

DIPLOMA THESIS

Evaluation and analysis from railway-measured data to describe the sensitivity of Head-Checks

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin
at the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DIPLOMARBEIT

Auswertung und Analyse von Streckenmessdaten zur Beschreibung der Empfindlichkeit von Head-Checks

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines / einer
Diplom-Ingenieurs/ Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Benedikt Gruber, B.Sc.

Matr.Nr.: 1027486

unter der Anleitung von

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

Dipl.-Ing. **Johannes Kehrer**

Dipl.-Ing. **Roman Schmid**



Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/230-2, A-1040 Wien

Wien, im November 2018

Danksagung

Ich möchte mich sehr herzlich bei folgenden Personen und Kollegen bedanken, ohne welche diese Diplomarbeit heute nicht in dieser Form vorliegen würde:

- Bei meinem Professor an der TU Wien Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-techn. Norbert Ostermann sowie meinem Betreuer Dipl.-Ing. Johannes Kehrer
- Bei meinen Betreuern bei der ÖBB-Infrastruktur AG Dipl.-Ing. Roman Schmid sowie Dipl.-Ing. Reinhard Popp
- Bei der ÖBB-Infrastruktur AG für die Bereitstellung der Messdaten, des Auswertungs-Programms IMC Famos, diverser Literatur sowie für die allgemeine Unterstützung
- Bei meiner gesamten Familie. Insbesondere bei meinem Vater, welcher mir das Studium an der TU Wien erst ermöglicht hat.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

Zusammenfassung

In den letzten Jahrzehnten stieg die Anforderung an die Schiene im Schienennetz der ÖBB-Infrastruktur AG durch steigende Betriebsbelastungen sowie durch modernere Antriebstechniken stetig an. Um diesen steigenden Belastungen gerecht zu werden, wurden hochwertigere Schienenstähle entwickelt und in das Schienennetz der ÖBB-Infrastruktur AG eingebaut. Im Zuge der steigenden Anforderungen kam das Thema von Head-Checks auf.

Head-Checks stellen eine Art von Schienenfehlern an der Schienenoberfläche dar und fallen in die Schadenskategorie der Rollkontaktermüdungen. In der Kontaktfläche des Eisenbahnrades mit der Schiene entstehen Spannungen, welche die Widerstände des Schienenmaterials übersteigen und in Folge zu Schäden an der Schienenoberfläche (der Kontaktfläche) führen. Die Entwicklung von Head-Checks kann in mehrere Phasen unterteilt werden: Der Entstehung eines Rissansatzes, dem kontinuierlichen Wachstum des Risses, bis hin zu Ausbrüchen der Fahrkante infolge von Head-Checks.

Um die genauen Ursachen von Head-Checks zu erforschen wird im ersten Schritt die Thematik und Entstehung von Head-Checks anhand von Fachliteratur erläutert, um im zweiten Schritt Gleismessdaten der ÖBB-Infrastruktur AG systematisch zu untersuchen und auf Hinblick unterschiedlicher Einflussparameter zu analysieren. Als Einflussfaktoren werden die Streckenparameter Bogenradius, Überhöhungsüberschuss, Längsneigung sowie die höchste zulässige Geschwindigkeit anhand des Verzeichnisses der örtlich zulässigen Geschwindigkeiten (VzG) gewählt. Das VzG stellt die örtlich zulässigen Höchstgeschwindigkeiten dar und ist kein Parameter für die tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten. Das Schienennetz der ÖBB-Infrastruktur AG wird für dessen systematische Untersuchung in seine einzelne Trassierungselemente (Gerade, Bogen, Übergangsbogen) unterteilt und die tiefsten Head-Check-Risse je Trassierungselement für Analysen herangezogen.

Die Ergebnisse der Auswertungen werden anhand von Diagrammen dargestellt und in Kontext mit den Theorien der Literaturrecherche gesetzt. Head-Checks treten vorwiegend auf Außenschienen in Bögen mit Radius zwischen 400 bis 2000 Meter auf, sowie vermehrt gegen in Fahrtrichtung Bogenende hin. Ein Zusammenhang zwischen dem Bogenradius und der Entstehung von Head-Checks konnte nachgewiesen werden, eine Erklärung für das Auftreten von Head-Checks gegen Bogenende hin konnte nicht gefunden werden. Die Erkenntnisse des Zusammenhangs von Bogenradius und dem Wachstum von Head-Checks sowie die vermehrte Entstehung von Head-Checks in Fahrtrichtung Bogenende hin decken sich mit jahrelangen Erfahrungswerten der ÖBB-Infrastruktur AG und können als plausibel betrachtet werden.

Als Endergebnis werden ermittelte Daten der Schienengüten R260 und R350 HT dargestellt und visualisiert. Mittels Korrelationskoeffizienten wurde eine gezielte Analyse verschiedener Einflussfaktoren durchgeführt und dabei kein Zusammenhang der Einflussfaktoren Überhöhungsüberschuss, Längsneigung sowie dem VzG auf die Entstehung von Head-Checks festgestellt.

Abstract

In recent decades, the demand for rails in the rail network of the ÖBB-Infrastruktur AG has been rising steadily due to increasing operational burdens and more modern drive technologies. In order to meet these increasing demands, higher-quality rail steels were researched and integrated into the rail network of ÖBB-Infrastruktur AG. As part of this change to higher quality materials, the topic of head checks raised up.

Head checks are a type of rail failure on the rail surface and belong to the category of damage of rolling contact fatigue. In the contact surface of the railway wheel with the rail, large stresses arise which exceed the resistances of the rail material and result in damage to the rail surface (the contact surface). The emergence of head checks can be divided into several phases: the formation of a crack initiation, the continuous growth of the crack, up to breakouts of the driving edge as a result of head checks.

In order to investigate the exact causes of head checks, the topic and origin of head checks will be explained in the first step on the basis of previously known literature. In the second step, track measurement data of ÖBB-Infrastruktur AG will be systematically analyzed and analyzed with regard to different influencing parameters. As influencing factors, the route parameters radius of curvature, superelevation excess, longitudinal inclination and the list of locally permissible speeds (VzG) are selected. The VzG represents the locally permissible maximum speeds and is not a parameter for the actually driven speeds. The rail network of ÖBB-Infrastruktur AG is subdivided into its individual routing elements (straight line, arch, transitional arch) for its systematic investigation, and the deepest cracks per routing element determined by head checks are used for analyzes.

The results of the evaluations are presented on the basis of diagrams and placed in context with the theories of the literature search. Head checks occur mainly in arches of the rail outside with radius between 400 to 2000 meters, as well as increasingly towards the end in the direction of travel. A correlation between the radius of curvature and the emergence of head-checks could be proven, a theory for the occurrence of head-checks towards the end of the curve could not be established. The findings of the relationship between the radius of curvature and the growth of head checks as well as the increased emergence of head checks towards the end of the curve are consistent with the years of experience of ÖBB-Infrastruktur AG and can be regarded as plausible.

As a final result, data of the rail grades R260 and R350 HT are displayed and visualized by means of correlation coefficients. No correlation could be found between one of the influencing factors excess surplus, longitudinal inclination and the VzG and the emergence of head checks.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	2
Eidesstattliche Erklärung	2
Zusammenfassung	3
Abstract	4
1 Einleitung und Themenfestlegung	9
1.1 Ziel und Aufbau der Diplomarbeit	9
1.2 Aufbau des Fahrweges	9
2 Einwirkungen auf die Schiene	10
2.1 Entstehung von Vertikalkräften	11
2.1.1 Kräfte infolge Eigengewichts	11
2.1.2 Zusätzliche vertikale Kräfte infolge Bogenfahrten	12
2.1.3 Zusätzliche vertikale Kräfte infolge Radschäden	12
2.1.4 Zusätzliche vertikale Kräfte infolge Oberflächenfehler	13
2.2 Entstehung von Querkräften	13
2.2.1 Querkräfte infolge Betriebsbelastung	13
2.2.2 Querkräfte infolge Überhöhungen	15
2.3 Entstehung von Längskräften	16
2.3.1 Kräfte infolge Fahrbetriebs	16
2.3.2 Materialeigenspannungen infolge Herstellprozesse	17
2.3.3 Zusätzliche Spannungen infolge Temperatureinwirkung	18
3 Widerstände der Schiene	19
3.1 Anforderungen an die Schiene	19
3.2 Festigkeitseigenschaften von Stahl	19
3.2.1 Zugfestigkeit	19
3.2.2 Härte nach Brinell	20
3.2.3 Härte nach Vickers	21
3.2.4 Stahlsorte	21
3.2.5 Wärmebehandelte Stähle (HT)	22
3.2.6 Schienenstrategie	24
3.3 Schienenform	24
3.3.1 Dauerhaftigkeit der Schienenform	24
3.3.2 Anforderungen an die Schienenform	25

3.3.3	Flächenträgheitsmoment	25
3.3.4	Widerstandsmoment	26
3.3.5	Metergewicht der Schienenform	27
4	Schienenschäden	28
4.1	Allgemeine Grundsätze	28
4.2	UIC-Schienenfehlerkatalog.....	28
4.3	Materialverlust durch Verschleiß.....	28
4.3.1	Abrasiver Verschleiß	29
4.3.2	Adhäsiver Verschleiß.....	30
4.3.3	Kaltverformung (Verwalzungen)	30
4.3.4	Riffel- und Schlupfwellenbildung	31
4.4	Korrosion.....	31
4.5	Rollkontaktermüdung	31
4.5.1	Squats.....	32
4.5.2	Belgrospis	32
5	Head-Checks	33
5.1	Entstehung und Wachstum von HC.....	33
5.1.1	Phasen der Entwicklung von HC.....	34
5.1.2	Abstände der HC-Risse	36
5.1.3	Einflussfaktoren auf HC.....	37
5.1.4	Zusammenhang Verschleiß der Schiene und HC.....	41
5.1.5	Wachstumsraten von HC der DB AG	43
6	Behebung von Schienenfehlern	44
6.1	Schienenschleifen	44
6.1.1	Neuschienenschleifen.....	44
6.1.2	Erhaltungsschleifen	45
6.1.3	Präventives Schleifen	45
6.1.4	Oszillierendes Schleifverfahren.....	45
6.1.5	Rotierende Schleifverfahren	46
6.2	Schienenfräsen.....	46
6.3	High Speed Grinding (HSG).....	47
7	Instandhaltungsstrategien betreffend Head-Checks	48
7.1	Eingriffsschwellen bezüglich HC	48

7.1.1	Eingriffsschwellen der ÖBB-Infrastruktur AG.....	48
7.1.2	Eingriffsschwellen der DB AG	49
7.2	Schleifhäufigkeit	50
8	Messdaten.....	51
8.1	Optische Messungen der Schiene	51
8.2	Wirbelstrom- und Ultraschallmessungen.....	51
8.2.1	Technik der Wirbelstromprüfung	51
8.2.2	Technik der Ultraschallprüfung.....	52
9	Analyse der Messdaten der ÖBB-Infrastruktur AG.....	53
9.1	Plausibilitätsprüfungen der Wirbelstrommessungen	53
9.2	Auswahl der zu untersuchenden Strecken	53
9.3	Auswertung der Datenbank der ÖBB-Infrastruktur AG	53
9.3.1	Allgemeine Informationen	53
9.3.2	Prinzip der ersten Phase: Unterteilung in die TE.....	54
9.3.3	Prinzip der zweiten Phase: Auswertung der TE.....	54
9.4	Analyse der ermittelten TE	56
9.4.1	Einflussparameter Innen-, Außenschiene	56
9.4.2	Analyse der Positionszahl	57
9.4.3	Einflussparameter Bogenradius	58
9.4.4	Analyse der Schienengüte der Außenschiene	60
9.4.5	Analyse des Schädigungskoeffizienten	60
9.4.6	Zeitkoeffizient & Belastungskoeffizient (BK)	61
9.5	Filterungen der TE.....	62
9.6	Korrelationsanalyse potentieller Einflussfaktoren auf Entstehung und Wachstum von Head-Checks.....	63
9.6.1	Korrelationskoeffizient von Pearson & Bestimmtheitsmaß	63
9.6.2	Visualisierung mittels Fundamentaldiagrammen.....	64
9.6.3	Ergebnisdarstellungen	64
9.6.4	FD (Längsneigung, BK, VzG).....	68
9.6.5	FD (Längsneigung, BK, Überhöhungsfehlbetrag).....	72
10	Zusammenfassung und Ausblick.....	75
11	Abbildungsverzeichnis	77
12	Tabellenverzeichnis.....	80

13	Literaturverzeichnis	81
14	Anhang	83
14.1	Untersuchte Strecken	83
14.2	Detaillierte Analyse der Fundamentaldiagramme	84

1 Einleitung und Themenfestlegung

Die Österreichischen Bundesbahnen Infrastruktur Aktiengesellschaft (ÖBB-Infrastruktur AG) betreiben ein Schienennetz von ungefähr 5000 Kilometer Streckenlänge[1]. Dieses Schienennetz wird von 42 Eisenbahnverkehrsunternehmen (EVU) in Anspruch genommen. Mit fortlaufender Belastung treten unterschiedliche Schäden an Schienen auf, welche von betrieblichen Einschränkungen bis hin zu einem kompletten Versagen der Schiene führen können. Eine Form von Schienenschäden sind Head-Checks (HC): Regelmäßige, schräge Anrisse der Schienenoberfläche im Nahbereich der Fahrkante. Gemäß Fischmeister [2] entstehen HC durch häufige Belastungen im Berührungspunkt des Eisenbahnrades mit der Schiene und sind in ihrer Entstehung sowie in ihrem Wachstum von unterschiedlichen Parametern abhängig.

1.1 Ziel und Aufbau der Diplomarbeit

Der Entstehungsmechanismus von HC ist noch nicht gänzlich erforscht. Ziel der Arbeit ist eine Untersuchung verschiedener Einflussparameter auf die Entstehung und die Geschwindigkeit des Wachstums von HC. Die Ableitung der auf die Schienenfahrwege einwirkenden Kräfte in den Untergrund spielt eine wesentliche Rolle bei der Entstehung von HC und wird im ersten Teil der Diplomarbeit behandelt. Das Verständnis vom Aufbau und der Funktion des Fahrweges, den Einwirkungen auf die Schiene, der daraus entstehenden Verteilung der Spannungen sowie der Widerstände in der Schiene sowie das Wissen über die daraus resultierenden Schienenschäden, stellen die Grundlage für die folgenden Untersuchungen dar.

Im zweiten Teil der Arbeit werden Überlegungen bezüglich unterschiedlicher Einflussparameter angestellt, die an der Entstehung von HC Einfluss haben könnten. Messdaten der ÖBB-Infrastruktur AG werden mit ausgewählten Parametern analysiert und die daraus gewonnenen Erkenntnisse dargestellt.

1.2 Aufbau des Fahrweges

Der Fahrweg der Eisenbahn besteht aus dem Gleiskörper, unterteilt in einen Unter- sowie in einen Oberbau. Der Unterbau besteht aus verfestigten Tragschichten des Untergrundes und dient der weiteren Abtragung der Lasten ins Erdreich. Der Oberbau liegt auf dem Unterbau auf und stellt die Verbindung zwischen dem Unterbau und dem Eisenbahnrad dar. Aufgabe des Oberbaus ist, neben der flächigen Verteilung einwirkender Kräfte, die Führung der auf den Schienen verkehrenden Fahrzeuge. [3]

2 Einwirkungen auf die Schiene

Die auf die Schienenoberfläche wirkenden Kräfte können gemäß Lichtberger [3] in drei Kraftkomponenten unterteilt werden:

- Vertikalkräfte
- Querkkräfte
- Längskräfte

Vertikalkräfte wirken lotrecht auf die Gleisebene (z.B. das Eigengewicht des Zuges), Querkkräfte beanspruchen das Gleis in Richtung der horizontalen Richtung quer zur Gleisachse (z.B. die Führungskräfte während einer Bogenfahrt) und Längskräfte wirken in Schienenlängsrichtung (z.B. Kräfte infolge Traktion). Eine Darstellung der drei Kraftkomponenten ist gemäß Fischmeister [2] in Abb. 2.1 abgebildet.

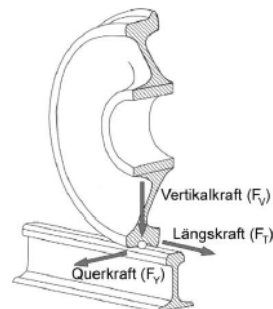


Abb. 2.1: Einwirkende Kräfte auf das Gleis gemäß Fischmeister [2]

Mit fortlaufender Ableitung der Kräfte in vertikaler Richtung wächst die Größe der Abtragungsfläche an und die in Folge resultierenden Spannungen werden kleiner. Eine Übersicht der in vertikale Richtung wachsenden Abtragungsfläche sowie die dazugehörigen Spannungen in Folge einer Überfahrt sind in Abb. 2.2 dargestellt.

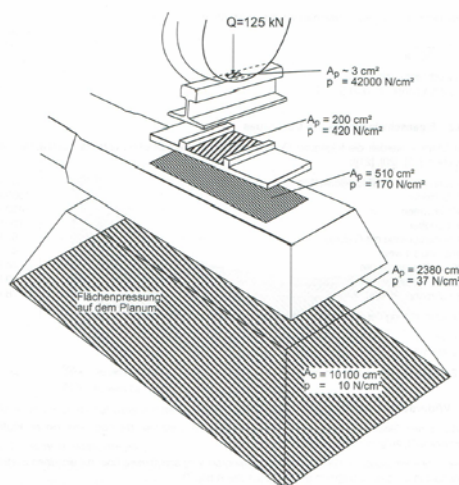


Abb. 2.2: Skizze einer Kraftableitung und -verteilung gemäß Lichtberger [3]

Die direkte Kontaktfläche des Eisenbahnrades mit der Eisenbahnschiene wird als Hertz'sche Fläche bezeichnet und beträgt nach Lichtberger [3] in etwa drei Quadratzentimeter. Auf dieser werden sämtliche Vertikalkräfte des Eisenbahnrades auf die Schiene übertragen. Aufgrund der kleinen Auflagefläche des Eisenbahnrades, sowie der großen Last des Zuges, entstehen in der Hertz'schen Fläche große Spannungen im Schienenmaterial.

Der vollständige Spannungsverlauf eines Schienenprofils ergibt sich bei Überlagerung der Spannungen sämtlicher Einwirkungen. Diese ist für einen Vergleich mit den Widerständen der Schiene heranzuziehen. [3] Ein Beispiel dreier Spannungsverläufe (Biege-, Traktion-, Temperaturspannung) ist in Abb. 2.3 ersichtlich.

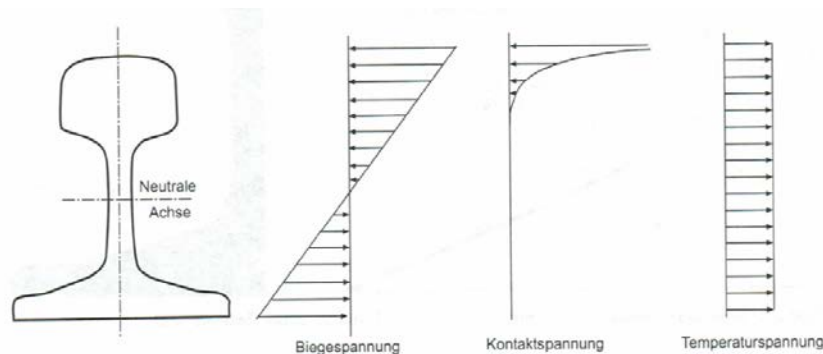


Abb. 2.3: Überlagerung der Schienenspannungen gemäß Lichtberger [3]

2.1 Entstehung von Vertikalkräften

2.1.1 Kräfte infolge Eigengewichts

Vertikalkräfte resultieren durch Radkräfte und wirken lotrecht auf die Gleisebene [3]. Je nach Streckenklasse sind Vertikalkräfte gemäß EN 15228 auf eine maximale Achslast beschränkt. Streckenklassen klassifizieren die Strecken in verschiedene Gruppen von Widerständen (maximale Achslasten von verkehrenden Fahrzeugen), in Abhängigkeit von den Achslasten verkehrender Fahrzeuge [4]. Die zur Bestimmung der Streckenklasse eingehenden Leistungsmerkmale sind gemäß EN 15228 [4]:

- die Achslast
- geometrische Merkmale der Radsatzabstände (Anm.: Maße a und b aus Abb. 2.4)
- die Fahrzeuglänge

Ein Ausschnitt der EN 15228, der höchstzulässigsten Achslasten der verschiedenen Streckenklassen, ist in Abb. 2.4 dargestellt.

Werte der Maße		Streckenklassen						
a	b	A	B2 B1	C4 C3 C2	D5 D4 D3 D2	D4xL	E4 E5	E6
m	m	t	t	t	t	t	t	t
1,80	1,50	16,0	18,0	20,0	22,5	22,5	25,0	25,0
	1,40	15,0	17,0	19,0	21,5	22,5	24,0	25,0
	1,30	14,5	16,5	18,5	20,5	22,0	23,0	25,0

Abb. 2.4: Höchstzulässigste Radsatzlasten gemäß EN 15528 [4]

Das österreichische Schienennetz wird als Mischverkehrsstrecke betrieben und entspricht den Streckenklassen der Kategorie D. Gemäß EN 15228 darf auf dem österreichischen Schienennetz, mit wenigen Ausnahmen, eine maximale Radsatzlast von 22,5 Tonnen zugelassen werden.

2.1.2 Zusätzliche vertikale Kräfte infolge Bogenfahrten

Aufgrund der Fliehkraft entwickelt der durchfahrende Zug während seiner Fahrt im Bogen eine horizontale Beschleunigung auf die Bogenaußenseite. Diese kann wie folgt berechnet werden:

$$F = m * \frac{v^2}{r} \quad (1)$$

F..... Fliehkraft/Querkraft/Spurführungskraft [N]
m Masse des Waggons [kg]
v Geschwindigkeit [m/s]
r Bogenradius [m]

Die Resultierende der Fliehkräfte wirkt im Schwerpunkt des Zuges. Dieser befindet sich über der Schienenoberkante, in dessen Folge sich ein Moment entwickelt. Dieses Moment der Fliehkraft führt zu einer Verlagerung der Radkräfte von der Bogeninnenseite zur Bogenaußenseite hin: Die vertikale Belastung der Außenschiene des Bogens wird größer. Die Änderungen der vertikal wirkenden Radkräfte infolge einer Bogenfahrt können gemäß Hempe [5] berechnet werden:

$$\frac{Q_0 + \Delta Q}{Q_0} = \frac{v^2}{rGs} * (2h_s + u) - \frac{1}{s^2} * 2uh_s \quad (2)$$

Q₀..... statische Radkraft [N]
ΔQ..... quasistatische Radkraftvergrößerung/ bzw. -verkleinerung [N]
V Fahrgeschwindigkeit [m/s]
r Bogenhalbmesser [m]
G Erdbeschleunigung (9,81 m/s²)
s Stützweite [m] (Normalspur: 1,5m)
h_s..... Höhe des Fahrzeugschwerpunktes über der Schienenoberkante [m]
u..... eingebaute Überhöhung [m]

2.1.3 Zusätzliche vertikale Kräfte infolge Radschäden

Je glatter Rad- und Schienenoberfläche sind, je gleichmäßiger die Radrundheit und je besser die Gleislage ist, desto geringer fallen die dynamischen Anteile der Radkräfte auf die Gleisinfrastruktur aus. Um Unregelmäßigkeiten beim Rollvorgang von Eisenbahnrädern zu verhindern, werden diese in kontinuierlichen Abständen auf ihren aktuellen Zustand kontrolliert und dabei auffallende Schäden behoben. Eine Schadenform von Eisenbahnrädern stellen Flachstellen dar. Eisenbahnräder mit Flachstellen besitzen keine vollkommene Rundheit, der Radius des Rades ist über den Radumfang nicht konstant. Es entwickelt sich eine Unwucht während des Fahrens, infolge derer das beschädigte Eisenbahnrad in kontinuierlichen Abständen eine größere Kraftkomponente in das Gleis einbringt. [6]

Flachstellen verursachen während der Fahrt übliche zusätzliche Schienenspannungen in der Größenordnung von 400-800 N/mm² [3]. Die Deutsche Bahn Aktiengesellschaft (DB AG) betreibt seit den 90er Jahren Messstellen für Vertikalkräfte, in deren Auswertungen die

zusätzlichen vertikale Belastungen infolge schadhafter Eisenbahnräder deutlich erkennbar sind. Ein Beispiel einer Auswertung ist in Abb. 2.5 dargestellt. In diesem zeitlichen Verlauf der gemessenen Vertikalkraft ist eine Flachstelle eines Güterwaggonrades und die daraus resultierenden Vertikalkräfte von bis zu 200kN ersichtlich. [6]

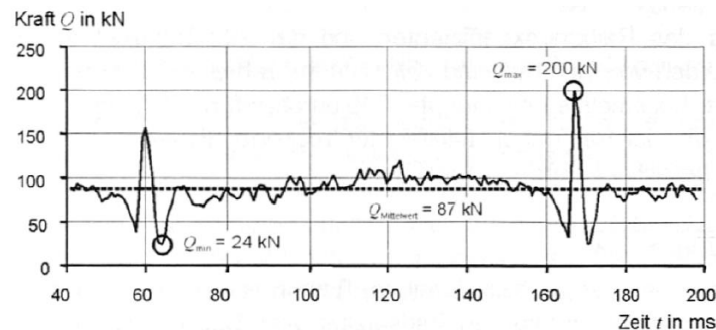


Abb. 2.5: Vertikalkraftverlauf eines Güterwagenrades mit Flachstelle gemäß Reinecke, Jörg-Michael und Jelinski [6]

2.1.4 Zusätzliche vertikale Kräfte infolge Oberflächenfehler

Züge verursachen bei Überfahrt einer fehlerlosen Schiene vertikale Beschleunigungen von rund 10g bei dieser. Oberflächenfehler stellen unter anderem Risse in der Fahrfläche dar, in Folge dessen die Ableitung (Verteilung) der Kräfte nicht mehr in alle Richtung möglich ist und sich die Spannungen in der Schiene weiters erhöhen. Messungen bei Schienen mit Schienenoberflächenfehlern ermitteln Beschleunigungen der Schiene von rund 100g. Oberflächenfehler der Schiene führen zu wesentlich höheren vertikalen Beschleunigungen des Gleises sowie zu höheren Spannungen in der Schiene. [3]

2.2 Entstehung von Querkräften

Querkräfte beanspruchen das Gleis in horizontaler Richtung quer zur Gleisachse und entstehen nach Lichtberger [3] wie folgt:

- direkt aus dem Fahrbetrieb
 - durch Beanspruchung der Spurführungskraft
 - beim Anlaufen des Spurkranzes an die Schienenflanke
- im Zuge von unausgeglichene Seitenbeschleunigungen

2.2.1 Querkräfte infolge Betriebsbelastung

Kräfte infolge des Fahrbetriebs unterscheiden sich je nach Trassierungselement in ihrer Größe sowie in ihrem Entstehungsprinzip [3].

Fahrt auf der Geraden: Ein Radsatz der Eisenbahn bildet während seiner Fahrt in der Geraden einen Wellenlauf. Dies ist der konischen Form des Eisenbahnrades zu verdanken und dient einem sicheren und ruhigen Lauf der Fahrzeuge. Der Wellenlauf eines Eisenbahnradatzes ist in Abb. 2.6 dargestellt.

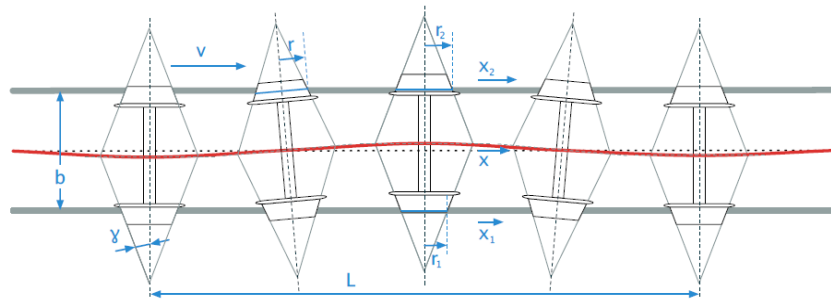


Abb. 2.6: Wellenlauf des Radsatzes [7]

Ausgehend von dieser stetigen Bewegung des Radsatzes von einer Schiene zur anderen entstehen horizontale Führungskräfte. Diese werden als Querkkräfte in der Hertz'schen Fläche auf die Schienenoberfläche initiiert [3].

Fahrt im Bogen: Während der Bogenfahrt eines Zuges entstehen horizontale Fliehkräfte des durchfahrenden Fahrzeuges (horizontale Seitenbeschleunigungen). Diese initiieren Querkkräfte auf die Schienenoberfläche. Um den Verschleiß der Schiene (Materialabrieb der Schiene) gering zu halten und Passagieren einen angenehmen Fahrkomfort zu bieten, ist in Österreich die unausgeglichene (wirkende) Seitenbeschleunigung der verkehrenden Fahrzeuge auf $0,85 \text{ m/s}^2$ beschränkt [3].

Aufgrund der Steifigkeit und Trägheit des Radsatzes sowie der resultierenden Fliehkraft (1) ist bei kleineren Bogenradien eine größere Spurführungskraft von Nöten. Dieser Effekt der steigenden Spurführungskraft tritt gemäß (1) ebenfalls bei steigender Geschwindigkeit des durchfahrenden Zuges ein. Bögen mit kleineren Radien werden in der Regel langsamer durchfahren und die Fliehkraft dadurch verringert. Eine Abschätzung der horizontalen Führungskräfte in Abhängigkeit des Bogenradius zeigt Abb. 2.7.

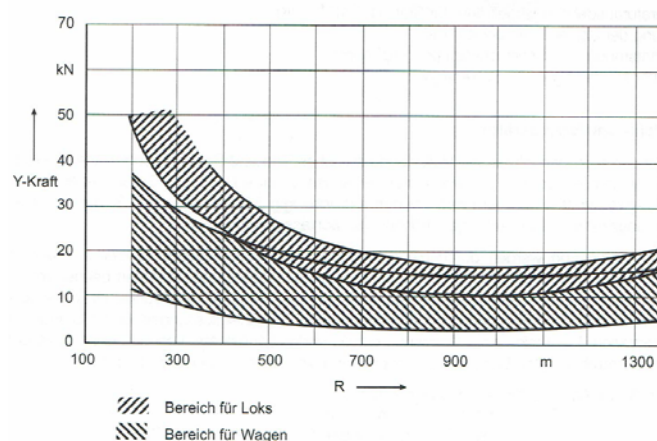


Abb. 2.7: Horizontale Führungskräfte abhängig vom Bogenradius gemäß Lichtberger [3]

In Folge der konischen Form des Eisenbahnrades besitzt das Eisenbahnrad keinen konstanten Radumfang quer zu seiner Lauffläche, sondern kann vereinfacht als Kegelstumpf betrachtet werden. Aufgrund dessen kann der Radsatz der Eisenbahn den Sonderfall der Bogenfahrt "Reines Rollen" bilden. Bei diesem Sonderfall durchläuft das

A diagram of a vehicle on a banked curve. The vehicle is tilted at an angle α relative to the vertical. The forces acting on it are:

- G : Gravitational force, acting vertically downwards from the center of gravity S .
- F : Centrifugal force, acting horizontally outwards from S .
- $G \cdot \sin \alpha$: Component of gravity acting parallel to the track, pointing upwards.
- $F \cdot \cos \alpha$: Component of centrifugal force acting parallel to the track, pointing downwards.
- $G \cdot \cos \alpha$: Component of gravity acting perpendicular to the track, pointing outwards.
- $F \cdot \sin \alpha$: Component of centrifugal force acting perpendicular to the track, pointing inwards.

 The track is inclined at an angle α to the horizontal. The distance from the center of gravity S to the track surface is labeled b . The track surface is labeled "SOK".

15

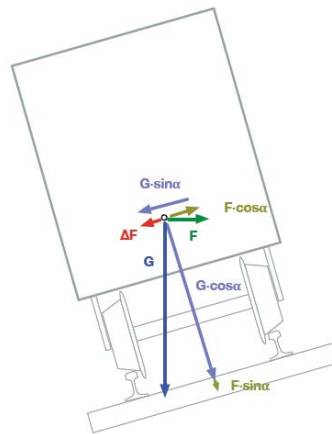


Abb. 2.9: Skizze der Kräfte in Folge einer Überhöhung mit $v < v_E$ [7]

Wird der Bogen mit einer höheren Geschwindigkeit als der Entwurfsgeschwindigkeit v_e befahren, stellt sich dieser Effekt auf der Bogenaußenseite ein. Die dabei entstehenden Beschleunigungen werden unausgeglichene Seitenbeschleunigungen bezeichnet. [3] Die unausgeglichene Seitenbeschleunigung lässt sich anhand der Erdbeschleunigung, des Überhöhungsfehlbetrages sowie der Spurweite laut Hempe [5] wie folgt berechnen:

$$a_f = g * \frac{u_f}{s} \quad (4)$$

a_f unausgeglichene Seitenbeschleunigung [m/s²]
 g Erdbeschleunigung (9,81 m/s²)
 s Spurweite [mm]
 u_f Überhöhungsfehlbetrag [mm]

Überhöhungsüberschüsse und unausgeglichene Seitenkräfte zählen zur Kategorie der Überhöhungsfehlbeträge Δu_f [7]

2.3 Entstehung von Längskräften

Längskräfte wirken in Schienenlängsrichtung und entstehen gemäß Lichtberger [3] wie folgt:

- aus dem Fahrbetrieb (Traktionskräfte)
- aus Materialeigenspannungen durch den Herstellungsprozess der Schiene
- durch Temperatureinwirkungen bei verhinderter Längsausdehnung der Schiene

2.3.1 Kräfte infolge Fahrbetriebs

Um eine sichere Bewegung von Eisenbahnzügen zu ermöglichen, müssen diese beschleunigen (Anfahren) sowie zum Stillstand kommen (Bremsen) können. Mit Hilfe der, zwischen dem Eisenbahnrad und der Schiene befindlichen, Reibung können getriebene Achsen von Triebfahrzeugen Kräfte auf die Schiene übertragen. Diese sogenannten Traktionskräfte initiieren in beide Richtungen Längskräfte in die Schiene. Die aus der Traktion maximal resultierende Längskraft ist von der Masse des Fahrzeuges sowie dem Reibungskoeffizienten zwischen dem Eisenbahnrad und der Schiene abhängig [3]. Der Reibungskoeffizient μ beschreibt die

vorherrschende Reibung zwischen dem Eisenbahnrad und der Schiene (im Bereich der Hertz'schen Fläche) und ist nach Diendorfer [8] von folgenden Einflussparametern abhängig:

- den Materialeigenschaften des Eisenbahnrades und der Schiene
- der Oberflächenbeschaffenheit der Kontaktpartner (z.B. glatt, rau oder Zahnräder)
- der Zwischenschicht (z.B. Schmierstoffe oder Sand)
- den Witterungseinflüssen
- der Geschwindigkeit des Zuges

Abhängig vom vorherrschenden Witterungszustand kann der Reibungskoeffizient stark variieren. Im Allgemeinen treten gemäß Diendorfer [8] folgende Größenordnungen von μ auf:

1. $0,30 < \mu < 0,35$: trockene Schiene und Sand
2. $0,18 < \mu < 0,25$: trockene Schiene
3. $0,16 < \mu < 0,24$: nasse Schiene
4. $0,09 < \mu < 0,15$: verschmutzte Schiene

Die maximal resultierende Längskraft F_R infolge Traktion kann nach Hempe [5] wie folgt berechnet werden:

$$F_R = \mu * F_N \quad (5)$$

F_R Längskraft [kN]

μ Reibungskoeffizient [-]

F_N Masse des Fahrzeuges [kN]

Unter Betrachtung der in Österreich maximal zulässigen Achslasten von 225kN, können Traktionskräfte von bis zu 75kN je Achse übertragen werden. Moderne, leistungsstarke Triebmaschinen besitzen vier angetriebene Achsen und können in Folge Traktionskräfte von bis zu 300kN übertragen. Diese Traktionskräfte bilden, nach den Vertikalkräften, die größte Beanspruchung auf die Schienenoberfläche. [9]

2.3.2 Materialeigenspannungen infolge Herstellprozesse

Eisenbahnschienen werden mittels Walzen in einem Stahlwerk hergestellt. Während und nach den Walzvorgängen im Stahlwerk entstehen im Zuge der Abkühlung Temperaturunterschiede in dieser. Der Stahl kühlt aufgrund der speziellen Form des Schienenprofils nicht gleichmäßig ab und es entwickeln sich unterschiedliche Erstarrungs- und Abkühlungsbedingungen im Schienenmaterial. In Folge bilden sich Eigenspannungen in der Schiene. Eigenspannungen in der Schiene entstehen zudem bei der Verschweißung zweier Schienenendstücke und können Druckspannungen von bis zu 200 N/mm² im Inneren des Schienenkopfes, bzw. Zugspannungen von bis zu 300 N/mm² auf der Schienensohle erreichen. Abb. 2.10 zeigt einen Verlauf der Eigenspannungen in einer unbelasteten, walzneuen Schiene sowie in einer Schiene unter Betriebslast. [3]

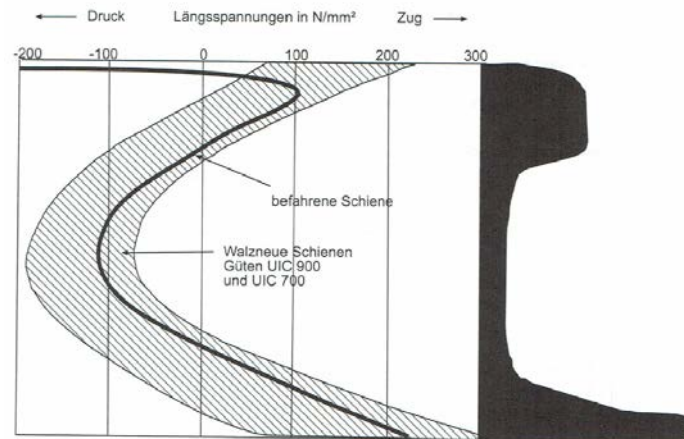


Abb. 2.10: Eigenspannungen in einer walzneuen sowie in einer Schiene unter Betriebslast gemäß Lichtberger [3]

2.3.3 Zusätzliche Spannungen infolge Temperatureinwirkung

Erwärmt sich Material, z.B. im Zuge von warmen Temperaturen im Sommer, dehnt sich dieses gemäß seinem spezifischen Wärmekoeffizienten aus. In lückenlos verschweißten Schienen können - aufgrund fehlender Dehnungsfugen - keine Längsdehnungen aufgenommen werden und es bilden sich Spannungen in der Schiene. Diese sind abhängig vom Schientyp sowie der Neutraltemperatur (Temperatur der Schiene ohne Spannung) der Schiene.

3 Widerstände der Schiene

Einwirkungen auf die Schienenoberfläche stehen Widerstände der Schiene entgegen.

3.1 Anforderungen an die Schiene

„Für die Eisenbahn ist die Schiene Fahrfläche, Träger und Führungselement zugleich. Sie wird statisch und dynamisch gleichermaßen beansprucht. [...] Abhängig von der Topografie werden Schienen mit engen Radien bis unter 300m verlegt und sind damit hohen seitlichen Beanspruchungen durch das anlaufende Rad ausgesetzt.“ - Lichtberger [3]

Um den auf die Schienenoberfläche wirkenden Beanspruchungen langfristig zu widerstehen, ergeben sich nach Lichtberger [3] folgende Anforderungen an die Schiene:

- hoher Verschleißwiderstand
- hoher Widerstand gegen Verquetschungen
- hohe Ermüdungsfestigkeit
- hohe Streckgrenze, Zugfestigkeit und Härte
- hohe Sprödbbruchfestigkeit
- gute Oberflächenbeschaffenheit
- geringe Eigenspannungen nach der Produktion
- u.v.m.

3.2 Festigkeitseigenschaften von Stahl

3.2.1 Zugfestigkeit

Die Festigkeit eines Elements ist mit der Widerstandsfähigkeit des Elements gegenüber Verformung und Trennung definiert. Die Festigkeit eines Materials entspricht einer maximalen Spannung, welche im Zuge einer einwirkenden Kraft vom Material aufgenommen werden kann. Die Festigkeit von Stahl wird anhand von Versuchen am Material festgestellt. Einen Versuch stellt der Zugversuch dar. Der Zugversuch ermittelt anhand des Spannung-Dehnungs-Diagrammes des Schienenstahls dessen Zugfestigkeit R_m [N/mm²]. Die Zugfestigkeit R_m ist mit der höchsten von Beginn der Messung bis zum auftretenden Bruch des Probenmaterials ermittelten Spannung definiert und stellt den größten Widerstand des Schienenmaterials unter Zug dar. [10] Ein Beispiel eines Spannung-Dehnungs-Diagramms, inklusive der Darstellung der Zugfestigkeit, ist in Abb. 3.1 ersichtlich.

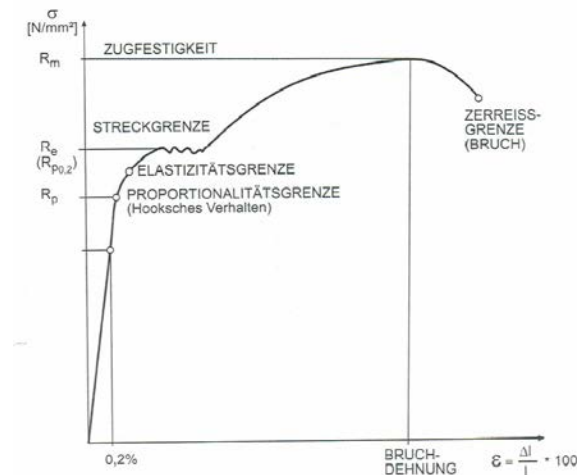


Abb. 3.1: Schematische Darstellung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms gemäß Lichtberger [3]

Die Zugfestigkeit des Schienenstahls wurde in den letzten Jahren kontinuierlich weiterentwickelt. [9] Ein Überblick über die Entwicklungen der Zugfestigkeiten der Schienenstähle am Schienenkopf sowie am Schienenfuß der letzten Jahre ist in Abb. 3.2 ersichtlich.

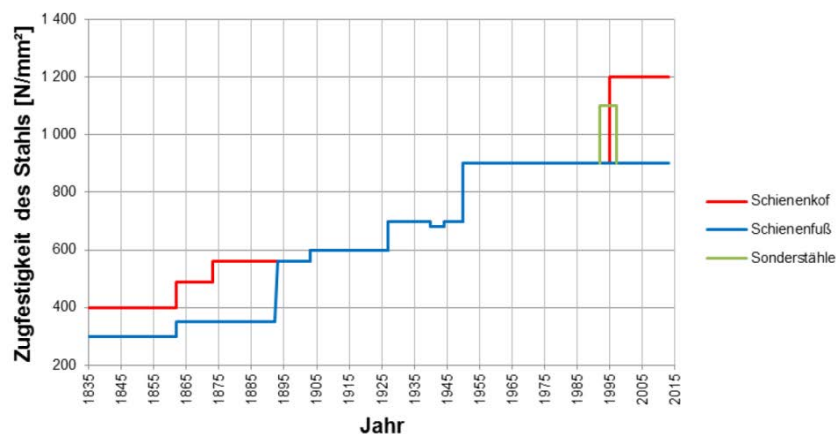


Abb. 3.2: Entwicklung der Schienenhärte nach Popp [9]

3.2.2 Härte nach Brinell

Die Härte eines Elements ist mit dem mechanischen Widerstand, den ein Werkstoff dem mechanischen Eindringen eines externen Körpers entgegensetzt, definiert und gilt als ein Maß für das Verschleißverhalten von Materialien. Die Ermittlung der Härte des Schienenstahls erfolgt durch Versuche an Probekörpern. Dabei werden genormte Prüfkörper unter festgelegten Bedingungen in das Werkstück eingedrückt und im Anschluss die Tiefe des erzeugten Eindrucks gemessen. Die Härteprüfung nach Brinell stellt eine solche Prüfung der Härte dar und ermittelt die Brinell-Härte (HB). Bei dieser Härteprüfung wird eine genormte Stahlkugel für 10-15 Sekunden mit einer festgelegten Prüfkraft auf die Oberfläche des Prüfkörpers gepresst und die dabei erzeugte Fläche des Abdrucks ermittelt. [10] Eine Darstellung des Versuchs zur Ermittlung der HB ist in Abb. 3.3 dargestellt.

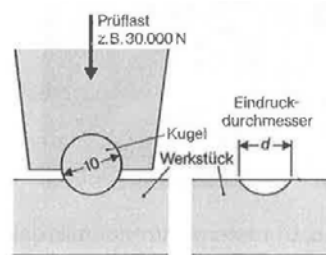


Abb. 3.3: Ermittlung der Härte des Materials nach Brinell gemäß Fink [10]

Die HB ist mit dem Verhältnis der Prüfkraft zur Oberfläche des entstehenden Eindrucks definiert. Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Brinellhärte und der Zugfestigkeit des Schienenstahls. [3]

3.2.3 Härte nach Vickers

Die Härteprüfung nach Vickers stellt eine ähnliche Härteprüfung wie nach Brinell dar. Bei der Härteprüfung nach Vickers wird, im Gegensatz zur Härteprüfung nach Brinell, eine genormte Pyramide aus Diamant mit einer vordefinierten Kraft in das Probenstück eingedrückt. [10]

3.2.4 Stahlsorte

Die Stahlsorte der Schienen wird Schienengüte bezeichnet und wurde in der Vergangenheit anhand des UIC-Kodex 860 V sowie der Zugfestigkeit bestimmt. Derzeit wird die Schienengüte anhand der Brinell-Härte am Schienenkopf sowie der EN 13674-1 klassifiziert. Eine Angabe der HB am Schienenkopf ist zielführend, da die Härte des Stahls im Bereich des Schienenkopfs mittels Nachbearbeitung der Schienen im Zuge ihrer Produktion gezielt gesteigert werden kann. Zudem ist der Schienenkopf, in Funktion der Fahrfläche, den Radkräften direkt ausgesetzt und die entstehenden Spannungen am Schienenkopf größer als beim Rest der Schiene. Eine Auflistung, der zurzeit im Schienennetz der ÖBB-Infrastruktur AG zur Anwendung kommenden Stahlsorten, ist in Tab. 1 ersichtlich. In dieser sind zusätzlich die nach dem veraltenden UIC-Kodex 860 V geltenden Bezeichnungen sowie deren Zugfestigkeiten des Schienenstahls, in grauer Schriftfarbe, angeführt.

Stahlbezeichnung		R_m	Härte
UIC 860 V	EN 13674-1	[N/mm ²]	[HB]
700	R 200	680	200
900A	R260	880	260
1100	R260 Mn	880	260
1200	R320 Cr	1180	320
1200HH	R350 HT	1175	350
1400	R400 HT	1280	400

Tab. 1: Übersicht der Festigkeiten von Schienenstählen gemäß Lichtberger [3]

Zusätze bei Schienenstählen beeinflussen gemäß Fink [10] dessen Eigenschaften. Die bei Schienenstahl zur Anwendung kommenden Zusätze und Behandlungen, sowie dessen positive Wirkungen auf den Stahl sind gemäß Fink [10]:

- Mangan (Mn): Erhöht die Festigkeit von Stahl, verbessert die Schweißbarkeit und vermindert die Gefahr der Brüche im rotglühenden Zustand während des Herstellungsprozesses
- Chrom (Cr): Erhöht den Widerstand gegen Rosten des Stahls
- Wärmebehandelte (HT) Stähle: Weisen höhere Festigkeiten des Stahls auf

3.2.5 Wärmebehandelte Stähle (HT)

In geraden Streckenabschnitten besitzt eine Schiene mit Stahlgüte "R260" eine Verschleißrate von rund 0,7 bis einen Millimeter je 100 Millionen Bruttotonnen Belastung. Derartige Verschleißraten stellen im Sinne der Wirtschaftlichkeit (einer langen Nutzungsdauer) akzeptable Werte dar. Die Verschleißraten von Schienen in Bögen liegen über den Verschleißraten von Schienen in geraden Streckenabschnitten. Überwiegend in Bögen mit kleinen Radien sowie der Stahlgüte "R260" ist der Widerstand gegen Verschleiß im Sinne der Wirtschaftlichkeit nicht groß genug. Ein Schienenbogen mit einem Radius von 600 Metern und derselben Stahlgüte "R260" weist eine Verschleißrate von in etwa zwei bis drei Millimeter je 100 Millionen Bruttotonnen Belastung auf. Eine Lösung des Problems - eine Verminderung der Verschleißrate - kann mit einer Erhöhung der Schienenstahlzugfestigkeit erfolgen. Eine Steigerung der Zugfestigkeit der Schiene um 200 N/mm^2 entspricht einer Halbierung der Verschleißrate der Schiene. Eine solche Erhöhung der Schienenstahlzugfestigkeit sowie der Schienenstahlhärte kann mittels Wärmebehandlungen erfolgen. [3] Die zwei wesentlichsten Verfahren der Wärmebehandlungen sind gemäß Lichtberger[3] das Off-Line-Härten sowie das In-Line-Härten.

Off-Line-Härten: Beim Verfahren des Off-Line-Härtens wird die Schiene auf rund $850\text{-}950^\circ\text{C}$ erhitzt und anschließend der Schienenkopf mit Druckluft, Sprühwasser oder Wassernebel rasch abgekühlt. Im Zuge dieser raschen Abkühlung des Schienenstahls entstehen große Eigenspannungen im Querschnitt der Schiene und es entwickelt sich ein feines Gefüge des Schienenstahls mit hoher Härte sowie hoher Festigkeit an der Schienenoberfläche. Neben diesen Vorteilen können gemäß Lichtberger [3] folgende Nachteile des Off-Line-Härtens festgestellt werden:

- die Eindringtiefe der Verhärtung ist begrenzt
- Schienen müssen vor der Behandlung gerichtet werden (Anmerkung: Das Richten der Schiene dient der Beseitigung von etwaigen Abweichungen vom geraden Verlauf der Schiene. Eine nachträgliche Richtung der Schienen ist aufgrund der im Verlauf der Abkühlung entstehenden Eigenspannungen nicht mehr möglich.)

In-Line-Härtung: Beim Verfahren der In-Line-Härtung wird die Schiene direkt nach dem Herstellprozess zur Härteanlage transportiert. In der Härteanlage wird der Schienenkopf in einem Härtebad (ein Wasserbecken mit synthetischen Zusätzen) abgeschreckt und es entwickelt sich, analog zum Off-Line-Härten, ein feines Gefüge mit hoher Härte sowie hoher Festigkeit an der Schienenoberfläche. Die synthetischen Zusätze im Wasserbecken

sorgen für eine geringere Abkühlintensität sowie für gleichmäßigere Abkühlbedingungen im Schienenstahl. Erreicht der Schienenstahl eine Temperatur von 60°C wird die Schiene gerichtet und abschließend geprüft.

Die Unterschiede der Spannung-Dehnungs-Diagramme von unbehandelten (naturharten) sowie wärmebehandelten (kopfgehärteten) Schienen sind in Abb. 3.4 ersichtlich. Wärmebehandelte Schienenstähle erreichen wesentlich höhere Zugfestigkeiten als unbehandelte Schienenstähle.

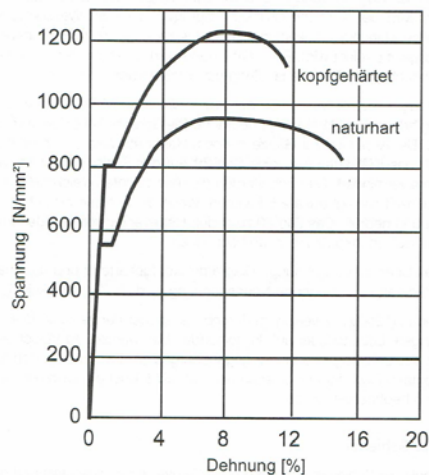


Abb. 3.4: Spannung-Dehnungs-Diagramm kopfgehärtetem und naturhartem Schienenstahls gemäß Lichtberger [3]

Wärmebehandelte Schienen weisen neben der größeren HB sowie der höheren Zugfestigkeit einen höheren Widerstand gegen Verschleiß auf. Ein Überblick über den Verschleiß von unterschiedlichen Schienenstahlgüten ist in Abb. 3.5 dargestellt. In dieser Abbildung sind die dargestellten Stahlgüten nach dem veralteten Kodex UIC 860 V bezeichnet.

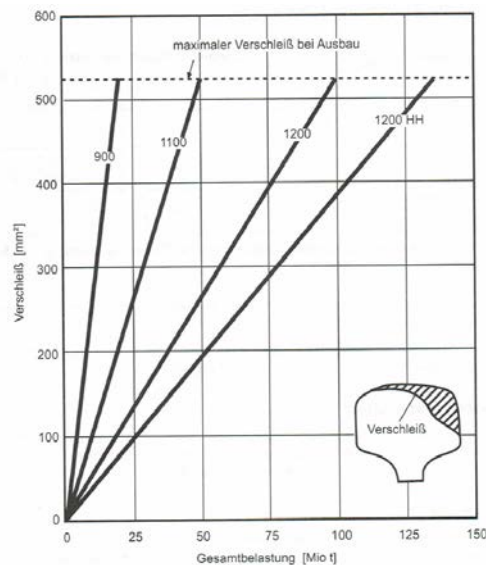


Abb. 3.5: Verschleiß von unterschiedlichen Stahlgüten gemäß Lichtberger [3]

3.2.6 Schienenstrategie

Eine Schienenstrategie bestimmt die Verwendung von Stahlgüten bei Streckenabschnitten mit bestimmten Trassierungs- und Nutzungseigenschaften. Die Schienenstrategie für das österreichische Schienennetz ist der Oberbauvorschrift (B 50-1) der ÖBB-Infrastruktur AG zu entnehmen. In Abhängigkeit vom Bogenradius, der Belastung des Gleises sowie in Streckenabschnitten mit regelmäßiger Bildung von HC sollen gemäß der Schienenstrategie der ÖBB-Infrastruktur AG kopfgehärtete Schienen zur Anwendung kommen. Zudem wird in der Oberbauvorschrift der ÖBB-Infrastruktur AG aufgrund des konstanten Richtungsbetriebs auf zweigleisigen Strecken zwischen Strecken mit einem und mehreren Gleisen unterschieden. Gemäß der Oberbauvorschrift der ÖBB-Infrastruktur AG gilt:

Für 1-gleisige Strecken:

Bogenradius ≤ 1200 m: R350 HT

Bogenradius > 1200 m: R260

Für 2-gleisige Strecken:

Bogenradius ≤ 600 m: R350 HT

Bogenradius > 600 m: R260

3.3 Schienenform

3.3.1 Dauerhaftigkeit der Schienenform

Schienen werden aus Stahl hergestellt und besitzen im Allgemeinen homogene Festigkeitseigenschaften über den gesamten Querschnitt, ausgenommen von kopfgehärteten Schienen sowie Produktionsfehlern. Um u.A. Biegezugspannungen (Kraftverteilungen im Querschnitt) entgegenzuwirken, kommen unterschiedliche Schienenformen zur Anwendung. Schienenformen können gemäß Lichtberger [3] in folgende Gruppen unterteilt werden:

- Vignolschienen
- Doppelkopfschienen (Anm.: Veraltet)
- Rillenschienen (i.A. für Straßenbahnen)
- Weichenschienen
- Kran- und Portalschienen
- u.v.m.

Vignolschienen werden standardmäßig für Vollbahnen (z.B. der ÖBB-Infrastruktur AG) verwendet und besitzen im Gegensatz zu Rillenschienen keine gesonderte Freihaltung der Schienenfahrfläche. Vignolschienen unterteilen sich weiters in Profile mit unterschiedlichen Abmessungen der Profilhöhe, -breite, der Stegbreite, etc. Detaillierte Abmessungen sowie die dazugehörigen Bezeichnungen der Profile von Vignolschienen sind der DIN EN 13674-1 zu entnehmen. Bei der ÖBB-Infrastruktur AG kommt zurzeit hauptsächlich die Schienenform UIC 60E1 standardmäßig zur Anwendung.

In der Vergangenheit waren im Schienennetz der ÖBB-Infrastruktur AG bis zu 54 unterschiedliche Schienenformen eingebaut. Heutzutage werden im Schienennetz der ÖBB-Infrastruktur AG nur noch jene in Tab. 2 ersichtlichen Schienenformen, in Abhängig der zu erwartenden Schienenbelastungen, verwendet.

Schienenform	Dauerfestigkeit der Schiene
49 E1	ungefähr 280 Millionen Lasttonnen
54 E2	ungefähr 380 Millionen Lasttonnen
60 E1	mehr als 1000 Millionen Lasttonnen

Tab. 2: Aktuell verwendete Schienenformen und deren Dauerfestigkeiten

Die Schienen des österreichischen Schienennetzes sind größtenteils auf Dauerfestigkeiten über 380 Millionen Lasttonnen ausgelegt und daher gemäß Tab. 2 im österreichischen Schienennetz die Schienenform 60 E1 eingebaut.

3.3.2 Anforderungen an die Schienenform

Um die Nutzungsdauer der Schienen zu erhöhen und Spannungsverläufe in diesen zu optimieren, können folgenden Anforderungen nach Lichtberger [3] für Schienenprofile definiert werden:

- die Lauffläche der Schiene soll genügend breit und ausgeformt werden, sodass die Flächenpressungen durch optimale Kontaktverhältnisse zwischen Rad und Schiene minimal gehalten werden
- die Höhe des Schienenkopfes soll, auf Hinblick einer lange Liegedauer der Schiene, einen ausreichenden Abnutzungsspielraum bieten
- der Steg muss ausreichend breit sein, sodass die Tragfähigkeit und Biegesteifigkeit der Schiene gewährleistet sind
- der Schienenfuß muss genügend breit sein, sodass die Standsicherheit der Schiene und die auf die Schwelle ausgeübte Flächenpressung gering bleibt
- das Widerstandsmoment der Schiene muss vertikal und horizontal den vorgesehenen Einwirkungen angepasst sein
- Höhe und Fußbreite der Schiene müssen so gewählt sein, dass eine ausreichende Kippsicherheit der Schiene garantiert ist
- der Schwerpunkt der Schiene soll aus statischen Gründen in halber Schienenhöhe liegen

3.3.3 Flächenträgheitsmoment

Zur Beschreibung des Biegeverhaltens eines belasteten Balkens beliebiger Form dient das Flächenträgheitsmoment. Das Flächenträgheitsmoment multipliziert die Flächen des Querschnitts des Elementes mit den Quadraten ihrer Schwerpunktabstände und beschreibt den Widerstand des Querschnitts gegen Einwirkungen von Biegemomenten sowie Torsion [10]. Die Formel zur Berechnung vom Flächenträgheitsmoment lautet gemäß [10]:

$$I_y = \int_A z^2 dA \quad (6)$$

I_y Flächenträgheitsmoment um die x-Achse [cm^4]

z senkrechter Abstand der y-Abstand zum Element dA [cm]

dA Fläche des Elements dA [cm^2]

3.3.4 Widerstandsmoment

Das Widerstandsmoment eines Querschnitts wird durch Rückrechnung des Flächenträgheitsmoments, durch Division des Flächenträgheitsmoments mit dem Abstandes der äußersten Randfaser bis zum Schwerpunkt des Querschnittes, ermittelt. Das Widerstandsmoment setzt sich, analog zum Flächenträgheitsmoment, aus rein geometrischen Größen zusammen und stellt ein Maß für die Widerstandskraft der am stärksten beanspruchten Faser des Querschnittes gegen innere Spannungen dar [10]. Das Widerstandsmoment berechnet sich gemäß Fink [10] mit folgender Formel:

$$W = \frac{I}{a_{\max}} \quad (7)$$

W Widerstandsmoment [m^3]

I Flächenträgheitsmoment [m^4]

$a_{\max}$ Abstand der äußersten Randfaser zum Schwerpunkt des Querschnittes [m]

Wächst das Widerstandsmoment eines Querschnittes, steigt der Widerstand dieses Querschnittes gegen Einwirkungen von Biegezugspannungen an. Beim Querschnitt der Vignolschiene entspricht die vom Schwerpunkt aus entfernteste Faser jener Faser an der Schienenoberkante. Wächst die Höhe der Schiene wächst der Abstand des Schwerpunktes zur äußersten Randfaser an. Das Verhältnis der Schienenhöhe H zum Widerstandsmoment W ist in Abb. 3.6 dargestellt. Mit steigender Schienenhöhe wächst das Widerstandsmoment (der Widerstand der Schiene gegen Einwirkungen von Biegezugspannungen) demnach ebenso an.

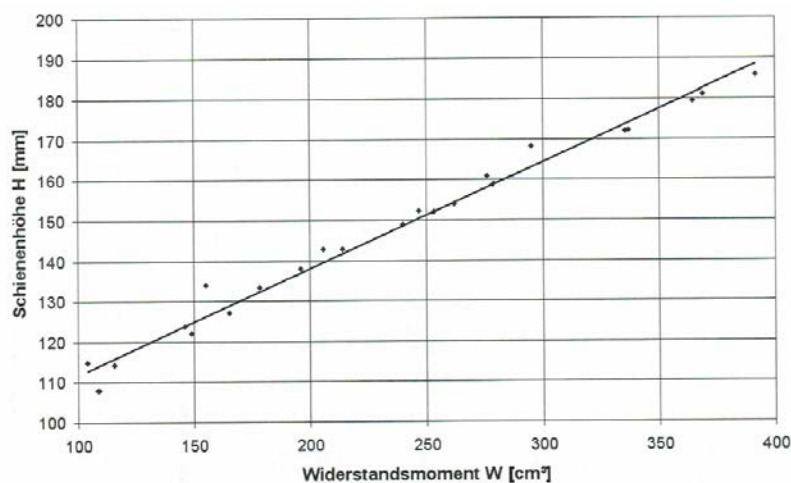


Abb. 3.6: Schienenhöhe versus Widerstandsmoment der Schiene gemäß Lichtberger [3]

3.3.5 Metergewicht¹ der Schienenform

Das Metergewicht der Schiene bezeichnet das Eigengewicht von dieser auf einer Länge von einem Meter und wird in Kilogramm angegeben. Das Metergewicht der Schiene ist in der Profilbezeichnung der DIN EN 13675-1 ersichtlich: Zum Beispiel beträgt das Eigengewicht einer Schiene mit der Form **60E1** (UIC **60**) **60,21kg/m**. Mit steigendem Metergewicht der Schiene wächst die Fläche des Schienenkopfes an und das Trägheitsmoment sowie das Widerstandsmoment der Schiene werden größer. Das Verhältnis des Metergewichts der Schiene zum Widerstandsmoment W ist in Abb. 3.7 dargestellt.

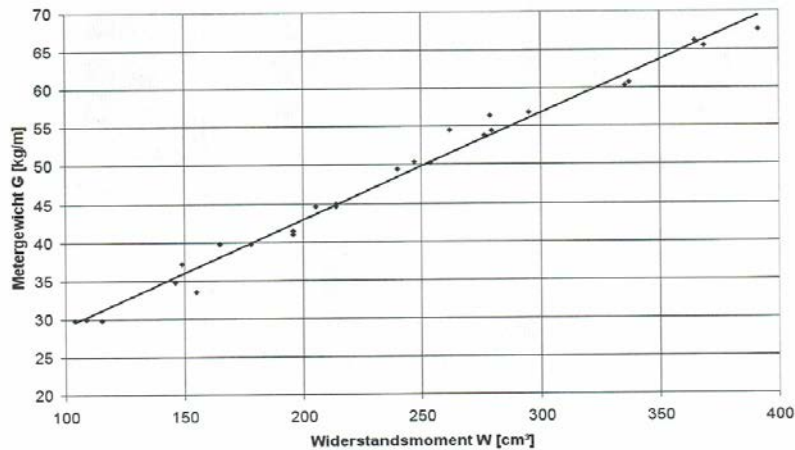


Abb. 3.7: Metergewicht der Schiene versus Widerstandsmoment gemäß Lichtberger [3]

Um die stetig wachsende Beanspruchung auf die Schiene zu kompensieren, wuchs das Metergewicht der Schiene über die letzten Jahre kontinuierlich an. Ein Überblick über die Entwicklung des Metergewichts der letzten Jahre ist Abb. 3.8 zu entnehmen.

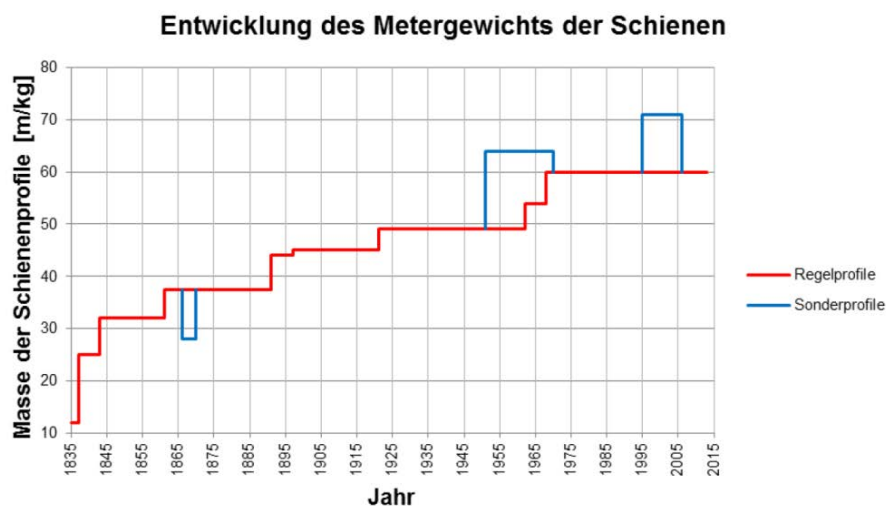


Abb. 3.8: Übersicht über die Entwicklung des Metergewicht der Schiene gemäß Popp [9]

¹Anmerkung: Hierbei handelt es sich um den technischen Begriff des Metergewichts: Um eine physikalisch gesehene Masse mit SI-Einheit Kilogramm und um kein Gewicht mit der SI-Einheit Kilonewton.

4 Schienenschäden

4.1 Allgemeine Grundsätze

Um Beschädigungen an Materialien zu vermeiden gilt grundsätzlich:

$$\text{Einwirkung} \leq \text{Widerstand des Materials} \quad (8)$$

Unter Betrachtung der Spannungen gilt für jedes Element im Gleiskörper:

$$\sigma \leq \sigma_{\text{zulässig}} \quad (9)$$

σ ist die infolge einer Belastung einwirkende Spannung auf das Element sowie $\sigma_{\text{zulässig}}$ die maximal zulässige Spannung des Materials. Einwirkende Kräfte sind gemäß Formel (9) derart flächig zu verteilen, dass keine Überbeanspruchungen und in Folge daraus resultierende Schäden an den Materialien (z.B. der Schiene) entstehen können.

4.2 UIC²-Schienenefehlerkatalog

Im Bereich der Hertz'schen Fläche ist eine flächige Verteilung der einwirkenden Kräfte (aufgrund der kleinen Kontaktfläche des Eisenbahnrades mit der Schiene) nicht möglich und es entstehen Spannungen bis zur Zugfestigkeit des Schienenstahls. Mit fortlaufender Belastung des Gleises treten unterschiedliche Schienenschädigungen ein, welche beginnend bei betrieblichen Einschränkungen bis hin zu einem kompletten Versagen der Schiene führen können. Eine Auflistung und Kategorisierung sämtlicher vorkommender Schienenefehler liefert der UIC-Schienenefehlerkatalog. Mit diesem können detektierte Risse nach ihrer Lage, ihrem Aussehen sowie ihrer Ursache mittels einer Kennziffer eindeutig zugeordnet werden. Die Kategorisierung des UIC-Schienenefehlerkatalog erfolgt gemäß Lichtberger [3] anhand von vier Ziffern.

4.3 Materialverlust durch Verschleiß

Schienenschädigungen können aufgrund ihres Entstehungsmechanismus grundlegend in zwei Gruppen eingeteilt werden. Diese lauten gemäß Lichtberger [3]:

- Materialverlust durch Verschleiß
- Rollkontaktermüdung (RCF³)

„Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers.“ - DIN ISO 50 320 [11]

Der Verschleiß einer Schiene wird mit der Abweichung des aktuellen Schienenprofil vom Soll-Schienenprofils definiert und kann gemäß Lichtberger [3] in eine Höhenabnützung sowie eine Seitenabnützung unterteilt werden. Je nach Grad des Verschleißes, d.h. je nach Abweichung des

² Union internationale des chemins de fer (Deutsch: internationaler Eisenbahnverband): Eine weltweite Organisation mit dem Ziel Betriebsbedingungen der Eisenbahnen zu vereinheitlichen.

³ Rolling Contact Fatigue (Deutsch: Rollkontaktermüdung)

aktuellen Schienenprofils vom Soll-Schienenprofil, werden Maßnahmen in Form von Langsam-Fahrstellen, Sonderinspektionen oder Schienenwechseln ergriffen. [12]

Höhenabnützung der Schiene: Die Höhenabnützung der Schiene ist mit der lotrechten Abweichung der aktuellen Schienenprofile von den Soll-Schienenprofilen in Schienenkopfmittle definiert.

Seitenabnützung der Schiene: Die Seitenabnützung beschreibt die Abweichung der Schienenprofile bei einem Winkel von 45° zur Schienenkopfflanke. Eine Skizze eines Schienenkopfes inkl. seiner Verschleiß-Toleranzen in Hinblick auf seine Seitenabnützung sowie die zu ergreifende Maßnahmen sind in Abb. 4.1 ersichtlich.

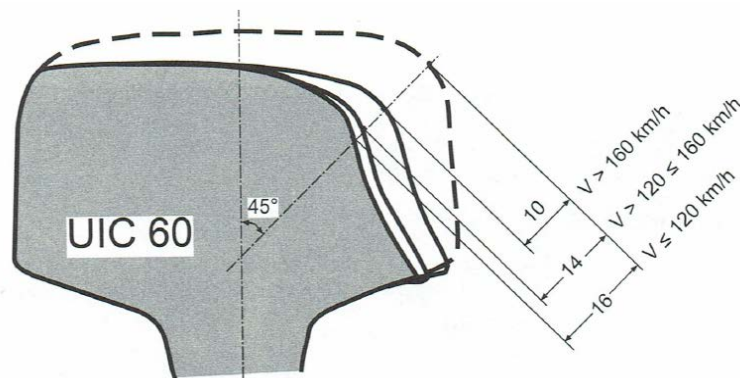


Abb. 4.1: Maximal zulässiger seitlicher Schienenverschleiß gemäß Lichtberger [3]

Ab einem bestimmten Grad des Verschleißes müssen Schienen getauscht werden. Gemäß Popp [9] kann Schienenverschleiß aufgrund seines Entstehungsmechanismus in vier Kategorien eingeteilt werden:

- abrasiver Verschleiß
- adhäsiver Verschleiß
- Kaltverformung (Verwalzungen)
- Riffel- und Schlupfwellenbildung

4.3.1 Abrasiver Verschleiß

Abrasiver Verschleiß bezeichnet den Materialverlust der Schiene in Folge Schlupf- und Führungskräften in der Herz'schen Fläche. Einflussfaktoren für den abrasiven Verschleiß sind, neben dem Material der Schiene bzw. des Rades, die Größen der wirkenden Kontaktkräfte (z.B. unausgeglichene Seitenbeschleunigungen sowie Traktionskräfte). Ein Beispiel von abrasiven Verschleiß ist in Abb. 4.2 dargestellt. [9]

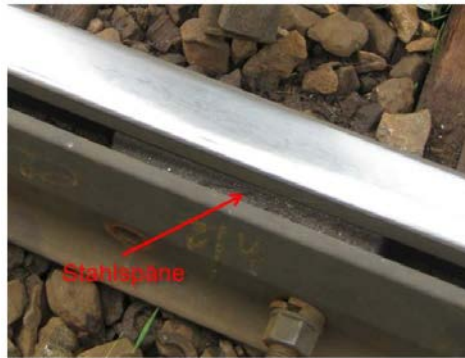


Abb. 4.2: Abrasiver Verschleiß gemäß Auer [13]

Abrasiver Verschleiß tritt sehr häufig bei Bögen mit kleinen Radien auf der Innenseite der Außenschiene auf. Auf der Innenseite der Außenschiene wirken i.A. hohe Radführungskräfte sowie laufen die Spurkränze überdurchschnittlich oft an den Schienenflanken an (bzw. werden sie an diesen geführt). Dies führt zu einem vermehrten Abrieb der Schiene.

4.3.2 Adhäsiver Verschleiß

Aufgrund hoher Kontaktpressung in der Hertz'schen Ebene kommt es zu einem Materialverschleiß der beiden Kontaktpartnern (der Eisenbahnschiene sowie dem Rad). Der dabei auftretende Verschleiß wird als adhäsiver Verschleiß bezeichnet. Beim adhäsiven Verschleiß findet keine Relativbewegung der beiden Kontaktpartner statt (z.B. aktive Reibung) und es werden i.A. wesentlich geringere Schienenverschleißraten (Schienenverschleiß je Zeiteinheit) gemessen als beim abrasiven Verschleiß. Ein Beispiel eines adhäsiven Verschleißes ist in Abb. 4.3 ersichtlich. [9]



Abb. 4.3: Adhäsiven Verschleiß gemäß Auer [13]

Eine eindeutige Trennung zwischen abrasiven und adhäsiven Verschleiß ist derzeit in der Praxis nicht möglich. Einerseits treten beide Verschleißmechanismen stets gleichzeitig auf und andererseits sind voneinander unabhängige Messungen derzeit nicht möglich.[9]

4.3.3 Kaltverformung (Verwalzungen)

Hohe Kontaktpressungen in der Hertz'schen Ebene erzeugen - neben adhäsiven Verschleiß - Kaltverformungen des Schienenstahls im Bereich des Schienenkopfes. Mit fortlaufender Belastung der Schiene wird der Schienenstahl im Bereich der Schienenoberfläche nach beiden

Außenseiten hin gewalzt. Es entstehen Verwalzungen, vorwiegend auf der Innenschiene von Bögen mit beliebigen Radius. Verwalzungen der Schienenköpfe können mittels konventionellen Schienenschleifungen vollständig entfernt werden. Eine Skizze von Verwalzungen eines Schienenquerschnitts ist in Abb. 4.4 dargestellt. [9]

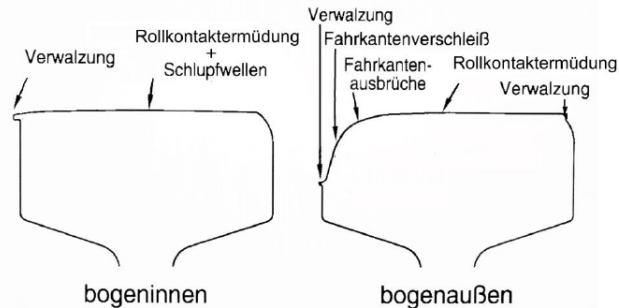


Abb. 4.4: Skizze einer Verwalzung gemäß Fischmeister [2]

4.3.4 Riffel- und Schlupfwellenbildung

Riffel- sowie Schlupfwellen beschreiben spezielle Schienenfehler an der Schienenoberkante. In Folge von Traktionskräften, bzw. den daraus entstehenden Längskräften, bilden sich im Zuge von Kaltverformungen regelmäßige Unebenheiten im Längsprofil des Schienenkopfes. In der Praxis besitzen Riffel- und Schlupfwellen unterschiedliche Entstehungsmechanismen und können i.A. durch Betrachtung der örtlichen Gegebenheiten schnell bestimmt werden. Riffel- und Schlupfwellen können sowohl anhand bestimmter Infrastrukturbedingungen (z.B. im Bereich von Bahnhöfen und Haltestellen), als auch durch den Einsatz gleicher Fahrzeuge über einen längeren Zeitraum und den daraus resultierenden konstanten Belastungen hervorgerufen werden. [2] Riffel- und Schlupfwellen können mittels konventionellen Schienenschleifungen vollständig entfernt werden.

4.4 Korrosion

"Tritt ungeschützter Stahl mit Sauerstoff und Wasser (Wasserdampf) bzw. mit anderen Schadstoffen (aggressive Stoffe) in Kontakt, tritt eine Korrosion des Stahles ein. Aus Eisen bildet sich Rost (=Eisenoxyd-Hydrat)." - Fink[10]

Umso dichter der Schienenstahl komprimiert ist, desto korrosionsbeständiger ist dieser. Korrosion der Schiene stellt bei regelmäßig befahrenen Strecken kein Problem dar, da verkehrenden Züge die Schienenoberfläche (den Schienenstahl) stets wiederkehrend belasten und verdichten, sodass eine natürliche Beständigkeit gegen Rost aufgebaut wird, bzw. entstehender Rost an der Fahrkante abgefahren wird. [9]

4.5 Rollkontaktermüdung

Neben dem Verschleiß der Schiene stellen Rollkontaktermüdungen (RCF) einen wesentlichen Teil in der Schadensstatistik der Schiene dar. Bei jedem Lastwechsel der Schiene, d.h. bei jeder Überfahrt eines Eisenbahnrades, verhärtet sich der Schienenstahl im Bereich des Fahrspiegels. Einhergehend mit dieser Erhärtung steigt die Sprödigkeit des Materials an und führt bei

fortlaufender Belastung zu Rissen in den erhärteten Bereichen. Gemäß Brehmer [14] stellen Schienenschäden in Folge von Rollkontaktermüdung eine kontinuierlich größer werdende Herausforderung für die Schieneninstandhaltung dar. Die Festigkeit der Schienen und der damit verbundene Widerstand gegen Verschleiß sind in den letzten Jahren fortlaufend gestiegen sodass Verschleiß in Folge einen geringeren Einfluss auf die Nutzungsdauer des Gleises spielt. Schienenschäden infolge RCF lassen sich gemäß Popp [9] in folgende Schadenfälle unterteilen:

- Squats
- Belgrospis
- Head-Checks (werden in Kapitel 5 ausführlich beschrieben)

4.5.1 Squats

"Squats treten an der Fahrfläche bzw. -kante von Schienen in Geraden bzw. Bögen mit Radien von mehr als 1.000 m auf. Als Ursprung für die Entstehung können die durch Riffel oder Eindrückungen von Fremdkörpern verursachten höheren dynamischen Beanspruchungen der Fahrfläche angesehen werden." - Popp [9]

Squats treten zunächst in Form von kleinen schwarzen Punkten an der Schienenoberfläche auf. Mit zunehmender Belastung wachsen diese und bilden den Ausgangspunkt für flach verlaufende Risse an der Schienenoberfläche. In Folge entstehen deutlich sichtbare halbkreisförmige Risse in Schienenkopfnähe sowie eine geringe Absenkung des Fahrspiegels im betroffenen Bereich der Schiene. Mit fortlaufender Belastung der Schiene kann es zu einem "Abkippen" der Risse in Richtung der Schienensohle kommen: Die vorhandenen Risse wachsen Richtung Schienensohle in die Schiene hinein. Dieser Effekt des „Abkippens“ erhöht die Wahrscheinlichkeit eines spontanen Bruchs der Schiene signifikant. [9]

4.5.2 Belgrospis

Belgrospis treten an der Schienenfahrkante auf und definieren periodische Anhäufungen von Rissen. Belgrospis treten tendenziell bei Schnellfahrstrecken in Zusammenhang mit Riffeln- und Schlupfwellen an der Außenschiene von Bögen sowie abwechselnd an der linken und rechten Schienenfahrkante in der Geraden (gemäß dem Verlauf des Wellenlaufes des Radsatzes) auf. [9] Beispiele von Belgrospis sind in Abb. 4.5 dargestellt.

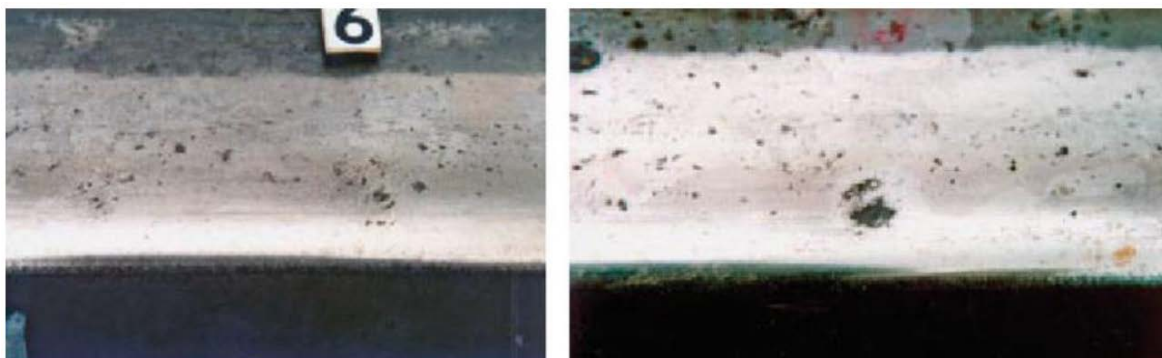


Abb. 4.5: Belgrospi - Links: Schwache Ausprägung, Rechts: Starke Ausprägung gemäß Popp [9]

5 Head-Checks

Der Schadenfall HC bezeichnet eine Summe von vielen feinen, periodisch auftretenden Rissen auf der Fahrkante. Die Risse weisen einen Winkel von 35° bis 70° zur Schienenlängsachse auf und besitzen je nach ihrem Entwicklungsstadium unterschiedliche Längen und Tiefen. [9] Ein Beispiel von HC an der Schienenoberfläche ist in Abb. 5.1 dargestellt.



Abb. 5.1: Abbildung von HC gemäß Popp [15]

Gemäß den Untersuchungen von Popp [9] sowie Brehmer [14] treten HC häufig an der Schienenoberfläche der Außenschiene von Bögen auf. Resultierend aus den beiden Untersuchungen ist die Entstehung sowie die Wachstumsgeschwindigkeit von HC-Rissen eine Funktion des Bogenradius. Diese These wurde anhand von visuellen Beobachtungen, sowie Untersuchungen mittels Wirbelstromprüfungen festgestellt. Seit 2008 betreibt die DB AG ein Programm zur Erforschung der Entstehung und Erarbeitung möglicher Präventivmaßnahmen gegen HC. Eine Datenbank mit ermittelten Wachstumsraten von HC-Rissen sowie Proben in Form von entnommenen Schienenstücken ermöglichten der Deutsche Bahn Systemtechnik die Untersuchung von HC für die Schienengüte R260 sowie R350 HT.[14]

5.1 Entstehung und Wachstum von HC

Gemäß den Untersuchungen der DB Systemtechnik entstehen HC aufgrund zyklischer, plastischer Verformungen des Schienenmaterials. Die bei einer Zugüberfahrt entstehenden Druck- und Schubspannungen in der Hertz'schen Fläche können gemäß ÖNORM EN ISO 6506-1 [16] mehr als 1000 N/mm^2 betragen und erreichen somit die Zugfestigkeit des Schienenstahls. Die Bedingung der Formel (9) ist nicht mehr eingehalten und es entwickeln sich Risse im rechten Winkel zur resultierenden Reibkraft [9].

Die Hertz'sche Fläche ist auf der Außenschiene eines Bogens kleiner und die entstehenden Spannungen in Folge größer. Zudem wird die Außenschiene durch kriechende Querkräfte sowie den Spannungen infolge Traktion des durchfahrenden Zuges zusätzlich beansprucht. Demzufolge entstehen nach Brehmer [14] HC-Risse überwiegend häufig auf der Außenschiene von Bögen. Eine Übersicht der auf die Schiene wirkenden Kräfte und der damit verbundenen Entstehung von (HC-)Rissen ist in Abb. 5.2 dargestellt.

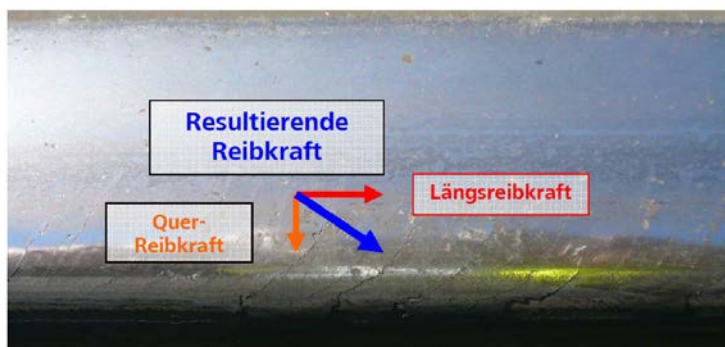


Abb. 5.2: Zusammenhang der Längsreibkräfte, den Querreibkräften sowie der Rissbildung gemäß Auer [13]

5.1.1 Phasen der Entwicklung von HC

Die Entwicklung von HC kann in unterschiedliche Phasen unterteilt werden. Auer [13] unterteilt die Entwicklung von HC in zwei Phasen, Brehmer [14] in Zuge seiner Untersuchung ebenso wie Fischmeister [2] in drei Phasen. Eine Übersicht der Phasen der Entwicklung von HC ist in **Tab. 3** dargestellt.

Nach [13]	Nach [2]	Nach [14]	Beschreibung der Phase
-	Phase a	1.Phase	[14]: Entstehung des Rissansatzes, Dauer der Phase bis in etwa 5-10 Mt. Belastung
Phase 1 "Frühes Risswachstum"	Phase b	2.Phase	[9]: Langsames Risswachstum, Dauer der Phase bis zu Tiefen des HC-Risses von drei bis fünf Millimetern [14]: Wachstum des Risses in einem flachen Winkel, mit einer relativ gleichbleibenden Geschwindigkeit
Phase 2 "Rasches Risswachstum"	Phase c	3.Phase	[9]: Wachstum des HC-Risses nimmt in einem Winkel von 90° zur SOK rasant zu, Ausbrüche an der Fahrkante zufolge HC sind möglich [14]: HC-Riss entwickelt sich mit horizontalen und vertikalen Ästen fort, Wachstumsgeschwindigkeit steigt signifikant, Schiene kann unter Last brechen

Tab. 3: Übersicht der Phasen nach Brehmer [14], Fischmeister [2] und Auer [13]

Eine schematische Übersicht über den Fortschritt des HC-Wachstums gemäß den drei Phasen von Fischmeister [2] ist in Abb. 5.3 dargestellt.

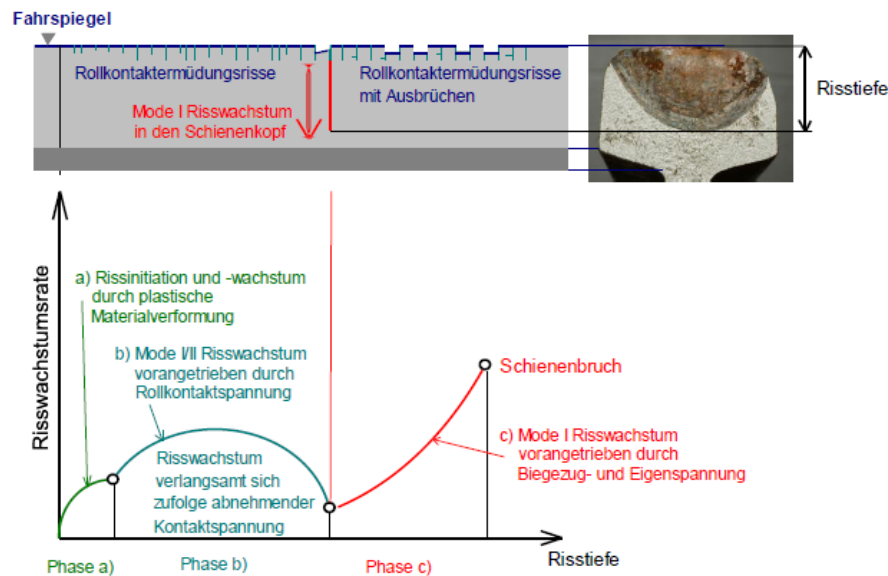


Abb. 5.3: Schematischer stufenweiser Rissfortschritt zufolge Rollkontaktermüdung gemäß Fischmeister [2]

Nach Brehmer [14] kommt es zum Bruch der Schiene sobald ein HC-Riss im Zuge seines Wachstums seine kritische Länge erreicht hat. Untersuchungen von entnommenen, infolge HC zu Bruch gegangenen Schienenstücke ergaben für die Schienengüte R260 kritische Risslängen im Bereich von fünf bis zehn Millimetern. Beispiele von Ausbrüchen der Fahrkante der Schiene zufolge HC sind in Abb. 5.4 abgebildet.



Abb. 5.4: Ausbrüche verursacht durch HC gemäß Auer [13]

Ein Schienenquerprofil mit den nach Popp [9] ausgeprägten und deutlich erkennbaren zwei Phasen der Entwicklung von HC ist in Abb. 5.5 abgebildet.

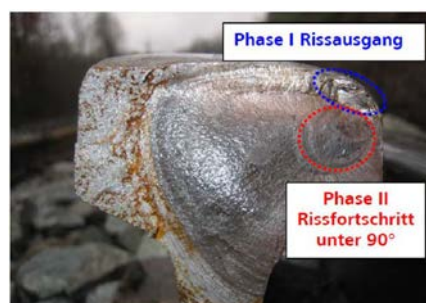


Abb. 5.5: Phasen der Entwicklung von HC (zwei Phasen) gemäß Auer [13]

5.1.2 Abstände der HC-Risse

Die Abstände der HC-Risse untereinander sind von der Schienengüte und der damit verbundenen Plastizität des Stahls abhängig. Schienen mit hohen Stahlgüten (geringen Plastizitäten) bieten einen höheren Materialwiderstand gegen Einwirkungen - die Abstände der Risse untereinander sind kleiner als bei Schienen mit niedrigeren Stahlgüten. Ein Vergleich von Stahlgüten in Bezug auf deren typische Abstände der HC-Risse zeigt Tab. 4. [13]

Stahlgüte	Abstand der HC-Risse
R200	> 10 mm
R260	6-10 mm
R350 HT	2-5 mm

Tab. 4: Abstände von HC-Rissen im Vergleich zur Schienengüte gemäß Auer [13]

Darstellungen und Bestätigung dieser aufgestellten These liefert Brehmer [14]. Brehmer analysierte Schienenprofile mit HC-Rissen und digitalisiert diese mittels einem 3D-Scanner für weitergehende Untersuchungen. Abb. 5.6 zeigt eine solche Digitalisierung von einer Außenschiene eines Bogens mit 782 Meter Radius, der Schienengüte R260, einer Belastung der Schiene von 60 Mt seit ihrer letzten Behandlung sowie einer maximal aufgetretenen HC-Risstiefe von 0,8 Millimeter.

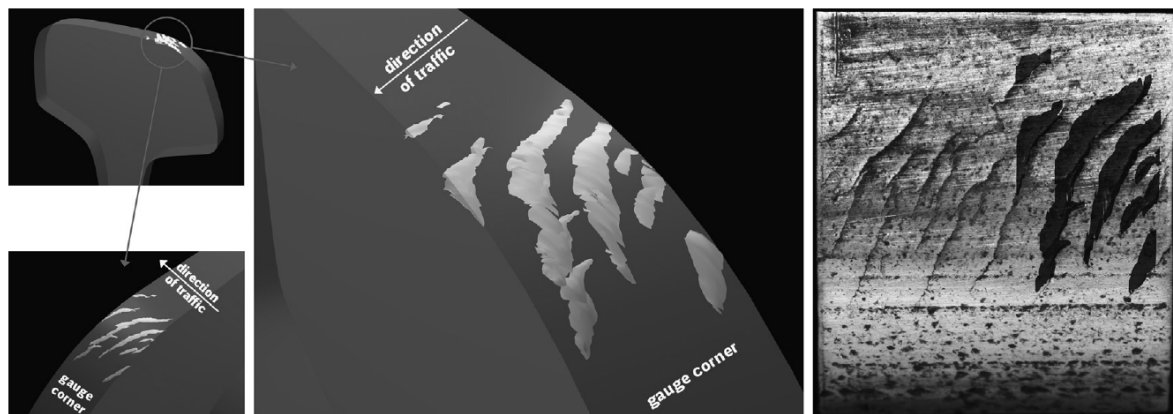


Abb. 5.6: HC-Schadensbild einer Schiene mit Schienengüte R260 gemäß Brehmer [14]

Im Vergleich dazu zeigt Abb. 5.7 eine Digitalisierung von einer Außenschiene eines Bogens mit 525 Meter Radius, einer Schienengüte R350 HT sowie einer Belastung des Gleises von ebenfalls 60 Mt seit ihrer letzten Behandlung. Deutlich erkennbar ist die von Ecke [17] aufgestellte These der kleineren Abstände der HC-Risse untereinander sowie der kleineren Tiefen der einzelnen HC-Risse im Vergleich zur Schienengüte R260.

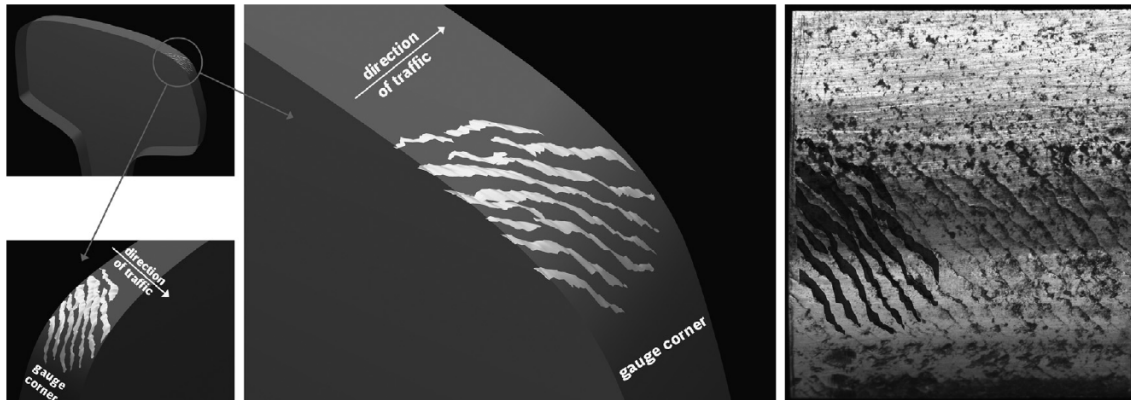


Abb. 5.7: HC-Schadensbild einer Schiene mit Schienengüte R350HT gemäß Brehmer [14]

5.1.3 Einflussfaktoren auf HC

Im Zuge der Untersuchungen der DB Systemtechnik wurden 80 unterschiedliche Fälle von HC-Rissen auf ihre Einflussparameter untersucht: Diese unterteilen sich in 47 Fälle mit der Schienengüte R260 und in 33 Fälle der Schienengüte R350 HT. 60 der 80 Fälle wurden mittels Wirbelstromprüfungen (siehe Kapitel 8.2.1) analysiert und betreffen Bögen mit Radius von 332 bis 1571 Metern. In elf der 80 Fällen kamen die Probestücke der Schienen mit HC-Rissen exakt von demselben Bogen: Durch Ersetzen der Abschnitte mit der jeweils anderen Schienengüte, bzw. durch Verlegung der beiden Schienengüten direkt hintereinander. Folgende Erkenntnisse wurden gemäß Brehmer [14] aus den Untersuchungen der DB Systemtechnik gewonnen:

Gleisbelastung auf HC-Risstiefe: Eine Gegenüberstellung der Gleisbelastung [Mt] seit dem Einbau oder der letzten Behandlung des Gleises auf die Risstiefe der HC, unterschieden in die beiden Schienengüte R260 sowie R350 HT, ist in Abb. 5.8 dargestellt. Gleisbelastungen über 300 Mt sind selten zu ermitteln, da bis zu dieser Belastung die Schienen i.A. bereits getauscht oder behandelt worden sind. Signifikant erkennbar sind die steigenden Risstiefen bei steigender Belastung, sowie die stets tieferen Risse der Schienengüte R260 im Vergleich der Schienengüte R350 HT - dies stützt die eingangs erläuterte These von Popp [9]. Dieser Effekt der kleineren HC-Risstiefe der Schienengüte R350 HT ist der höheren Härte (dem höheren Widerstand) von dieser geschuldet. Im Zuge der Auswertung wurden bei der Schienengüte R260 fünf Risse mit einer HC-Risstiefe größer als fünf Millimeter detektiert. Ab einer HC-Risstiefe von fünf Millimeter sind Spontanbrüche des Gleises infolge weiterer Belastungen möglich und konnte bei den beiden jeweiligen Maximalwerten (9,6mm und 11mm) beobachtet werden. [14]

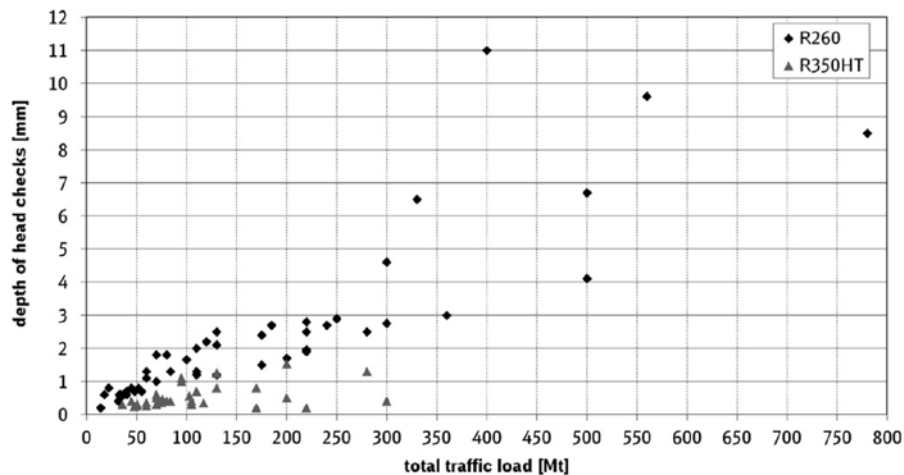


Abb. 5.8: Gleisbelastung (total traffic load) [Mt] auf Risstiefe [mm] gemäß Brehmer [14]

In der weiteren Analyse wurden gemäß Brehmer [14] Einflussparameter (Bogenradius, Schienenneigung, Überhöhungsfehlbetrag und Höchstgeschwindigkeit) auf die Wachstumsgeschwindigkeiten von HC-Rissen untersucht.

Einflussfaktor Bogenradius: Gemäß den Erfahrungen von Popp [15] hängt der Bogenradius mit der Entstehung von HC zusammen. Bögen mit Radius zwischen 600 bis 2000 Meter Radius sind nach Erfahrung aus dem Netz der ÖBB Infrastruktur AG seitens Popp [15] überdurchschnittlich stark von HC-Wachstum betroffen.

Einflussfaktor Bogenradius auf Wachstumsgeschwindigkeit: Eine Darstellung des Bogenradius [m] auf die Riss-Wachstumsgeschwindigkeit von HC [mm/100 Mt] zeigt Abb. 5.9. HC-Risse der Schienengüte R260 weisen Riss-Wachstumsgeschwindigkeiten von 0,8-2,8mm je 100 Tonnen Gleisbelastung auf. Im Gegensatz dazu wachsen HC-Risse der Schienengüte R350 HT lediglich mit 0,1-1,2mm je 100 Tonnen Gleisbelastung. Auffallend ist zudem, dass gemäß den Untersuchungen der DB Systemtechnik der Bogenradius keinen Einfluss auf die Wachstumsgeschwindigkeit von HC-Rissen besitzt. [14]

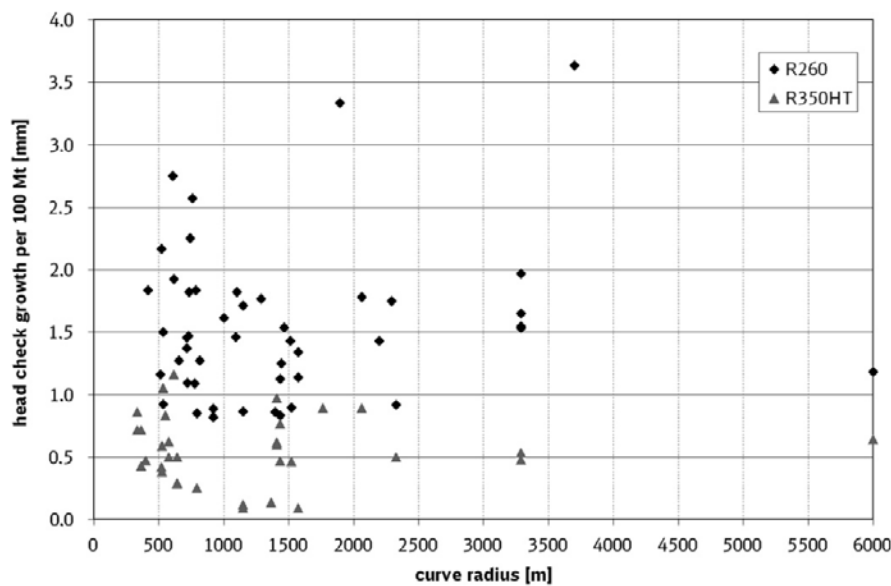


Abb. 5.9: Bogenradius (curve radius) [m] auf Riss-Wachstumsgeschwindigkeit [mm/100 Mt] gemäß Brehmer [14]

Diese Aussage des keinen-Einflusses des Bogenradius auf die Risswachstumsgeschwindigkeiten von HC deckt sich mit den Untersuchungen von Popp [9] und ist in Abb. 5.10 ersichtlich.

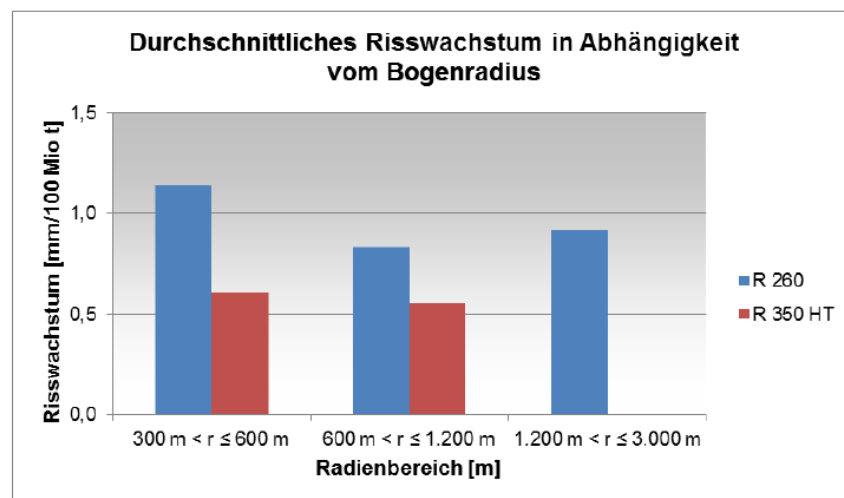


Abb. 5.10: Bogenradius [m] auf Riss-Wachstumsgeschwindigkeit [mm/100 Mt] der ÖBB-Infrastruktur AG gemäß Popp [9]

Einflussfaktoren Schienenneigung, Überhöhungsfehlbetrag und Höchstgeschwindigkeit:

Die Einflussfaktoren Schienenneigung (Abb. 5.11), Überhöhungsfehlbetrag (Abb. 5.12) und Höchstgeschwindigkeit (Abb. 5.13) haben gemäß Brehmer [14] keinen Einfluss auf die Entstehung und die Wachstumsgeschwindigkeit von HC-Rissen. Diese These wurde zusätzlich mit theoretischen Studien belegt, bei welchen unter anderem Simulationen von Eisenbahnzügen durchgeführt wurden und diese ergaben, dass es zu keiner vermehrten Reibung im Zuge dieser Einflussfaktoren auf der Schiene kommt. Auffallend sind die jeweils signifikant langsamer wachsenden Risse der Schienengüte R350 HT im Gegensatz zur Schienengüte R260. [14] Um diese These erneut zu belegen, wurden die vorhin

genannten Einflussfaktoren im Zuge dieser Diplomarbeit für das Schienennetz der ÖBB-Infrastruktur AG untersucht.

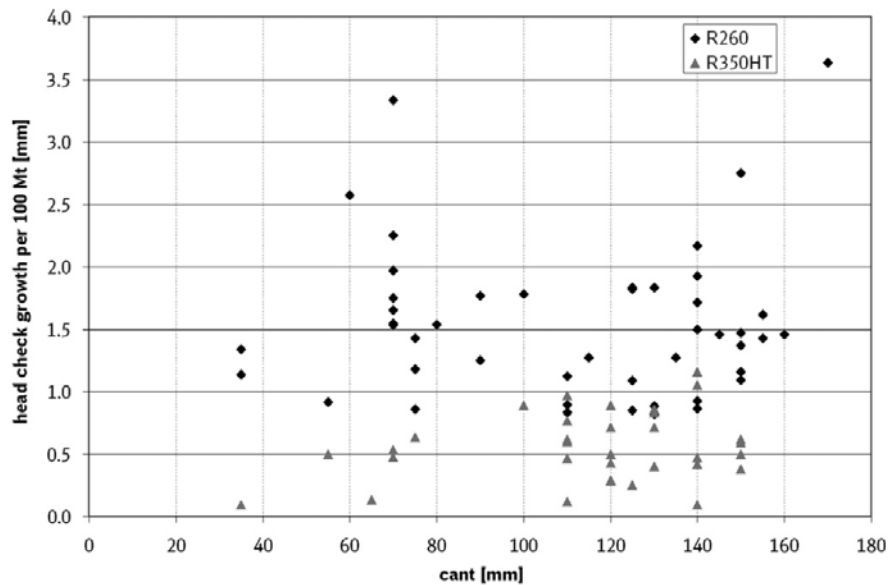


Abb. 5.11: Überhöhung (cant) [mm] auf Riss-Wachstumsgeschwindigkeit [mm/100 Mt] gemäß Brehmer [14]

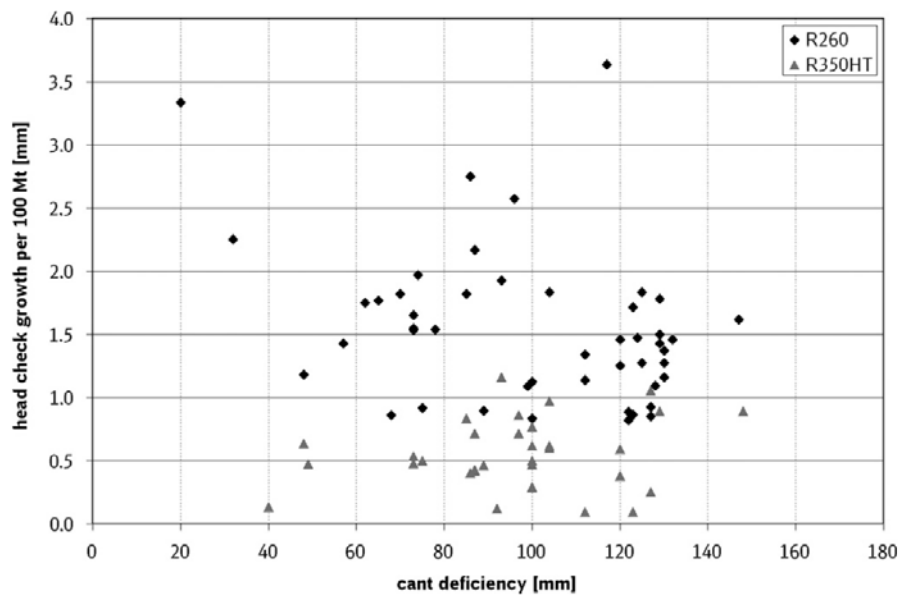


Abb. 5.12: Überhöhungsfehlbetrag [mm] auf Riss-Wachstumsgeschwindigkeit [mm/100 Mt] gemäß Brehmer [14]

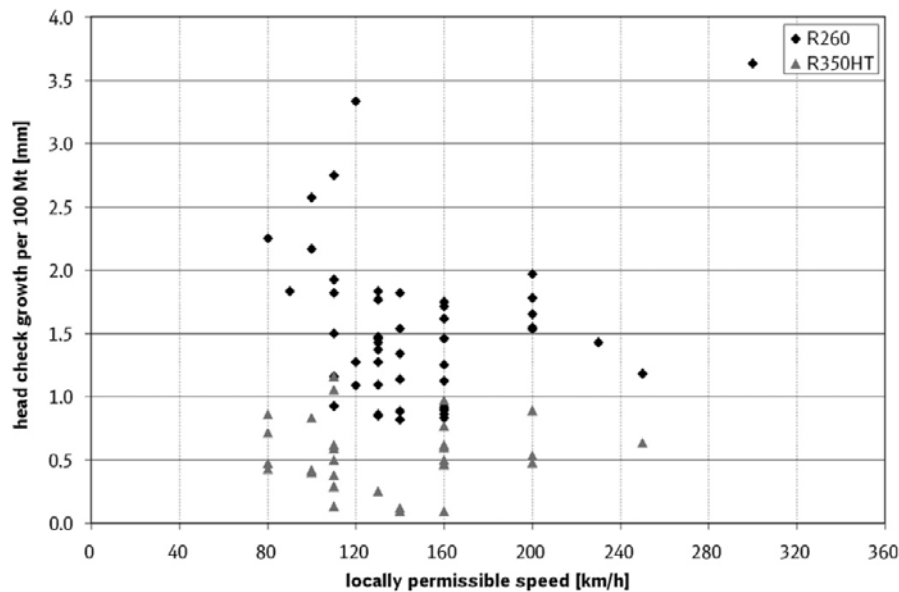


Abb. 5.13: Höchstgeschwindigkeit [km/h] auf Riss-Wachstumsgeschwindigkeit [mm/100 Mt] nach Brehmer [14]

Einflussfaktor Zug und „Drive-System“: Simulationen von unterschiedlichen Eisenbahnzügen haben Erkenntnisse von Einflüssen der Traktionskräfte auf die Schiene geliefert. Eine generelle Aussage über den Einfluss von Zügen auf die Schiene ist nach Brehmer [14] nicht möglich. In der Praxis hat sich jedoch gemäß Popp [9] und Brehmer [14] gezeigt, dass moderne, elektrische Triebfahrzeuge eine, im Vergleich zu ihrer Achslast, sehr hohe Traktionskraft auf die Schiene übertragen können. Dies ist der modernen Technologie der "automatischen Traktionskontrolle" geschuldet, welche den entstehenden Schlupf zwischen Rad und Schiene berechnen und optimal berechnen und ausnutzen kann. Eine vermehrte HC-Entstehung kann seit Einsatz der neuen Technologie gemäß Auer [13] festgestellt werden. Der Einfluss von "automatischen Traktionskontrollen" auf die Entstehung und Förderung von HC ist gemäß Popp [9] und Brehmer [14] derzeit jedoch nicht erforscht.

5.1.4 Zusammenhang Verschleiß der Schiene und HC

Die Analyse des Wachstums von HC-Rissen ermöglichte gemäß Brehmer [14] ebenfalls eine Untersuchung des Verschleißes der Schiene. Der Verschleiß der Schiene gegenübergestellt auf den Bogenradius ist in Abb. 5.14 dargestellt. Daraus ersichtlich ist eine Abhängigkeit des Schienenverschleißes vom Bogenradius: Kleinere Bogenradien besitzen einen höheren, härtere Schienengüten einen langsameren Verschleiß. Bei Bögen mit Radius >1000m liegt die Verschleißrate um die 0,5-1mm der Schienengüte R260, bzw. um die 0,2-0,4mm je 100Mt Gleisbelastung der Schienengüte R350 HT. Bei Bögen mit Radius <800m beträgt die Verschleißrate je nach Schienengüte bis zu 6mm (R260), bzw. 4,8mm (R350 HT) je 100Mt Gleisbelastung und ist demnach signifikant höher als bei Bögen mit Radius >1000m. Die Höhe der Verschleißrate hängt gemäß Brehmer [14] von der Lage im Bogen ab. Gegen in Fahrtrichtung Bogenende nimmt der Verschleiß der Schiene zu.

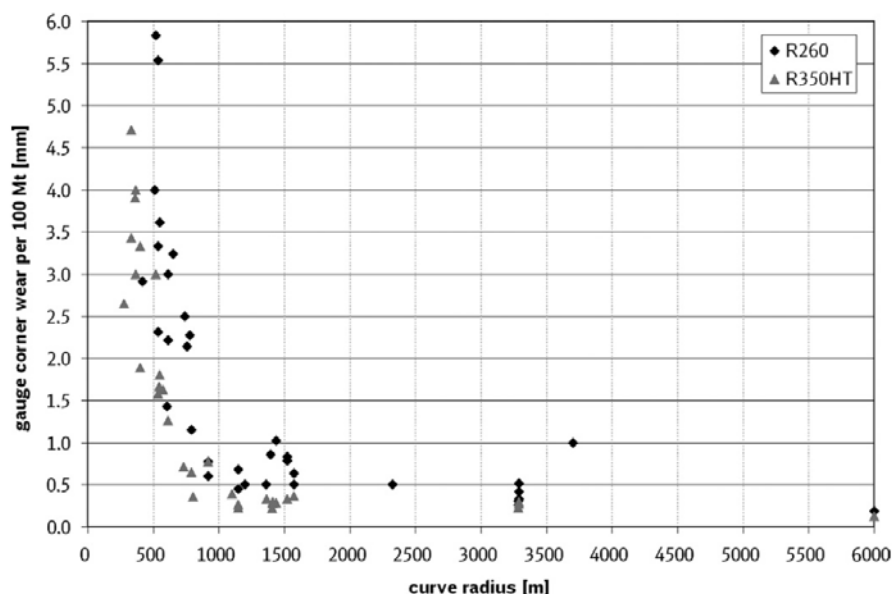


Abb. 5.14: Bogenradius [m] auf Verschleißrate [mm/100 Mt] im Netz der DB AG gemäß Brehmer [14]

Untersuchungen von Popp [9] im Schienennetz der ÖBB-Infrastruktur AG ergaben ähnliche Ergebnisse bzgl. dem Verschleiß der Schiene in Abhängigkeit des Bogenradius und sind in Abb. 5.15 dargestellt.

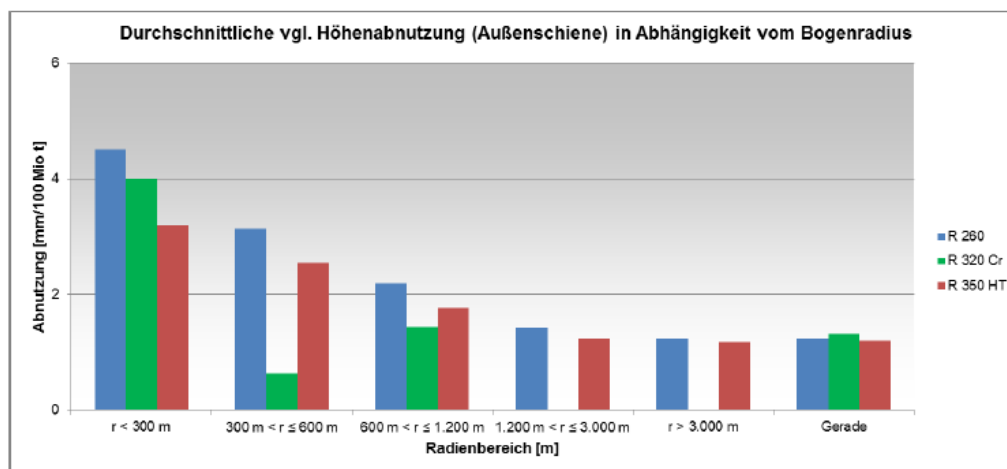


Abb. 5.15: Verschleiß der Schiene nach Schienengüte und Radienbereichen der ÖBB-Infrastruktur AG gemäß Popp [9]

Unter Betrachtung der Erkenntnis der Schienenverschleißraten mit Abb. 5.8 wird ersichtlich, dass für Bögen mit größerem Radius die natürliche Verschleißrate keinen dominanten Faktor für die Nutzungsdauer der Schiene darstellt. Umgekehrt, für Bögen mit kleinem Radius stellt die natürliche Verschleißrate einen wichtigen Einflussparameter auf die Nutzungsdauer der Schiene dar. Gemäß Brehmer [14] würde in einem idealen Schienenstahl der natürliche Verschleiß der Schiene infolge Rollkontaktermüdung entstehende Risse auf einem konstant niedrigen Wert halten. HC-Risse würden in der zweiten Phase des HC-Wachstums im Zuge des natürlichen Verschleißes der Schiene weggeschliffen und kein Problem darstellen.

Dieses Gleichgewicht besteht zufolge Brehmer [14] in Bögen mit engen Radius. Gemäß Brehmer [14] sei bekannt dass Schienen mit Schienengüte R260 in Bögen mit engen Radius verbaut werden, auf diesen ebenfalls HC entstehen würden, der Verschleiß der Schiene jedoch groß genug sei um keine kritischen Tiefen zu erreichen [14].

In Bögen mit großen Radius ist gemäß Brehmer [14] der Verschleiß der Schiene zu gering um ein Gleichgewicht zwischen HC-Risswachstum und Schienenverschleiß herstellen zu können. Eine Lösung könnte durch Verwendung von härteren Schienengüten erreicht werden. Versuche von unterschiedlichen Schienengüten (R220, R260 und R350 HT) zeigten, dass entstehende HC-Risstiefen in Schienen mit Schienengüten R220 ungefähr doppelt so tief waren wie jene in Schienen mit Schienengüten R260 und in etwa sechsmal so tief wie jene in Schienen mit Schienengüten R350 HT. Laut Brehmer [14] wäre der Verschleiß ebenfalls überdurchschnittlich höher, jedoch das Wachstum des HC-Risses größer. Demzufolge können Rollkontaktermüdungen durch Stähle sowie hoher Härte, hoher Zugfestigkeit und hoher Streckgrenze limitiert werden und geringere Bildungen von HC resultieren.

5.1.5 Wachstumsraten von HC der DB AG

Die DB AG erstellte, aufbauend auf ihre Datenbank, eine Liste von durchschnittlichen Wachstumsraten von HC der Schienengüte R260 für unterschiedliche Bogenradien sowie Streckentypen. Diese ist in **Tab. 5** dargestellt und dient zur Prognostizierung etwaiger Instandhaltungsarbeiten. Für Schienen mit Schienengüte R350 HT können die Werte mit einem Faktor 0,5 multipliziert werden. [14]

Strecken- Klassifizierung	Wachstumsraten von HC [mm/100 Mt]		
	Für die Schienengüte R260		
	Für die Schienengüte R350 HT: Multiplizieren mit 0,5		
	Strecken mit homogener Belastung (z.B. U-Bahnen)	Hochgeschwindigkeits- strecken (v > 280km/h)	Andere Strecken
Gerade Strecke	1,67	1,2	0,56
R > 1500m	1,67	3,6	1,67
500m < R ≤ 1500m	3,33	-	1,67
R ≤ 500m	3,33	-	0,56

Tab. 5: Wachstumsraten von HC der DB AG gemäß Brehmer [14]

6 Behebung von Schienenfehlern

Treten HC auf der Schiene auf, nehmen im Normalfall die Anzahl sowie die Tiefe der Risse mit fortlaufender Betriebsbelastung exponentiell schnell zu. Tiefe Risse führen zum Bruch der Schiene und gefährden damit die Betriebssicherheit, die Funktion der Schiene als Fahrweg. In Anbetracht einer nachhaltigen und kostengünstigen Schieneninfrastruktur ist eine rasche Entfernung von Rissen in der Schiene sinnvoll. Eine Entfernung von Rissen an der Schienenoberfläche kann gemäß Popp [9] im Zuge von Schienenoberflächenbehandlungen (SOFB) mit folgenden Technologien erfolgen:

- Schienenschleifen
- Schienenfräsen
- High-Speed-Grinding (HSG)

Diese Technologien der SOFB besitzen unterschiedliche Tiefenwirkungen und Einsatzgebiete. Die Auswahl der Technologie im Zuge einer SOFB erfolgt nach den Tiefen der Risse. [9]

6.1 Schienenschleifen

Das Schleifen von Schienen ist eine bevorzugte Technologie der ÖBB-Infrastruktur für die Durchführung einer SOFB und dient gemäß Popp [9] der Erfüllung zweier Aufgaben:

- Beseitigung von Schienenfehlern (z.B. HC)
- Anwendung für lärmemissionsmindernden Maßnahmen

Mittels Schleifung der Schienen können Schäden an der Oberfläche der Schiene beseitigt und ein rasches Wachstum der Risse in die Schiene hinein vorgebeugt werden. Die Nutzungsdauer der Schiene wird damit wesentlich verlängert. [9] Schleifprozesse an Schienen können gemäß Popp [9] in drei Kategorien unterteilt werden:

- Neuschienenschleifungen
- Erhaltungsschleifungen
- präventive Schleifungen

In der Vergangenheit wurden unterschiedliche Technologien für Schienenschleifungen entwickelt [9]. Die gemäß Popp [9] bei der ÖBB-Infrastruktur AG derzeit zur Anwendung kommenden Technologien sind:

- oszillierendes Schleifverfahren
- rotierendes Schleifenverfahren

6.1.1 Neuschienenschleifen

Ziel der Neuschienenschleifung ist die Herstellung einer möglichst fehlerfreien Schienenoberflächenqualität nach der Gleisherstellung. Im Zuge des Neuschienenschleifens werden einerseits Rückstände an der Schiene infolge der Herstellung (z.B. Walztoleranzen) und andererseits eventuelle Beschädigungen der Fahrfläche infolge des Einbaus (z.B. Eindrückungen

von fremden Materialien) beseitigt. Das Ergebnis der Neuschienenschleifung liefert eine fehlerfreie Schienenoberfläche mit optimalen Rad-Schiene-Kontaktbedingungen und eine daraus resultierende Verzögerung der Entstehung von Schäden an der Schienenoberfläche. Die Ausgangsqualität der Schienenoberfläche ist maßgeblich für die Nutzungsdauer des Gleises verantwortlich. [9]

6.1.2 Erhaltungsschleifen

Ziel der Erhaltungsschleifung ist die Her- und Wiederherstellung einer qualitativ hochwertigen Schienenoberfläche. Eine Reprofilierung des Schienenprofils ist im Zuge der Erhaltungsschleifung möglich. In speziellen Fällen kann zur Verbesserung des Rad-Schiene-Kontakts ein asymmetrisches Schienenprofil aufgezogen werden. Um ein erneutes rasches Wachstum von Schienenfehlern an derselben Stelle zu verhindern, sind Fehler an der Schienenoberfläche im Zuge der Erhaltungsschleifung vollständig zu entfernen. [9]

6.1.3 Präventives Schleifen

Präventive Schleifungen stellen kontinuierliche, schnelle Schleifprozesse dar. Im Zuge von präventiven Schleifungen werden feine Risse der ersten Phase entfernt, bevor diese in die Schiene hinein wachsen können. Das Verfahren der präventiven Schleifung kommt vornehmlich auf Hochgeschwindigkeitsstrecken zur Anwendung, um aufwendigere und teurere Erhaltungsschleifungen bzw. Schienenwechseln vorzubeugen. [9]

6.1.4 Oszillierendes Schleifverfahren

Beim oszillierenden Schleifverfahren werden, während der kontinuierlichen Fortbewegung des Schleifzuges, Schleifsteine auf der Oberfläche der Schiene in Längsrichtung hin- und her bewegt. Mittels der Reibung zwischen den Schleifsteinen und der Schienenoberfläche kann ein geringer Materialabtrag von in etwa 0,1 Millimeter pro Überfahrt erzielt werden. Die Form des Schienenkopfes wird von der Form der Schleifsteine bestimmt und kann während des Schleifprozesses nicht angepasst werden. Das oszillierende Schleifverfahren stellt eine präzise Oberflächenbehandlung dar und kommt bei der ÖBB-Infrastruktur AG vorwiegend bei Neuschienenschleifungen zur Anwendung. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Anwendung bei und für lärmemissionsmindernde Maßnahmen: Feine Riffel in Längsrichtung der Schiene besitzen im Vergleich zu ungeschliffenen Schienen einen positiven Effekt auf den entstehenden Lärmpegel infolge der Überfahrt eines Zuges. [9] Ein Beispiel einer oszillierend geschliffenen Schiene ist in Abb. 6.1 ersichtlich.



Abb. 6.1: Schienenoberfläche nach oszillierender Bearbeitung gemäß Auer [13]

6.1.5 Rotierende Schleifverfahren

Das System der rotierenden Schleifung funktioniert mittels Rotationsbewegungen der Schleifaggregate (im Gegensatz zu den Längsbewegungen der Schleifaggregate des oszillierenden Schleifverfahrens). Ein Materialabtrag von bis zu 0,2 Millimeter ist mit diesem Verfahren pro Überfahrt möglich. Die einzelnen Schleifaggregate des Schleifzuges sind beweglich angeordnet, sodass eine gezielte Schienenkopfbearbeitung während dem Schleifvorgang möglich wird. Um Fehler an der Schienenoberfläche vollständig zu entfernen (genug Material abzutragen) sind i.A. sieben bis acht Überfahrten des Schleifzuges über den Schienenfehler notwendig. [2] Ein Beispiel einer Schiene nach der Behandlung einer rotierenden Schleifung ist in Abb. 6.2 dargestellt.



Abb. 6.2: Schienenoberfläche nach rotierender Bearbeitung gemäß Auer [13]

6.2 Schienenfräsen

Beim Schienenfräsen kann pro Überfahrt eine Materialtiefe von bis zu drei Millimeter entfernt werden und stellt einen effizienten Prozess zur Beseitigung von tiefreichenden Schienenfehlern dar. Im Gegensatz zu Schleifmaschinen erfolgt der Materialabtrag nicht mit Schleifsteinen sondern mit Fräsrädern. Diese produzieren unter Betrieb keinen Funkenflug oder Schleifstaub, sodass die im Zuge der Schienenfräsung abgehenden Metallspäne gesammelt werden können und das Verfahren des Schienenfräsens infolge eine besonders umweltfreundliche Variante zur

SOFB darstellt. Zur Herstellung einer glatten und fehlerfreien Oberfläche der Schiene ist jedoch eine Nachbearbeitung mittels Schleifen unbedingt erforderlich. [9]

6.3 High Speed Grinding (HSG)

Das Verfahren des High Speed Grindings (HSG) wurde 2008 von "Vossloh Rail Services" entwickelt. Das System des HSG besteht aus einem um den horizontalen Winkel α verdrehtes Schleifrad. Dieses rollt während der Fahrt selbstständig mit und reibt währenddessen die Oberfläche der Schiene ab. [9]. Eine Darstellung des Prinzips des HSG ist in Abb. 6.3 ersichtlich.

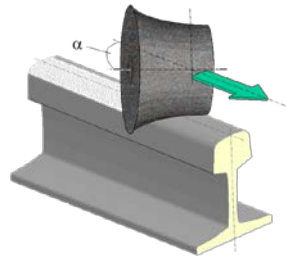


Abb. 6.3: Prinzip des High-Speed-Grindings gemäß Freudenstein [18]

Pro Überfahrt kann ein Materialabtrag von bis zu 0,1 Millimeter erzielt werden und ist gemäß Popp [9] ausreichend groß um Risse der ersten Phase sowie entstehende Schlupfwellen zu entfernen sowie eine quantitativ hochwertige Schienenoberfläche zu erhalten. Der Schleifzug des HSG erreicht unter Betrieb eine Geschwindigkeit von bis zu 80 km/h und benötigt demnach keine speziellen, kostenintensiven Sperrpausen des Gleises. Gemäß Popp [15] findet dieses System bei der ÖBB-Infrastruktur AG derzeit keine Anwendung.

7 Instandhaltungsstrategien betreffend Head-Checks

Schienenoberflächenbehandlungen (SOFB) dienen der Herstellung einer fehlerfreien Schienenoberfläche. Treten HC in der Schiene auf, nehmen Anzahl sowie Tiefe der Risse im Allgemeinen mit fortlaufenden Betriebsbelastungen exponentiell schnell zu. Die Schienenverschleißrate beschreibt den Schienenverschleiß pro Zeiteinheit und nimmt demnach mit fortlaufender Belastung bei konstant bleibenden Zeitabschnitten zu. Bei Erreichung eines bestimmten Schienenverschleißes oder einer bestimmten Risstiefe muss die Schiene gemäß der Oberbauvorschrift der ÖBB-Infrastruktur AG [12] ersetzt werden. SOFB entfernen Risse an der Schienenoberfläche und setzen die Verschleißrate der Schiene auf ihren Ursprungswert Null zurück.

Um eine wirtschaftliche Verschleißrate der Schiene zu erzielen, werden SOFB mittels Instandhaltungsstrategien geplant. Die anhand der Instandhaltungsstrategien ermittelte Verschleißrate der Schiene wird gemäß Lichtberger [3] "magische" Verschleißrate genannt. Das Prinzip von dieser ist in Abb. 7.1 dargestellt. Instandhaltungsstrategien der ÖBB-Infrastruktur AG werden mittels Schwellen definiert. Diese schreiben bei Erreichung bestimmter Risstiefen gemäß dem Regelwerk der ÖBB-Infrastruktur AG Maßnahmen in Form von SOFB vor. Je nach Tiefe des Risses wird nach folgenden Schwellen unterschieden [12]:

- Aufmerksamkeitsschwelle (AS)
- Eingriffsschwelle (ES)
- Soforteingriffsschwelle (SES)

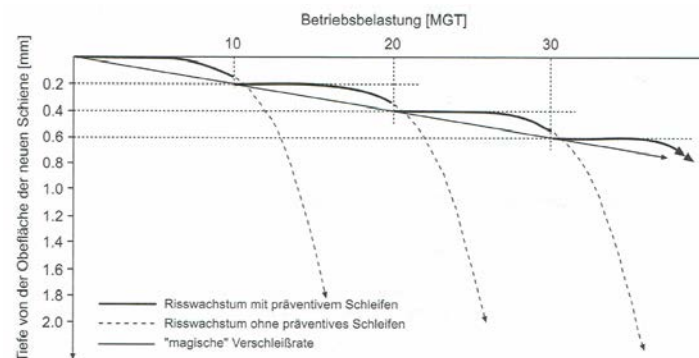


Abb. 7.1: Prinzip der "magischen" Verschleißrate gemäß Lichtberger [3]

7.1 Eingriffsschwellen bezüglich HC

7.1.1 Eingriffsschwellen der ÖBB-Infrastruktur AG

Rollkontaktermüdungen (z.B. HC) stellen ein maßgebendes Kriterium für die Durchführung von Schleifeinsätzen dar. Das Regelwerk 06 01.01 (Instandhaltungsplan Oberbauanlagen) der ÖBB-Infrastruktur AG regelt hierfür die zeitlichen Abstände der Messfahrten, bzw. die zu treffenden Maßnahmen bei auftretenden HC. Gemäß dem Regelwerk 06 01.01 sind Wirbelstromprüfungen der Schienen zur Dedektierung von HC jährlich durchzuführen. Teilbereiche, welche nicht mit dem Schienenprüfzug gemessen werden können, sind gemäß dem Regelwerk 06 01 01 der ÖBB-

Infrastruktur AG [12] visuell zu prüfen und bei optischer Erkennung von HC mit manuellen Wirbelstromprüfungen zu analysieren. Eine Übersicht der Schwellenwerte, der dazugehörigen Risstiefen, der Sonderinspektionen sowie der Maßnahmen ist in **Tab. 6** ersichtlich.

Art	Risstiefe über 2,7mm & Zusatzbedingungen	Sonderinspektion	Maßnahme
SES	Zusätzlich Ultraschallfehler vom Prüfzug in diesem Bereich	Sofortige visuelle Inspektion durch Bm oder Glm und sofortige Ultraschallprüfung	Sofortmaßnahmen sind erforderlich, sofortige Ultraschallprüfung des Bereichs wie bei einem U1 - Fehler erforderlich
ES	Überschreitungslänge länger als 1m und Zusatzangabe „plausibel“	Visuelle Inspektion durch Bm oder Glm und Ultraschallprüfung innerhalb von 8 Wochen	Festlegung der Maßnahmen im Zuge der Ultraschallprüfung
ES	Überschreitungslänge ist 1m und Zusatzangabe „plausibel“	Visuelle Inspektion durch Bm oder Glm innerhalb von 8 Wochen	Festlegung der Maßnahmen bei der visuellen Inspektion; Einleitung der Behebung oder zusätzliche Ultraschallprüfung
AS	Zusatzangabe "unplausibel"	Visuelle Inspektion im Zuge der nächsten planmäßigen Jahresbegehung durch einen Bm	-

Tab. 6: Übersicht der Schwellenarte, Risstiefen, Sonderinspektionen sowie Maßnahmen gemäß dem Regelwerk 06 01 01 der ÖBB-Infrastruktur AG [12]

Die ÖBB-Infrastruktur AG ermittelt zur Beurteilung zusammenhängender Risse (HC) den Median der Schienenrisstiefen über eine Länge von fünf Metern.

Die Eingriffsschwelle bezüglich HC beträgt bei der ÖBB-Infrastruktur AG ein ermittelter Median von über 1,0 Millimeter. Gemäß dem Regelwerk 06 01.01 der ÖBB-Infrastruktur AG werden Gleisabschnitte, bei welchen die ermittelten Mediane der Risstiefen die Eingriffsschwelle überstiegen haben, in das Arbeitsprogramm der nächstjährigen Instandsetzungsarbeiten (Schleifen oder Fräsen) mit aufgenommen und entstehende HC frühzeitig entfernt.

7.1.2 Eingriffsschwellen der DB AG

Bei der DB AG werden HC anhand ihrer Risstiefe in fünf Stufen kategorisiert. Diese sehen für detektierte Risse unterschiedliche Maßnahmen vor. [9] Eine Übersicht dieser Maßnahmen der DB AG hinsichtlich HC ist in **Tab. 7** ersichtlich.

Stufe	Risstiefe	Maßnahme
1, 2	> 2,7 mm	Tausch der Schiene innerhalb von sechs Wochen sowie sofortige Einrichtung einer Langsamfahrstelle
3-5	≤ 2,7 mm	SOFB in Abhängigkeit der Risstiefe im Zeitraum von drei bis 18 Monate

Tab. 7: Kategorien der DB AG anhand der Risstiefe gemäß Lichtberger [3]

7.2 Schleifhäufigkeit

Die Schleifhäufigkeit der ÖBB Infrastruktur AG wurde im Jahr 2013 im Zuge der Auswertung der Diplomarbeit von Popp [9] ermittelt. Das Ergebnis der Ermittlung der Schleifhäufigkeit, in Abhängigkeit des Bogenradius, der Oberbauform sowie der Schienenbelastung, ist in **Tab. 8** sowie in Abb. 7.2 ersichtlich.

Radius	Oberbauform	Schleifhäufigkeit pro 100 Mio. Tonnen
< 300m	Holz	0,97
	Beton	0,49
300-3000m	Holz	0,69
	Beton	0,72
> 3000m	Holz	0,47
	Beton	0,57
	Feste Fahrbahn	0,77

Tab. 8: Schleifhäufigkeiten in Abhängigkeit von Bogenradius und Oberbauform gemäß Popp [9]

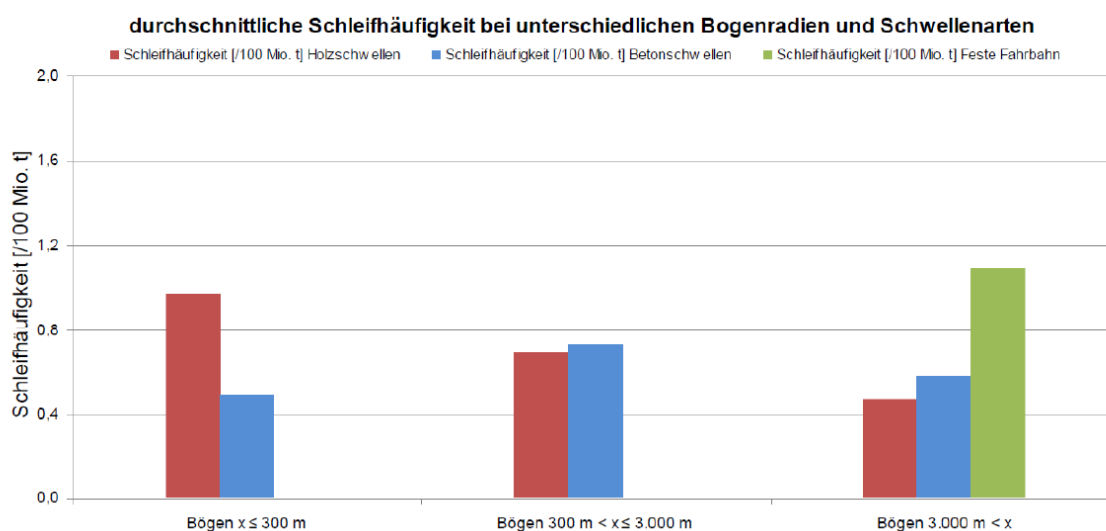


Abb. 7.2: Schleifhäufigkeiten in Abhängigkeit von Bogenradius und Oberbauform gemäß Popp [9]

8 Messdaten

Das Wissen über den aktuellen Zustand des Schienennetzes ist für die Betrachtung von Lebenszykluskosten und der Ermittlung der Betriebssicherheit erforderlich. Um den aktuellen Zustand der Schienen zu ermitteln bedarf es Messungen an diesen. Mit Messungen können Fehler an den Schienen (z.B. HC) eruiert, Maßnahmen zur Behebung von diesen geplant sowie die daraus ermittelten Daten der Messungen analysiert werden. Zur Inspektion der vorhandenen Infrastruktur, insbesondere für die Erfassung des aktuellen Schienenzustands der Schienen (hinsichtlich Risse), besitzt die ÖBB-Infrastruktur AG unterschiedliche Schienenprüfzüge.

8.1 Optische Messungen der Schiene

Messungen der Schienen können gemäß Popp [9] in Verfahren mit und ohne Berührungen der Schiene unterteilt werden. Die Wahl des Verfahrens hängt von den zu erfassenden Daten ab. Es werden das Schienenprofil, die Gleisgeometrie, die Spurweite, die Rauheit der Schienenoberfläche (Riffel, Schlupfwelle) sowie die Überhöhung gemessen. [9]

8.2 Wirbelstrom- und Ultraschallmessungen

8.2.1 Technik der Wirbelstromprüfung

Mit der Wirbelstromprüfung können oberflächennahe Risse an der Schiene (z.B. HC) sowie deren Tiefen detektiert werden. Die Funktionsweise der Wirbelstromprüfung erfolgt über elektrische Spulen. Diese befinden sich einen Millimeter über der SOK und erzeugen ein elektromagnetisches Feld mit Wirbelströmen in der Schiene. Ein Beispiel von vier nebeneinanderliegenden Wirbelstrommesssonden eines Schienenprüfzuges ist in Abb. 8.1 abgebildet.



Abb. 8.1: Vier Wirbelstrommesssonden gemäß Popp [9]

Die Eindringtiefe des elektromagnetischen Feldes sowie der Wirbelströme hängen von der elektrischen Leitfähigkeit des durchströmten Materials ab. Überfährt die elektrische Spule einen Riss, ändert sich die elektrische Leitfähigkeit der Schiene und Rückschlüsse über die Risstiefe

können gezogen werden. Das Verfahren der Wirbelstromprüfung stellt gemäß Popp [9] bei Ermittlung der exakten Risstiefe jedoch ein Problem dar:

- Sensoren können nebeneinander liegende Risse überlagern. Es resultieren überhöhte Signalamplituden (falsche Ergebnisse)
- Sensoren mit höheren Auflösungen (um einem Überlagern der Risse entgegenzuwirken) sind in deren Tiefenwirkung beschränkt

Um die Qualität der Wirbelstrommesswerte zu erhöhen, sollten die Messdaten des Schienenprüfzuges Plausibilitätsprüfungen unterzogen werden. Diese sind im folgenden Kapitel der Datenaufbereitung 9.1 aufgelistet.

Die Abstände der HC-Risse untereinander sind bei kopfgehärteten Schienen kleiner als bei unbehandelten Schienen. In Folge stellt vor allem bei kopfgehärteten Schienen die Ermittlung der exakten Risstiefe ein Problem dar. Ebenso besitzt die Schienengüte einen Einfluss auf die Genauigkeit der Wirbelstromprüfung: Schienen mit niedrigeren Stahlgüten liefern genauere Ergebnisse der Wirbelstromprüfung. Laut Untersuchungen der ÖBB-Infrastruktur AG betragen die Messungenauigkeiten der Risstiefen +/- 30%. [9]

Gemäß Popp [15] ist die ÖBB-Infrastruktur AG in keinem Besitz eines eigenen Schienenprüfzuges, sondern mietet diesen für ihre regelmäßigen Kontrollfahrten bei Bedarf von der ungarischen Eisenbahngesellschaft (Magyar Államvasutak) [15]. Die ungarische Eisenbahngesellschaft besitzt gemäß Wöhrhart [19] einen Schienenprüfzug "SDS".

8.2.2 Technik der Ultraschallprüfung

Mit der Ultraschallprüfung können Schäden (Risse) im Inneren der Schiene ermittelt werden. In Österreich kommt für die Ultraschallprüfung das Impuls-Echo-Verfahren zur Anwendung. Im Zuge des Impuls-Echo-Verfahrens wird ein Ultraschallsignal in die Schiene eingebracht. Dieses durchwandert in Folge das Material der Schiene, wird an der gegenüberliegenden Kante (der Schienenfuß) reflektiert und wandert daraufhin zurück zur Schienenoberkante. Die dafür benötigte Zeit der Schallwelle wird gemessen und dokumentiert. Befindet sich innerhalb der Schiene ein Riss, wird die Schallwelle an diesem reflektiert und returniert in Folge wesentlich früher an die Schienenoberkante. Anhand der bekannten Geschwindigkeit der Schallwelle kann die benötigte Soll-Zeit eruiert und mit den Messungen verglichen werden [9]. Die Formel für die Ermittlung der Lage (Tiefe) des Risses lautet gemäß den Grundlagen der Physik:

$$\text{Tiefenlage des Risses} = \text{Benötigte Zeit} * \text{Geschwindigkeit der Schallwelle} \quad (10)$$

Mit der Ultraschallprüfung können lediglich die Tiefenlagen der Risse ermittelt werden. Eine Eruiierung der Längen der Risse ist mit dem Ultraschallverfahren nicht möglich.

9 Analyse der Messdaten der ÖBB-Infrastruktur AG

9.1 Plausibilitätsprüfungen der Wirbelstrommessungen

Um die Qualität der Wirbelstrommesswerte zu erhöhen, sollten die Messdaten der Schienenprüfzüge (Risstiefe von HC), wie eingangs erwähnt, Plausibilitätsprüfungen unterzogen werden. Gemäß Popp gibt es zwei Untersuchungsverfahren für die Sicherstellung der Plausibilität, die lauten wie folgt [15]:

- Bedingung 1: Die Anzahl der HC-Risse je Meter Schiene ist mit mindestens 100 und maximal 350 Rissen definiert.
- Bedingung 2: Die Abweichung der ermittelten Risstiefen zweier benachbarter Wirbelstromprüfsonden darf maximal 1,5mm lauten.

Gemäß Popp [15] wurden im Zuge der Frühjahreskampagne 2018 der ÖBB-Infrastruktur AG ungefähr 5.990 Kilometern Gleis vermessen. Bei ungefähr 40 Kilometern Gleis konnten Risstiefen von über einen Millimeter mit dem Schadenbild HC eruiert werden, von welchen wiederum etwa 5% der Messwerte als unplausible Messwerte ausgeschieden wurden.

9.2 Auswahl der zu untersuchenden Strecken

Als Grundlage der Analysen von HC im österreichischen Schienennetz wurden Messdaten der ÖBB-Infrastruktur AG herangezogen. Um das Schienennetz der ÖBB-Infrastruktur AG möglichst vollständig und gezielt auf HC zu untersuchen, wurde eine Auswahl von hochfrequentierten, hochrangigen Strecken in Österreich getroffen. Eine Liste der analysierten Strecken ist im Anhang in Kapitel 14.1 aufgelistet. Es wurden insgesamt 31 Strecken mit einer Gesamtlänge von 4967 Kilometer analysiert. Die Auswahl erfolgte in Absprache mit den Experten der ÖBB-Infrastruktur AG und deckt hochfrequentierte, erfahrungsmäßig verschleiß- und HC-anfällige, zweigleisige Strecken der ÖBB-Infrastruktur AG ab.

9.3 Auswertung der Datenbank der ÖBB-Infrastruktur AG

9.3.1 Allgemeine Informationen

Die zu untersuchenden Streckengleise wurden mit der Software "IMC FAMOS" ausgewertet. In "IMC FAMOS" wurde, aufbauend auf den Programmiercode von Popp [9], ein Algorithmus für die Datenauswertung verfasst. Der Algorithmus untersucht systematisch die zu analysierenden Strecken und wertet ausgewählte Daten in der Software "Microsoft Excel" für weitergehende Betrachtungen aus. Datengrundlage der Untersuchungen waren aktuelle Messdaten des Schienenprüfzuges sowie fahrplanmäßige Betriebsbelastungen der Strecken anhand Daten der ÖBB-Infrastruktur AG. Zur Kontrolle der Plausibilität, der aus "IMC FAMOS" ermittelten Ergebnisse, wurden NATAS⁴-Blätter der ÖBB-Infrastruktur AG herangezogen. Auf NATAS-Blättern der ÖBB-Infrastruktur AG sind die Ergebnisse sämtlicher Messungen der Schienenprüfungen dargestellt.

⁴ New Austrian Track Analysing-System (Deutsch: Neues österreichische Streckenanalyse-System)

Der in "IMC FAMOS" programmierte Algorithmus der Datenauswertung läuft in zwei Phasen ab. Die erste Phase unterteilt die zu analysierenden Streckengleise in ihre jeweils einzelnen Trassierungselemente (TE), die anschließende zweite Phase wertet diese auf HC aus.

9.3.2 Prinzip der ersten Phase: Unterteilung in die TE

In der ersten Phase erfolgt die Unterteilung der zu analysierenden Strecken in deren TE. Diese Unterteilung erfolgt anhand der Änderung des Bogenradius in fortlaufender Richtung sowie den folgenden drei Regeln:

- (0) Bogenradius an der Stelle x = Bogenradius an der Stelle x+1 = 0m → TE Gerade
- (1) Bogenradius an der Stelle x = Bogenradius an der Stelle x+1 ≠ 0m → TE Bogen
- (2) trifft keiner der Fälle ein → TE Übergangsbogen

Im Zuge der Ermittlung der TE werden folgende Eigenschaften des TE ermittelt:

- Richtung des Bogens oder des Übergangsbogens (Gerade, Links, Rechts)
- Verzeichnis der örtlich zulässigen Geschwindigkeiten (VzG) [km/h] in der Mitte des TE
- Längsneigung [%] in der Mitte des TE
- Überhöhung [mm] in der Mitte des TE
- Berechnung des Überhöhungsfehlbetrag [mm] in der Mitte des TE

Da keine Daten der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeiten ermittelt werden konnten, wurde der Überhöhungsfehlbetrag, in Absprache mit den Experten der ÖBB-Infrastruktur AG, mit den Geschwindigkeiten des VzG mit folgender Formel abgeschätzt:

$$u_f = 11,8 * \frac{v^2}{R} - u \quad (11)$$

u_f Überhöhungsfehlbetrag [mm]

v Geschwindigkeit gemäß VzG [km/h]

R Bogenradius [m]

u ermittelte Überhöhung [mm]

Ein Ausschnitt der ermittelten TE (Ergebnis der ersten Phase) ist in Abb. 9.1 dargestellt.

[2]	Anzahl Elemente:		28257	Fortschritt:		100.0%	(60 von 60)			Excel-Auswertung		TE-Daten (Auf Mitte des TE bezogen)			Excel-Auswertung	
TE-Nummer	DB776 =Streckennummer	Gleis [Nr]	Regel- Fahrtrichtung 0 gegen Km 1 in Km	Trassierungstyp 0 Gerade 1 Bogen (2 Übergangsbogen)	Bogenrichtung 0 Gerade 1 Links 2 Rechts	TE Anfang [m]	TE Ende [m]	TE Radius [m]	TE Radius bis (Übergangsbogen) [m]	VZG [km/h]	Längsneigung [‰]	Überhöhung [mm]	Überhöhungs- Fehlbetrag [mm]			
1	4051	1	0	1	1	1085	1166	1004	-9999	120	-2,73	76,17	93,07			
2	4051	1	0	1	2	1166	1436	1042	-9999	120	-2,34	81,95	81,12			
3	4051	1	0	2	2	1436	1565	1042	0	120	0	39,57				
4	4051	1	0	0	0	1565	2609	0	-9999	120	0,39	0,9	-0,90			
5	4051	1	0	1	2	2609	2674	20600	-9999	120	0	1,21	7,04			
6	4051	1	0	0	0	2674	2734	0	-9999	120	0	4,3	-4,30			
7	4051	1	0	1	1	2734	2799	20600	-9999	120	0	0,98	7,27			
8	4051	1	0	0	0	2799	2949	0	-9999	120	0	3,48	-3,48			
9	4051	1	0	1	1	2949	3013	20600	-9999	120	0	7,34	0,91			

Abb. 9.1: Ausschnitt der Ergebnisse der ersten Phase

9.3.3 Prinzip der zweiten Phase: Auswertung der TE

Nach Ermittlung der TE erfolgt in der zweiten Phase die Auswertung dieser bezüglich HC. Im Zuge der Auswertung der TE wird zwischen der Innen- und Außenschiene des Gleises

unterschieden. Beim TE "Gerade" wurde die in Fahrtrichtung liegende rechte Schiene als Außenschiene definiert. Der Algorithmus zur Auswertung der TE durchläuft die in der ersten Phase ermittelten TE nacheinander und ermittelt meterweise den Median auf einer Länge von fünf Metern von den in der Datenbank hinterlegten HC-Risstiefen. Dieses Kriterium kommt bei der Instandhaltungsstrategie der ÖBB-Infrastruktur zur Anwendung (siehe Kapitel 7.1.1) und ermöglicht einen plausiblen Vergleich mit den Erfahrungswerten der Schieneninstandhaltung der ÖBB-Infrastruktur AG. Unplausible Messwerte (gemäß Popp [15] 5% der ermittelten Daten) werden im Zuge der Auswertung nicht berücksichtigt und wurden für diesen Zweck mit einer Risstiefe von Null Millimeter ersetzt.

Der maximal ermittelte Median des TE wird mit dem Kriterium von 0,1 Millimeter Risstiefe verglichen und stellt wiederum eine Kompatibilität mit der Schieneninstandhaltungsstrategie der ÖBB-Infrastruktur dar. Übersteigt der maximal ermittelte Median des TE das Kriterium von 0,1 Millimeter Risstiefe, erfolgt eine Ausgabe des TE in die Auswertungsliste der zweiten Phase. Zur Analyse der ermittelten Risse werden folgende Eigenschaften des betroffenen TE aus der Datenbank mit ausgegeben:

- Trassierungstyp (Gerade, Bogen, Übergangsbogen)
- max. HC-Stelle (Kilometrierung der maximalen Risstiefe)
- Positionszahl (PZ) (Die Positionszahl eines TE beschreibt die Lage des tiefsten Risses des TE. Null entspricht dem TE-Anfang, Eins dem TE-Ende in Regelfahrtrichtung)
- Schienengüte (z.B. R260)
- Tägliche Belastung (nach Fahrplan)
- Risstiefe innen/außen (ermittelte maximale Risstiefe)
- Datum der Messung
- Art des Eingriffs (Einbau oder SOFB)
- Datum des Eingriffs
- Zeitkoeffizient (Wachstum des Risses [mm] pro Jahr)
- Belastungskoeffizient (BK, Wachstum des Risses [mm] pro 100 Millionen Bruttotonnen)
- Schädigungskoeffizient (%-Anteil des TE mit Rissen)
- Plausibilität an der Stelle (Plausibilität des maximalen Risses)
- Plausibilität im Umkreis (Durchschnitt der Plausibilität der Risse bei +/- 3 Meter)
- Plausibilität des TE (Durchschnitt der Plausibilität der Risse des TE)

Ein Ausschnitt der Auswertungsliste der zweiten Phase der Außenschienen ist in Abb. 9.2 dargestellt.

[3]	Anzahl Zeilen:	984	=Anzahl Headchecks	Fortschritt:	100,00%	(28255 von 28257)	Restdauer:	00:00:00	(16:57:15)			
TE-Nummer	D8776 =Streckennummer	Gleis	Trassierungstyp 0 Gerade 1 Bogen 2 Übergangsbogen	Bogenrichtung 0 Gerade 1 Links 2 Rechts	TE-Anfang [m]	TE-Ende [m]	max. HC-Stelle [m]	Positionszahl 0 Anfang 1 Ende	TE Radius [m]	TE Radius bis (Übergangsbogen) [m]	Schienenlänge 1 R200 2 R260 3 R320 Cr 4 R360 HT 5 R400 HT	tägliche Belastung (Ges-BT je Gleis)
4	4051	1	0	0	1566	2608	1566,00	1,00	0,00	-9999,00	2	63911
84	4051	1	0	0	20617	21109	20824,88	0,58	0,00	-9999,00	3	63911
115	4051	1	1	2	29503	29933	29523,67	0,95	10000,00	-9999,00	2	63911
187	4051	1	0	0	53954	55441	54363,67	0,72	0,00	-9999,00	3	63911
191	4051	1	0	0	56070	56451	56161,63	0,76	0,00	-9999,00	2	63911
201	4051	1	0	0	57958	58029	58000,95	0,40	0,00	-9999,00	2	63911
203	4051	1	0	0	58085	58603	58138,84	0,90	0,00	-9999,00	2	63911
223	4051	1	0	0	61942	62304	61969,93	0,92	0,00	-9999,00	2	63911

Aktuellste Messung		Letzter Eingriff			Δ Vergleich			Excel-Auswertung	Excel-Auswertung	Excel-Auswertung	0,99	98,59	85,63
Risstiefe außen (mm)	Datum der Messung	Art des Eingriffs	Datum des Eingriffs	Δ Zeit (Monat)	Δ Risttiefe außen Zeitkoeffizient (mm/Jahr)	Δ Risttiefe außen Belastungskoeffizient (mm/100MioTo)	Schädigungs- koeffizient (%)	TE-Länge (m)	Schädigungsmeter des TE (m)	Überhöhungs- Fehlbetrag (mm)	Plausibilität an der Stelle 1 Plausibel 0 Nicht plausibel	Plausibilität im Umkreis ± 3 Meter (%)	Plausibilität im TE (%)
0,21	30.06.2017	Einbau	01.07.2004	153,13	0,02	0,07	9,40	1042	98	-0,90	1,00	100,00	81,69
0,30	30.06.2017	SOFB	05.04.2011	73,48	0,05	0,21	3,25	492	16	-999999,00	1,00	100,00	73,23
0,22	30.06.2017	Einbau	01.07.2009	94,23	0,03	0,12	13,63	430	59	-999975,87	1,00	100,00	1,85
0,13	30.06.2017	Einbau	01.07.2006	129,58	0,01	0,05	1,75	1487	26	-3,48	1,00	100,00	87,16
0,21	30.06.2017	SOFB	23.09.2007	115,10	0,02	0,09	2,36	381	9	-0,35	1,00	100,00	69,55
0,17	30.06.2017	Einbau	01.07.1995	259,19	0,01	0,03	9,72	71	7	-1,33	1,00	100,00	97,22
0,15	30.06.2017	Einbau	01.07.2007	117,81	0,02	0,07	5,39	518	28	-2,81	1,00	100,00	74,57
0,26	30.06.2017	Einbau	01.07.2009	106,00	0,02	0,13	11,51	362	42	-1,12	1,00	100,00	68,22

Abb. 9.2: Ausschnitt der Ergebnisse der zweiten Phase (Außenschienen)

9.4 Analyse der ermittelten TE

Die in der zweiten Phase ermittelten TE, welche das Kriterium der Risstiefe von >0,1mm erfüllen, werden auf Einfluss verschiedener Parameter analysiert.

9.4.1 Einflussparameter Innen-, Außenschiene

Eine Auflistung der ermittelten TE der analysierten Schienen, unterteilt in gesamt, in TE mit HC auf der Innenschiene sowie in TE mit HC auf der Außenschiene, ist in Abb. 9.3 abgebildet.

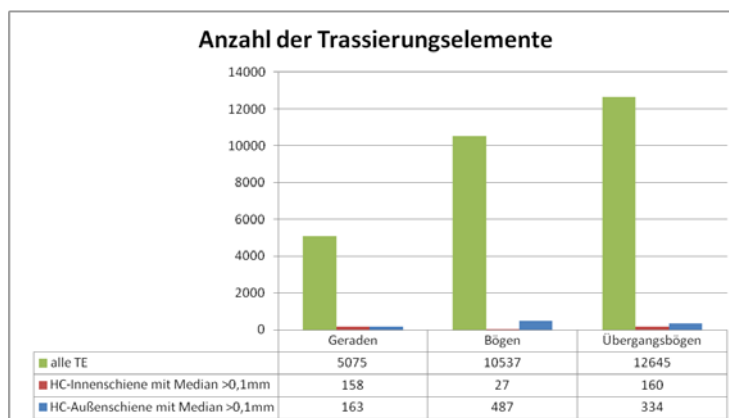


Abb. 9.3: Anzahl der TE

Das analysierte Schienennetz der ÖBB-Infrastruktur AG besteht aus rund doppelt so vielen Übergangsbögen (12645) und Bögen (10537) wie aus Geraden (5075). Bei der Anzahl von TE mit erfülltem Kriterium von Kapitel 9.3.3 (dem Kriterium von mindestens 0,1 Millimeter Risstiefe) bilden Außenschienen von Bögen (487), gefolgt von Außenschienen von Übergangsbögen (334) sowie deren Innenschiene (160) die größten Gruppen. Die Theorie von Brehmer [14], wonach HC vorwiegend in Bögen von Außenschienen entstehen, kann mit diesem Diagramm belegt werden.

9.4.2 Analyse der Positionszahl

Die Boxplots der PZ der Innenschiene sind in Abb. 9.4 dargestellt. Der durchschnittliche Median der PZ der Innenschiene beträgt 0,69 und befindet sich demnach in der zweiten Hälfte der TE in Fahrtrichtung. Es sind sämtliche PZ zwischen Null und Eins vorhanden, die Schwankungsbreiten der 25%-Quantile betragen 0,35 (untere 25%-Quantil) und 0,91 (obere 25%-Quantil). Die PZ besitzen eine sehr große Streuung, es lassen sich maximal Tendenzen erkennen. Thesen bezüglich der zu erwartenden Position des tiefsten HC-Risses sind keine aufstellbar.

Bögen der Innenschiene weisen durchschnittlich einen Median der PZ (der Position des tiefsten HC-Risses in Regelfahrtrichtung des TE) von 0,29 auf und entsprechen nicht dem Durchschnitt der gesamten Innenschiene. Die Schwankungsbreite der 25%-Quantile beträgt 0,02 (untere 25%-Quantil) und 0,94 (obere 25%-Quantil). Bei Bögen der Innenschiene treten HC somit vermehrt im Bogenanfang der Fahrtrichtung auf.

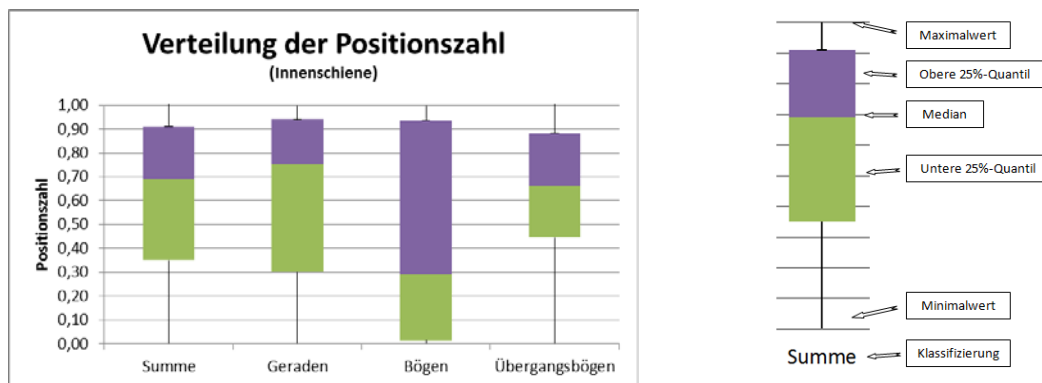


Abb. 9.4: Positionszahl der Innenschiene

Eine Betrachtung der PZ der Außenschiene ist in Abb. 9.5 abgebildet. Im Gegensatz zur Innenschiene befindet sich der durchschnittlich tiefste Riss bei PZ 0,53. Es sind ebenfalls sämtliche Werte zwischen Null und Eins vorhanden, die Schwankungsbreiten der 25%-Quantil betragen 0,11 (untere 25%-Quantil) und 0,92 (obere 25%-Quantil). Die Verteilung der Lage der tiefsten HC-Risse besitzt bei der Außenschiene eine sehr große Streuung, es lassen sich maximal Tendenzen erkennen. Thesen bezüglich der zu erwartenden Position des tiefsten HC-Risses sind keine aufstellbar.

In Geraden sowie in Übergangsbögen treten HC vermehrt im zweiten Viertel des Bogens in Fahrtrichtung auf (Median Gerade: 0,38, Median Übergangsbogen: 0,36). Eine Betrachtung der Bögen der Außenschienen liefert einen Median von 0,74. Die Schwankungsbreite der Quantile der Bögen von Außenschienen betragen 0,21 (untere 25%-Quantil) sowie 0,97% (obere 25%-Quantil). Bei der Außenschiene von Bögen treten HC vorwiegend in Fahrtrichtung Ende des Bogens auf. Die Verteilung der HC in Bögen der Außenschiene entspricht nicht dem Durchschnitt der gesamten TE der Außenschiene. Die Erkenntnisse über die Verteilung der Position der tiefsten HC-Risse spiegelt gemäß Popp [15] Erfahrungswerte der ÖBB Infrastruktur AG wieder.

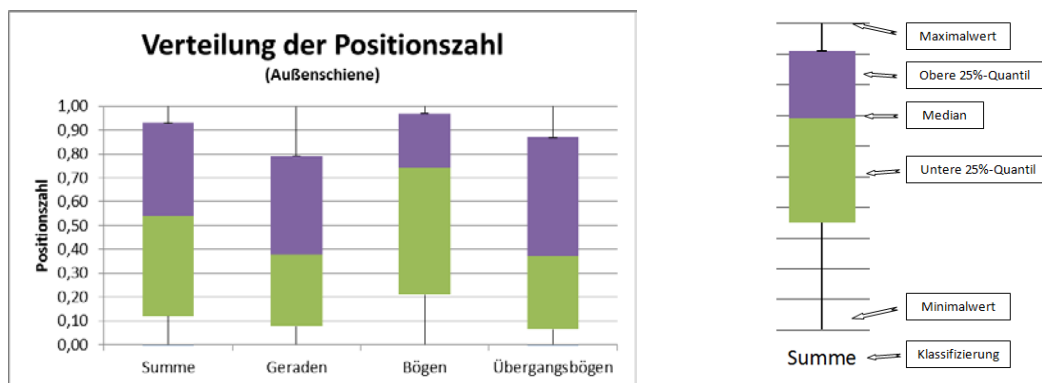


Abb. 9.5: Positionszahl der Außenschiene

Eine detaillierte Betrachtung der PZ von Bögen der Außenschiene ist in Abb. 9.6 dargestellt. In Abb. 9.6 ist die Anzahl der TE auf Bogenradienklassen sowie aufsteigender PZ aufgetragen.

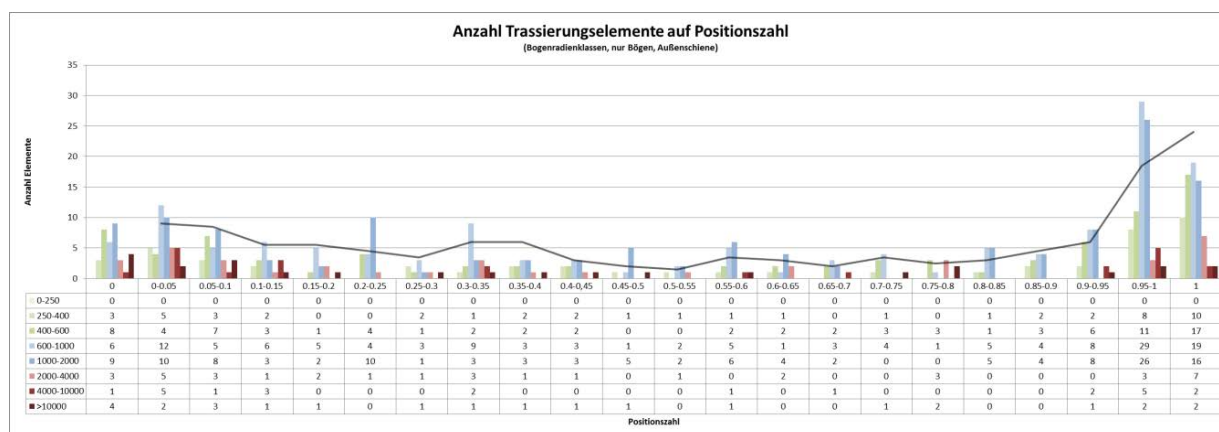


Abb. 9.6: Übersicht der Positionszahlen von Bögen mit HC der Außenschiene

Deutlich erkennbar ist die stetige Abnahme der Anzahl der TE in fortlaufender Richtung der PZ (bis 0,75-0,8) sowie die signifikante Steigung der Anzahl der TE ab PZ 0,8. Das Maximum der Anzahl der TE tritt bei der Bogenradienklasse 600-1000m mit 29 TE, gefolgt von der Bogenradienklasse 1000-2000m mit 26 TE bei jeweils der Positionszahl zwischen 0,95 und 1 auf. Die Erkenntnis des häufigeren Auftretens der tiefsten HC-Risse gegen Bogenende - nur als Tendenz erkennbar - decken sich gemäß Popp [15] mit Erfahrungswerten der ÖBB Infrastruktur AG und konnten bis dato mit keiner Theorie belegt werden.

9.4.3 Einflussparameter Bogenradius

Eine Betrachtung der Anzahl von Bögen mit HC hinsichtlich deren Verteilung in Bogenradienklassen ist in Abb. 9.7 abgebildet.

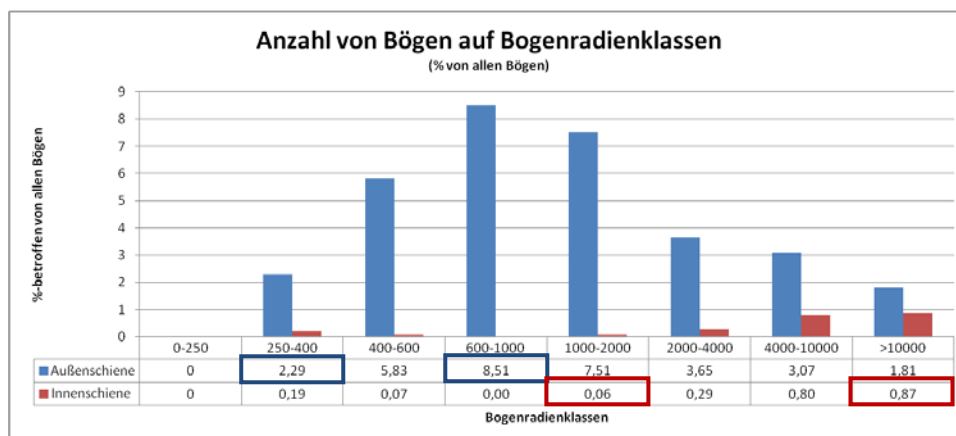


Abb. 9.7: Anzahl von Bögen mit HC auf Bogenradienklassen

Bei Innenschienen treten HC vermehrt bei größer werdenden Bogenradien auf (über 2000m Radius) und sind vorwiegend in nahezu geraden Abschnitten aufzufinden. Bei Bögen der Außenschiene ist überwiegend der Radiusbereich von 400 bis 2000 Metern von HC betroffen (jeweils über 5,5% der Gesamtsumme). Diese Erkenntnisse der Verteilung von HC über den Schienenradius belegen Erfahrungen von Popp [15] von der ÖBB Infrastruktur AG.

Eine Betrachtung der schadhaften Längen der TE (Summe der Länge des TE mit Rissen), liefert Abb. 9.8. Bei der Außenschiene sind durchschnittlich 6-16% von der Gesamtlänge des TE von HC betroffen; Bei der Innenschiene ist die Schwankung der schadhaften Schienenlänge mit durchschnittlich 3-20% von der Gesamtlänge der TE größer. Das Maximum der prozentuell schadhaften Längen der Außenschienen liegt bei Bögen mit Radien von 250 bis 400 Metern (16,01%), bzw. bei Bögen mit Radien >10000 Metern (15,57%). Bei Innenschienen befindet sich das Maximum der prozentuell schadhaften Längen bei Radien von 1000 bis 2000 Meter (19,68%).

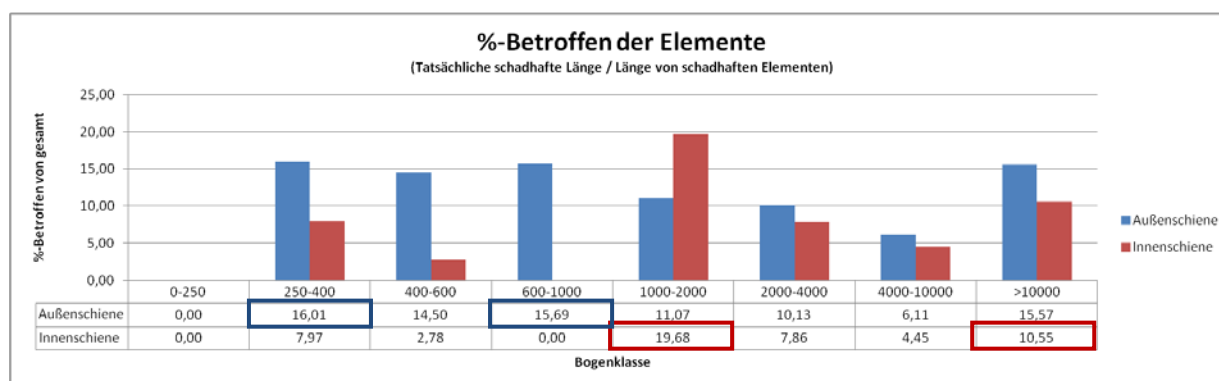


Abb. 9.8: Schadhafte Längen der Außenschiene von Bögen

Analyse Innenschiene: Ein Vergleich der beiden Grafiken ergibt, dass der durchschnittliche Maximalwert der prozentuell schadhaften Längen der Innenschiene bei lediglich 0,06% aller Bögen der Innenschiene auftritt und demnach keine plausiblen Aussagen getroffen werden können. In der maßgeblichen Bogenradienklasse der betroffenen Bögen der Innenschiene beträgt die durchschnittlich maximale beschädigte Länge 10,55% des TE.

Analyse Außenschiene: Der Vergleich der beiden Grafiken ergibt, dass die durchschnittlich maximal schadhafte Länge des TE (16,01%) bei 2,29% der TE der Außenschiene auftreten. In der maßgeblichen Bogenradienklasse der betroffenen Bögen der Außenschiene (8,51%) beträgt die maximal beschädigte Länge des TE 15,69% und entspricht in etwa dem Maximalwert.

Aufgrund der Erkenntnis der PZ der Innenschiene sowie aufgrund des geringen Anteils der Bögen der Innenschiene bezogen auf das Gesamtnetz der ÖBB-Infrastruktur AG (27 TE), wurde die Innenschiene nach Absprache mit den Experten der ÖBB-Infrastruktur AG vernachlässigt und die Außenschiene als Datengrundlage weitergehender Analysen herangezogen.

9.4.4 Analyse der Schienengüte der Außenschiene

Der Zusammenhang des durchschnittlichen Radius von mit HC beschädigten Bögen mit der Schienengüte ist in Abb. 9.9 dargestellt.

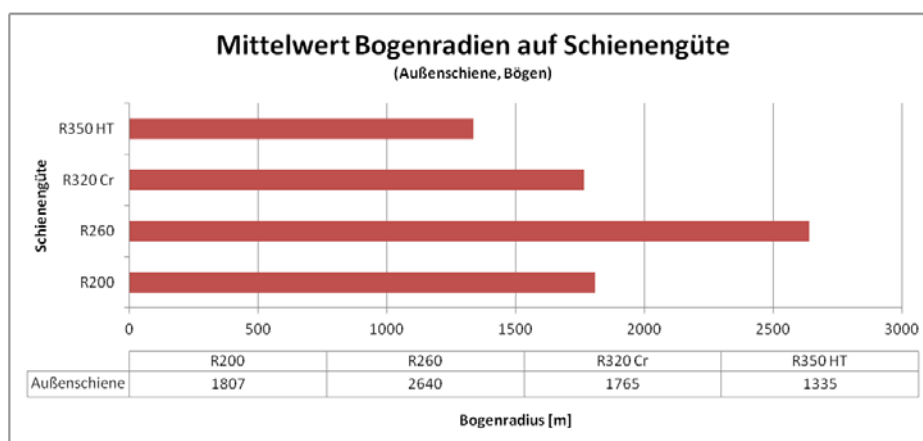


Abb. 9.9: Mittelwert der Bogenradien mit HC auf Schienengüte

Die Schienengüte R260 weist mit einem durchschnittlichen Bogenradius von 2640 Meter den Maximalwert des Vergleichs auf, die Schienengüte R350 HT bildet mit einem durchschnittlichen Bogenradius von 1335 Meter den Minimalwert des Vergleichs der Bogenradien. Die Schienengüte R350 HT wird im österreichischen Schienennetz aufgrund ihrer Härte und ihrem Widerstands gegen HC speziell auf Streckenabschnitten mit starkem HC-Wachstum eingebaut. HC treten gemäß Kapitel 9.4.3 vermehrt in Bögen mit kleineren Radien auf und plausibilisieren den Minimalwert der Schienengüte R350 HT sowie im umgekehrten Fall den Maximalwert der Schienengüte R260.

In Absprache mit den Experten der ÖBB-Infrastruktur AG wurden die Schienengüten R260 und R350 HT für weitergehende Analysen herangezogen. Die Schienengüte R320 Cr und R200 werden im Zuge dieser DA nicht näher untersucht.

9.4.5 Analyse des Schädigungskoeffizienten

Gemäß Kapitel 5 treten HC über einen längeren Abschnitt des Gleises auf. Der Schädigungskoeffizient eines TE in % beschreibt die Summe der schadhafte Längen eines TE, bezogen auf dessen Gesamtlänge.

Die Summenfunktion des Schädigungskoeffizienten der Außenschiene ist in Abb. 9.10 dargestellt. 100% aller mit HC beschädigte Bögen der Außenschiene besitzen einen Schädigungskoeffizient größer gleich Null, bzw. besitzen 60% aller mit HC beschädigte Bögen der Außenschiene einen Schädigungskoeffizienten größer gleich 10%. Mit der Summenfunktion des Schädigungskoeffizienten kann ein Minimum-Kriterium der schadhafte Länge eines TE gewählt und der Datensatz auf typische HC gemäß Kapitel 5 gefiltert werden. Für die Filterung wurde das Kriterium Schädigungskoeffizient > 10% gewählt.

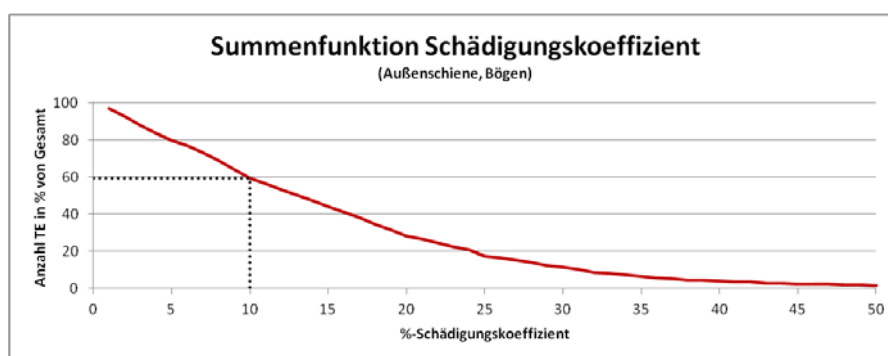


Abb. 9.10: Verteilungskurve Schädigungskoeffizient der Außenschiene

Anmerkung: Längere TE besitzen anhand der Angabe des Schädigungskoeffizienten in Prozent bezogen auf die Gesamtlänge des TE einen tendenziell niedrigeren Schädigungskoeffizienten und erfüllen das Kriterium des Schädigungskoeffizienten schwieriger.

9.4.6 Zeitkoeffizient & Belastungskoeffizient (BK)

Der **Zeitkoeffizient** [mm/Jahr] eines TE stellt die Wachstumsgeschwindigkeit eines HC-Risses eines TE pro Jahr dar. Die ermittelte Risstiefe wird für die Ermittlung des Zeitkoeffizienten durch die Zeitdauer seit dem letzten Eingriff (ΔZeit) dividiert. Eingriffe der Schiene stellen Schieneneinbau oder SOFB dar. Bei einer SOFB wird angenommen, dass die behandelte Schiene in einem Zustand ohne Risse vorliegt und dem Profil sowie den Eigenschaften einer neuen Schiene entspricht. Die Formel zur Ermittlung des Zeitkoeffizienten eines TE lautet wie folgt:

$$\text{Zeitkoeffizient} = \frac{\text{Ermittelte Risstiefe}}{\Delta\text{Zeit}} \quad (12)$$

Als Problem, bei Berechnung des Zeitkoeffizienten, stellt sich die Datierung des Schieneneinbaus dar. Diese ist in der Datenbank der ÖBB-Infrastruktur AG lediglich mit dem Jahr des Einbaus datiert und würde bei einer willkürlichen Festlegung des Datums des Schieneneinbaus (z.B. auf Anfang Juli) und der damit verbundenen Schwankungsbreite von +/- sechs Monaten die Ergebnisse des Zeitkoeffizienten verfälschen. Aufgrund des fehlenden exakten Datums sowie in Absprache mit den Experten der ÖBB-Infrastruktur AG wurden im weiteren Verlauf der Analysen lediglich TE mit letzter Aktion "SOFB" herangezogen.

Gemäß Kapitel 4 sind Schienenschäden von der Belastung des Gleises abhängig. Um den Faktor der Gleisbelastung zu berücksichtigen und HC-Risse anhand ihrer Gesamtbelastung vergleichen zu können stellt der **Belastungskoeffizient (BK)** [mm/100MioTo] eines TE eine Verknüpfung des Zeitkoeffizienten mit der Belastung des Gleises her. Der BK wird mit folgender Formel ermittelt:

$$BK = \frac{\text{Zeitkoeffizient}}{\text{Belastung des Gleises}} \quad (13)$$

Eine Darstellung der Mittelwerte des BK auf die Bogenradienklassen der Schienengüte R260 sowie R350 HT zeigt Abb. 9.11. Tendenziell wachsen HC in der Schienengüte R350 HT langsamer als HC der Schienengüte R260. Der höhere BK der Schienengüte R350 HT der Bogenradienklasse 250-400 Metern kann, wie in Kapitel 6 aufgezeigt, mit einer Überlagerung der HC-Risse im Zuge der Messung der Risstiefen erklärt werden. Aus diesen resultieren tiefere Risstiefen und in Folge höhere Belastungskoeffizienten. Im Durchschnitt können gemäß Popp [15] aufgrund Überlagerungen von HC-Rissen im Zuge der Messungen rund 30-40% tiefere HC-Risse in der Schienengüte R350 HT ermittelt werden.

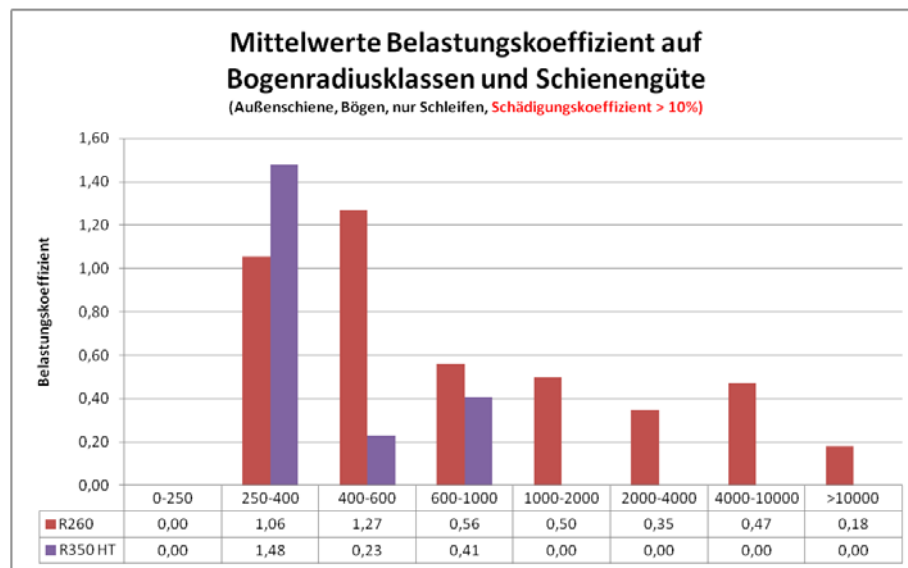


Abb. 9.11: Mittelwert BK auf Bogenradiusklassen und Schienengüte

9.5 Filterungen der TE

Um typische HC gemäß Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aus dem Datensatz der ÖBB-Infrastruktur AG herauszufiltern wurde der Datensatz der ÖBB-Infrastruktur nach folgenden Kriterien gefiltert:

- TE mit Riss-Median >0,1mm der Außenschiene (= zweite Phase der Datenermittlung)
- TE mit Schienengüte R260 & R350HT
- Letzte Aktion: "SOFB" (= geschliffene Elemente)
- TE mit Schädigungskoeffizienten >10%
- Risse mit Plausibilität

Die Filterung des Datensatzes der ÖBB-Infrastruktur AG nach Rissen mit Plausibilität stellt eine Überprüfung dar, da diese Bedingung bereits im Zuge der Auswertung der TE (= zweite Phase) berücksichtigt worden ist.

Eine Übersicht der Anzahl der TE der Außenschiene vor und nach den Filterungen ist in Abb. 9.12 ersichtlich. Nach den Filterungen verbleiben 156 TE der Schienengüte R260, bzw. 11 TE der Schienengüte R350 HT der Außenschiene zur weiteren Analyse. Die Schienengüte R350 HT wurde erst in den letzten Jahren verstärkt eingebaut, sodass wenige Gleisabschnitte mit der Schienengüte R350 HT bereits geschliffen und mit Wirbelstromprüfungen geprüft wurden. Trotz der Bedingung der Plausibilität im Zuge der Auswertung der zweiten Phase konnte bei der Schienengüte R260 ein unplausibler Riss ermittelt und herausgefiltert werden.

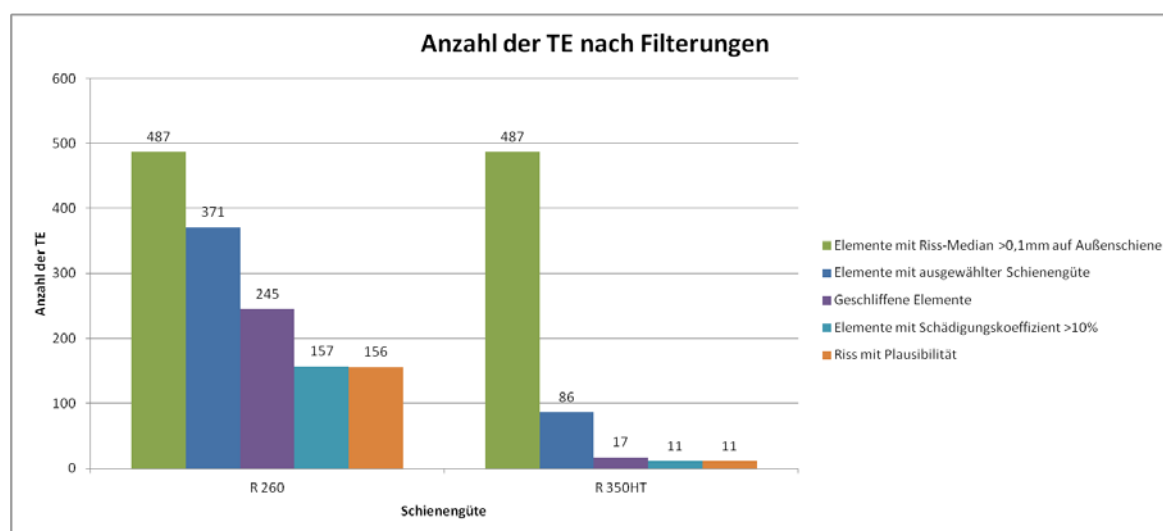


Abb. 9.12: Anzahl der TE nach Filterungen

9.6 Korrelationsanalyse potentieller Einflussfaktoren auf Entstehung und Wachstum von Head-Checks

9.6.1 Korrelationskoeffizient von Pearson & Bestimmtheitsmaß

Der **Korrelationskoeffizient von Pearson** (r oder ρ) stellt ein Maß des **linearen** Zusammenhangs zweier Datensätze her und kann gemäß Hemmerich [20] mit folgender Formel ermittelt werden:

$$\rho_{X,Y} = \frac{\text{cov}(X,Y)}{\sigma_X * \sigma_Y} = \frac{E[(X - \bar{X}) * (Y - \bar{Y})]}{\sigma_X * \sigma_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 * \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (14)$$

$X, Y, \dots$ Messreihen bzw. Zufallsvariablen

$\rho_{X,Y}$ Korrelation zwischen den beiden Messreihen

$\text{cov}(X,Y)$.. Kovarianz der Messreihen von X und Y

σ_X Standardabweichung der Messreihe X

$E(x)$ Erwartungswert der Variable x

Der Korrelationskoeffizient von Pearson kann gemäß Hemmerich [20] Werte zwischen -1 und 1 annehmen. Eine Interpretation des Korrelationskoeffizienten nach Cohen liefert **Tab. 9**:

Wert des Korrelationskoeffizienten von Pearson	Interpretation des Korrelationskoeffizienten nach Cohen
.10	Kleiner Effekt (niedrige Korrelation)
.30	Mittlerer Effekt
.50	Großer Effekt (große Korrelation)

Tab. 9: Interpretation des Korrelationskoeffizienten nach Cohen gemäß Hemmerich [20]

Das **Bestimmtheitsmaß R^2** stellt eine Wahrscheinlichkeit des linearen Zusammenhangs der untersuchten Datensätze dar und wird gemäß Hemmerich [20] mit folgender Formel ermittelt:

$$R^2 = \rho_{X,Y}^2 \quad (15)$$

R^2 Bestimmtheitsmaß

$\rho_{X,Y}^2$ Korrelationskoeffizient von Pearson

Das Bestimmtheitsmaß kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Im Gegensatz zum Korrelationskoeffizienten beschreibt das Bestimmtheitsmaß die Höhe der Varianz der Regression und bildet ein Maß über die Qualität der durch die Korrelation gebildeten Funktion (entspricht dem Anteil des Datensatzes [%] welcher mit der gebildeten Funktion abgebildet werden kann).

9.6.2 Visualisierung mittels Fundamentaldiagrammen

Das Fundamentaldiagramm (FD) bezeichnet eine grafische Darstellung dreier verschiedener Parameter der Außenschiene für die Schienengüte R260 sowie die R350 HT. Die Typisierung des FD lautet: FD (erster Parameter der x-Achse, zweiter Parameter der y-Achse, dritter Parameter des Symbols der Punktwolke). Es wurden HC nach den in Kapitel 9.5 durchgeführten Filterungen analysiert, sowie folgende FD für die Schienengüten R260 sowie R350 HT dargestellt:

- FD (Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag)
- FD (Längsneigung, BK, VzG)
- FD (Längsneigung, BK, Überhöhungsfehlbetrag)

Sämtliche zum Vergleich herangezogene Daten, ausgenommen der gemessenen Risstiefen, sind dem idealen Zustand gemäß den Anlagendaten der ÖBB-Infrastruktur AG, bzw. dem VzG (d.h. keine realen Geschwindigkeiten) entnommen. Diese werden in Folge auf Eignung zur Feststellung eines Zusammenhangs mit der Entstehung sowie Wachstum von HC geprüft.

9.6.3 Ergebnisdarstellungen

Im FD (Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag) wird der Bogenradius auf der x-Achse sowie der Belastungskoeffizient auf der y-Achse des FD aufgetragen. Der Überhöhungsfehlbetrag ist in Gruppen zusammengefasst und anhand unterschiedlicher Symbole der Punkte ersichtlich.

Schienenegüte R260: Das FD (Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag) der Schienenegüte R260 ist in Abb. 9.13 abgelichtet. Die dazugehörigen Korrelationskoeffizienten sowie Bestimmtheitsmaße des Datensatzes sind in **Tab. 10** aufgelistet.

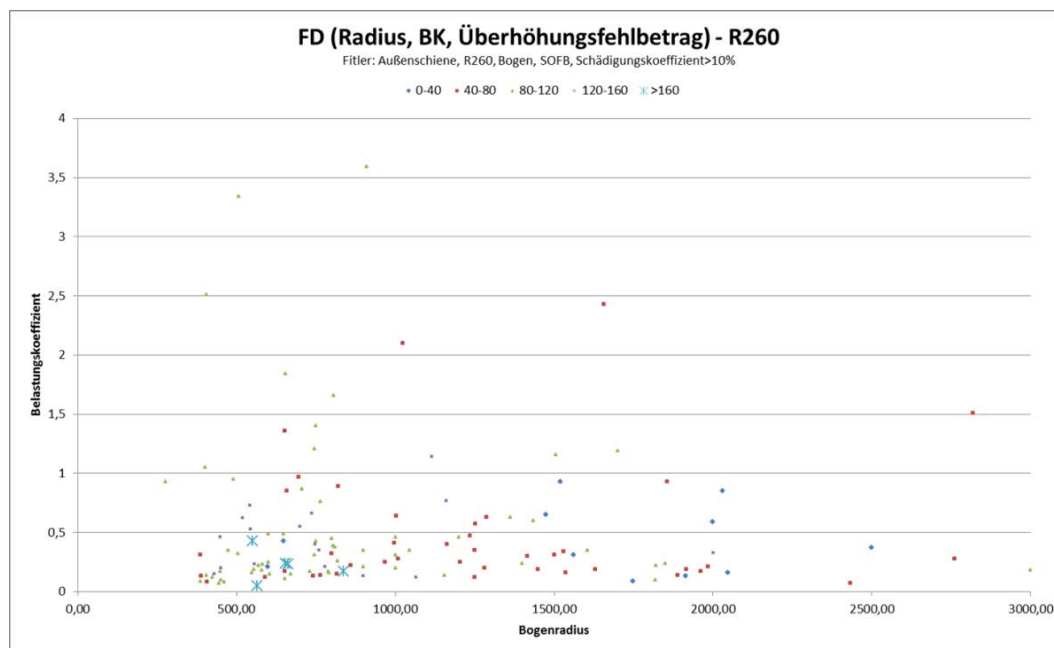


Abb. 9.13: FD (Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag) der Schienenegüte R260

Überhöhungsfehlbetrag ⁵	0-40	40-80	80-120	120-160	>160
Korrelationskoeffizient	-0,27	0,01	-0,10	0,10	-0,25
Bestimmtheitsmaß	0,07	0,00	-0,01	0,01	0,06
Anzahl der TE	210	44	61	17	5

Tab. 10: Korrelationskoeffizienten des FD (Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag) – R260

Der größte Korrelationskoeffizient tritt bei Überhöhungsfehlbeträgen von 0 bis 40 Millimetern auf und beträgt -0,27 (Datengrundlage: 210 TE). Gemäß der Interpretation des Korrelationskoeffizienten nach Cohen tritt ein mittlerer, fallender Effekt ein: Je größer der Bogenradius, desto kleiner der BK. Gemäß dem Bestimmtheitsmaß von 0,07 können 7% des Datensatzes mit der Deutung des Korrelationskoeffizienten abgebildet werden. Die Streuung der Korrelationskoeffizienten beträgt zwischen -0,27 und 0,10 - in dessen Folge keine allgemeingültigen Aussagen über das gesamte VzG-Spektrum aufgestellt werden können. Das Diagramm stellt eine Vertiefung der bereits aufgestellten Analyse von Kapitel 9.4.3 dar und bestätigt dessen Erkenntnisse: Eine Linearität konnte aufgrund des vorhergehendes Kapitels bereits ausgeschlossen werden.

Um ähnliche Daten (z.B. TE mit ähnlichen Radius sowie in derselben Überhöhungsfehlbetragsgruppe) zu analysieren wurden folgende Daten (HC) des FD (Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag) in Abb. 9.14 miteinander verglichen. Eine Tabelle der ermittelten Daten der TE der ausgewählten HC von Abb. 9.14 ist im Anhang in Kapitel 14.2 ersichtlich.

⁵ Hinweis: Überhöhungsfehlbetrag ermittelt mittels VzG

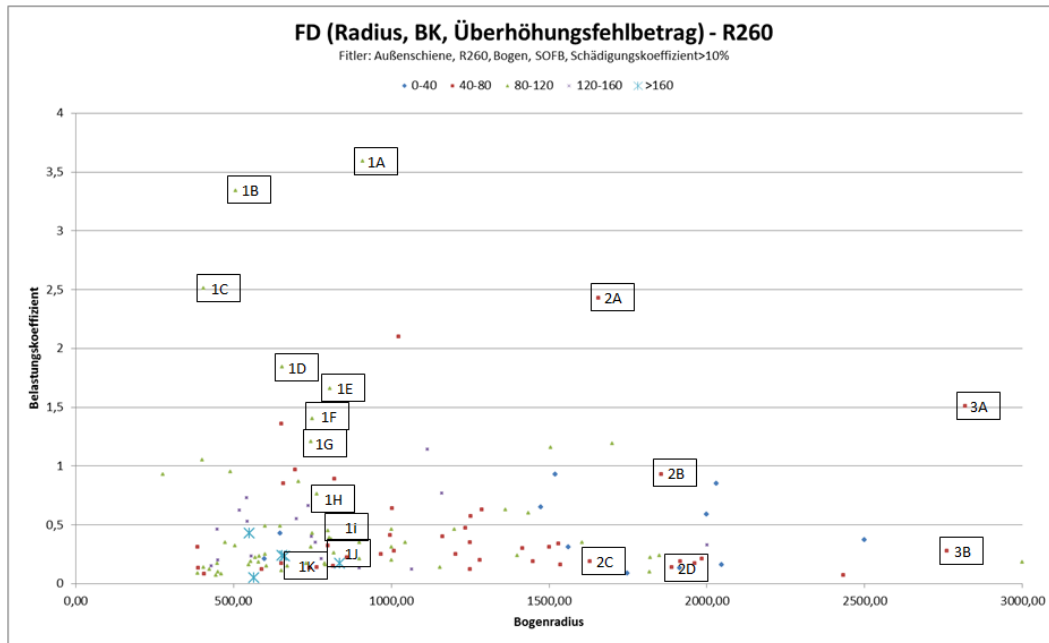


Abb. 9.14: Analyse Fundamentaldiagramm (Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag) der Schienengüte R260

Es konnte kein Zusammenhang zwischen den drei Parametern Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag festgestellt werden. Eine Häufung der ermittelten TE um den Bogenradius zwischen 500-2000 Metern sowie eine geringe Steigung des BK um den Radius 500-1000 Metern entspricht den Erkenntnissen der Analyse des BK des Kapitels 9.4.6.

Schienengüte R350 HT: Das FD (Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag) der Schienengüte R350 HT ist in Abb. 9.15 dargestellt. Die dazugehörigen Korrelationskoeffizienten sowie Bestimmtheitsmaße des Datensatzes sind in **Tab. 11** aufgelistet.

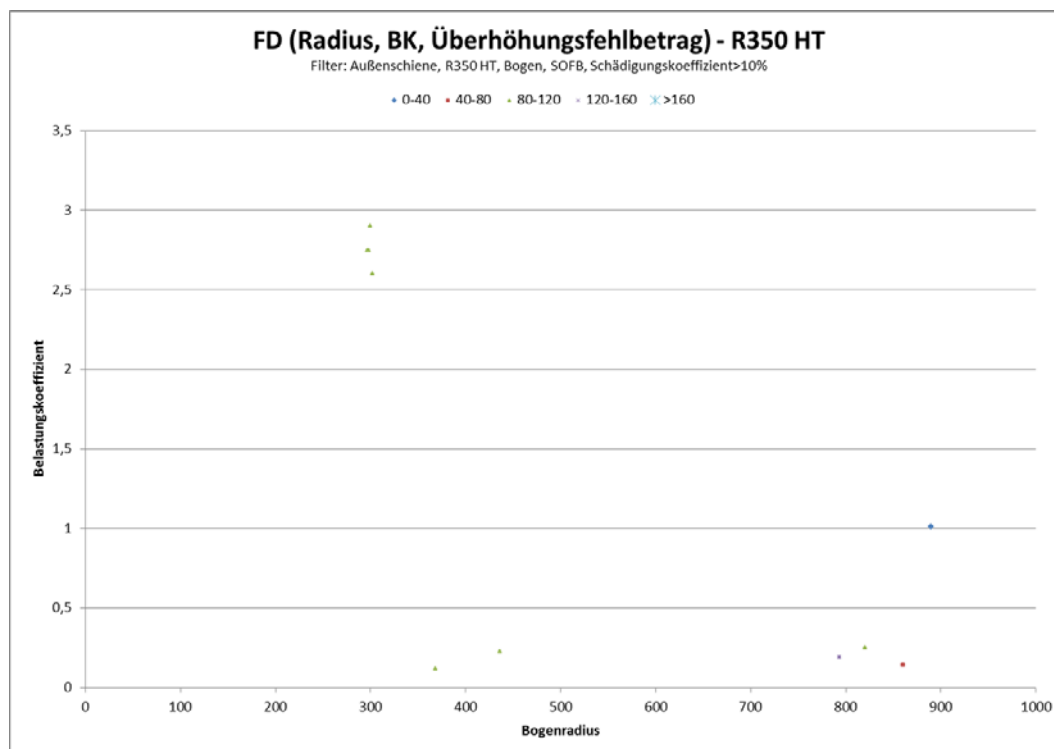


Abb. 9.15: FD (Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag) der Schienengüte R350 HT

Überhöhungsfehlbetrag ⁶	0-40	40-80	80-120	120-160	>160
Korrelationskoeffizient	-	-	-0,66	-	-
Bestimmtheitsmaß	-	-	0,44	-	-
Anzahl der TE	1	1	7	1	0

Tab. 11: Korrelationskoeffizienten des FD (Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag) – R350 HT

Aufgrund des zu kleinen Datensatzes konnte lediglich ein Korrelationskoeffizient bei Überhöhungsfehlbeträgen zwischen 80 und 120 Millimetern ermittelt werden. Der Korrelationskoeffizient beträgt -0,66 (Datengrundlage: 7 TE) und entspricht einem großen, fallenden Effekt gemäß der Interpretation des Korrelationskoeffizienten nach Cohen gemäß Hemmerich [20]. Aufgrund der Größe des Datensatzes von insgesamt 10 TE und in Anbetracht der Anzahl der TE des Schienennetzes der ÖBB-Infrastruktur AG ist eine Deutung des Korrelationskoeffizienten sowie des Bestimmtheitsmaßes als nicht repräsentativ zu beurteilen.

Trotz der fehlenden Plausibilität wurden folgende Dateneinträge (HC) des FD (Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag) in Abb. 9.16 tiefergehend analysiert. Eine Tabelle der ermittelten TE-Daten der ausgewählten HC ist im Anhang in Kapitel 14.2 ersichtlich.

⁶ Hinweis: Überhöhungsfehlbetrag ermittelt mittels VzG

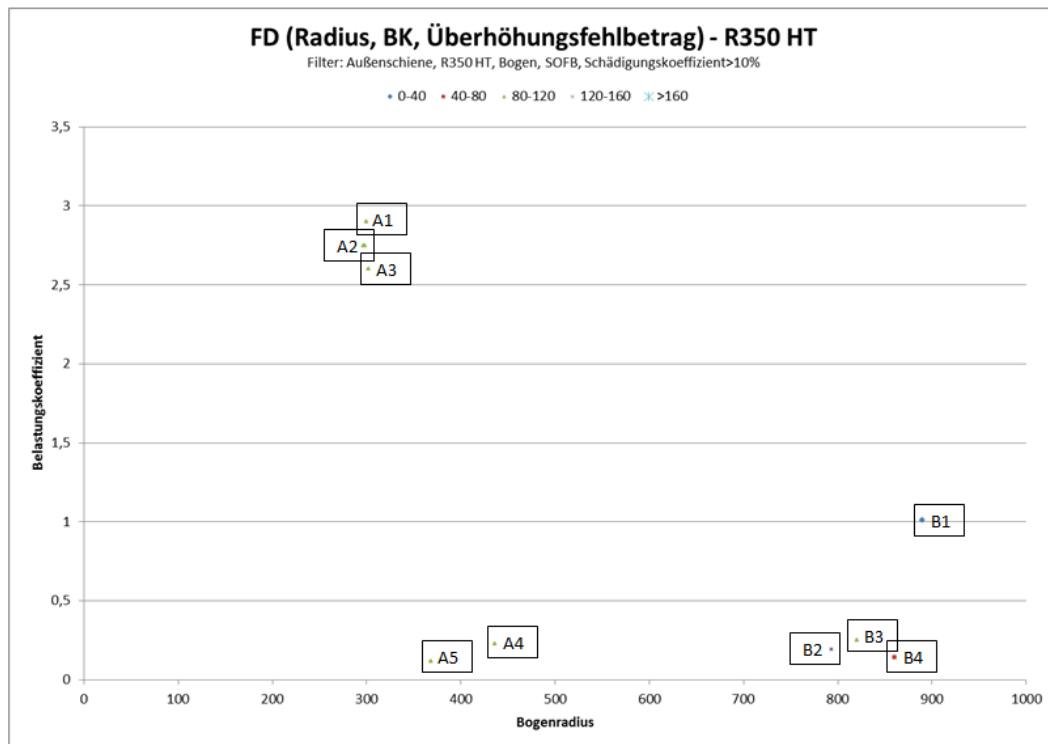


Abb. 9.16: Analyse FD (Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag) der Schienengüte R350 HT

Aufgrund der durch die Filterungen stark dezimierter Datengrundlage von elf Daten (HC), sind keine Aussagen bzgl. Korrelationen möglich. Bei den drei um Bogenradius 300m sowie Belastungskoeffizienten zwischen 2,5 und 3 liegenden TE (A1 bis A3) handelt es sich um drei direkt hintereinanderliegende Bögen mit gering unterschiedlichen Radien auf der Strecke 6022. Bei diesen Daten kann von einem einzigen Bogen ausgegangen werden.

Im Zuge der Auswertung der Einzelproben der Abb. 9.16 konnten keine Zusammenhänge der Einflussparameter gefunden werden.

9.6.4 FD (Längsneigung, BK, VzG)

Im FD (Längsneigung, BK, VZG) wird die Längsneigung auf der x-Achse und der BK auf der y-Achse des FD aufgetragen. Der Überhöhungsfehlbetrag wurde in Gruppen zusammengefasst und ist anhand unterschiedlicher Symbole der Punkte ersichtlich.

Schienengüte R260: Das FD (Längsneigung, BK, VZG) der Schienengüte R260 ist in Abb. 9.17 abgebildet. Die dazugehörigen Korrelationskoeffizienten sowie Bestimmtheitsmaße des Datensatzes sind in **Tab. 12** aufgelistet.

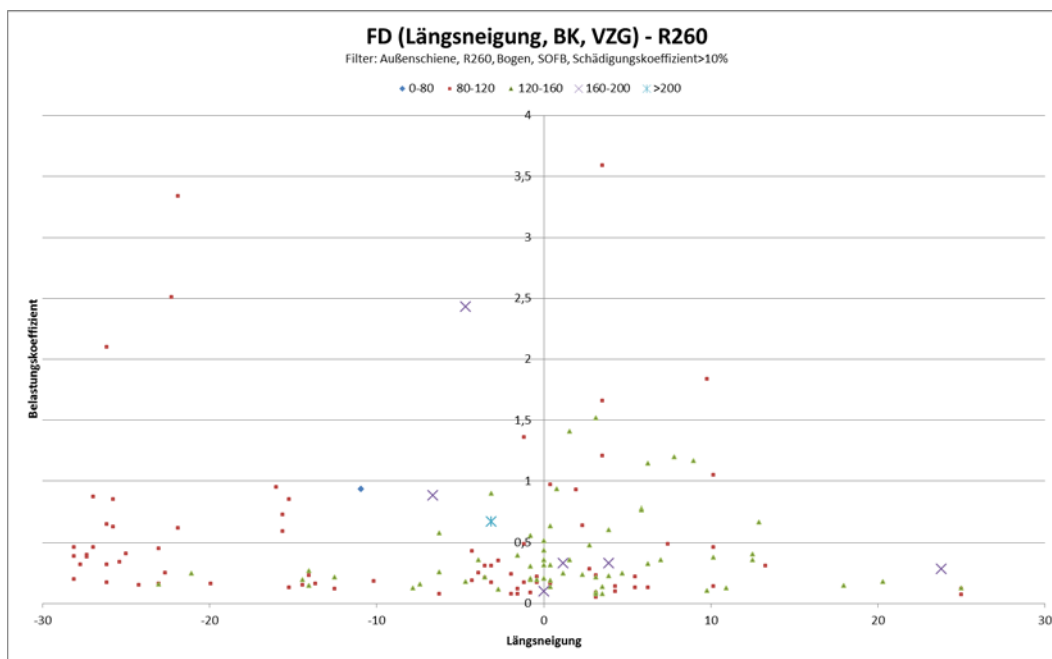


Abb. 9.17: FD (Längsneigung, BK, VZG) der Schienengüte R260

VzG	0-80	80-120	120-160	160-200	>200
Korrelationskoeffizient	-0,27	0,00	0,38	-0,45	-
Bestimmtheitsmaß	0,07	0,00	0,14	0,20	-
Anzahl der TE	3	80	69	6	1

Tab. 12: Korrelationskoeffizienten des FD (Längsneigung, BK, VZG) – R260

Aufgrund des zu kleinen Datensatzes konnte kein Korrelationskoeffizient bei VzG > 200 km/h ermittelt werden. Der größte Korrelationskoeffizient tritt bei VzG von 160 bis 200 km/h auf und beträgt -0,45 (Datengrundlage: 6 TE). Dies entspricht einem großen, fallenden Effekt gemäß der Interpretation des Korrelationskoeffizienten nach Cohen gemäß Hemmerich [20]. Gemäß dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß von 0,20 können 20% des Datensatzes mit diesem Effekt beschrieben werden. Aufgrund der Größe des Datensatzes von sechs TE der VzG-Gruppe ist die Aussagekraft des Korrelationskoeffizienten sowie des Bestimmtheitsmaßes für nicht repräsentativ zu beurteilen. Der nächstgrößte Korrelationskoeffizient befindet sich bei VzG von 120 bis 160 km/h mit einem Wert von 0,14 (kleinem Effekt gemäß Hemmerich [20]) und einem Bestimmtheitsmaß von 0,14. Diesem liegen Daten von 69 TE zugrunde und kann als repräsentativ betrachtet werden.

Folgende Dateneinträge (HC) des FD (Längsneigung, BK, VZG) in Abb. 9.18 wurden tiefergehend analysiert. Eine Tabelle der ermittelten TE-Daten der ausgewählten HC ist im Anhang in Kapitel 14.2 ersichtlich.

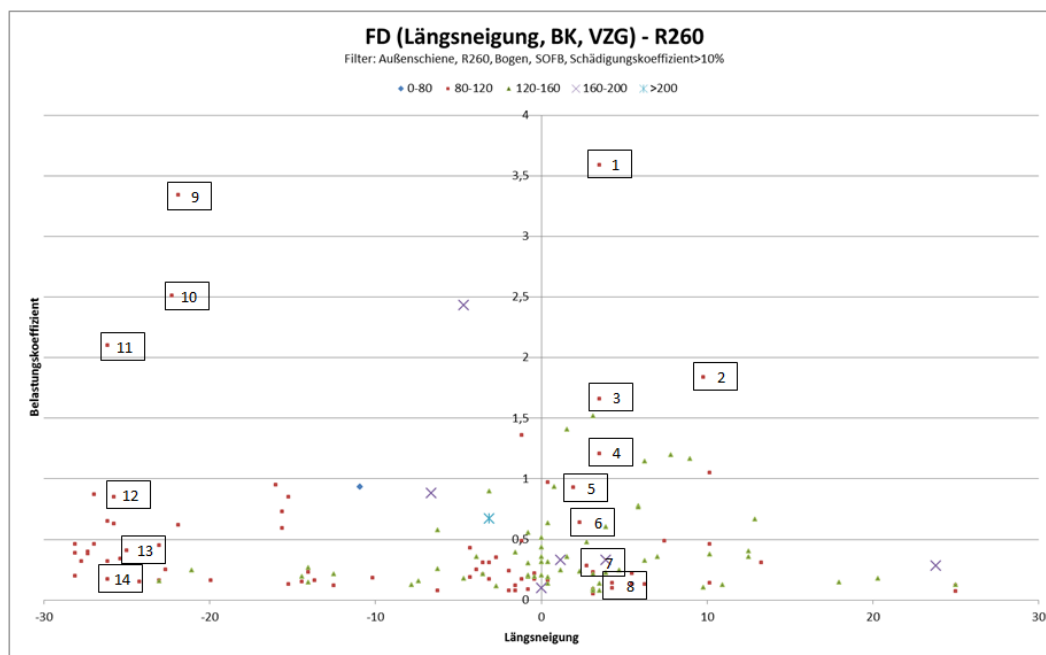


Abb. 9.18: Analyse FD (Längsneigung, BK, VZG) der Schienengüte R260

Im Zuge der Auswertung der Einzelproben der Abb. 9.18 konnten keine Zusammenhänge der Einflussparameter gefunden werden.

Schienengüte R350 HT: Das FD (Längsneigung, BK, VZG) der Schienengüte R350 HT ist in Abb. 9.19 dargestellt. Die dazugehörigen Korrelationskoeffizienten sowie Bestimmtheitsmaße des Datensatzes sind in **Tab. 13** aufgelistet.

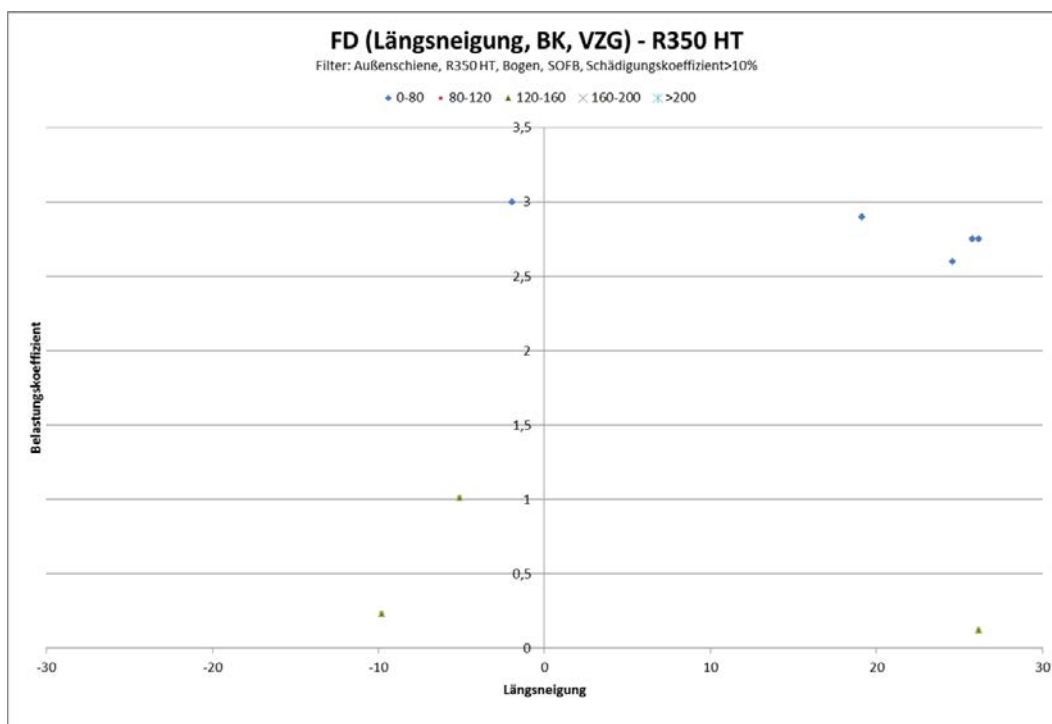


Abb. 9.19: FD (Längsneigung, BK, VZG) der Schienengüte R350 HT

VzG	0-80	80-120	120-160	160-200	>200
Korrelationskoeffizient	-0,82	-0,49	0,80	-	-
Bestimmtheitsmaß	0,67	0,24	0,65	-	-
Anzahl der TE	5	3	3	0	0

Tab. 13: Korrelationskoeffizienten des FD (Längsneigung, BK, VzG) – R350 HT

Aufgrund des zu kleinen Datensatzes konnten keine Korrelationskoeffizienten bei VzG > 160 km/h ermittelt werden. Der größte Korrelationskoeffizient tritt bei VzG von 0 bis 80 km/h auf und beträgt -0,82 (Datengrundlage: 5 TE). Dies entspricht einem sehr großen, fallenden Effekt gemäß der Interpretation des Korrelationskoeffizienten nach Cohen [20]. Gemäß dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaß von 0,67 können 67% des Datensatzes mit diesem Effekt beschrieben werden. Die Streuung der Korrelationskoeffizienten beträgt zwischen -0,82 und 0,80 - in dessen Folge keine allgemeingültige Aussagen über das gesamte VzG-Spektrum aufgestellt werden können. Aufgrund der Größe des Datensatzes (maximal 5 TE je VzG-Gruppe) ist die Aussagekraft des Korrelationskoeffizienten sowie des Bestimmtheitsmaßes für nicht repräsentativ zu beurteilen.

Folgende Dateneinträge (HC) des FD (Längsneigung, BK, VzG) in Abb. 9.20 wurden tiefergehend analysiert. Eine Tabelle der ermittelten TE-Daten der ausgewählten HC ist im Anhang in Kapitel 14.2 ersichtlich.

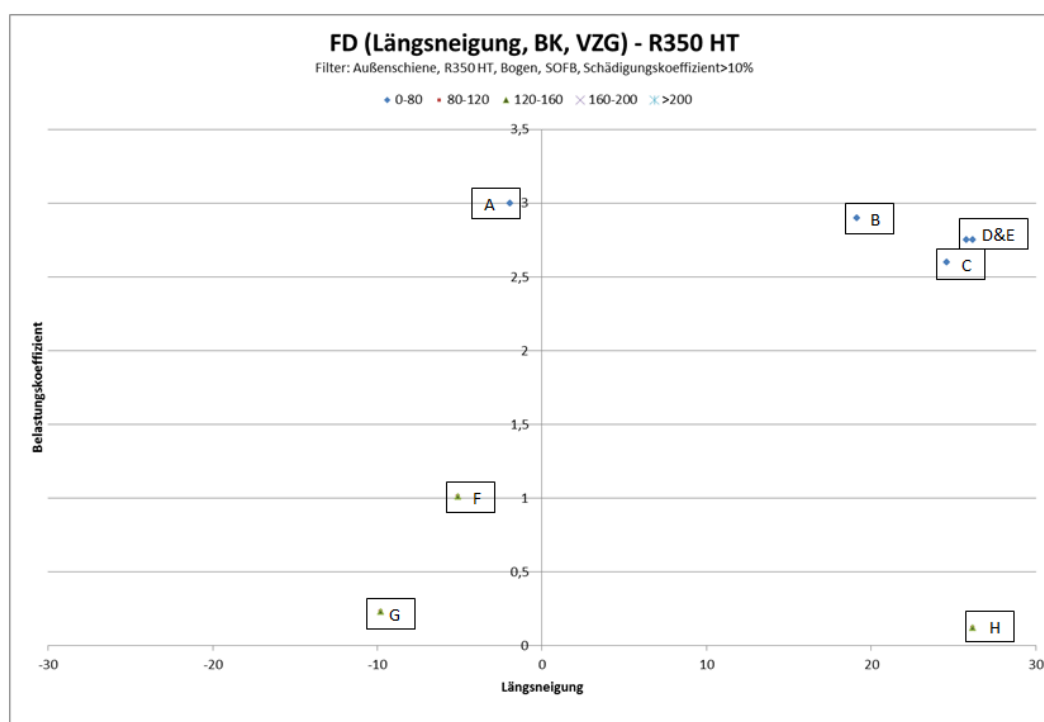


Abb. 9.20: Analyse FD (Längsneigung, BK, VzG) der Schienengüte R350 HT

Im Zuge der Auswertung der Einzelproben der Abb. 9.20 konnten keine Zusammenhänge der Einflussparameter gefunden werden.

9.6.5 FD (Längsneigung, BK, Überhöhungsfehlbetrag)

Im FD (Längsneigung, BK, Überhöhungsfehlbetrag) wird die Längsneigung auf der x-Achse und der BK auf der y-Achse des FD aufgetragen. Der Überhöhungsfehlbetrag wurde in Gruppen zusammengefasst und ist anhand unterschiedlicher Symbole der Punkte ersichtlich.

Schienenegüte R260: Das FD (Längsneigung, BK, Überhöhungsfehlbetrag) der Schienenegüte R260 ist in Abb. 9.21 abgelichtet. Die dazugehörigen Korrelationskoeffizienten sowie Bestimmtheitsmaße des Datensatzes sind in **Tab. 14** aufgelistet.

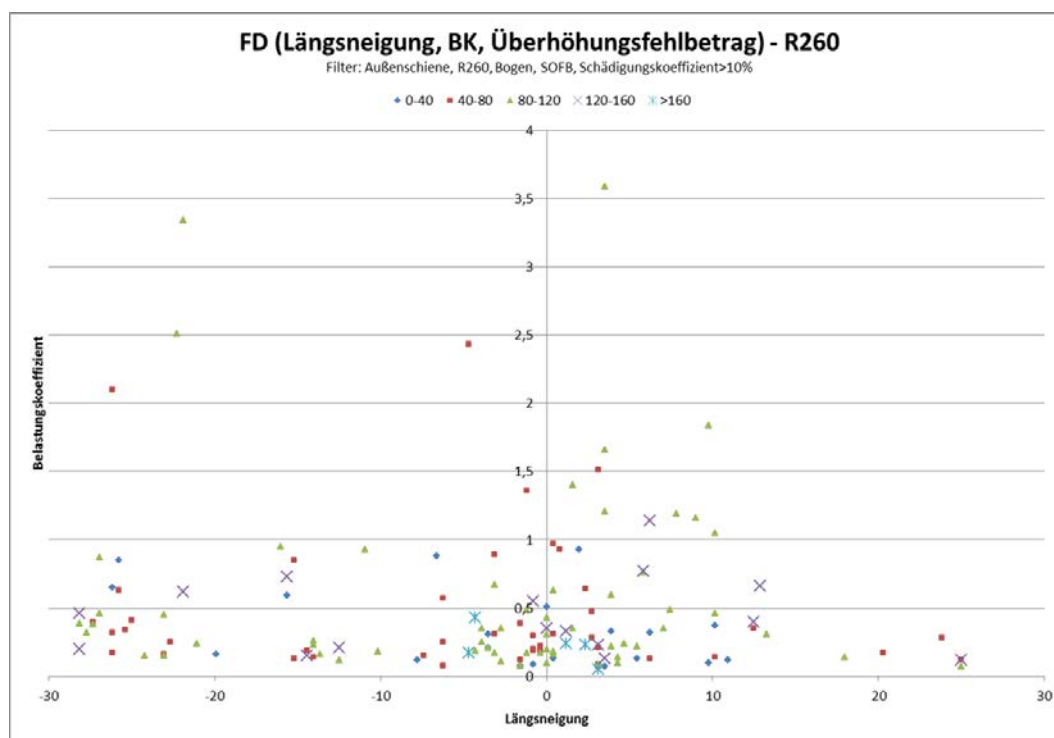


Abb. 9.21: FD (Längsneigung, BK, Überhöhungsfehlbetrag) der Schienenegüte R260

Überhöhungsfehlbetrag ⁷	0-40	40-80	80-120	120-160	>160
Korrelationskoeffizient	-0,41	-0,13	-0,27	0,08	-0,55
Bestimmtheitsmaß	0,16	0,02	0,07	0,01	0,31
Anzahl der TE	21	44	61	17	5

Tab. 14: Korrelationskoeffizienten des FD (Längsneigung, BK, Überhöhungsfehlbetrag) – R260

Der größte Korrelationskoeffizient tritt bei Überhöhungsfehlbeträgen >160 Millimetern auf und beträgt -0,55 (Datengrundlage: 5 TE). Dies entspricht einem großen, fallenden Effekt gemäß den Interpretation des Korrelationskoeffizienten nach Cohen [20]. Gemäß dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaßes von 0,31 können 31% des Datensatzes mit diesem Effekt beschrieben werden. Aufgrund der Größe des Datensatzes von fünf TE der VzG-Gruppe ist die Aussagekraft des Korrelationskoeffizienten sowie des Bestimmtheitsmaßes für nicht repräsentativ zu beurteilen. Der nächstgrößte Korrelationskoeffizient befindet sich bei einem

⁷ Hinweis: Überhöhungsfehlbetrag ermittelt mittels VzG

Überhöhungsfehlbetrag von 0 bis 40 km/h mit einem Wert von -0,41 (großer Effekt gemäß Hemmerich [20]) und einem Bestimmtheitsmaß von 0,16. Diesem liegen Daten von 21 TE zugrunde und kann als repräsentativ betrachtet werden.

Aufgrund der Ähnlichkeit mit dem FD(Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag) von Abb. 9.13 können dieselben Einzelwerte wie bei diesem herangezogen werden.

Schienengüte R350 HT: Das FD (Längsneigung, BK, Überhöhungsfehlbetrag) der Schienengüte R350 HT ist in Abb. 9.22 abgebildet. Die dazugehörigen Korrelationskoeffizienten sowie Bestimmtheitsmaße des Datensatzes sind in **Tab. 15** aufgelistet.

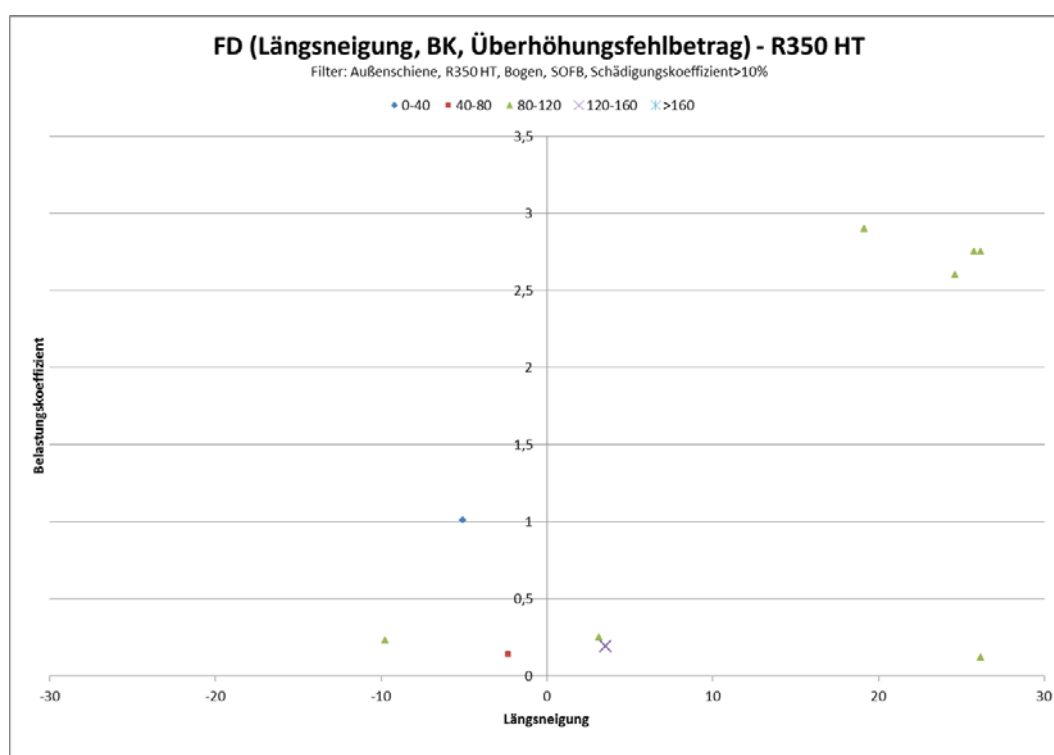


Abb. 9.22: FD (Längsneigung, BK, Überhöhungsfehlbetrag) der Schienengüte R350 HT

Überhöhungsfehlbetrag ⁸	0-40	40-80	80-120	120-160	>160
Korrelationskoeffizient	-	-	0,63	-	-
Bestimmtheitsmaß	-	-	0,39	-	-
Anzahl der TE	1	1	7	1	0

Tab. 15: Korrelationskoeffizienten des FD (Längsneigung, BK, Überhöhungsfehlbetrag) – R350 HT

Aufgrund des zu kleinen Datensatzes konnte lediglich ein Korrelationskoeffizient bei Überhöhungsfehlbeträgen zwischen 80 und 120 Millimetern ermittelt werden. Der Korrelationskoeffizient beträgt 0,63 (Datengrundlage: 7 TE) und entspricht einem großen, steigenden Effekt gemäß den Interpretation des Korrelationskoeffizienten nach Cohen [20]. Gemäß dem dazugehörigen Bestimmtheitsmaßes von 0,39 können 39% des Datensatzes mit

⁸ Hinweis: Überhöhungsfehlbetrag ermittelt mittels VzG

dieser Theorie beschrieben werden. Aufgrund der Größe des Datensatzes (maximal 7 TE je Überhöhungsfehlbetrags-Gruppe) ist die Aussagekraft des Korrelationskoeffizienten sowie des Bestimmtheitsmaßes für nicht repräsentativ zu beurteilen.

Aufgrund der Ähnlichkeit mit dem FD(Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag) von Abb. 9.15 können dieselben Einzelwerte wie bei diesem herangezogen werden.

10 Zusammenfassung und Ausblick

Head-Checks stellen eine Art von Schienenfehlern an der Schienenoberfläche dar und fallen in die Schadenskategorie der Rollkontaktermüdungen. In der Kontaktfläche des Eisenbahnrades mit der Schiene entstehen große Spannungen, welche die Widerstände des Schienenmaterials oft übersteigen und in Folge zu Schäden an der Schienenoberfläche (der Kontaktfläche) führen. Die Folgen der Überbelastungen der Schienen führen bis hin zu Ausbrüchen der Fahrkante infolge von Head-Checks.

Zielsetzung der Diplomarbeit war eine Erforschung des Zusammenhangs von unterschiedlichen Streckenparametern (Trassierungstyp, Bogenradius, Überhöhungsfehlbetrag nach VzG, VzG sowie der Längsneigung) auf die Entstehung und Wachstumsgeschwindigkeit von Head-Checks. Die lokal maximal erlaubten Geschwindigkeiten sowie der Überhöhungsfehlbetrag nach VzG stellen eine Abschätzung dar, da diese Daten nicht erhoben werden konnten.

Für eine gezielte Analyse wurden die zu untersuchenden Strecken in ihre Trassierungselemente (Gerade, Bogen, Übergangsbogen) unterteilt und ihr jeweils maximalster Riss infolge Head-Checks detektiert. Übersteigt der maximalste Riss infolge Head-Checks ein Kriterium von 0,1 Millimeter - ein Kriterium welches auch bei der Instandhaltungsstrategie der ÖBB-Infrastruktur AG zur Anwendung kommt - erscheint dieses dazugehörige Trassierungselement in der Liste der zu näher untersuchenden Trassierungselemente.

Anhand dieser Daten konnten erste Auswertungen anhand von Diagrammen durchgeführt werden. Head-Checks treten vorwiegend in Bögen der Schienenaußenseite mit Radius zwischen 400 bis 2000 Meter auf, sowie vermehrt gegen in Fahrtrichtung Bogenende. Ein Zusammenhang zwischen dem Bogenradius und der Entstehung von Head-Checks konnte nachgewiesen werden, eine Theorie für das Auftreten von Head-Checks gegen Bogenende konnte nicht aufgestellt werden. Die Erkenntnisse des Zusammenhangs von Bogenradius und Wachstum von Head-Checks sowie die vermehrte Entstehung von Head-Checks gegen in Fahrtrichtung Bogenende decken sich mit jahrelangen Erfahrungswerten der ÖBB-Infrastruktur AG und können als plausibel betrachtet werden.

Aufbauend auf diese Erkenntnisse wurden die Schienengüten R260 und R350 HT auf auserwählte Streckenparameter untersucht und mittels dem Korrelationskoeffizienten nach Pearson auf lineare Zusammenhänge analysiert. Es konnte kein Zusammenhang zwischen einem der Einflussfaktoren Überhöhungsüberschuss nach VzG, Längsneigung sowie den Geschwindigkeiten nach VzG und der Entstehung von Head-Checks ermittelt werden. Die ermittelten Korrelationskoeffizienten nach Pearson weisen keine Regelmäßigkeiten auf und sind aufgrund der oft kleinen untersuchten Datensätze von einzelnen Ausreißern in ihrer Größe leicht beeinflussbar.

Zusammenfassend können folgende Erkenntnisse der Arbeit festgehalten werden:

- (1) Head-Checks treten vorwiegend auf der Außenschiene von Bögen auf
- (2) Head-Checks treten vorwiegend am Bogenende in Fahrtrichtung auf
- (3) Head-Checks treten vermehrt bei Bogenradien zwischen 400 und 2000 Meter auf
- (4) Im Durchschnitt sind 10-15% der Bogenlänge mit Head-Checks schadhaft
- (5) Tendenziell wachsen Head-Checks in Bögen mit kleinen Radien schneller
- (6) Es konnte **kein** Einfluss der Einflussfaktoren Überhöhungsüberschuss, Längsneigung sowie VzG festgestellt werden

Weitere Untersuchungen an Einflussparameter, wie z.B. der Veränderung der Antriebstechnologien der Triebfahrzeuge (Kraftaufbringung auf die Schiene) oder den tatsächlichen Geschwindigkeiten der Züge, würden neue, interessante Erkenntnisse hinsichtlich der Entstehung und dem Verhalten von Head-Checks liefern. Derartige Analysen gewinnen bei der ÖBB-Infrastruktur AG gemäß Schmid zunehmend an Bedeutung und Fokussierung.

Abschließend sei erwähnt, dass gemäß Popp [15] HC heutzutage zwar einen Einfluss auf die Schieneninstandhaltung ausüben - da diese teure Instandhaltungsarbeiten erforderlich machen - jedoch kein Risiko mehr darstellen. HC sind heutzutage anhand verschiedener Messsysteme sehr gut mess- und auffindbar geworden und können daher in Folge mittels rechtzeitige SOFB behoben werden.

11 Abbildungsverzeichnis

Abb. 2.1: Einwirkende Kräfte auf das Gleis gemäß Fischmeister [2]	10
Abb. 2.2: Skizze einer Kraftableitung und -verteilung gemäß Lichtberger [3]	10
Abb. 2.3: Überlagerung der Schienenspannungen gemäß Lichtberger [3]	11
Abb. 2.4: Höchstzulässigste Radsatzlasten gemäß EN 15528 [4]	11
Abb. 2.5: Vertikalkraftverlauf eines Güterwagrades mit Flachstelle gemäß Reinecke, Jörg-Michael und Jelinski [6]	13
Abb. 2.6: Wellenlauf des Radsatzes [7]	14
Abb. 2.7: Horizontale Führungskräfte abhängig vom Bogenradius gemäß Lichtberger [3]	14
Abb. 2.8: Skizze der Kräfte in Folge einer Überhöhung [7]	15
Abb. 2.9: Skizze der Kräfte in Folge einer Überhöhung mit $v < v_E$ [7]	16
Abb. 2.10: Eigenspannungen in einer walzneuen sowie in einer Schiene unter Betriebslast gemäß Lichtberger [3]	18
Abb. 3.1: Schematische Darstellung des Spannung-Dehnungs-Diagramms gemäß Lichtberger [3]	20
Abb. 3.2: Entwicklung der Schienenhärte nach Popp [9]	20
Abb. 3.3: Ermittlung der Härte des Materials nach Brinell gemäß Fink [10]	21
Abb. 3.4: Spannung-Dehnungs-Diagramm kopfgehärtetem und naturhartem Schienenstahls gemäß Lichtberger [3]	23
Abb. 3.5: Verschleiß von unterschiedlichen Stahlgüten gemäß Lichtberger [3]	23
Abb. 3.6: Schienenhöhe versus Widerstandsmoment der Schiene gemäß Lichtberger [3]	26
Abb. 3.7: Metergewicht der Schiene versus Widerstandsmoment gemäß Lichtberger [3]	27
Abb. 3.8: Übersicht über die Entwicklung des Metergewicht der Schiene gemäß Popp [9]	27
Abb. 4.1: Maximal zulässiger seitlicher Schienenverschleiß gemäß Lichtberger [3]	29
Abb. 4.2: Abrasiver Verschleiß gemäß Auer [13]	30
Abb. 4.3: Adhäsiven Verschleiß gemäß Auer [13]	30
Abb. 4.4: Skizze einer Verwalzung gemäß Fischmeister [2]	31
Abb. 4.5: Belgrospi - Links: Schwache Ausprägung, Rechts: Starke Ausprägung gemäß Popp [9]	32
Abb. 5.1: Abbildung von HC gemäß Popp [15]	33
Abb. 5.2: Zusammenhang der Längsreibkräfte, den Querreibkräften sowie der Rissbildung gemäß Auer [13]	34
Abb. 5.3: Schematischer stufenweiser Rissfortschritt zufolge Rollkontaktermüdung gemäß Fischmeister [2]	35
Abb. 5.4: Ausbrüche verursacht durch HC gemäß Auer [13]	35
Abb. 5.5: Phasen der Entwicklung von HC (zwei Phasen) gemäß Auer [13]	35

Abb. 5.6: HC-Schadensbild einer Schiene mit Schienengüte R260 gemäß Brehmer [14].....	36
Abb. 5.7: HC-Schadensbild einer Schiene mit Schienengüte R350HT gemäß Brehmer [14]	37
Abb. 5.8: Gleisbelastung (total traffic load) [Mt] auf Risstiefe [mm] gemäß Brehmer [14]	38
Abb. 5.9: Bogenradius (curve radius) [m] auf Riss-Wachstumsgeschwindigkeit [mm/100 Mt] gemäß Brehmer [14].....	39
Abb. 5.10: Bogenradius [m] auf Riss-Wachstumsgeschwindigkeit [mm/100 Mt] der ÖBB- Infrastruktur AG gemäß Popp [9]	39
Abb. 5.11: Überhöhung (cant) [mm] auf Riss-Wachstumsgeschwindigkeit [mm/100 Mt] gemäß Brehmer [14].....	40
Abb. 5.12: Überhöhungsfehlbetrag [mm] auf Riss-Wachstumsgeschwindigkeit [mm/100 Mt] gemäß Brehmer [14].....	40
Abb. 5.13: Höchstgeschwindigkeit [km/h] auf Riss-Wachstumsgeschwindigkeit [mm/100 Mt] nach Brehmer [14]	41
Abb. 5.14: Bogenradius [m] auf Verschleißrate [mm/100 Mt] im Netz der DB AG gemäß Brehmer [14]	42
Abb. 5.15: Verschleiß der Schiene nach Schienengüte und Radienbereichen der ÖBB- Infrastruktur AG gemäß Popp [9]	42
Abb. 6.1: Schienenoberfläche nach oszillierender Bearbeitung gemäß Auer [13].....	46
Abb. 6.2: Schienenoberfläche nach rotierender Bearbeitung gemäß Auer [13]	46
Abb. 6.3: Prinzip des High-Speed-Grindings gemäß Freudenstein [18]	47
Abb. 7.1: Prinzip der "magischen" Verschleißrate gemäß Lichtberger [3].....	48
Abb. 7.2: Schleifhäufigkeiten in Abhängigkeit von Bogenradius und Oberbauform gemäß Popp [9].....	50
Abb. 8.1: Vier Wirbelstrommesssonden gemäß Popp [9]	51
Abb. 9.1: Ausschnitt der Ergebnisse der ersten Phase	54
Abb. 9.2: Ausschnitt der Ergebnisse der zweiten Phase (Außenschienen)	56
Abb. 9.3: Anzahl der TE	56
Abb. 9.4: Positionszahl der Innenschiene	57
Abb. 9.5: Positionszahl der Außenschiene.....	58
Abb. 9.6: Übersicht der Positionszahlen von Bögen mit HC der Außenschiene	58
Abb. 9.7: Anzahl von Bögen mit HC auf Bogenradienklassen.....	59
Abb. 9.8: Schadhafte Längen der Außenschiene von Bögen.....	59
Abb. 9.9: Mittelwert der Bogenradien mit HC auf Schienengüte	60
Abb. 9.10: Verteilungskurve Schädigungskoeffizient der Außenschiene	61
Abb. 9.11: Mittelwert BK auf Bogenradiusklassen und Schienengüte	62
Abb. 9.12: Anzahl der TE nach Filterungen	63
Abb. 9.13: FD (Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag) der Schienengüte R260	65

Abb. 9.14: Analyse Fundamentaldiagramm (Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag) der Schienengüte R260	66
Abb. 9.15: FD (Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag) der Schienengüte R350 HT	67
Abb. 9.16: Analyse FD (Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag) der Schienengüte R350 HT	68
Abb. 9.17: FD (Längsneigung, BK, VZG) der Schienengüte R260	69
Abb. 9.18: Analyse FD (Längsneigung, BK, VZG) der Schienengüte R260.....	70
Abb. 9.19: FD (Längsneigung, BK, VZG) der Schienengüte R350 HT	70
Abb. 9.20: Analyse FD (Längsneigung, BK, VZG) der Schienengüte R350 HT	71
Abb. 9.21: FD (Längsneigung, BK, Überhöhungsfehlbetrag) der Schienengüte R260	72
Abb. 9.22: FD (Längsneigung, BK, Überhöhungsfehlbetrag) der Schienengüte R350 HT	73

12 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Übersicht der Festigkeiten von Schienenstählen gemäß Lichtberger [3].....	21
Tab. 2: Aktuell verwendete Schienenformen und deren Dauerfestigkeiten	25
Tab. 3: Übersicht der Phasen nach Brehmer [14], Fischmeister [2] und Auer [13]	34
Tab. 4: Abstände von HC-Rissen im Vergleich zur Schienengüte gemäß Auer [13]	36
Tab. 5: Wachstumsraten von HC der DB AG gemäß Brehmer [14]	43
Tab. 6: Übersicht der Schwellenarte, Risstiefen, Sonderinspektionen sowie Maßnahmen gemäß dem Regelwerk 06 01 01 der ÖBB-Infrastruktur AG [12]	49
Tab. 7: Kategorien der DB AG anhand der Risstiefe gemäß Lichtberger [3]	50
Tab. 8: Schleifhäufigkeiten in Abhängigkeit von Bogenradius und Oberbauform gemäß Popp [9]	50
Tab. 9: Interpretation des Korrelationskoeffizienten nach Cohen gemäß Hemmerich [20]	64
Tab. 10: Korrelationskoeffizienten des FD (Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag) – R260	65
Tab. 11: Korrelationskoeffizienten des FD (Radius, BK, Überhöhungsfehlbetrag) – R350 HT	67
Tab. 12: Korrelationskoeffizienten des FD (Längsneigung, BK, VZG) – R260	69
Tab. 13: Korrelationskoeffizienten des FD (Längsneigung, BK, VZG) – R350 HT	71
Tab. 14: Korrelationskoeffizienten des FD (Längsneigung, BK, Überhöhungsfehlbetrag) – R260	72
Tab. 15: Korrelationskoeffizienten des FD (Längsneigung, BK, Überhöhungsfehlbetrag) – R350 HT	73

13 Literaturverzeichnis

Folgende Literatur wurde in dieser Diplomarbeit verwendet.

- [1] ÖBB-Holding AG, „Zahlen Daten Fakten,“ Druckerei Paul Gerin, Wien, 2017.
- [2] D.-I. D. E. Fischmeister, Strukturelles Sicherheits-Management für die Instandhaltung von urbanen Gleisen, Wien: Technische Universität Wien, 2012.
- [3] B. Lichtberger, Handbuch Gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit, Hamburg: Tetzlaff Verlag, 2003.
- [4] D. D. I. f. Normung, *EN 15528:2015 (Streckenklassen zur Behandlung der Schnittstelle zwischen Lastgrenzen der Fahrzeuge und Infrastruktur)*, Berlin: FSF, 2016.
- [5] H. Thomas, Ein LCC-basiertes Verfahren zur Evaluierung von Schleifstrategien für Schienenbahnen, Eurailpress, 2010.
- [6] J.-M. u. J. M. Reinecke, „Anlagen zur Erkennung unrunder Eisenbahnräder,“ *ZEV + DET Glasers Annalen*, 12/2001.
- [7] I. f. Verkehrswissenschaften, „Studiumsunterlagen zur VO Eisenbahnwesen (TU Wien),“ Technische Universität Wien, Karlsplatz 13/230-2, Wien, 2014.
- [8] D. Anton, *Zugförderungsmechanik, Vorlesungsskript für Fahrzeug- und Traktionstechnik 2*, FH St.Pölten, 2009.
- [9] R. Popp, Optimierung der Stahlsortenstrategie: Eine Untersuchung über den wirtschaftlichen Einsatz verschiedener Stahlsorten in Bezug auf Verschleiß und Rollkontaktermüdung im Netz der ÖBB, Fachhochschule St.Pölten GmbH, 2013.
- [10] U.-P. D.-I. D. J. Fink, Studienblätter zur Vorlesung Stahlbau 1, Wien: TU Wien, 2006.
- [11] E. Nehl, DIN ISO 50 320, Verschleiß; Begriffe; Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes (Online ISBN: 978-3-642-82798-3), Berlin: Springer, Berlin, Heidelberg, 1986.
- [12] Ö.-I. AG, „Instandhaltungsplan Oberbauanlagen Regelwerk 06 01.01,“ ÖBB-Infrastruktur AG, Wien, 01.03.2017.
- [13] A. Florian, Interviewee, *Info Head Checks*. [Interview]. 29 Juni 2008.
- [14] D.-I. B. u. Dr.Heyder, „Empirical studies of head check propagation on the DB network,“ *Elsevier*, pp. 36-43, 2013.

- [15] D.-I. R. Popp, Interviewee, *Informationen über HC-Wachstum und Schienenprüfungen*. [Interview]. 24.05.2018.
- [16] ÖNORM EN ISO 6506-1, Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Brinell, 2006/04.
- [17] E. Martin, Studienarbeit „Bewertung von Oberflächenfehlern mittels Wirbelstromprüfung an kopfgehärteten Schienen der Stahlsorte R350HT im Vergleich zu Schienen der Stahlsorte R260“, Otto von Guericke Universität Magdeburg, 2011/06.
- [18] P. D.-I. S. Freudenstein, Vorlesungsunterlagen Bahnbau, München: Technische Universität München, 2016.
- [19] A. Wöhhart, „Info US-Zug MAV“, ÖBB Infrastruktur Bau, 2008.
- [20] W. Hemmerich, „MatheGuru (Korrelation, Korrelationskoeffizient)“, [Online]. Available: <https://matheguru.com/stochastik/korrelation-korrelationskoeffizient.html>. [Zugriff am 27.06.2018].
- [21] U.-P.-I. S. Freudenstein, Studiumsunterlagen zu Asphaltfahrbahnen, München: Technische Universität München, 2016.
- [22] R. Schmid, „Systemtechnologie Rad-Schiene: Lauftechnik und Wechselwirkung Fahrzeug-Fahrweg“, in *s Eisenbahn- und Bautechnischer Kurs, Frühjahr 2017*, Wien, 2017.
- [23] F. Fastenrath, Die Eisenbahnschiene, Berlin, München, Düsseldorf: Wilhelm Ernst & Sohn, 1977.
- [24] D. D. I. f. N. e. Berlin, „DIN EN 13674-1: Bahnanwendungen - Oberbau - Schienen“, Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, Juli 2017.
- [25] D. D. I. f. N. e.V., „EN 10027-1:2016 Bezeichnungssysteme für Stähle“, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 2017.
- [26] V. R. S. GmbH, „Schienen perfekt instandhalten“, Vossloh Rail Services GmbH, [Online]. Available: https://www.vossloh.com/01_product_finder/VRS/HSG/VOS_SB_DE.pdf. [Zugriff am 7. April 2018].
- [27] S. Wolfgang, Entwicklung von Schleifstrategien gegen Rollkontaktermüdung – Ein internationaler Überblick, ZEVrail, 2008/10.

14 Anhang

14.1 Untersuchte Strecken

Für die Analyse des österreichischen Schienennetzes wurden in Absprache mit Dipl.-Ing. Roman Schmid und Dipl.-Ing. Reinhard Popp folgende Strecke (DB-Streckennummern) untersucht:

4012, 4014, 4015, 4051, 8060, 8067, 8134, 8133, 8131, 8052, 2051, 2302, 2305, 4301, 2011, 2016, 2017, 4011, 6011, 6021, 6302, 6022, 6013, 6017, 6015, 8064, 8041, 2057, 8136, 2181, sowie 2141

14.2 Detaillierte Analyse der Fundamentaldiagramme

[4]		Anzahl Zeilen: 49		Infos: 8060=4221										Aktuellste Messung		Letzte Aktion		Δ Vergleich				Excel-Auswertung		Excel-Auswertung					
Rechenwerte		2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Punkt	TE Nummer	DB776	Streckennummer	Gleis	Trassierungstyp 0 Gerade 1 Bogen (2 Übergangsbogen)	Bogenrichtung 0 Gerade 1 Links 2 Rechts	TE-Anfang [m]	TE-Ende [m]	max. HC-Stelle [m]	Positionszahl 0 Anfang 1 Ende	TE Radius [m]	Schienengüte 1 R260 2 R230 Cr 3 R250 HT 4 R260 HT	tägliche Belastung [Ges.HT je Gleis]	Risstiefe außen [mm]	Datum der Messung	Art der Aktion	Datum der Aktion	Δ Time [Monat]	Δ Risstiefe außen Zeitkoeffizient [mm/Jahr]	Δ Risstiefe außen Belastungskoeffizient [mm/100MioTo]	Schädigungs-koeffizient [%]	TE-Länge [m]	Schädigungsmeter des TE [m]	VZG [km/h]	Längsneigung [‰]	Überhöhung [mm]	Überhöhungs-Fehlbetrag [mm]		
A1	19542	6022	2	1	2	102660	102851	102665,90	0,03	300,00	4	60093	0,18	11.07.2017	SOFB	27.03.2017	3,42	0,64	2,90	19,07	191	36	70	19,14	106,09	86,64			
A2	19543	6022	2	1	2	102853	103141	102869,95	0,06	298,00	4	60093	0,17	11.07.2017	SOFB	27.03.2017	3,42	0,60	2,75	11,34	288	33	70	26,17	105,51	88,52			
A3	19544	6022	2	1	2	103143	103188	103145,89	0,06	302,00	4	60093	0,16	11.07.2017	SOFB	27.03.2017	3,42	0,57	2,60	37,50	45	17	70	24,61	105,16	86,3			
A4	13686	2011	1	1	2	34830	35179	34834,87	0,99	436,00	4	56342	0,20	20.07.2017	SOFB	16.03.2013	51,19	0,05	0,23	12,78	349	45	95	-9,77	126,76	117,49			
A5	19514	6022	2	1	2	100417	100497	100417,86	0,01	368,00	4	60093	0,29	11.07.2017	SOFB	30.04.2006	131,94	0,03	0,12	37,35	80	30	80	26,17	120,16	85,06			
B1	9464	8052	1	1	1	164331	164363	164331,67	0,02	890,00	4	47932	0,19	30.05.2017	SOFB	24.04.2016	12,94	0,18	1,01	36,36	32	12	90	-5,08	82,73	24,66			
B2	1340	4014	2	1	1	260352	260620	260433,00	0,30	793,00	4	43603	0,23	12.04.2017	SOFB	24.08.2009	89,94	0,03	0,19	21,89	268	59	130	3,52	126,72	124,76			
B3	1341	4014	2	1	1	260622	260658	260654,78	0,91	820,00	4	43603	0,30	12.04.2017	SOFB	24.08.2009	89,94	0,04	0,25	27,03	36	10	130	3,13	129,02	114,18			
B4	10263	8052	2	1	1	189422	189486	189432,40	0,84	860,00	4	47932	0,16	06.06.2017	SOFB	04.07.2010	81,58	0,02	0,14	18,46	64	12	130	-2,34	155,12	76,76			
1A	18317	6011	2	1	2	166179	166208	166203,57	0,85	909,00	2	17689	1,06	05.07.2017	SOFB	06.11.2012	54,90	0,23	3,59	18,75	29	5	100	3,52	33,83	95,98			
1B	24036	8064	1	1	2	59484	59538	59484,90	0,98	507,00	2	34715	1,68	10.10.2017	SOFB	23.09.2013	47,68	0,42	3,34	49,12	54	27	100	-21,88	119,38	113,36			
1C	5421	8060	1	1	2	28369	28414	28383,77	0,67	404,00	2	38154	0,22	10.10.2017	SOFB	18.02.2017	7,55	0,35	2,51	14,58	45	7	80	-22,27	90,47	96,46			
1D	24175	8064	1	1	2	73107	73266	73112,61	0,96	655,00	2	34715	0,93	10.10.2017	SOFB	25.09.2013	47,61	0,23	1,84	24,69	159	39	110	9,77	119,77	98,21			
1E	24159	8064	1	1	2	70760	70930	70766,76	0,96	805,00	2	34715	0,25	10.10.2017	SOFB	27.07.2016	14,19	0,21	1,66	28,90	170	49	110	3,52	89,14	88,23			
1F	7341	8133	2	1	1	11707	11895	11782,98	0,40	750,00	2	30082	0,38	20.05.2017	SOFB	09.11.2014	29,87	0,15	1,40	18,52	188	35	120	1,56	146,37	80,19			
1G	13499	2011	1	1	1	9793	10189	9809,89	0,96	745,00	2	56342	0,23	20.07.2017	SOFB	11.08.2016	11,06	0,25	1,21	14,36	396	57	110	3,52	101,09	90,56			
1H (1)	23944	8064	1	1	2	48162	48414	48161,87	1,00	705,00	2	34715	0,86	10.10.2017	SOFB	29.10.2009	93,65	0,11	0,87	28,63	252	72	110	-26,95	106,56	95,96			
1H (2)	6855	8134	1	1	2	142027	142174	142028,90	0,99	765,00	2	35848	0,25	24.05.2017	SOFB	07.11.2014	29,97	0,10	0,76	12,67	147	19	130	5,86	153,55	107,13			
1i	16342	6011	1	1	1	143649	143727	143649,00	1,00	800,00	2	17689	0,21	12.07.2017	SOFB	28.03.2010	85,90	0,03	0,45	15,19	78	12	110	-23,05	82,81	95,67			
1J	18139	6011	2	1	2	145510	145547	145517,80	0,21	819,00	2	17689	0,19	05.07.2017	SOFB	05.12.2005	136,45	0,02	0,26	27,50	37	10	120	-14,06	107,27	100,2			
1K	1491	4014	2	1	1	285891	286013	285914,00	0,19	730,00	2	43603	0,20	12.04.2017	SOFB	09.12.2009	86,48	0,03	0,17	31,02	122	38	110	-0,39	97,03	98,56			
2A	13321	4301	1	1	2	181008	181715	181350,43	0,52	1657,00	2	18755	0,25	13.04.2017	SOFB	07.10.2015	17,87	0,17	2,43	17,75	707	125	160	-4,69	104,18	78,13			
2B	7528	8131	1	1	2	228131	228235	228137,00	0,94	1856,00	2	34523	0,32	30.05.2017	SOFB	07.09.2014	32,13	0,12	0,93	14,95	104	16	130	0,78	35,04	72,41			
2C	1287	4014	2	1	1	248267	248396	248267,00	0,00	1630,00	2	43603	0,26	12.04.2017	SOFB	16.09.2008	100,97	0,03	0,19	29,23	129	38	120	-0,78	41,56	62,69			
2D	7693	8131	1	1	1	248934	249287	248934,74	1,00	1890,00	2	34523	0,16	30.05.2017	SOFB	14.04.2008	107,52	0,02	0,14	15,25	353	54	140	-14,06	62,54	59,83			
3A	24836	8041	1	1	1	158192	158260	158198,40	0,09	2818,00	2	33460	0,41	17.07.2017	SOFB	12.04.2015	26,68	0,19	1,51	31,88	68	22	130	3,13	7,19	63,58			
3B	19849	6013	1	1	2	36347	36590	36351,00	0,98	2760,00	2	25126	0,13	10.07.2017	SOFB	18.04.2012	61,58	0,03	0,28	10,57	243	26	160	23,83	32,73	76,72			
A	25980	2057	1	1	1	103557	103580	103570,23	0,58	600,00	4	56517	0,35	22.05.2017	SOFB	22.10.2016	6,84	0,62	3,00	20,83	23	5	65	-1,95	999999				
B	19542	6022	2	1	2	102660	102851	102665,90	0,03	300,00	4	60093	0,18	11.07.2017	SOFB	27.03.2017	3,42	0,64	2,90	19,07	191	36	70	19,14	106,09	86,64			
C	19544	6022	2	1	2	103143	103188	103145,89	0,06	302,00	4	60093	0,16	11.07.2017	SOFB	27.03.2017	3,42	0,57	2,60	37,50	45	17	70	24,61	105,16	86,3			
D	19545	6022	2	1	2	103190	103408	103192,45	0,01	297,00	4	60093	0,17	11.07.2017	SOFB	27.03.2017	3,42	0,60	2,75	24,43	218	53	70	25,78	107,03	87,65			
E	19543	6022	2	1	2	102853	103141	102869,95	0,06	298,00	4	60093	0,17	11.07.2017	SOFB	27.03.2017	3,42	0,60	2,75	11,34	288	33	70	26,17	105,51	88,52			
F	9464	8052	1	1	1	164331	164363	164331,67	0,02	890,00	4	47932	0,19	30.05.2017	SOFB	24.04.2016	12,94	0,18	1,01	36,36	32	12	90	-5,08	82,73	24,66			
G	13686	2011	1	1	2	34830	35179	34834,87	0,99	436,00	4	56342	0,20	20.07.2017	SOFB	16.03.2013	51,19	0,05	0,23	12,78	349	45	95	-9,77	126,76	117,49			
H	19514	6022	2	1	2	100417	100497	100417,86	0,01	368,00	4	60093	0,29	11.07.2017	SOFB	30.04.2006	131,94	0,03	0,12	37,35	80	30	80	26,17	120,16	85,06			
1	18317	6011	2	1	2	166179	166208	166203,57	0,85	909,00	2	17689	1,06	05.07.2017	SOFB	06.11.2012	54,90	0,23	3,59	18,75	29	5	100	3,52	33,83	95,98			
2	24175	8064	1	1	2	73107	73266	73112,61	0,96	655,00	2	34715	0,93	10.10.2017	SOFB	25.09.2013	47,61	0,23	1,84	24,69	159	39	110	9,77	119,77	98,21			
3	24159	8064	1	1	2	70760	70930	70766,76	0,96	805,00	2	34715	0,25	10.10.2017	SOFB	27.07.2016	14,19	0,21	1,66	28,90	170	49	110	3,52	89,14	88,23			
4	13499	2011	1	1	1	9793	10189	9809,89	0																				