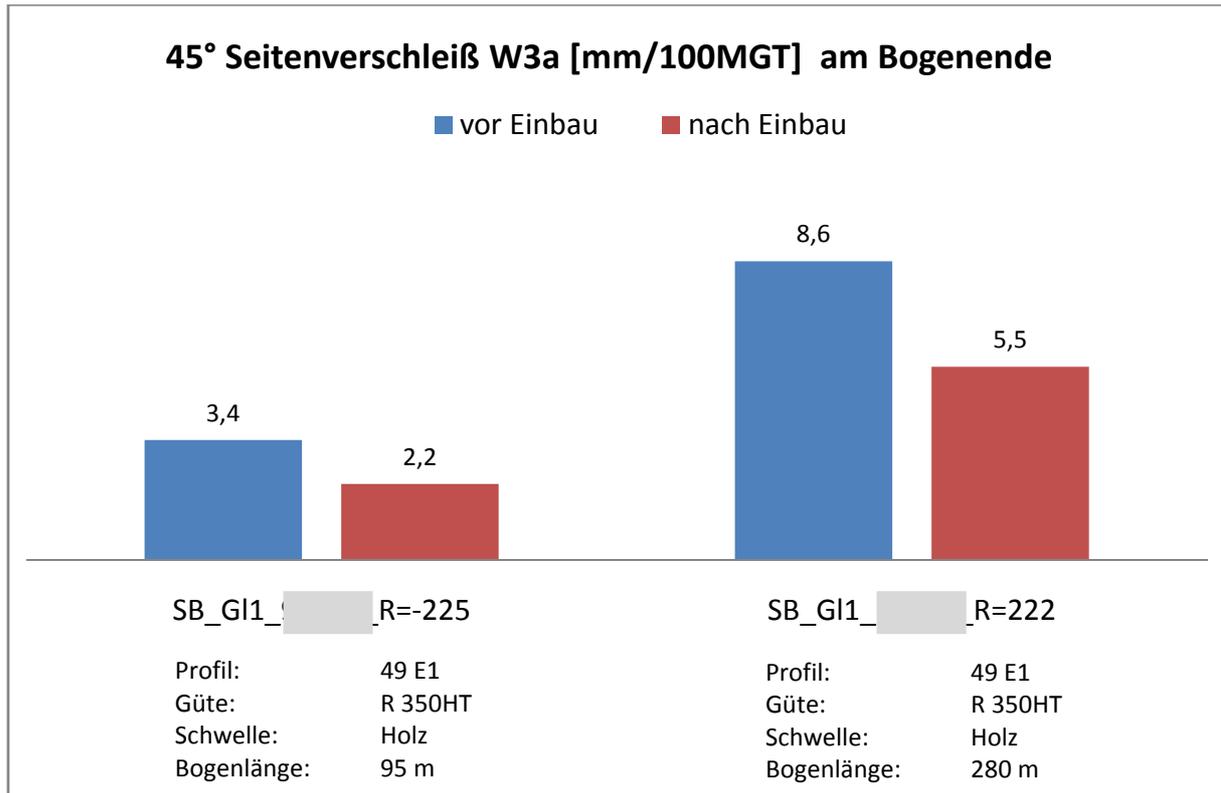


Abbildung 76: Vergleich zweier ähnlicher Bögen vor und nach Einbau einer Schmieranlage

#### Schlussfolgerung:

Da nicht alle Parameter ausreichend beschrieben werden können und lokale Einflüsse sehr großen Einfluss auf das Verschleißverhalten von Schienen haben, wird auf diese Untersuchung verzichtet. Ein weiterer Grund hierfür ist die geringe Anzahl an Bögen der einzelnen Bogenklassen die es nicht möglich machen generelle Aussagen zum Verschleißverhalten zu treffen.

## 6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Masterarbeit konnte ein Auswertungstool für die „Messsignale 45°-Seitenverschleiß (W3a)“ und „Spurweite“ programmiert werden, mit Hilfe dessen das Verschleißverhalten von Schienen untersucht werden kann. Es wurde damit auch das Problem der „Fehlstationierung“, die teilweise mehr als 100 Meter beträgt, gelöst. Die Auswertung erfolgt hier nicht voll automatisch, da Bogenanfang und Bogenende jeder Messspur manuell eingegeben werden müssen.

Die Analyse einzelner Messspuren zeigte einen wellenförmigen Verlauf der Verschleißkurve, mit einer mittleren Wellenlänge zwischen 7 und 15 Metern und einer Amplitude von mehr als einem Millimeter. Diese Schwankungen machten es notwendig die untersuchten Bereiche Bogenanfang, Bogenmitte und Bogenende über eine Distanz von 15 Meter zu mitteln. Dafür erwies sich der Median gegenüber dem arithmetischen Mittel als geeignet.

Eine Betrachtung des Verschleißverhaltens (W3a) von Bogenanfang, Bogenmitte und Bogenende zeigte, dass annähernd in allen Fällen das Bogenende die höchste Verschleißrate aufwies, wie dies bereits aus der Literatur bekannt war. Dies gilt nur für Bögen im Richtungsbetrieb. Es wird hier nochmals vermerkt, dass sich die Untersuchung ausschließlich auf die Südbahn – Abschnitt „Semmering“ beschränkt. Außerdem zeigten die Untersuchungen, dass der 45°-Seitenverschleiß (W3a) am Ortsquerschnitt mit guter Näherung linear beschrieben werden kann. In wenigen Fällen zeigte sich eine „Einspielphase“, die durch eine höhere Verschleißrate innerhalb der ersten 40 MGT charakterisiert ist.

Der Einfluss von Spurweite und Längsneigung auf den 45°-Seitenverschleiß (W3a) konnte nicht beschrieben werden. Es zeigte sich, dass lokale Einflüsse das Verschleißverhalten zu stark beeinflussen. Laut Expertengesprächen und Literaturquellen können das die Folgenden sein, wobei kein Anspruch auf Vollständigkeit besteht:

- I Unterschiedliche Bogen-Historie, die zu unterschiedlich hohem Schmierfilmabbrand der Spurkranzschmierung führt
- I Unterschiedlicher Zustand des Schotterbettes oder anderer Gleiskomponenten, die nicht in die Untersuchung mit eingehen
- I Steifigkeitsunterschiede im Gleis auf Grund anderer Ursachen
- I Die Abweichung der Fahrgeschwindigkeit (Ist-Geschwindigkeit) von der Betriebsgeschwindigkeit (Soll-Geschwindigkeit) zeigt einen Einfluss in Form zu großer oder geringer Überhöhung

### I Unterschiedliche Traktion

Eine Untersuchung von sieben Bögen, der Güte R 350HT, die mit einer Schienenflankenschmierung ausgestattet wurden, zeigte eine Reduktion des 45°-Seitenverschleißes (W3a) zwischen 30% und 56%, wobei keine Abhängigkeit von Parametern wie dem Radius, der Bogenlänge, etc. erkannt werden konnte. Die absolute Verschleißminimierung in [mm/100MGT] war naturgemäß in jenen Bögen mit hohen Verschleißraten am größten.

Mittels statistischer Verfahren konnte die Wirksamkeit der Schienenflankenschmierung bezüglich ihrer Verschleißreduktion nachgewiesen werden. Es zeigte sich, dass die Streuung der Verschleißraten durch die Applikation von Schmiermitteln deutlich reduziert wird.

Eine Ermittlung der Wirkungslänge von Schienenschmiermitteln nach dem vorgestellten Modell ergab keine plausiblen Ergebnisse. Hauptursache hierfür ist das nicht lineare Verhalten des so genannten „Position-in-curve-effect“ über die Bogenlänge.

Die Verlängerung der Liegedauer wurde auf bis zu 125% errechnet, wobei hierfür ein stark vereinfachtes Modell herangezogen wurde. Dieser Wert ist außerdem als theoretisch anzusehen, da einerseits andere Schienenfehler wie Head Checks und Spalling/Flaking nicht einfließen und andererseits die Liegedauer auf Grund der Dauerfestigkeit limitiert ist. Schleifabtrag wurde ebenfalls nicht mit einbezogen.

Auf Grund der oben genannten, lokalen Einflüsse und der geringen Grundgesamtheit von Bögen mit Schmieranlagen, vor allem bei der Unterteilung in Klassen, war es nicht möglich pauschale Aussagen zur Verschleißreduktion durch Schienenflankenschmierung in Abhängigkeit einzelner Parameter zu treffen. Dies gilt auch für den Bogenradius.

Aus den Erkenntnissen der Untersuchungen kann also folgende Empfehlung zur Reduktion des 45°-Seitenverschleißes der Außenschiene (W3a) gegeben werden:

- I Der Einsatz von Schmieranlagen zur Schienenflankenschmierung führt zu einer deutlichen Verschleißreduktion. Bei den sieben untersuchten Bögen liegt eine Reduktion des 45°-Seitenverschleißes der Außenschiene (W3a) zwischen 30% und 56% vor.

Um die Ergebnisse in Relation zu anderen Maßnahmen zu bringen, werden an dieser Stelle noch einmal die Ergebnisse der Literaturstudie zusammengefasst.

Aus Kapitel 2.2.2 geht hervor, dass sich die Reduktion des 45°-Seitenverschleißes der Außenschiene (W3a) durch den Einsatz kopfgehärteter Schienen wie folgt zeigt:

- I Verbesserung der Güte R350HT im Vergleich zu R260: ~ Faktor 3
- I Verbesserung der Güte R400UHC im Vergleich zu R350HT: ~ Faktor 2

Folglich muss eine kombinierte Verwendung von hochfesten Schienen in Verbindung mit Schienenflankenschmierung die größte Reduktion des 45°-Seitenverschleißes der Außenschiene (W3a) erzielen.

## Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] Lichtberger, B., *Handbuch Gleis*. Hamburg: DVV Media Group GmbH | Eurailpress, 2010.
- [2] Veit, P., *Skriptum Eisenbahnwesen*.: TU Graz, Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft, 2012.
- [3] Meier, H., *Aufgaben und Probleme des Eisenbahnoberbaus*, in Jahrbuch des Eisenbahnwesens., 1967.
- [4] Stephanides, J., *Different lateral measured values and elevations*, Arbeitspapier EN14363.
- [5] Auer, F., *Vortrag: Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen*, in *Vorlesungsunterlagen Oberbau VA.*, 2012.
- [6] ÖBB Infrastruktur, *"B50-Teil1 Oberbauformen"*, 2009.
- [7] Auer, F., *Zur Verschleißreduktion von Gleisen in engen Bögen.*, Dissertation 2010.
- [8] ÖBB Infrastruktur, *BH 763-TL für Zwischenlagen und Unterlagsplatten.*,2004.
- [9] ÖBB Infrastruktur, *ZOV 23- Schwellen.*, 2012.
- [10] (25.08.2012) wikipedia. [Online]. <http://de.wikipedia.org/wiki/Holz>
- [11] ÖBB-Infrastruktur, *BH 700 Oberbauschotter.*, 2011.
- [12] Jörg, A., *Die Gleiskomponente Schiene*, in Lehrveranstaltung Oberbau VA, Graz, 2012.
- [13] Girsch, G. ; Frank, N., *LCC Rail: a software tool for life-cycle-cost calculation for rails*, Rail Engineering International Edition 2008 Number2, 2008.
- [14] Girsch, G. ; Jörg, A.; Schoech W., *Managing rail life to match performance and cut costs*, Railway Gazette International, August 2010.
- [15] ÖBB\_Infrastruktur, *B 50-Teil 3 Oberbauberechnung*, Vorschrift ÖBB Infrastruktur, August 2010.
- [16] Jörg, A., *Ermüdungsfestigkeit von Eisenbahnschienen*. Diplomarbeit an der TU Graz, 2004.

- [17] Steenbergen, M., J., M., M, "*Wheel-rail interaction at shortwave irregularities,*" Technische Universiteit Delft, 2008.
- [18] Stachowiak G. W., *Wear - Materials, Mechanisms and Practice.*
- [19] (2012, Dezember) wikipedia. [Online].  
[http://de.wikipedia.org/wiki/Verschlei%C3%9F#Abrasive\\_Verschlei.C3.9F](http://de.wikipedia.org/wiki/Verschlei%C3%9F#Abrasive_Verschlei.C3.9F)
- [20] Grassie ; Kalousek, *Rolling contact fatigue of rails. Characteristics causes and treatments,* in 6th International Heavy Haul Railway Conference, Kapstadt, 1997.
- [21] Auer, F.; Wöhnhard A., *Info Head Checks.: ÖBB-Infrastruktur,* 2008.
- [22] Kalousek, J., *Wheel/rail damage and its relationship to track curvature,* 2004.
- [23] Gunacker, R., *Verkaufspräsentation.*
- [24] Willy Vogel A.G. (2013, Jänner) Vogel Spurkranzschmierung für Schienenfahrzeuge. [Online].  
[http://www.lubtec.cz/vogel/dateien/de/pdf/zs\\_spurkranz\\_pdf/1-8090.pdf](http://www.lubtec.cz/vogel/dateien/de/pdf/zs_spurkranz_pdf/1-8090.pdf)
- [25] Reiff; Steele, *Rail: Its Behavior and Relationship to Total System Wear.*
- [26] Daten: Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft - TUGraz.
- [27] Datenbankabfrage: Landgraf, M, - TUGraz
- [28] Fellendorf, M, *Skript: Statistik-Infrastruktur.,* 2011.
- [29] Liu, *Skript: Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik.,* 2009.
- [30] Nerlich, I. , *E-Mail an Autor,* 2013.
- [31] Gespräch mit Stock R., voestalpine Schiene, 2012.
- [32] Strauch A., *E-mail an Autor,* 2012.
- [33] Vinolas; Seco;Egana, *Investigation of the influence of rail pad stiffness on rail,* University of Navara, 2004.
- [34] Girsch, G. ; Keichel; J.; Gehrman R.; Zlatnik A.; Frank N., *Advanced rail steels for Heavy Haul application - track performance and weldability,* voestalpine Schienen GmbH; Elektro-Thermit GmbH,.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Aufbau der wesentlichen Gleisformen [1].....	12
Abbildung 2: Die Führungskraft Y [3].....	14
Abbildung 3: FührungskraftY [2] .....	15
Abbildung 4: Seitliche Krafteinwirkung auf die Schiene in Abhängigkeit vom Radius [3] .....	16
Abbildung 5: Einwirkende Kräfte im Querschnitt [5].....	17
Abbildung 6: Grenzwerte Fahrsicherheit und Fahrwegbeanspruchung [1] .....	17
Abbildung 7: Kraftfluss der Radlast in den Untergrund [1].....	19
Abbildung 8: Querschnittsbild des K-Oberbaues [1] .....	21
Abbildung 9: Rippenplatte mit Spannklemme [7] .....	21
Abbildung 10: Pandrol e-Clip [1].....	22
Abbildung 11: Vossloh W14 Befestigung [1].....	23
Abbildung 12: Querschnitt einer Holzschwelle [2].....	27
Abbildung 13: Querschnitt einer Betonschwelle in Schwellenmitte, Länge= 2600mm [2] .....	27
Abbildung 14: Vergleich des Biegeverhaltens von Holz und Betonschwellen.....	28
Abbildung 15: Verschleißverhalten zweier verschiedener Schienengüten im Bogen [12] .....	32
Abbildung 16: Verschleißfestigkeit von kopfgehärteten Schienengüten im Vergleich [13] .....	33
Abbildung 17: Gefüge zweier Stahlgüten [14].....	34
Abbildung 18: Verschleißfestigkeit verschiedener Stahlgüten in einem Bogen R=185m [14].....	34
Abbildung 19: Liegedauer auf Grund Dauerfestigkeit [15] .....	36
Abbildung 20: Ergebnis einer Überfahrt über einen Schweißstoß bei 140km/h [17].	38
Abbildung 21: Dynamische Spitzenkräfte bei der Überfahrt eines Stoßes [1].....	39
Abbildung 22: Arten des Verschleißes [18].....	40
Abbildung 23: Höhenabnützung einer Schiene [15].....	41

Abbildung 24: Seitenabnützung einer Schiene [15].....	42
Abbildung 25: Vergleichene Höhenabnützung [15].....	43
Abbildung 26: Seitliche Verschleißrate der Schiene abhängig vom Bogenhalbmesser [20] .....	45
Abbildung 27: Seitenabnützung in Abhängigkeit des Radius für die Schienengüten [21] .....	46
Abbildung 28: Rollradiendifferenz [1].....	48
Abbildung 29: Äquivalente Konizität abhängig von der Spurweite [1].....	49
Abbildung 30: Äquivalente Konizität [1] .....	50
Abbildung 31: Auswertung einer Bogenfolge der SBB [23] .....	64
Abbildung 32: Flankenschmierung und Schienenkopfkonditionierung [24].....	51
Abbildung 33: Funktionsprinzip einer Schmieranlage der Fa. Hypower [24].....	52
Abbildung 34: Hauptteile einer Schmieranlage [24].....	52
Abbildung 35: [27].....	54
Abbildung 36: [28].....	55
Abbildung 37: Boxplott [30].....	59
Abbildung 38: lineare Regression [30].....	61
Abbildung 39: Wahrscheinlichkeitsdichte der Fischerfunktion [30] .....	61
Abbildung 40: Prinzip des F-Test mit Erklärung.....	62
Abbildung 41: Gestalt der Messdaten.....	75
Abbildung 42: Messfahrten übereinander gelegt .....	77
Abbildung 43: Darstellung einzelner Messfahrten .....	78
Abbildung 44: Ausleseschema .....	80
Abbildung 45: Untersuchung eines Gleisstoßes .....	81
Abbildung 46: Einspielphase .....	87
Abbildung 47: Auswirkung von Schleifarbeiten.....	88
Abbildung 48: Untersuchung zur Wirkungslänge der Schmiermittel.....	94
Abbildung 49: Ergebnis einer Messfahrt.....	96

Abbildung 50: Ergebnis einer Messfahrt.....	96
Abbildung 51: Lebensdauerberechnung.....	98
Abbildung 52: Darstellung einer Messfahrt.....	101
Abbildung 53: Erkennung von Schleifarbeiten.....	104
Abbildung 54: Ergebnisse Klasse 1.....	107
Abbildung 55: Ergebnisse Klasse 5.....	108
Abbildung 56: Ergebnisse Klasse 12.....	109
Abbildung 57: Ergebnisse Klasse 13.....	110
Abbildung 58: Ergebnisse Klasse 14.....	111
Abbildung 59: Spurweite in Abhängigkeit der Position.....	116
Abbildung 60: Verschleißwerte in Abhängigkeit der Spurweite.....	116
Abbildung 61: Ergebnisblatt 1 der 2. Teiluntersuchung.....	118
Abbildung 62: Ergebnisblatt 2 der 2. Teiluntersuchung.....	119
Abbildung 63: Ergebnisblatt 3 der 2. Teiluntersuchung.....	120
Abbildung 64: Ergebnisblatt 4 der 2. Teiluntersuchung.....	121
Abbildung 65: Ergebnisblatt 1 der 3. Teiluntersuchung.....	122
Abbildung 66: Ergebnisblatt 2 der 3. Teiluntersuchung.....	123
Abbildung 67: Ergebnisblatt 3 der 3. Teiluntersuchung.....	124
Abbildung 68: Ergebnisblatt 4 der 3. Teiluntersuchung.....	125
Abbildung 69: Verschleißraten bei unterschiedlichen Steigungen.....	126
Abbildung 70: Vergleich dreier identer Bögen.....	127
Abbildung 71: R-Code des gepaarten T-Tests.....	129
Abbildung 72: Verschleißreduktion durch Schmieranlageneinbau.....	130
Abbildung 73: Boxplot Verschleißreduktion.....	131
Abbildung 74: Liegedauer auf Grund Dauerfestigkeit [15].....	134
Abbildung 75: Ergebnisse Liegedauerberechnung.....	135
Abbildung 76: Vergleich zweier ähnlicher Bögen vor und nach Einbau einer Schmieranlage.....	137

## 7 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schienenbefestigung [6] .....	20
Tabelle 2: Zwischenlagen im Neubau [6].....	25
Tabelle 3: Schwellenbezeichnungen im Neubau [6].....	26
Tabelle 4: Abmessungen Schwellen [9].....	26
Tabelle 5: Schienenprofile in Abhängigkeit von $V_{\max}$ [6] .....	31
Tabelle 6: Verwendete Schienengüten ÖBB [6] .....	32
Tabelle 7: Schienenlängen und Hersteller [6].....	35
Tabelle 8: Größte zulässige Seitenabnutzung [15].....	44

## 8 Anhang

- I Flächenträgheitsmoment Holzschwelle.jpg
- I Ordner „Eingang“ (sämtliche Unterlagen zu Eingangsdaten der Untersuchungen)
- I Ordner „Ausgang“ (sämtliche Ausgabedaten und Untersuchungsergebnisse)
- I Ausleseprogramm.xlsm (VBA-Programm)
- I Auswertungsblatt.xlsx (Ergebnisblatt der Untersuchungen)
- I Datei\_Schmieranlagen Standorte\_Schienen\_Einbaujahr.xlsx (Liste aller RB und SB)
- I Untersuchung Stoß.xlsx



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](http://www.ebw.tugraz.at)