



Dieter Knabl, BSc

Wechselwirkungen im System *Rad-Schiene*

Zusammenhang von Schienengüte und
Schädigungsmechanismen (Verschleiß) am Rad

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. MBA Martin Leitner

Dipl.-Ing. Dr.techn. Christian Buzzi

Institut für Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Veit

Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft



Graz, April 2022



Il piacere più nobile è la gioia della comprensione

Leonardo da Vinci

Danksagung

In erster Linie möchte ich mich bei meinen Betreuern, den Herren Martin Leitner, Peter Veit und Christian Buzzi, für Ihre Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit bedanken.

Weiters gilt der Dank meinen Institutskolleginnen und -kollegen für hilfreiche Gespräche rund um das Thema Eisenbahn während des Büroalltages.

Großer Dank geht an meine Freundin Karin Riedl, die mich stets unterstützt und begleitet hat – nicht nur während der Masterarbeit, sondern durch das ganze Studium.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern Dolores Knabl-Steinhäufel und Bernd Steinhäufel bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglichten.

Abstract

This master thesis deals with the investigation of the correlation between the wheel wear of a rail vehicle and the steel grade of the rail. Specifically, the research question is: What is the relationship between rail grade and the hardness of the rail tread and various damage mechanisms (especially wear) on the wheel?

To answer this question, various investigations described in the literature were compared and analysed in terms of boundary conditions and results. These investigations include several two-disk tests, wheel-rail test rig tests and one track test. In addition to the tests, theoretical considerations on wear in the wheel-rail system were also examined in more detail.

Combined, the evaluation and comparison of the test results showed that the wear behaviour of the wheels depends on the load level - the axle load: at common axle loads (mixed traffic), wheel wear decreases with an increase in rail hardness; at high axle loads (heavy haul applications), it shows more or less constant behaviour.

In order to be able to accurately understand these relationships, further tests are necessary that focus on the influences of various parameters not yet precisely known.

Kurzfassung

Diese Masterarbeit befasst sich mit der Ergründung der Zusammenhänge zwischen dem Radverschleiß eines Schienenfahrzeuges und der Güte – und damit Laufflächenhärte – der befahrenen Schiene. Konkret lautet die Forschungsfrage: Wie ist der Zusammenhang zwischen Schienengüte und damit der Härte der Schienenlauffläche und verschiedenen Schädigungsmechanismen (v.a. Verschleiß) am Rad?

Um diese Frage zu beantworten, wurden verschiedene, in der Literatur beschriebene Untersuchungen gegenübergestellt und hinsichtlich der Randbedingungen sowie Ergebnisse analysiert. Zu diesen Untersuchungen zählen mehrere Zweischeiben-Tests, Rad-Schiene-Prüfstandtests und ein Gleistest. Neben den Versuchen wurden auch theoretische Überlegungen zum Verschleiß im System *Rad-Schiene* näher betrachtet.

Kombiniert ergaben die Auswertungen und Gegenüberstellungen der Versuchsergebnisse, dass das Verschleißverhalten der Räder abhängig vom Belastungsniveau – also der Achslast – ist: Bei den hierzulande üblichen Achslasten des Mischverkehrs sinkt der Radverschleiß bei Zunahme der Schienenhärte ab, bei hohen Achslasten von Heavy-Haul Anwendungen zeigt er konstantes Verhalten.

Um diese gezeigten Zusammenhänge exakt verstehen zu können, sind weitere Versuche notwendig, die sich auf die noch nicht genau bekannten Einflüsse verschiedener Parameter konzentrieren.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	viii
Abkürzungsverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
2 Das System <i>Rad-Schiene</i>	3
2.1 Funktion und Aufgaben	3
2.2 Geometrien im System	4
2.3 Werkstoffe	14
2.3.1 Radwerkstoffe	15
2.3.2 Schienenwerkstoffe	16
2.3.3 Weitere Medien im Kontakt	20
2.4 Schäden im System	21
2.4.1 Schäden am Rad	21
2.4.2 Schäden an der Schiene	23
3 Studien und Untersuchungen	25
3.1 Angewendete Test- und Prüfmethode n	25
3.1.1 Zweiseiben-Test (Amsler-Test)	25
3.1.2 Rad-Schiene-Prüfstand	31
3.1.3 Gleis-Test	36
3.2 Vergleich der Untersuchungen	38
3.2.1 Theoretische Überlegungen	39
3.2.2 Zweiseiben-Tests	45
3.2.3 Rad-Schiene-Prüfstandtests	57
3.2.4 Gleis-Tests	60
3.2.5 Weitere Tests	60
3.3 Vergleich der Ergebnisse	63
4 Diskussion der Ergebnisse	83
5 Résumé	109
6 Ausblick und Empfehlung	111
7 Literaturverzeichnis	115
Anhang	121

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wirkmechanismen verschiedener Fahrzeuge	3
Abbildung 2: Rad-Schiene-Kontakt	4
Abbildung 3: Radsatz	5
Abbildung 4: Schotter-Querschwellengleis	5
Abbildung 5: SW 1435 Berührungspunkt	7
Abbildung 6: SW 1430 Berührungspunkt	7
Abbildung 7: SW 1435 Δr	8
Abbildung 8: SW 1430 Δr	8
Abbildung 9: Neigung 1:20 Berührungspunkt.....	9
Abbildung 10: Neigung 1:20 Δr	9
Abbildung 11: Radprofil SBB 28-2 Berührungspunkt	10
Abbildung 12: Radprofil SBB 28-2 Δr	11
Abbildung 13: Berührkontakt Verschleißprofil R260.....	12
Abbildung 14: Berührkontakt Verschleißprofil R400HT	13
Abbildung 15: Gefügeschliffbild Radstahl R7	16
Abbildung 16: Gefügeschliffbild Radstahl Class C	16
Abbildung 17: verschiedene Gefüge der Güte R350HT	18
Abbildung 18: Schliffbild von perlitischem Gefüge	20
Abbildung 19: Schliffbild von bainitischem Gefüge	20
Abbildung 20: Schema eines Zweiseiben-Prüfstandes	26
Abbildung 21: mögliche Position der Prüfrollen und deren Abmessungen	27
Abbildung 22: SUROS-Maschine	28
Abbildung 23: Geometrie der SUROS-Prüflinge.....	28
Abbildung 24: Position der SUROS-Prüflinge	28
Abbildung 25: Simulation des Rad-Schiene-Kontaktes	29
Abbildung 26: Berechnungsgrundlagen zur Hertz'schen Theorie	30
Abbildung 27: Rad-Schiene-Prüfstand der voestalpine GmbH	32
Abbildung 28: Rad-Schiene-Prüfstand B der DB.....	34
Abbildung 29: Rad-Schiene-Prüfstand A (linear) der DB	34
Abbildung 30: Schema des BU300 Rollenprüfstandes von Lucchini	35
Abbildung 31: Rollenprüfstand BU300 bei Lucchini	36
Abbildung 32: Layout des TTCI (1981)	37
Abbildung 33: theoretisches Verschleißmodell	43
Abbildung 34: Härtebereiche von Rädern und Schienen	44
Abbildung 35: SUROS-Prüfmaschine	51
Abbildung 36: Probenorientierung ZST4	52

Abbildung 37: Proben in SUROS-Maschine	52
Abbildung 38: Härten der Schienenwerkstoffe und -proben von ZST4	54
Abbildung 39: spezielle Probengeometrie des ZST7	57
Abbildung 40: Ableitung des Modellsystems für WT1	61
Abbildung 41: Versuchsaufbau WT1	62
Abbildung 42: Radprobe WT1	62
Abbildung 43: Schienenprobe WT1	62
Abbildung 44: Ergebnisse des ZST1	64
Abbildung 45: Ergebnisse des ZST2: konstanter Kontaktdruck 900 N/mm ²	66
Abbildung 46: Ergebnisse des ZST2: konstanter Schlupf 5%	67
Abbildung 47: Ergebnisse des ZST3	69
Abbildung 48: Ergebnisse des ZST4: 1% Schlupf – nach 30.000 Zyklen	70
Abbildung 49: Ergebnisse des ZST4: Schlupfrate 1%	71
Abbildung 50: Ergebnisse des ZST4: 10% Schlupf – nach 10.000 Zyklen	71
Abbildung 51: Ergebnisse des ZST5	72
Abbildung 52: Ergebnisse des ZST5: Radhärten vor und nach dem Versuch	73
Abbildung 53: Ergebnisse des ZST5: Schienenhärten vor und nach dem Versuch	74
Abbildung 54: Ergebnisse des ZST6: Radverschleiß	75
Abbildung 55: Ergebnisse des RSPS1: nach 100.000 Zyklen	76
Abbildung 56: Ergebnisse des RSPS1: perlitische Schienen	77
Abbildung 57: Ergebnisse des RSPS2	78
Abbildung 58: Ergebnisse des GT1	79
Abbildung 59: Ergebnisse des WT1: gerader Lauf	81
Abbildung 60: Ergebnisse des WT1: schräger Lauf (0,3°)	81
Abbildung 61: Ergebnisse des WT1: Radwerkstoff ER7H	82
Abbildung 62: Vergleich der Ergebnisse: R260 vs. R350HT	84
Abbildung 63: Vergleich der Ergebnisse: R260 vs. R400HT	84
Abbildung 64: Verschleißraten für Härteverhältnis Schiene/Rad > 1 (ZST)	87
Abbildung 65: Verschleißraten für Härteverhältnis Schiene/Rad > 1 (RSPS)	88
Abbildung 66: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Belastung (ZST)	89
Abbildung 67: norm. Schienenverschleiß – Härteverhältnis, Belastung (ZST)	89
Abbildung 68: norm. Radverschleiß – Belastung (ZST)	90
Abbildung 69: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Kontaktdruck (ZST)	91
Abbildung 70: norm. Schienenverschleiß – Belastung (ZST)	92
Abbildung 71: norm. Schienenverschleiß 3D – Härteverhältnis, Kontaktdruck (ZST) ..	93
Abbildung 72: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Belastung (RSPS)	93
Abbildung 73: norm. Schienenverschleiß – Härteverhältnis, Belastung (RSPS)	94

Abbildung 74: norm. Radverschleiß – Belastung (RSPS)	94
Abbildung 75: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Kräfte (RSPS)	95
Abbildung 76: norm. Schienenverschleiß – Belastung (RSPS)	96
Abbildung 77: norm. Schienenverschleiß – Härteverhältnis, Kräfte (RSPS).....	96
Abbildung 78: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Grenzwert (ZST)	101
Abbildung 79: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Grenzwert (RSPS)	101
Abbildung 80: norm. Schienenverschleiß – Härteverhältnis, Grenzwert (ZST).....	102
Abbildung 81: norm. Schienenverschleiß – Härteverhältnis, Grenzwert (RSPS).....	102
Abbildung 82: Verschleißmodell nach Jendel	103
Abbildung 83: Verschleißmodell nach Krause und Poll	105

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grundfunktionen von Rad und Schiene	3
Tabelle 2: Parameter Spurweite	8
Tabelle 3: Parameter Neigung	10
Tabelle 4: Parameter Radprofil	11
Tabelle 5: Anforderungen an Radstähle nach UIC 812-3 und DIN EN 13626.....	15
Tabelle 6: Technische Daten des Rad-Schiene-Prüfstandes der voestalpine.....	32
Tabelle 7: Technische Daten der Prüfstände der DB	33
Tabelle 8: Übersicht der Untersuchungen	38
Tabelle 9: Übersicht untersuchter Werkstoffpaarungen.....	39
Tabelle 10: ZST1 Übersicht.....	46
Tabelle 11: ZST2 Übersicht.....	48
Tabelle 12: ZST3 Übersicht.....	50
Tabelle 13: ZST4 Übersicht.....	53
Tabelle 14: ZST5 Übersicht.....	55
Tabelle 15: RSPS1 Übersicht.....	58
Tabelle 16: RSPS2 Übersicht.....	59
Tabelle 17: WT1 Übersicht.....	63
Tabelle 18: Ergebnisse des WT1: Radverschleißzunahme durch Schräglauf	82
Tabelle 19: Werte für Normierungsbeispiel anhand RSPS2	86
Tabelle 20: Ergebnisse des Normierungsbeispiels anhand RSPS2	86
Tabelle 21: Parameter für Hertz'sche Pressung.....	99
Tabelle 22: Parameter Versuchsvorschlag.....	112
Tabelle 23: Versuchsvorschlag	112

Abkürzungsverzeichnis

DMM	Domain-Mapping-Matrix
FEM	Finite Elemente Methode
GT	Gleis-Test
HC	Head Check
RCF	Rolling Contact Fatigue (Rollkontaktermüdung)
RSPS	Rad-Schiene-Prüfstand
SW	Spurweite
TTCI	Transportation Technology Centre, Inc., Pueblo, USA
WT	weiterer Test
ZST	Zweischeiben-Test

1 Einleitung

Der Schienenverkehr gewinnt aktuell und in Zukunft für die klimaschonende bzw. klimaneutrale Mobilität immer mehr an Bedeutung. Dadurch steigt nicht nur die Belastung der Schienennetze, sondern durch Steigerung der Auslastung auch die Belastung von Komponenten und Bauteilen. Hohe Taktraten im Personenverkehr fordern hohe Beschleunigungen, die wiederum zu hohen Traktionskräften, damit zu großen Schlupfraten, und somit zu hoher Kontaktbeanspruchung führen. Im Güterverkehr sind es durch hohe Nutzlasten bedingte Achslasten, die in hohe Kontaktbeanspruchung resultieren. Wichtig ist daher die Auswahl bzw. Weiterentwicklung geeigneter verschleißfester Werkstoffe – vor allem für Rad und Schiene. In vorliegender Arbeit soll aufgezeigt werden, wie die Wahl des *Schienenwerkstoffes* den Verschleiß des Kontaktpartners *Rad* beeinflussen kann. Die **Forschungsfrage** lautet:

Wie ist der Zusammenhang zwischen Schienengüte und damit der Härte der Schienenlauffläche und verschiedenen Schädigungsmechanismen (v.a. Verschleiß) am Rad?

Ziel und Motivation

Wenn das Thema Schienengüte in Zusammenhang mit Radverschleiß Gegenstand ist, wird häufig die Auffassung vertreten, dass harte Schienen die Räder der Schienenfahrzeuge eher schädigen als weiche. Es erscheint vermeintlich logisch, befasst man sich nicht näher mit genannter Materie. Doch dieser „erste Bias“¹ erweist sich bei näherer Betrachtung als falsch. Hier sei geraten, gedanklich etwas zurückzutreten und die vorliegenden Abhängigkeiten – unter Einbeziehung theoretischer Grundlagen zum Thema Verschleiß² – zu verinnerlichen. Wie sich die theoretischen Zusammenhänge vor allem in

¹ Kahneman, *Schnelles Denken, Langsames Denken (Thinking, Fast and Slow)*.

² Rabinowicz, *Friction and Wear*; Archard, „Contact and rubbing of flat surfaces“.

Prüfstandversuchen, zuletzt aber auch im realen System *Rad-Schiene* wider spiegeln, wird in den nachfolgenden Kapiteln beleuchtet.

Ziel dieser Arbeit ist es, das notwendige Wissen zu vermitteln, um diese Zusammenhänge und Abhängigkeiten im System *Rad-Schiene* erfassen und verstehen zu können. Weiters sollen durchgeführte Untersuchungen zum genannten Thema studiert und verglichen, hinsichtlich der Randbedingungen analysiert sowie deren Ergebnisse diskutiert werden.

Aufbau

Die gegenständliche Arbeit startet mit einigen Grundlagen zum System *Rad-Schiene*. Es werden Funktion und Aufgabe, wichtige Geometrien und Werkstoffe des Systems beleuchtet sowie eine Übersicht über auftretende Schäden gegeben. Weiters widmet sich die Arbeit verschiedenen Studien und Untersuchungen: Zuerst werden die angewendeten Test- und Prüfmethode erklärt, dann die einzelnen Untersuchungen selbst. Es folgt ein Vergleich der Ergebnisse sowie die Diskussion derselben. Abschließend gibt das Résumé wichtige Erkenntnisse wieder, bevor im Abschnitt Ausblick und Empfehlung mögliche Optimierungen für zukünftige Untersuchungen sowie ein Vorschlag für weitere Versuche genannt werden.

2 Das System *Rad-Schiene*

Ein wichtiges Teilsystem des Gesamtsystems *Schienenverkehr* ist das System *Rad-Schiene*. Es bildet die Verbindung zwischen Fahrzeug und Gleis (als Teil der Infrastruktur). Drei Grundfunktionen bzw. -aufgaben, die dieses System für statische und dynamische Fälle erfüllen muss, können nach Tabelle 1 identifiziert werden:

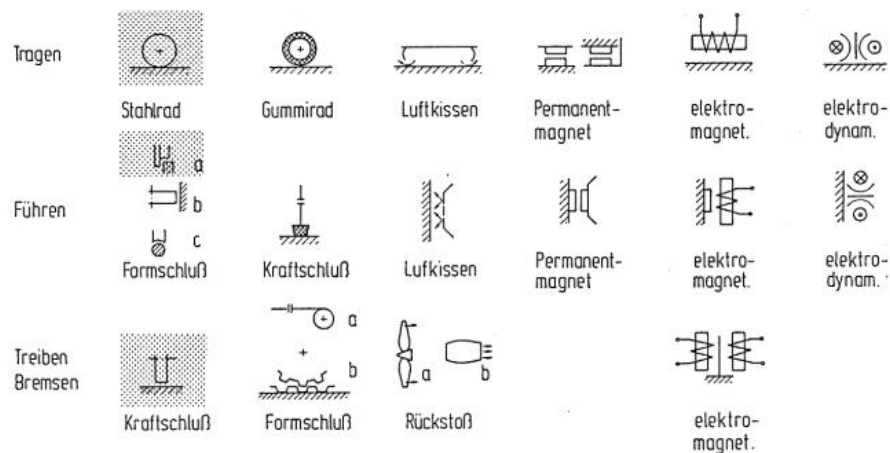
Tabelle 1: Grundfunktionen von Rad und Schiene³

1.	Tragen:	Abstützung des Gesamtgewichtes in vertikaler Richtung (z)
2.	Führen:	Horizontale Führung bzw. Spurführung (y)
3.	Antreiben/Bremsen:	Übertragung von Längskräften (x)

Wird in weiterer Folge der Begriff *System* verwendet, so bezieht er sich auf das System *Rad-Schiene*.

2.1 Funktion und Aufgaben

Grundsätzlich können diese Aufgaben durch verschiedene Mechanismen, wie in Abbildung 1 zu sehen, umgesetzt werden. Verschiedene Kombinationen dieser Wirkprinzipien ergeben, abgesehen von den Schienenfahrzeugen, verschiedenste Arten und Ausführungen von Fahrzeugen.

Abbildung 1: Wirkmechanismen verschiedener Fahrzeuge⁴

³ nach: Haigermoser, „Schienenfahrzeuge“, 13.

⁴ Haigermoser, 13.

Für ein herkömmliches Schienenfahrzeug werden die Funktionen durch folgende Mechanismen erfüllt:

- **Tragen:** abrollendes Stahlrad auf Stahlschiene
- **Führen:** Kombination aus Kraftschluss (Reibung zwischen Rad und Schienenlauffläche) und Formschluss (zwischen Spurkranz und Fahrkante der Schiene)
- **Treiben/Bremsen:** Kraftschluss zwischen Rad und Schiene

Im Falle einer Zahnradbahn erfolgt das Treiben/Bremsen mittels Formschluss zwischen Zahnrad und Zahnstange, auch liegt oftmals eine Kombination aus Kraft- und Formschluss vor.

Es lässt sich erkennen, dass der Interaktion zwischen Rad und Schiene eine große Bedeutung zukommt. Beeinflusst wird dieses Zusammenspiel sowohl von den eingesetzten Werkstoffen als auch von den vorliegenden Geometrien. Details dazu folgen in den nächsten Abschnitten.

2.2 Geometrien im System

An der Kontaktfläche zwischen dem Rad und der Schiene wird die Verbindung vom Fahrzeug zum Gleis hergestellt (Abbildung 2). Große Lasten und damit einhergehend große Kräfte werden über eine kleine Fläche von wenigen Quadratzentimetern übertragen.

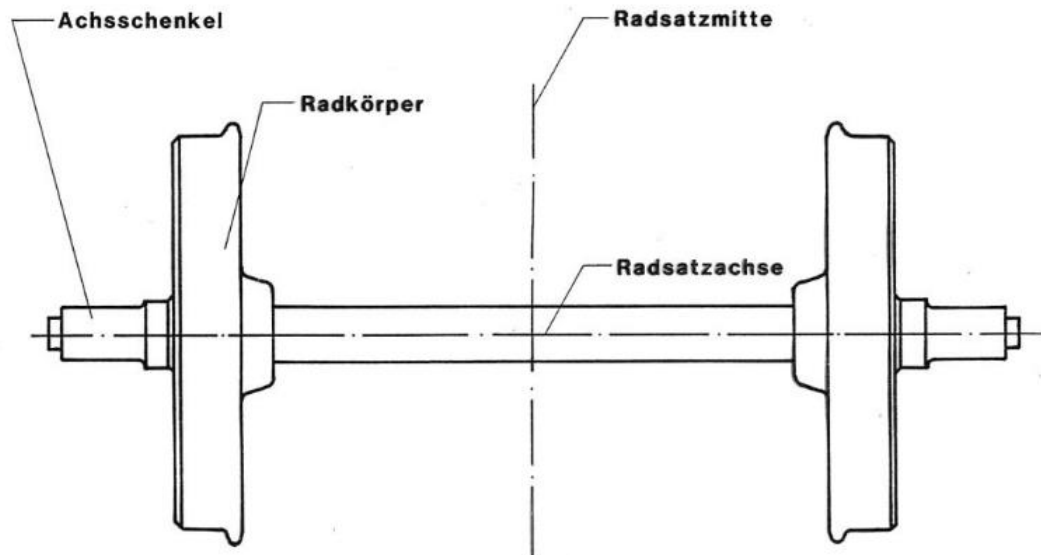
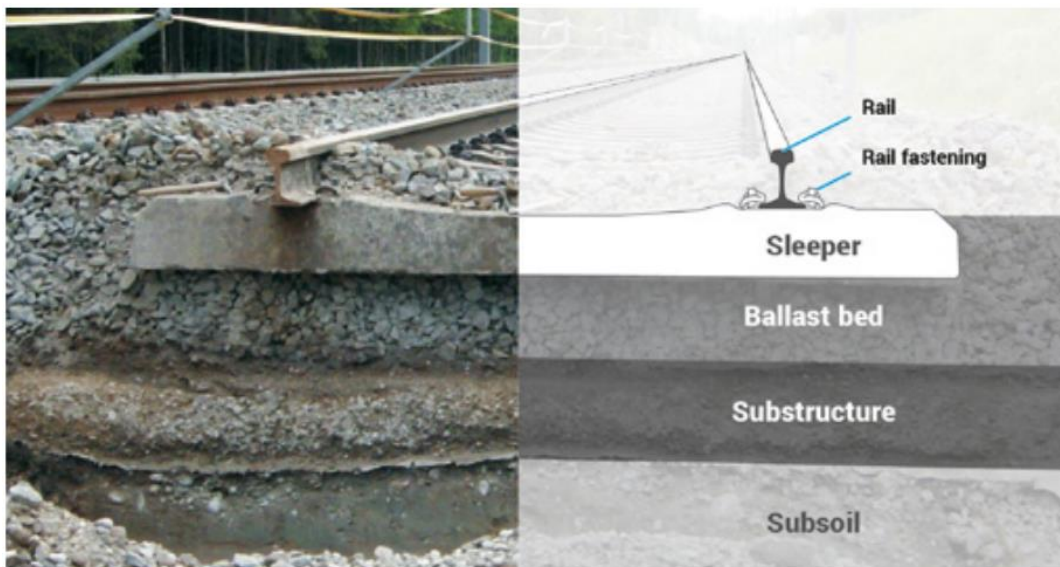


Abbildung 2: Rad-Schiene-Kontakt⁵

⁵ Schuminetz, „Rad auf Schiene“.

2 Das System Rad-Schiene

Zwei Räder bilden zusammen mit der Radsatzwelle (außer im Fall von Losrädern) den **Radsatz** (siehe Abbildung 3). Dieser rollt auf den beiden Schienen, welche zusammen mit Schwellen, Befestigung und Schotter das **Gleis** bilden, ab (Abbildung 4).

Abbildung 3: Radsatz⁶Abbildung 4: Schotter-Querschwellengleis⁷

⁶ Fengler, „Spurführung“, 1.

⁷ Hansmann, Nemetz, und Spoor, *Keeping Track of Track Geometry*, 39.

Damit sich im geraden Gleis ein stabiler Lauf einstellen kann, ist Voraussetzung, dass die Laufflächen der Räder kegelförmig sind. Durch Anregungen des Systems kann sich ein sogenannter Sinuslauf ausbilden.

Um die Zusammenhänge zu beschreiben, wurde der Begriff der *äquivalenten Konizität* eingeführt: Laut Definition beschreibt sie die Neigung eines kegeligen Radprofils, welches auf scharfen Kanten abrollt und die gleiche Wellenlänge des Sinuslaufes wie das zu vergleichende Radprofil erzeugt.⁸

Sowohl für Räder als auch für Schienen gibt es unterschiedliche Profile (siehe entsprechende Normen⁹), weiters kann die Schienenneigung variieren (üblich: 1:20 oder 1:40, bei Weichen auch 1:∞). Damit kommt es für jede Kombination von Rad- und Schienenprofil, Schienenneigung, Raddurchmesser, Spurweite etc. zu einer anderen Berührgeometrie im Kontakt. Einhergehend ändert sich auch die äquivalente Konizität, welche maßgebend für den zuvor erwähnten Sinuslauf in der Geraden aber auch für den Bogenlauf eines Radsatzes ist.

Die Rollradiendifferenz als Funktion der seitlichen Auslenkung (beschreibende Funktion der äquivalenten Konizität) wird von Spurweite, Schienenneigung, Schienenprofil und Radprofil beeinflusst¹⁰. Nachfolgende Beispiele sollen zeigen, dass die Berührung zwischen Rad und Schiene von vielen geometrischen Parametern abhängt. Durch Verschleiß an Rad und Schiene ändern sich relevante Geometrien und damit auch die Kontaktparameter. Die verwendeten Profile beziehen sich auf den Norm- und damit Sollzustand. Sie verändern sich im Betrieb abhängig von der Einbausituation völlig unterschiedlich (Schiene in der Geraden vs. im Bogen; Rad an Lokomotive vs. Rad am Waggon). Somit sind genaue Kontaktbedingungen, wie sie zwischen Rädern und Schiene tatsächlich auftreten, nur schwer zu bestimmen. Umgekehrt beeinflussen die tatsächlichen Kontaktbedingungen wiederum den auftretenden Verschleiß und andere Schädigungen wie z.B. Rissbildung durch Rollkontaktermüdung.

⁸ Austrian Standards International, „EN 15302 - Bahnanwendungen - Parameter der Rad-Schiene-Kontaktgeometrie - Definitionen und Berechnungsmethoden“.

⁹ Austrian Standards International, „EN 13715:2020 - Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Räder - Radprofile“; Austrian Standards International, „EN 13674-1 Bahnanwendungen – Oberbau – Schienen Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m“.

¹⁰ Rießberger, „Das Zusammenwirken von Rad und Schiene“, 23–24.

Einfluss der Spurweite

Die vorliegende Spurweite (SW) beeinflusst die Berührungspunktzuordnung (Abbildung 5 und Abbildung 6) und damit auch den Verlauf der Rollradiendifferenz als Funktion der seitlichen Auslenkung (Abbildung 7 und Abbildung 8, S. 8). Die Parameter des Vergleichs sind in Tabelle 2 (S. 8) gelistet.

Die in Abbildung 5 dargestellten strichlierten Linien zeigen die Positionen, an denen das Rad die Schiene bei gegebener seitlicher Auslenkung y berührt. Es ist zu erkennen, dass diese Berührungspunktzuordnungen in Abbildung 6 durch Änderung der Spurweite abweichen. Es sind unterschiedliche Bereiche der Berührung (rote Markierungen) bei gleichen seitlichen Auslenkungen zu sehen.

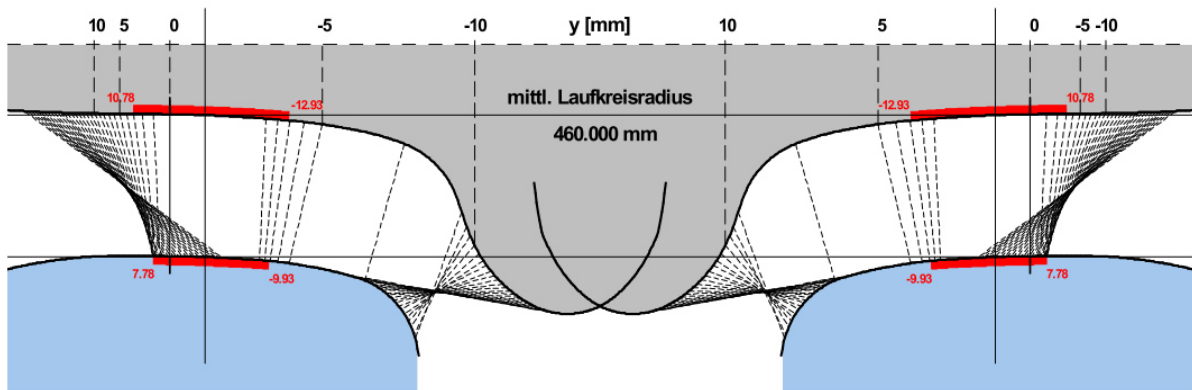


Abbildung 5: SW 1435 Berührungspunkt¹¹

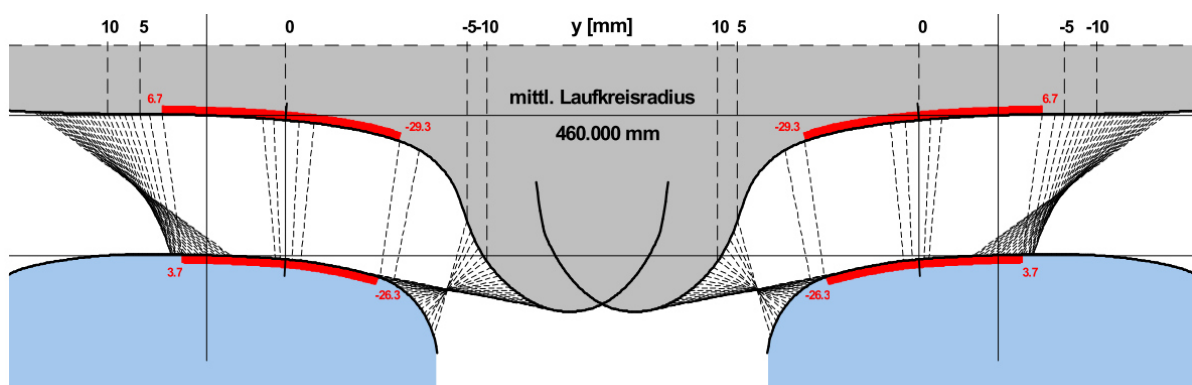


Abbildung 6: SW 1430 Berührungspunkt¹²

¹¹ Gleislauftechnik Müller, „Berührgeometrische Interaktion“, 7.

¹² Gleislauftechnik Müller, 7.

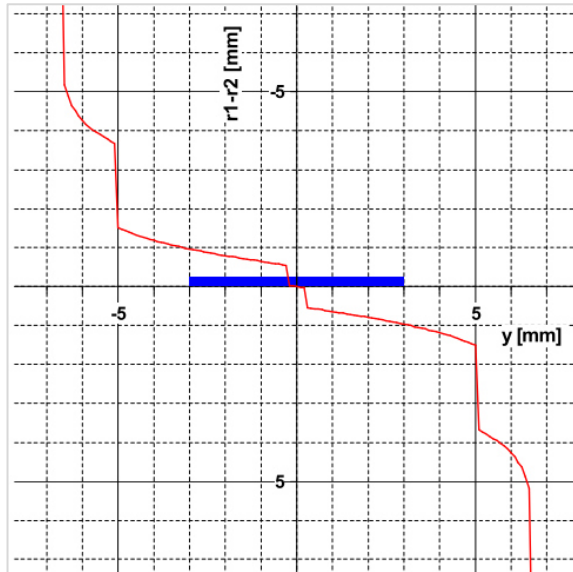


Abbildung 7: SW 1435 Δr^{13}

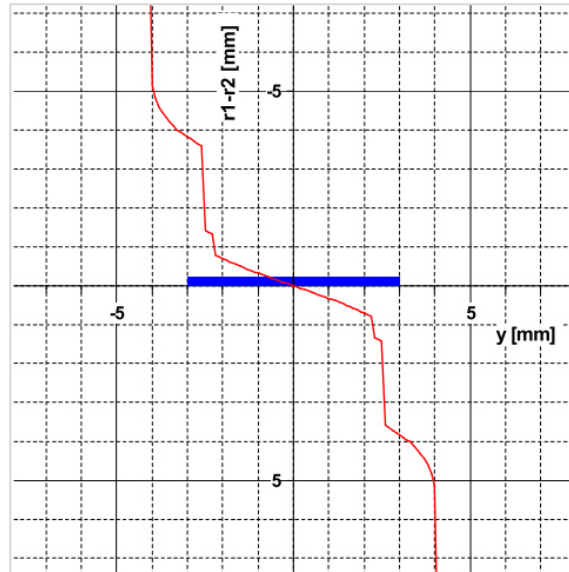


Abbildung 8: SW 1430 Δr^{14}

r1 – r2 ... Rollradiendifferenz
y ... laterale Verschiebung des Radsatzes

Der Vergleich der Rollradiendifferenz zeigt den Unterschied der Funktion in Abhängigkeit der lateralen Verschiebung. Verschiedene Rollradiendifferenzfunktionen führen zu unterschiedlichem Verhalten des Radsatzes hinsichtlich Sinuslauf und des Verhaltens im Bogen.

Tabelle 2: Parameter Spurweite¹⁵

Parameter	
Schienenprofil:	60E1 (gemäß EN 13674-1)
Neigung:	1:40
Radprofil:	ORE S1002
Spurmaß:	1426 mm
Spurweite (ausgewertet für):	1435 mm 1430 mm

¹³ Gleislauftechnik Müller, 7.

¹⁴ Gleislauftechnik Müller, 7.

¹⁵ Gleislauftechnik Müller, 7.

Einfluss Schienenneigung

Die Schienenneigung hat ebenso erheblichen Einfluss auf Berührungspunktzuordnung (vgl. Abbildung 5, S. 7 und Abbildung 9) und Funktion der Rollradiendifferenz (vgl. Abbildung 7 und Abbildung 10). Die übliche Schienenneigung variiert je nach regionalen Vorgaben. Übliche Werte hierbei sind 1:20 und 1:40. Somit befahren dieselben Schienenfahrzeuge verschiedene Gleise mit unterschiedlich geneigten Schienen, was zu komplexen Verschleißvorgängen am Radprofil führen kann, da sich die Berührungspunkte je nach Neigung unterscheiden.

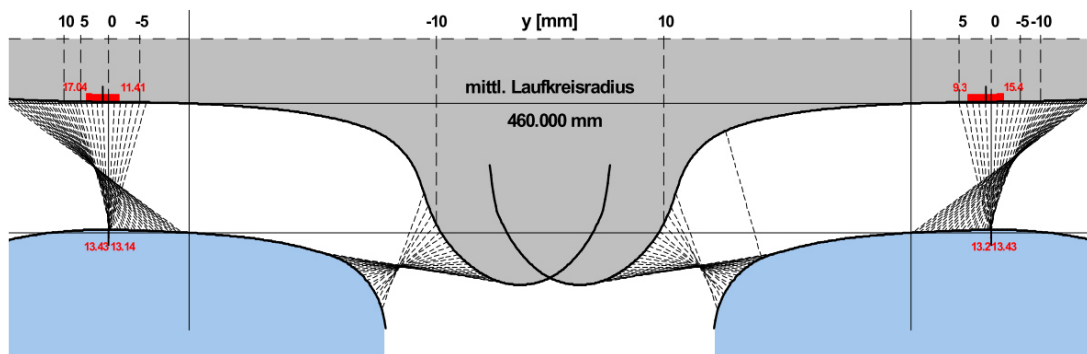


Abbildung 9: Neigung 1:20 Berührungspunkt¹⁶

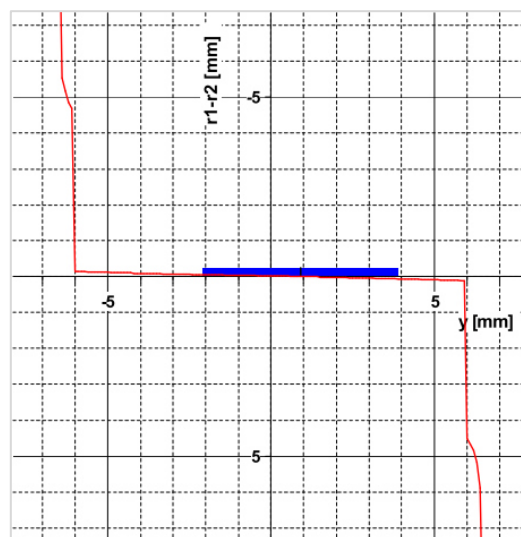


Abbildung 10: Neigung 1:20 Δr ¹⁷

$r_1 - r_2$... Rollradiendifferenz

y ... laterale Verschiebung des Radsatzes

¹⁶ Gleislauftechnik Müller, 8.

¹⁷ Gleislauftechnik Müller, 8.

Vergleicht man Abbildung 7 (S. 8) mit Abbildung 10 (S. 9) wird deutlich, dass sich die Funktion der Rollradiendifferenz in Abhängigkeit der seitlichen Auslenkung stark ändert, wenn sich die geometrische Konfiguration ändert. D.h. das Verhalten des Radsatzes wird durch die geometrischen Gegebenheiten des Systems Rad-Schiene bestimmt.

Tabelle 3 zeigt die Vergleichsparameter hinsichtlich Schienenneigung.

Tabelle 3: Parameter Neigung¹⁸

Parameter	
Schienenprofil:	60E1 (gemäß EN 13674-1)
Neigung (ausgewertet für):	1:40 1:20
Radprofil:	ORE S1002
Spurmaß:	1426 mm
Spurweite:	1435 mm

Einfluss des Radprofils

Das Radprofil hat ebenso Einfluss auf die Position des Berührungspunktes (vgl. Abbildung 5, S. 7 und Abbildung 11) sowie auf die Rollradiusdifferenzfunktion (vgl. Abbildung 7, S. 8 und Abbildung 12).

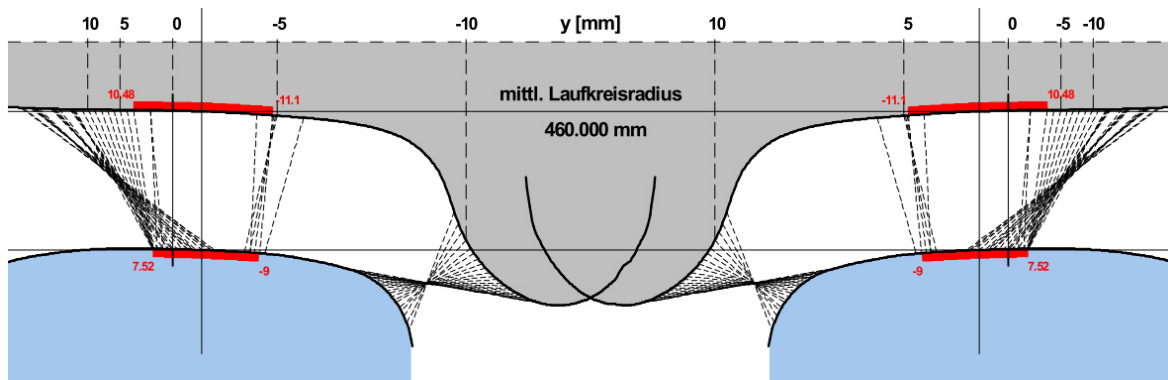
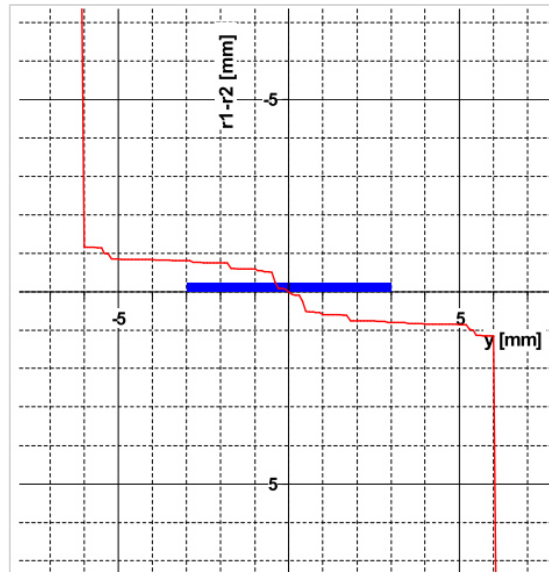


Abbildung 11: Radprofil SBB 28-2 Berührungspunkt¹⁹

¹⁸ Gleislauftechnik Müller, 8.

¹⁹ Gleislauftechnik Müller, 9.

2 Das System Rad-Schiene

Abbildung 12: Radprofil SBB 28-2 Δr^{20}

$r_1 - r_2$... Rollradiendifferenz

y ... laterale Verschiebung des Radsatzes

In Tabelle 4 sind die Vergleichsparameter bezüglich des Radprofils zusammengefasst.

Es ist anzumerken, dass das Radprofil S1002 – wie auch die meisten üblichen Schienenprofile – ein sogenanntes *Verschleißprofil* ist. Das bedeutet, das Profil ist derart gestaltet, dass sich der Verschleiß in der Theorie nur gering auf das tatsächliche Radprofil auswirkt. Unterschiedliche Belastungen lassen Räder dennoch unterschiedlich verschleifen.²¹ Analog zum Radprofil beeinflusst auch das Schienenprofil den Berührungskontakt.

Tabelle 4: Parameter Radprofil²²

Parameter	
Schienenprofil:	60E1 (gemäß EN 13674-1)
Neigung:	1:40
Radprofil (ausgewertet für):	ORE S1002 SBB 28-2
Spurmaß:	1426 mm
Spurweite:	1435 mm

²⁰ Gleislauftechnik Müller, 9.

²¹ Schelle, „Radverschleißreduzierung für eine Güterzuglokomotive durch optimierte Spurführung“, 6.

²² Gleislauftechnik Müller, „Berührgeometrische Interaktion“, 9.

Einfluss des Verschleißes

Vergleicht man Abbildung 13 (gemessenes Verschleißprofil einer Schiene der Güte R260) und Abbildung 14 (gemessenes Verschleißprofil einer Schiene der Güte R400HT) wird deutlich, dass verschlissene Schienenprofile den Berührungskontakt und dessen Geometrie beeinflussen. Hierbei sind die blauen Linien (ähnlich den vorangegangenen Abbildungen) die zusammengehörigen Berührungspunkte von Rad und Schiene. Erkennbar ist der eindeutige Unterschied zwischen dem stark verschlissenen und dem weniger verschlissenen Schienenprofil. In letzterem Fall ist eine Verteilung der Berührungspunkte über einen großen Anteil der Schienenoberfläche gegeben, was zu einem breiten Fahrspiegel führt.

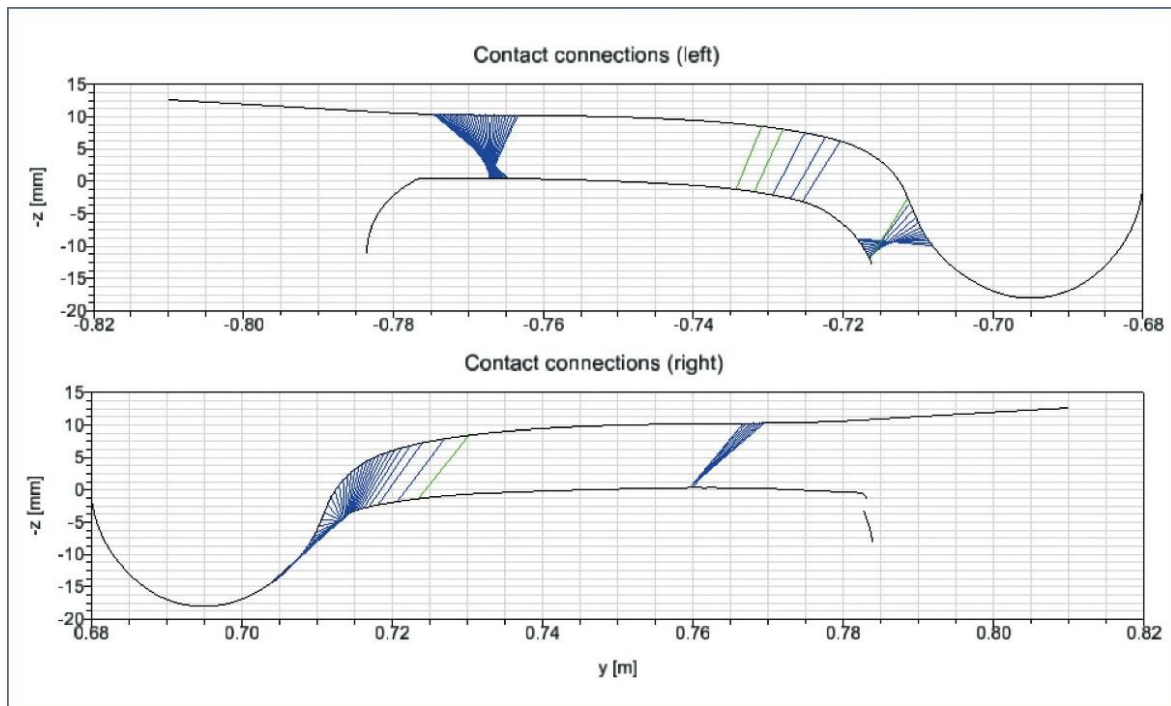
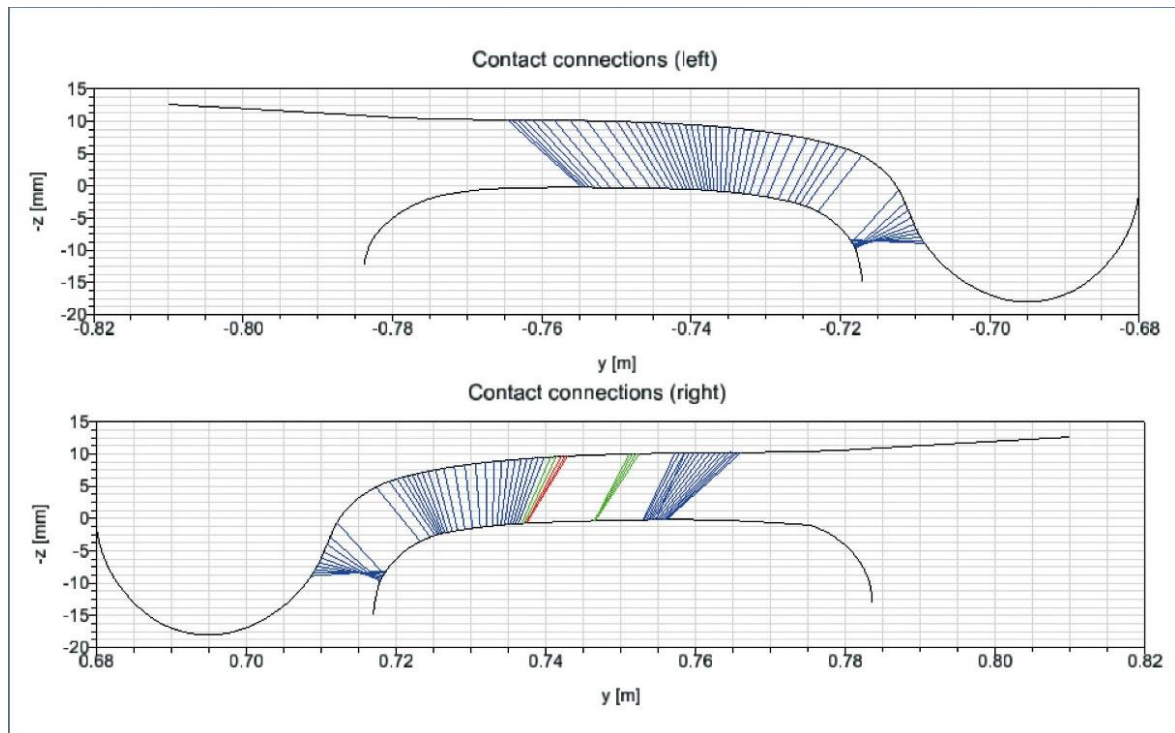


Abbildung 13: Berührungskontakt Verschleißprofil R260²³

²³ Pietsch u. a., „Der Einsatz verschleißfester Schienenstähle im Bogen und deren Einfluss auf das Laufverhalten“, 477.

2 Das System Rad-Schiene

Abbildung 14: Berührkontakt Verschleißprofil R400HT²⁴

Das stärker verschlissene Profil führt zu einem unerwünschten Berührkontakt, einer Zweipunktberührung, die hohe Berührspannungen und Reibleistungen zufolge hat. Deutlich näher an der „Designgeometrie“ ist die Berührgeometrie zwischen Rad und der weniger verschlissenen Schiene. Dies führt zu einer gleichmäßigeren Berührungspunktverteilung und einem breiteren Fahrspiegel wie auch zu reduzierten Führungskräften. Voraussetzung dafür ist ein von Grund auf optimiertes System, denn Qualität kann nur erhalten bleiben, wenn sie bereits zu Beginn besteht.²⁵

Die Oberflächen der Kontaktpartner im System *Rad-Schiene* sind hochbelastet: Es treten Kräfte auf, die zu Normalspannungen von bis zu 2000 N/mm² und Tangentialspannungen von bis zu 500 N/mm² führen²⁶. Bei der Übertragung eben dieser Kontaktkräfte tritt Schlupf in verschiedenen Richtungen auf: Längs- und Querschlupf sowie Bohrschlupf.

²⁴ Pietsch u. a., 478.

²⁵ Pietsch u. a., „Der Einsatz verschleißfester Schienenstähle im Bogen und deren Einfluss auf das Laufverhalten“.

²⁶ Mädler und Heyder, „Schienenfahrzeugtagung Dresden“, 3.

Die Belastung im Kontakt durch Schlupf sowie Kontaktdruck hat großen Einfluss auf verschiedene Arten der Schädigung beider Kontaktpartner (siehe 2.4, S. 21). Unterschiedliche Kontaktbedingungen sowie Kontaktparameter haben unterschiedliche Schäden zur Folge, auch die Berührgeometrie hat großen Einfluss darauf.

Es ist zu erkennen, dass sich Unterschiede der Parameter deutlich auf das Verhalten des Berührungspunktes und damit auf das Verhalten des Radsatzes im Gleis auswirken. Damit einher verändern sich die Kontaktparameter, welche sich wiederum auf das Verschleißverhalten auswirken. Die **geometrische Konfiguration** des Systems *Rad-Schiene* ist **nicht konstant**, sondern verändert sich im Betrieb.

Zusammengefasst lässt sich sagen, neben dem Werkstoffverhalten (siehe 2.3) sind die Geometrien der Kontaktpartner ein wesentlicher Punkt, wenn das System hinsichtlich Schädigungen (siehe 2.4, S. 21) bzw. Verschleiß betrachtet wird. Andersherum beeinflusst der Verschleiß durch Materialabtrag aber die Geometrien – daraus entsteht eine Abhängigkeitsspirale.

Die **Auswirkung unterschiedlicher Geometrien auf den Verschleiß** wird in vorliegender Arbeit **nicht näher beleuchtet**. Es sei auf Fachliteratur, wie beispielsweise von *Knothe* und *Stichel*, verwiesen.²⁷

2.3 Werkstoffe

Für die Räder von Schienenfahrzeugen wie auch für die Schienen selbst sind verschiedene Stahlsorten bzw. Güten in Verwendung. Im Folgenden werden unterschiedliche Werkstoffkonzepte kurz umrissen.

Eine Auflistung und Beschreibung der jeweiligen Güten ist der vorliegenden Arbeit in Form einer Übersichtstabelle als Beilage angehängt (siehe Anhang 5, XLVII): Diese beinhaltet eine Auflistung der in den entsprechenden Normen genannten Schienen- und Radwerkstoffen sowie die in den einzelnen Untersuchungen erwähnten Güten (inkl. Härteverteilungs- bzw. Gefügeschliffbilder, sofern vorhanden).

²⁷ Knothe und Stichel, *Schienenfahrzeugdynamik*.

2 Das System Rad-Schiene

2.3.1 Radwerkstoffe

Im Kontakt zwischen Rad und Schiene werden die verwendeten Werkstoffe hoch belastet: einerseits durch die vorherrschenden Kontaktdrücke und -spannungen, andererseits durch von auftretenden Relativbewegungen verursachten Schlupf in Quer- und Längsrichtung. Erstere belasten das Material mechanisch, letztere auch thermisch. Eingesetzte Werkstoffe müssen somit ausreichend Widerstand gegen die auftretenden Beanspruchungen aufweisen.

Die in Europa verwendeten Standardwerkstoffe für Vollräder (bzw. Anforderungen an diese) sind in Tabelle 5 (S. 15) nach der Vorschrift UIC 812-3 sowie der Norm DIN EN 13626²⁸ ersichtlich.

Tabelle 5: Anforderungen an Radstähle nach UIC 812-3 und DIN EN 13626²⁹

Stahlbezeichnung		Kohlenstoffgehalt in %	Streckgrenze in N/mm ²	Zugfestigkeit in N/mm ²	Bruchdehnung in %	Kerbschlagarbeit in J	
UIC 812-3	EN 13262	UIC/ EN	EN 13262	UIC/ EN	UIC/ EN	UIC 812-3 U-Kerbe (RT)	EN 13262 V-Kerbe (-20°C)
R1 N	-	≤ 0,48	-	600 bis 720	≥ 18	≥ 15	-
R2 N	-	≤ 0,58	-	700 bis 840	≥ 14	≥ 10	-
R3 N	-	≤ 0,70	-	800 bis 940	≥ 10	≥ 10	-
R6 T, E	ER6	≤ 0,48	≥ 500	780 bis 900	≥ 15	≥ 15	≥ 12
R7 T, E	ER7	≤ 0,52	≥ 520	820 bis 940	≥ 14	≥ 15	≥ 10
R8 T, E	ER8	≤ 0,56	≥ 540	860 bis 980	≥ 13	≥ 15	≥ 10
R9 T, E	ER9	≤ 0,60	≥ 580	900 bis 1050	≥ 12	≥ 10	≥ 8

N - normalisiert, T - radkranzvergütet, E - vollvergütet, RT - Raumtemperatur

Verwendete Stähle, welche die genannten Anforderungen erfüllen, sind typischerweise unlegiert und weisen ein überwiegend ferritisch-perlitisches Gefüge auf (siehe Abbildung 15 und Abbildung 16, jeweils S. 16). Dieses bietet durch hohe Härte der Zementitlamellen einen hohen Verschleißwiderstand. Weiters bietet es durch die Umwandlung nahe des thermodynamischen Gleichgewichtes eine hohe Warmfestigkeit. Verschiedene Wärmebehandlungen der Stähle sind üblich (siehe Tabelle 5), wobei die Vergütung nicht im klassischen Sinne verstanden wird, vielmehr handelt es sich dabei um Verfeinerung des Perlitgefüges durch eine Beschleunigung des Abkühlungsvorganges. Die häufigste der eingesetzten Güten ist R7.³⁰

²⁸ Austrian Standards International, „EN 13262 - Bahnanwendungen — Radsätze und Drehgestelle — Räder — Produktanforderungen“.

²⁹ Mädler und Bannasch, „Werkstoffeinsatz in Schienenfahrzeugrädern - Alternativen und Grenzen“.

³⁰ Mädler und Bannasch.

Beachtung bei der Werkstoffkonzeption muss auf die Bauart der Bremse des jeweiligen Schienenfahrzeuges gelegt werden: Bei klotzgebremsten Fahrzeugen müssen Kennwerte hinsichtlich der Bruchzähigkeit eingehalten werden. Dazu wird – ausgehend von der Güte R7 – der Kohlenstoffgehalt entsprechend eingestellt (meist $<0,5\%$), was zu erhöhtem Ferrit-Anteil im Gefüge führt. Damit einher geht eine Verringerung der Festigkeit und somit auch des Verschleißwiderstandes.³¹

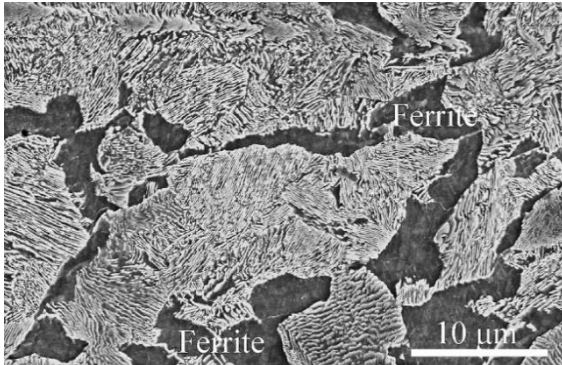


Abbildung 15: Gefügeschliffbild Radstahl R7³²

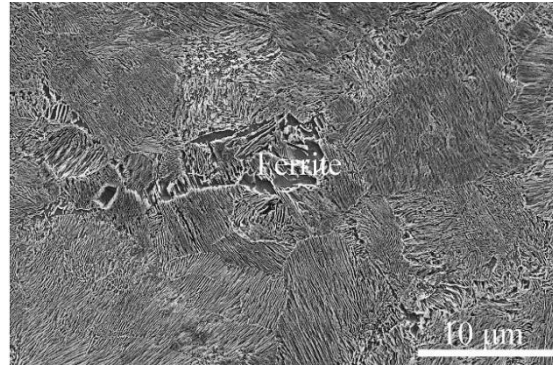


Abbildung 16: Gefügeschliffbild Radstahl Class C³³

Für eine Übersicht aller Radgüten, welche in den Untersuchungen (Kapitel 3, S. 25) auftreten bzw. in den entsprechenden Normen genannt sind, siehe Blatt 1 (Anhang 5, S. XLVII).

2.3.2 Schienenwerkstoffe

Analog zu den Rädern erfahren auch die Schienen als Teil des Gleises hohe mechanische Beanspruchungen. Entsprechender Einsatz des richtigen Werkstoffes, je nach Belastungs- bzw. Einbausituation, optimiert das Verhalten des Gleises. Anforderungen an die Schiene sind (nach *Linsel u. a.*):³⁴

- hohe Ermüdungs- bzw. Dauerfestigkeit
- ausreichend hohe Streckgrenze bzw. Zugfestigkeit
- hohe Härte
- hohe Sprödbruchsicherheit
- Schweißneigung

³¹ Mädler und Bannasch.

³² aus: Hu u. a., „Investigation on wear and rolling contact fatigue of wheel-rail materials under various wheel/rail hardness ratio and creepage conditions“.

³³ aus: Hu u. a.

³⁴ Linsel und Meißner, „Schienen und Schienenschweißen“, 69–70.

2 Das System Rad-Schiene

- Widerstand gegen:
 - o Verschleiß
 - o Verquetschung
 - o Rollkontaktermüdung (Rissbildung, Head Checks, Squats, Ausbröckelungen)
 - o Schlupfwellen
- gute Oberflächenbeschaffenheit
- ausreichende Ebenheit sowie Profiltreue

Zur Erfüllung dieser Ansprüche werden verschiedene Arten von Schienenwerkstoffen eingesetzt: Grundsätzlich kann zwischen **naturharten, legierten** und **wärmebehandelten** Stählen unterschieden werden. Weiters kann in **perlitisches** und **bainitisches** Werkstoffkonzepte eingeteilt werden.

Eine Übersicht über Schienengüten (chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften) nach europäischer Norm (EN 13674-1³⁵) sowie alle in den Untersuchungen aus Kapitel 3 vorkommende Güten liefert Blatt 1 in Anhang 5 (S. XLVII).

2.3.2.1 Naturharte Schienenwerkstoffe

Zur Herstellung naturharter Schienen finden im Allgemeinen unlegierte oder niedriglegierte Stähle Verwendung. Das dabei auftretende Gefüge kann perlitisch oder bainitisch sein. Für perlitische Schienen darf nur Perlit im Gefüge vorhanden sein.³⁶

2.3.2.2 Legierte Schienenwerkstoffe

Durch Hinzugabe von Legierungselementen (z.B. Chrom) kann der Perlit verfeinert werden. Der dadurch entstehende Effekt gleicht dem der Wärmebehandlung (siehe 2.3.2.3), wobei der Effekt durch Legieren begrenzt ist. So kann beispielsweise die Grundhärte von 260 HBW des Standardwerkstoffes auf bis zu 320 HBW des legierten Stahles erhöht werden. Dabei hat der gesamte Schienenquerschnitt dieselbe Härte.³⁷

³⁵ Austrian Standards International, „EN 13674-1 Bahnanwendungen – Oberbau – Schienen Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m“.

³⁶ Austrian Standards International, 22.

³⁷ Linsel und Meißner, „Schienen und Schienenschweißen“, 70.

2.3.2.3 Wärmebehandelte Schienenwerkstoffe

Mittels Wärmebehandlung können verschiedene Arten des Werkstoffes Stahl für Schienen erreicht werden: perlitische sowie bainitische Stähle.

Perlitische wärmebehandelte Schienenwerkstoffe weisen ein – im Vergleich zu nicht wärmebehandelten – feinlamellares Gefüge im Bereich des Schienenkopfes auf.

Abbildung 17 zeigt verschiedene Gefüge bzw. Härten einer Schiene der Güte R350HT: Am Schienenkopf, welcher den Wirkungsbereich der Wärmebehandlung darstellt, tritt feinlamellarer Perlit höherer Härte auf, am Schienenfuß hingegen ist das gröbere lamellare Gefüge niedrigerer Härte (Grundgefüge) zu sehen.

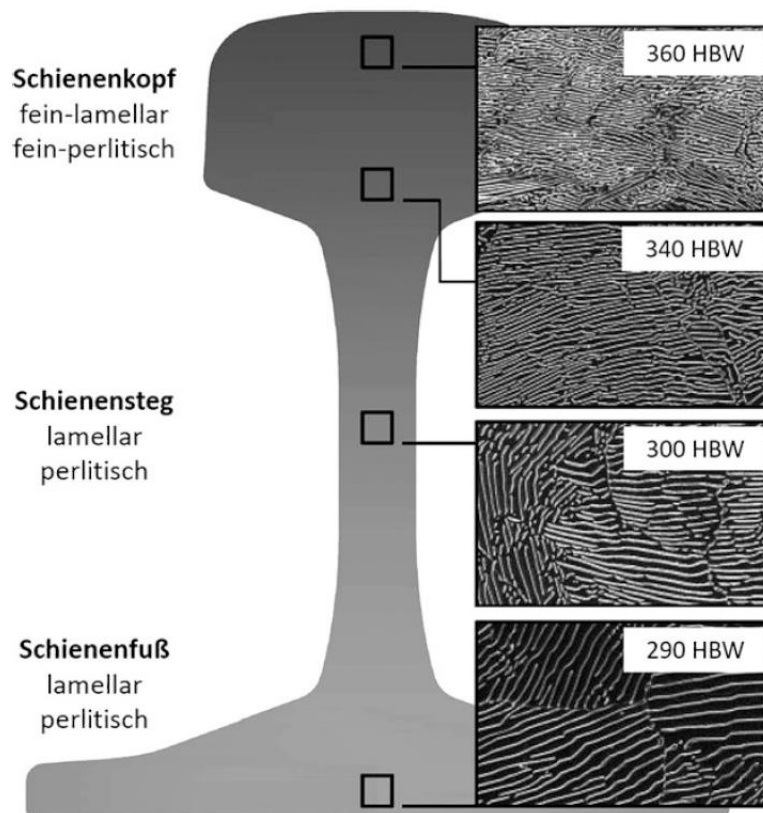


Abbildung 17: verschiedene Gefüge der Güte R350HT³⁸

³⁸ Linsel und Meißner, 71; Quelle: voestalpine Donawitz.

2 Das System Rad-Schiene

Der Prozess der Wärmebehandlung, welche für die Verfeinerung des Gefüges notwendig ist, unterscheidet sich von klassischem Härten (mit Martensitbildung): Im Falle der Wärmebehandlung von Schienen wird eine leicht beschleunigte Abkühlung des Schienenkopfes zur Bildung feinlamellaren Perlits durch Unterbindung von Diffusionsvorgängen verstanden. Üblicherweise wird dazu die Walzhitze der Schiene genutzt und die Wärmebehandlung am Ende des Walzprozesses durchgeführt.³⁹

Die durch Wärmebehandlung erzielte Härtesteigerung führt einerseits zu höherem Verschleißwiderstand, andererseits zur Absenkung der Rissempfindlichkeit⁴⁰.

Zur Erzeugung **bainitischen** Gefüges wird bei der Wärmebehandlung eine isotherme (statt einer kontinuierlichen) Abkühlung gewählt. Nachfolgend ist der Vergleich des (durch Überrollungen belasteten) Gefüges von Perlit (Abbildung 18, S. 20) und Bainit (Abbildung 19, S. 20) dargestellt.

Das dabei entstehende Gefüge unterscheidet sich nicht nur optisch von Perlit, sondern auch in seinen Eigenschaften. Der Bainit vereint hohe Festigkeit und gute Zähigkeit, zudem bietet er gute Verschleißfestigkeit und hohen Widerstand gegen Rollkontaktermüdung.⁴¹

An dieser Stelle sei hervorgehoben, dass das zum Perlit verschiedene Gefüge des Bainits ein anderes Verhalten hinsichtlich Schädigung und Verschleiß zeigt. Gut zu sehen ist dieser Unterschied in Abbildung 44 auf Seite 64 (ZST1).

Bainitische Schienenwerkstoffe befinden sich derzeit noch in Entwicklung und Erprobung, nicht im Serieneinsatz. Deshalb existiert (noch) keine breitflächige Untersuchung dieser, wie bspw. für perlitische Werkstoffe.

³⁹ Vanovsek, „Auswahl eines Härtemittels zur Herstellung perlitischer und bainitischer Schienen und Ermittlung der optimalen Prozessparameter“; Pointner, Moser, und Prskawetz, Method of heat treating rails.

⁴⁰ Vanovsek, „Auswahl eines Härtemittels zur Herstellung perlitischer und bainitischer Schienen und Ermittlung der optimalen Prozessparameter“, 34.

⁴¹ Vanovsek, „Auswahl eines Härtemittels zur Herstellung perlitischer und bainitischer Schienen und Ermittlung der optimalen Prozessparameter“.



Abbildung 18: Schliffbild von perlitischem Gefüge⁴²

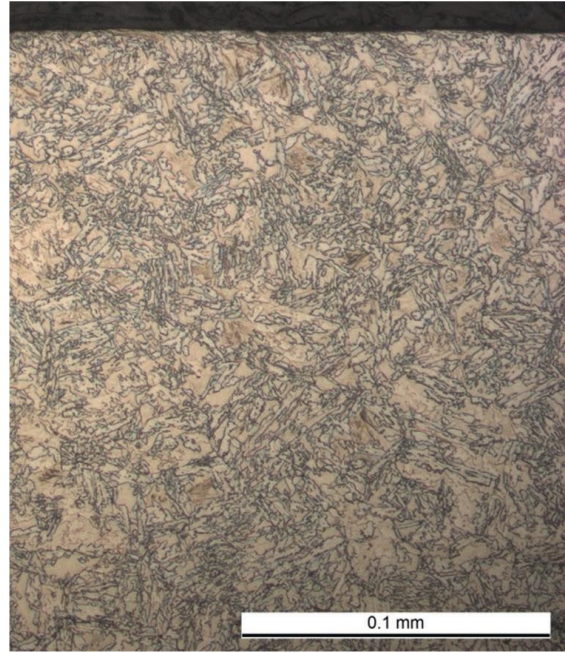


Abbildung 19: Schliffbild von bainitischem Gefüge⁴³

2.3.3 Weitere Medien im Kontakt

Im System *Rad-Schiene* existieren neben den beiden Kontaktpartnern Rad und Schiene auch weitere Medien im Kontakt. Diese können sein:

- Schmiermittel (Spurkranzschmierung)
- Wasser bzw. Feuchtigkeit
- Verschmutzungen (z.B. Sand oder Laub auf der Schienenoberfläche)

Durch das Auftreten dieser Zwischenmedien können Reib- und Kontaktverhältnisse beeinflusst werden. Hier soll grundsätzlich auf die Existenz der Zwischenmedien hingewiesen werden, in dieser Arbeit wird jedoch nicht weiter darauf eingegangen.

⁴² Wiedorn, Kammerhofer, und Scheriau, „340 Dobain HSH – Schienenwerkstoff gegen Head Checks“, 33.

⁴³ Wiedorn, Kammerhofer, und Scheriau, 33.

2.4 Schäden im System

Im System *Rad-Schiene* treten an beiden Kontaktpartnern, verursacht durch mechanische sowie thermische Belastung, diverse Schäden auf. In den nachfolgenden Abschnitten soll ein Überblick über mögliche Schadensbilder an Rad und Schiene gegeben werden.

2.4.1 Schäden am Rad

Die wichtigsten der auftretenden Schäden an Rädern von Schienenfahrzeugen (Gründe für Austausch oder Instandsetzung) nach *Bevan u. a.* aus einer Datenerhebung verschiedener Fahrzeugflottenbetreiber sind wie folgt:⁴⁴

- *Rollkontaktermüdung (engl. Rolling contact fatigue – RCF)*
Hierbei handelt es sich um ermüdungsbasierte Schäden induziert durch zyklische Be- und Entlastung in Kombination mit Schlupf resultierend aus Seitenkräften sowie Tangentialkräften zufolge Traktion und Bremsen.
- *Dünner Spurkranz*
Verschleiß konzentriert sich an der Seitenfläche des Spurkranzes und resultiert in eine Verringerung der Spurkranzdicke (Spurkranzverschleiß).
- *Hoher Spurkranz*
Verschleiß tritt konzentriert an der Lauffläche des Rades auf und führt zu einer Zunahme der Spurkranzhöhe (Laufflächenverschleiß).
- *Schäden an der Lauffläche*
Hierbei handelt es sich um Kombinationen von verschiedenen Schädigungsmechanismen in Zusammenhang mit dem Radwerkstoff, wie z. B. Flachstellen, Ovalität und Ausbröckelungen. Flachstellen an der Lauffläche sind die Folge von Wärmeeinfluss auf das Material durch zu hohe Schlupfraten (durchdrehendes oder blockierendes Rad). Der lokale Wärmeeintrag führt zur Bildung von Martensit, welcher hart und spröde ist. Dadurch besteht die Gefahr, dass diese verhärteten Stellen durch weitere zyklische Belastung von der Radoberfläche abplatzen.

⁴⁴ Bevan u. a., „Development and validation of a wheel wear and rolling contact fatigue damage model“, 101.

Mädler beschreibt folgende Schäden, die an Rädern auftreten können:⁴⁵

- *Verschleiß am Längsprofil*

Rad-Unrundheiten (Polygonisierung): treten v.a. in Verbindung mit weichen Rädern (bspw. aus R7) auf und haben eine hohe Schallabstrahlung zur Folge.

- *Verschleiß am Querprofil*

Spurkranz- und Laufflächenverschleiß (Hohllauf): treten v.a. bei „weicheren“ Rädern aus ER7 auf (alle Fahrzeugtypen sind mehr oder weniger davon betroffen). Zusammen mit Materialabtrag an der Schiene verändert sich durch das verschlissene Radprofil der Rad-Schiene-Kontakt – veränderte Kontaktspannungen und Schlupf sind die Folge davon, weiters wird die äquivalente Konizität beeinflusst (siehe auch 2.2, S. 4).

Diese Art von Verschleiß führt zur Gefahr von Laufflächenschäden am Rad und Fahrflächen- bzw. Fahrkantenrissen an der Schiene.

- *Laufflächenschäden durch reine Rollkontaktermüdung*

Hierbei handelt es sich um Ermüdungsschäden ohne martensitische Umwandlung des Gefüges an der Radoberfläche.

- *Laufflächenschäden durch Rollkontaktermüdung*

Darunter sind Ermüdungsschäden mit martensitischer Umwandlung durch thermischen Einfluss zu verstehen. Durch Wärmeeintrag in die Oberfläche durch große Reibleistung kann sich martensitisches Gefüge bilden, welches durch weitere zyklische Belastung Gefahr läuft auszubrechen.

In der europäischen Norm EN 15313 sind unter Anhang C verschiedene Arten von Radschäden gelistet. Jene, die die Räder und nicht Radsätze bzw. Radsatzwellen betreffen, sind in Anhang 1 ersichtlich⁴⁶.

⁴⁵ Mädler, „Der Rad-Schiene-Kontakt – Werkstoffeinsatz aus Systemsicht“, 181–85.

⁴⁶ Austrian Standards International, „EN 15313 - Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Radsatzinstandhaltung“, 65–89.

2.4.2 Schäden an der Schiene

Im Betrieb treten an den Schienen – wie auch an den Rädern – verschiedene Schäden auf. Grob lassen sich diese Schäden einteilen in:

- Verschleißbedingte Schäden
 - o Verschleiß als Funktion des Bogenradius
 - o Schlupfwellen
- Schäden durch Rollkontaktermüdung
 - o Head Checks
- weitere, wie
 - o Squats
 - o Riffel
 - o Schleuderstellen
 - o Schienenbruch

Betrachtet man die Bogenfahrt eines Schienenfahrzeuges und lässt den Radius des Bogens immer enger werden, beginnt bei Unterschreitung eines bestimmten Radius (400 ... 600 m – abhängig vom Fahrzeug, dessen Zustand und der Möglichkeit zur Radialstellung der Radsätze im Fahrzeug bzw. Drehgestell) der Spurkranz des bogenäußeren Rades eines Radsatzes an der Schiene anzulaufen. Dies geschieht, wenn kein Sinuslauf mehr möglich ist, weil die Längendifferenz Δl der Rollbahnen der Räder auf den Schienen größer ist als die Längendifferenz $\Delta r * 2\pi$ der Umfänge basierend auf den Rollkreisradien der Räder, also wenn:

$$\Delta r * 2\pi - \Delta l \leq 0 \quad (1)$$

Mit diesem Anlaufen unter einem bestimmten Anlaufwinkel geht großer **Verschleiß an der Außenschiene** einher. Gleichzeitig tritt an der Innenschiene ein periodisches schlupferzeugendes Torsionsschwingen des bogeninneren Rades auf, welches aus der starren Verbindung der beiden Räder durch die Radsatzwelle und den unterschiedlichen Bogenradien resultiert. Dies führt zu sogenannten **Schlupfwellen**, durch Schlupf und plastischer Verformung erzeugte Wellen an der Schienenoberfläche mit Wellenlängen von 150 – 450 mm und Amplituden bis 1 mm⁴⁷. Das Auftreten der Schlupfwellen ist abhängig von der Steifigkeit des Oberbaus, z.B. kann der Einsatz von Schwellenbesohlung die

⁴⁷ Six und Rosenberger, „Schadensbilder auf der Schiene/am Rad“, 18.

Steifigkeit derart verändern, sodass Schlupfwellen verringert oder gar vermieden werden. Die beiden genannten Schienenschäden (Verschleiß der Außenschiene und Schlupfwellen auf der Innenschiene) entstehen unter normalen Betriebsbedingungen an Schienen in Bögen mit Radien kleiner einem Grenzradius, bei dem das Anlaufen beginnt. Um die Haltbarkeit von Schienen (und auch Rädern) zu vergrößern, werden Spurkranzschmieranlagen an Lokomotiven (und selten auch ortsfeste Schmieranlagen) eingesetzt, welche den Verschleiß im Kontakt zwischen Schienenkopf und Radkranz verringern.⁴⁸

Der Schädigungsmechanismus *Rollkontaktermüdung* führt (unter anderem) zu sogenannten **Head Checks** (HC). Dabei handelt es sich um Risse an der Fahrkante, meist an der Außenschiene – bei hoher Traktion treten HC auch im geraden Gleis auf. Seit der flächendeckenden Umstellung auf Drehstromantriebe im Jahr 2005 und einhergehender Veränderung der Schlupfregelung der Lokomotiven treten HC im österreichischen Eisenbahnnetz regelmäßig auf. Die seitdem auftretenden großen Schlupfraten und Traktionskräfte sind verantwortlich für Rissbildung an der Schienenoberfläche.

Werden diese Risse nicht mittels Schienenschleifen abgetragen, können die durch HC verursachten Anrisse zu Trümmerbrüchen der Schiene führen. Diese bergen großes Unfallpotential und sind durch präventive Instandhaltung zu konterkarieren.⁴⁹

Ein weiterer möglicher Schaden einer Schiene, mitunter auch ausgehend von RCF-bedingten Schäden, sind sogenannte **Squats**. Dabei handelt es sich um nierenförmige Eindrückungen am Fahrspiegel und von dort ausgehende Risse an und unter der Oberfläche. Squats können als Systemversagen eingestuft werden. Auch dieser Fehler kann bei Nichtbeseitigung zum Schienenbruch führen.⁵⁰

Eine bebilderte Übersicht der Schienenschäden befindet sich in Anhang 2 (S. VII).

⁴⁸ Veit, „Persönliche Kommunikation“.

⁴⁹ Veit.

⁵⁰ Stock, „Wheel-Rail Damage Mechanisms“, 34; Veit, „Persönliche Kommunikation“.

3 Studien und Untersuchungen

In der Vergangenheit wurden zahlreiche Tests und Untersuchungen des Rad-Schiene-Kontakts hinsichtlich Werkstoffverhalten, Verschleiß, Ermüdung usw. durchgeführt. In den folgenden Kapiteln wird zuerst auf die angewendeten Testmethoden theoretisch näher eingegangen. Danach folgen eine Beschreibung sowie ein Vergleich von einigen ausgewählten Untersuchungen. Besonderer Fokus wird dabei auf den **Radverschleiß** gelegt. Deshalb werden auch nur Untersuchungen für den Vergleich herangezogen, die den Verschleiß radseitig behandeln. Um eine aussagekräftige Gegenüberstellung zu erzielen, wird auch der Schienenverschleiß berücksichtigt und in den Vergleich miteinbezogen.

Andere Schädigungsmechanismen wie z. B. RCF-bedingte Risse sind teilweise in den Untersuchungsergebnissen angeführt, werden in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht näher behandelt.

3.1 Angewendete Test- und Prüfmethoden

Zur Untersuchung des Verhaltens verschiedener Werkstoffe im System *Rad-Schiene* werden in der Literatur unterschiedliche Testmethoden und Prüfstände beschrieben. In den nachfolgenden Abschnitten werden drei davon näher erklärt.

3.1.1 Zweiseiben-Test (Amsler-Test)

Eine einfache und bereits seit knapp 100 Jahren etablierte Testmethode für tribometrische Untersuchungen ist der Zweiseiben-Test, auch Amsler-Test genannt. Es können verschiedene Bewegungsarten modelliert werden: Rollen, Gleiten und Wälzen.⁵¹

Zur Untersuchung des Rad-Schiene-Kontaktes am Zweiseiben-Prüfstand rollen zwei Prüfkörper mit den definierten Randbedingungen

- Drehzahlen,
- daraus resultierend Schlupf,
- Normalkraft,

⁵¹ Grebe, *Tribometrie - Anwendungsnahe tribologische Prüftechnik als Mittel zur erfolgreichen Produktentwicklung*, 89.

- bei nicht achsparallelen Berührflächen resultierender Axialkraft
- sowie Schmierung bzw. Kühlung

aufeinander ab.

Die Prüfkörper können gleiche oder unterschiedliche Durchmesser aufweisen. Bei manchen der Prüfstände wird der Schlupf bei nicht veränderlichem Drehzahlverhältnis über unterschiedliche Prüflingsdurchmesser eingestellt.

Bei der Modellierung des Rad-Schiene-Kontaktes mittels Zweiseiben-Prüfstand besteht ein hoher Abstraktionsgrad. Es wird lediglich das Werkstoffverhalten unter definierten Bedingungen geprüft, nicht das Verhalten des Werkstoffes in einem Rad-Schiene-System. Aufgrund der dort auftretenden Kontaktsituation, welche sich von idealer Berührung am Prüfstand deutlich unterscheidet, kann das Verhalten der Systempartner im realen Kontakt deutlich abweichen. Dies muss bei der Betrachtung bzw. Evaluierung der Ergebnisse von Zweiseiben-Tests unbedingt berücksichtigt werden.

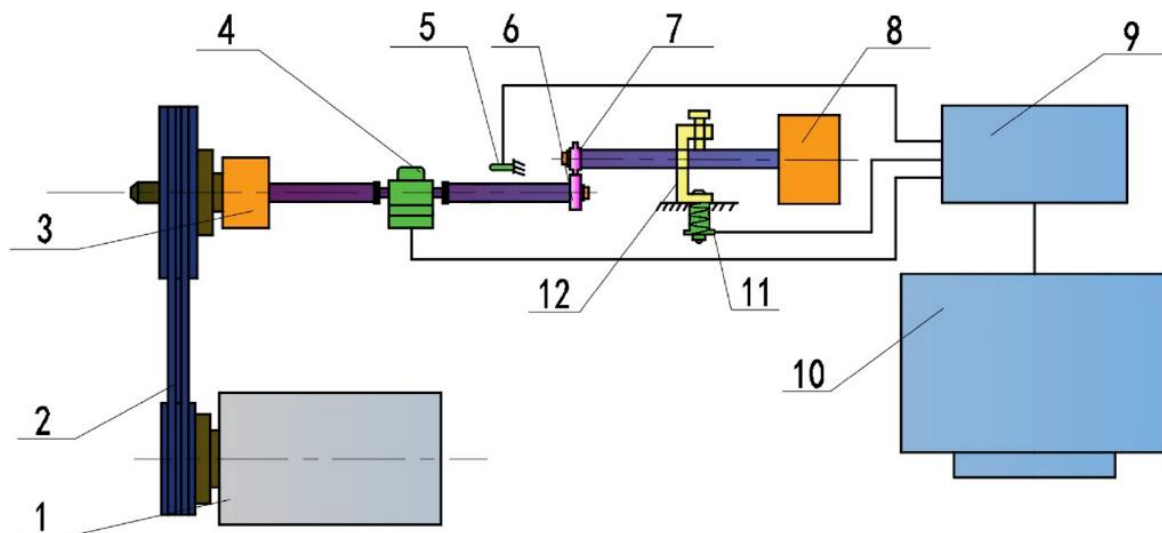


Abbildung 20: Schema eines Zweiseiben-Prüfstandes⁵²

In Abbildung 20 ist der schematische Aufbau eines Zweiseiben-Prüfstandes zu sehen.

Dabei entsprechen folgende Ziffern den genannten Bauteilen:

⁵² Hu u. a., „Investigation on wear and rolling contact fatigue of wheel-rail materials under various wheel/rail hardness ratio and creepage conditions“, 2.

3 Studien und Untersuchungen

1	Antriebsmotor
2	Antriebsriemen
3, 8	Getriebe
4	Drehmomentsensor
5	Drehzahlsensor
6	Unterer Prüfling
7	Oberer Prüfling
9	Controller
10	Computer
11	Lastsensor
12	Vorgespannte Feder

Hu u. a. zeigen in Abbildung 21 mögliche Positionen und Orientierungen in Rad und Schiene, aus denen die Prüffrollen ausgearbeitet werden können. Weiters sind typische Abmessungen der Prüflinge dargestellt.

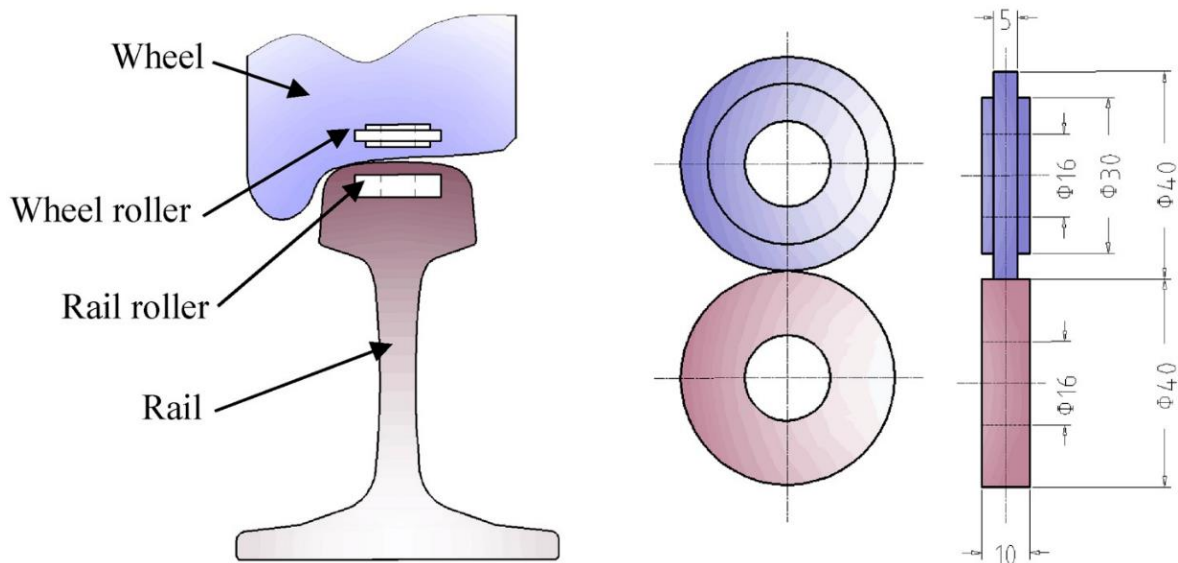


Abbildung 21: mögliche Position der Prüffrollen und deren Abmessungen⁵³

Ein weiteres Beispiel für eine Zweiseiben-Prüfmaschine erwähnen *Fletcher et al.* in Form der SUROS-Maschine, schematisch zu sehen in Abbildung 22 (S. 28).

⁵³ Hu u. a., 2.

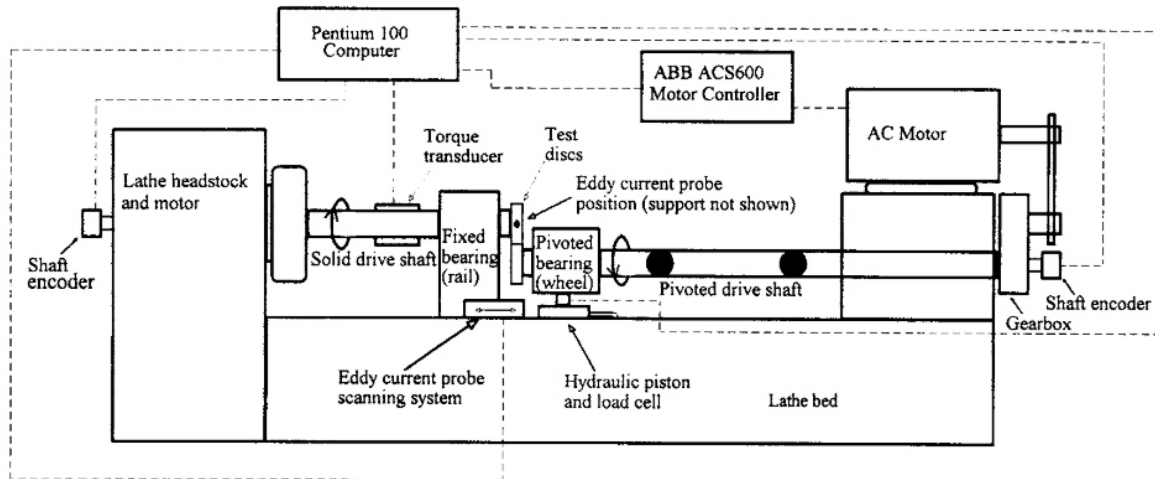


Abbildung 22: SUROS-Maschine⁵⁴

Die dazugehörigen Proben sind in Abbildung 23 abgebildet, die möglichen Positionen und Orientierungen der Prüflinge in Rad und Schiene in Abbildung 24.

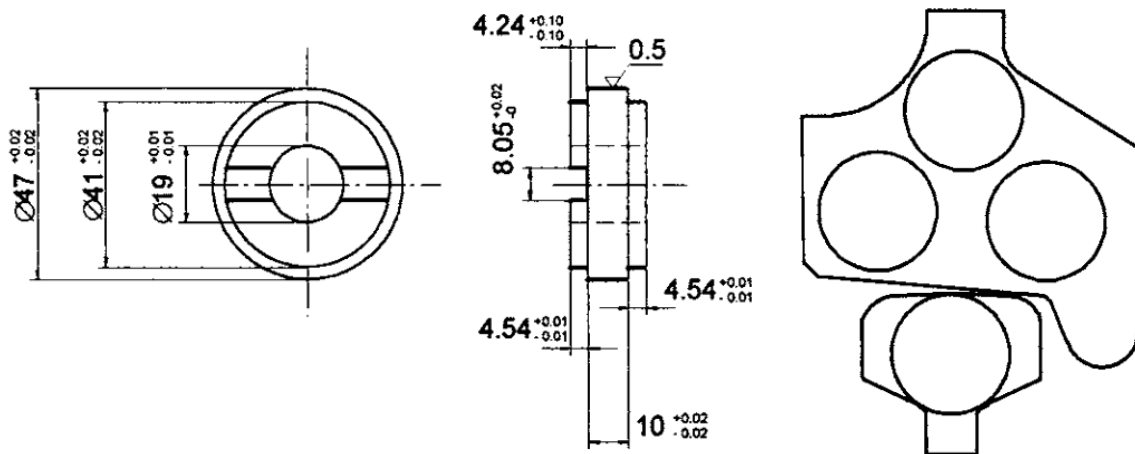


Abbildung 23: Geometrie der SUROS-Prüflinge⁵⁵

Abbildung 24: Position der SUROS-Prüflinge⁵⁶

Hierbei fällt auf, dass die Orientierung der Achsrichtungen der Prüfrollen in den ursprünglichen Werkstücken (Rad und Schiene) eine andere ist als im vorigen Beispiel dargestellt (siehe Abbildung 21, S. 27). Die bei der Herstellung durch notwendige Umformung durch Schmieden oder Walzen des Werkstoffes oder Anwendung von Wärmebehandlungsprozessen entstandene Anisotropie bzw.

⁵⁴ Fletcher und Beynon, „The influence of lubricant type on rolling contact fatigue of pearlitic rail steel“, 301.

⁵⁵ Fletcher und Beynon, 302.

⁵⁶ Fletcher und Beynon, 302.

Inhomogenität kann sich deshalb auf die Eigenschaften der Prüfrollen auswirken.

Grebe u. a. beschreiben den Versuch, den Rad-Schiene-Kontakt auf einem Zweischeiben-Prüfstand durch Veränderung der Probengeometrien realistischer abzubilden. Dadurch kann seitliches Anlaufen des Spurkranzes simuliert werden.⁵⁷

Abbildung 25 zeigt die dabei verwendete Probenform sowie den Berührungspunkt.

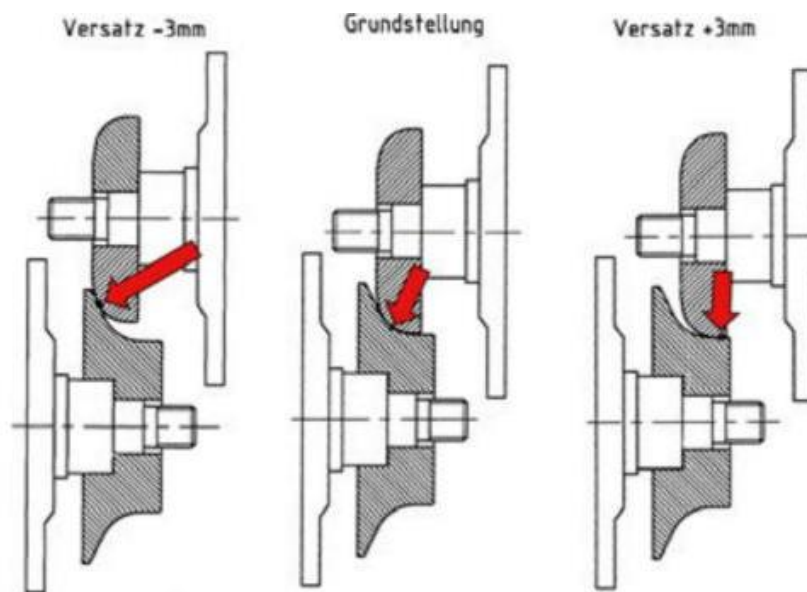


Abbildung 25: Simulation des Rad-Schiene-Kontaktes⁵⁸

Hierbei auftretende Berührgeometrien sowie die vorhandenen Spannungen liegen näher am tatsächlichen Rad-Schiene-Kontakt als bei Verwendung von zuvor gezeigten zylindrischen Prüfrollen.

Die zwischen zylindrischen Rollen entstehende Linienberührung kann mittels Hertz'scher Theorie und den zugehörigen Gleichungen beschrieben werden. In Abbildung 26 (S. 30) sind die Grundlagen der Berechnung des Kontaktes notiert.⁵⁹

⁵⁷ Grebe und Feinle, „Verschleißreduzierung an Rädern und Schienen durch Spurkranzschmierstoffe und angepasste Werkstoffpaarungen“, 51.

⁵⁸ Grebe, *Tribometrie - Anwendungsnahe tribologische Prüftechnik als Mittel zur erfolgreichen Produktentwicklung*, 89.

⁵⁹ Hertz, „Über die Berührung fester elastischer Körper“; Czichos und Santner, „Tribologische Beanspruchung“, 47.

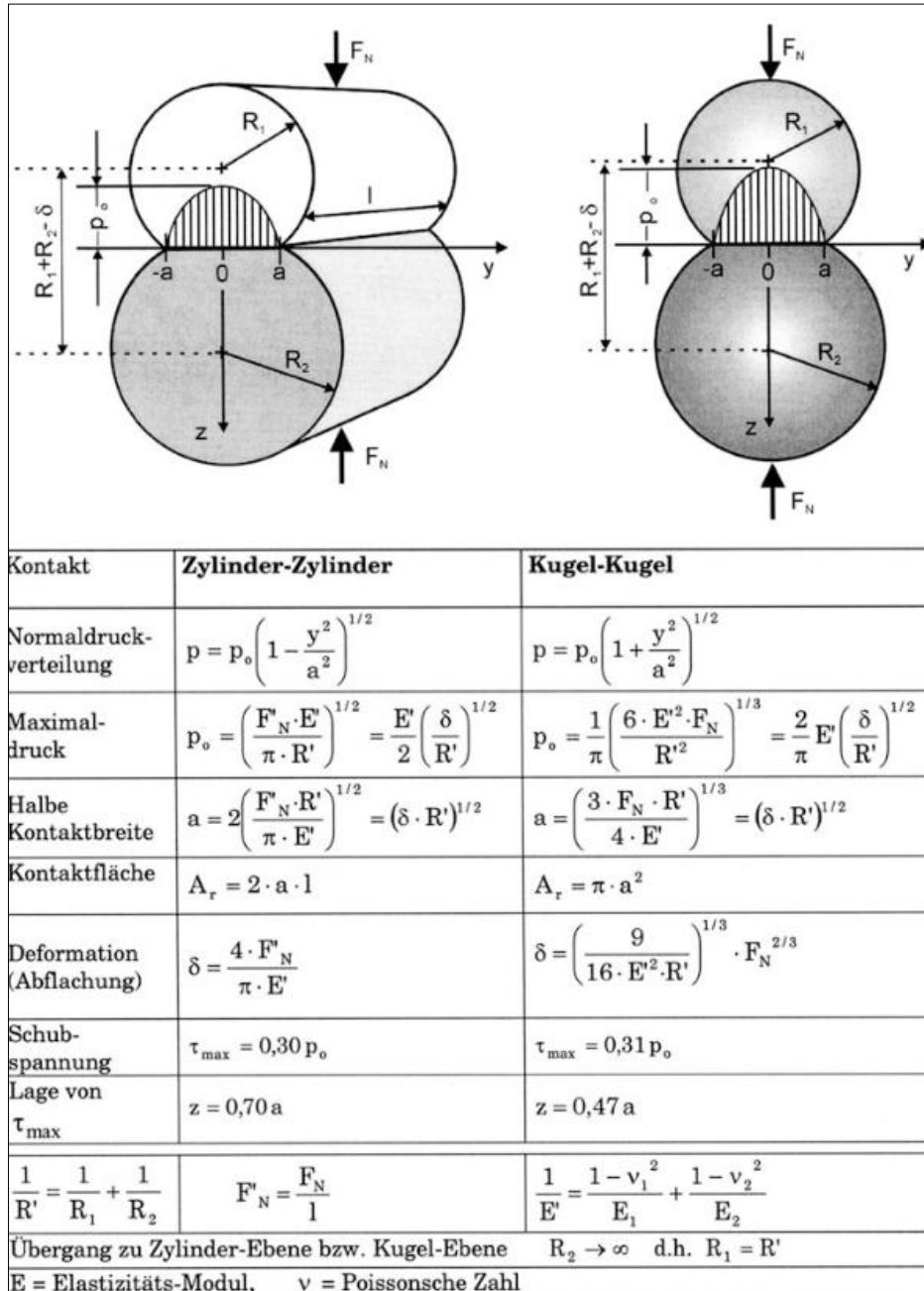


Abbildung 26: Berechnungsgrundlagen zur Hertz'schen Theorie⁶⁰

Abschließend ist zu erwähnen: weder Prüfmaschinen noch Prüfrollen sind einheitlich ausgebildet. Deshalb ist es unerlässlich, bei Gegenüberstellungen sowohl das verwendete Equipment als auch Probengeometrien und -ursprung in die Evaluierung miteinzubeziehen.

⁶⁰ Czichos und Santner, „Tribologische Beanspruchung“, 47.

3.1.2 Rad-Schiene-Prüfstand

Eine weitere Möglichkeit der Untersuchung des Systems *Rad-Schiene* ist die Verwendung eines Rad-Schiene-Prüfstandes. Es lässt sich der Kontakt zwischen Rad und Schiene dabei realitätsnah abbilden. Zu beachten ist, dass es sich trotz der guten Abbildung des realen Rad-Schiene Kontaktes um ein Modell handelt: beispielsweise ist die Schienenlagerung am Prüfstand idealisiert ausgeführt und bildet damit nicht die reale Situation ab.

Je nach Ausführung des Prüfstandes müssen bei der Belastung bzw. Dynamik des Kontaktes mehr oder weniger Einschränkungen in Kauf genommen werden. Rad-Schiene-Prüfstände lassen sich in zwei Bauweisen einteilen, welche nachfolgend beschrieben werden: Linearprüfstände sowie Rollprüfstände.

3.1.2.1 Linearprüfstand

Am Standort Donawitz der *voestalpine Schiene GmbH* wird ein in Eigenentwicklung konstruierter Rad-Schiene-Prüfstand betrieben. Zur Entwicklung von Schienenwerkstoffen sind Materialtests notwendig. Um diese in kurzer Zeit von wenigen Tagen durchführen zu können, werden sie statt im Gleis, wo die erforderliche Zeit einige Jahre betragen kann, am Prüfstand vollzogen.⁶¹

Das Prinzip des in Abbildung 27 (S. 32) gezeigten Prüfstandes umfasst eine auf einem linear beweglichen Wagen fixierte Schienenprobe und ein belastbares rollendes Rad. Die Lastkräfte in vertikaler und horizontaler Richtung werden über das Rad in das System eingeleitet. Dadurch auftretende Reaktionskräfte erzeugen Schädigungen wie Verschleiß und Rollkontaktermüdung.

Die Lastsituation kann je nach gewünschten Prüfparametern angepasst werden, wie auch der Anlaufwinkel. Damit lässt sich enge Bogenfahrt, wie sie beispielsweise im Nahverkehr vorkommt, simulieren. Die Einbauneigung der Schiene kann variiert werden (1:20, 1:40). Weiters können Schlupfsituationen durch Drehmoment auf das Rad erzeugt werden. Damit kann ein breites Spektrum an Kontaktsituationen und Schädigungen abgebildet werden.

In Tabelle 6 sind die technischen Daten des Prüfstandes gelistet.

⁶¹ Technischer Kundendienst voestalpine, „TechText - Rad-Schiene Prüfstand“.

Tabelle 6: Technische Daten des Rad-Schiene-Prüfstandes der voestalpine⁶²

Vertikalkraft:	10 ... 500 kN
Querkraft:	5 ... 159 kN
Überrolllänge:	200 ... 1600 mm
Schienenlänge:	500 ... 2000 mm
Raddurchmesser:	500 ... 1500 mm
Schienenprofile:	Sämtliche Vignol-, Rillen- und Zungenprofile



Abbildung 27: Rad-Schiene-Prüfstand der voestalpine GmbH⁶³

Bei der *DB Systemtechnik GmbH* sind in Brandenburg-Kirchmöser zwei verschiedene Linearprüfstände im Einsatz. Der „Rad-Schiene-Prüfstand B – Linearprüfstand“ (siehe Abbildung 28, S. 34) kann eine einzelne Schiene sowie ein einzelnes Rad aufnehmen. Der Einsatz liegt bei Untersuchungen des Rad-Schiene-Kontaktes unter Einbringung von Längskräften hinsichtlich Verschleiß oder Erprobung von Werkstoffen und Profilen.⁶⁴

⁶² Technischer Kundendienst voestalpine, 5.

⁶³ Technischer Kundendienst voestalpine, 3.

⁶⁴ DB Systemtechnik GmbH und Goebel, „Prüfeinrichtungen“.

3 Studien und Untersuchungen

Am selben Standort wird außerdem der „Rad-Schiene-Prüfstand A“ (siehe Abbildung 29, S. 34) betrieben, welcher entweder als Linear- oder als Rollprüfstand eingesetzt werden kann. Als Linearprüfstand kann auch hier ein einzelner Rad-Schiene-Kontakt geprüft werden. Hier liegt der Fokus ebenfalls auf Verschleißuntersuchungen sowie Werkstoffproben.⁶⁵

Rad- und Schienenwerkstoffe sowie -profile können variiert und je nach Untersuchung angepasst werden. Bogenfahrten können durch Querkräfte bzw. Schrägstellung simuliert werden. Damit lässt sich die Belastung des Rad-Schiene-Kontaktes gut abbilden. Der Nachteil von Linearprüfständen besteht in der fehlenden Dynamik: Abrollgeschwindigkeiten in der Größenordnung von 2 m/s sind möglich, was zwar zu einer hohen Lastbeanspruchung durch bis zu mehrere tausend Überrollungen pro Stunde führt, jedoch keine Beobachtung von dynamischen Effekten zulässt.

Die technischen Daten der beiden eben genannten Prüfstände sind Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Technische Daten der Prüfstände der DB⁶⁶

	DB Prüfstand B	DB Prüfstand A
<i>Rad:</i>		
Durchmesser:	640 ... 1250 mm	800 ... 920 mm
Werkstoff und Profil:	variabel	variabel
<i>Schiene:</i>		
Länge:	1,2 ... 1,4 m	-
Werkstoff und Profil:	variabel	variabel
<i>Parameter:</i>		
Lastzyklen:	5000 h ⁻¹	1000 h ⁻¹
Radsatzlast:	bis 40 t	bis 40 t
Längskraft:	bis 34 kN	-
Querkraft:	bis 60 kN	bis 20 kN
Gleisbögen:	120 m ... ∞	300 m ... ∞

⁶⁵ DB Systemtechnik GmbH und Goebel.⁶⁶ DB Systemtechnik GmbH und Goebel.



Abbildung 28: Rad-Schiene-Prüfstand B der DB⁶⁷



Abbildung 29: Rad-Schiene-Prüfstand A (linear) der DB⁶⁸

⁶⁷ DB Systemtechnik GmbH und Goebel; Foto von Christian Bedschinski.

⁶⁸ DB Systemtechnik GmbH und Goebel; Foto von Andreas Assfalg.

3.1.2.2 Rollprüfstand

Der Rad-Schiene-Prüfstand A der *DB Systemtechnik GmbH* lässt ebenso die Verwendung als Rollprüfstand zu. Hierbei werden ganze Lauf- oder Treibradsätze eingespannt und gegen Schienenrollen abgerollt. Durch die Gegebenheit, dass die Schienenrollen ein bestimmtes Schienenmodell in einer definierten Profil- und Einbausituation (R260, 60E2, 1:40) vorgeben, können nur die Räder verändert werden. Deshalb lassen sich auf dem Rollprüfstand nur unter großem Aufwand, nämlich Bereitstellung unterschiedlicher Schienenrollen, Schlüsse von der Schienengüte auf den Radverschleiß ziehen.

Beim Radhersteller Lucchini, beheimatet in Italien, wird der „BU300 Rollenprüfstand“ betrieben, berichten *Cantini u. a.* Das Schema ist in Abbildung 30 zu sehen, der ganze Prüfstand in Abbildung 31 (S. 36).

Auf Rollprüfständen lassen sich neben dynamischen Versuchen, wie z. B. akustische Untersuchungen und Dauerfestigkeitsprüfungen, auch Simulationsvalidierungen durchführen. Dabei können Geschwindigkeiten von bis zu 300 km/h simuliert werden.

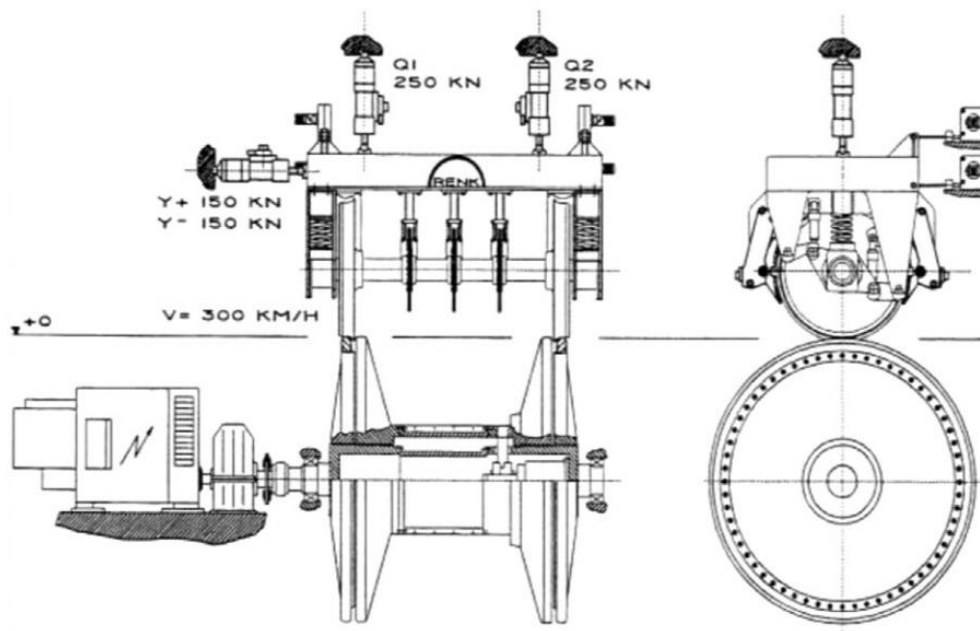


Abbildung 30: Schema des BU300 Rollenprüfstandes von Lucchini⁶⁹

⁶⁹ Cantini und Cervello, „The competitive role of wear and RCF: Full scale experimental assessment of artificial and natural defects in railway wheel treads“, 327.

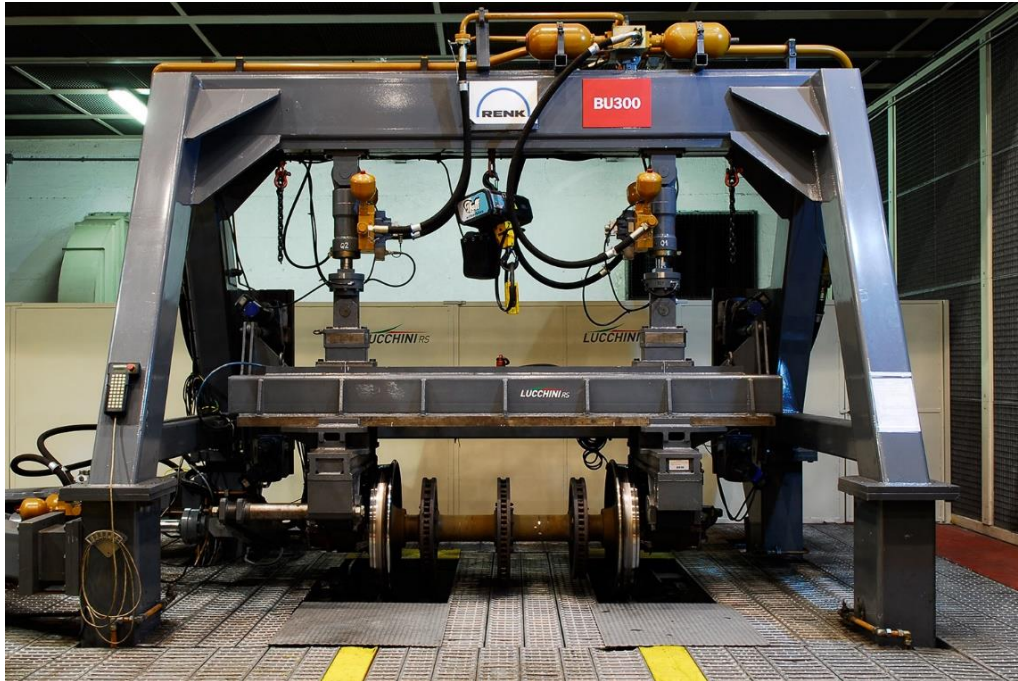


Abbildung 31: Rollenprüfstand BU300 bei Lucchini⁷⁰

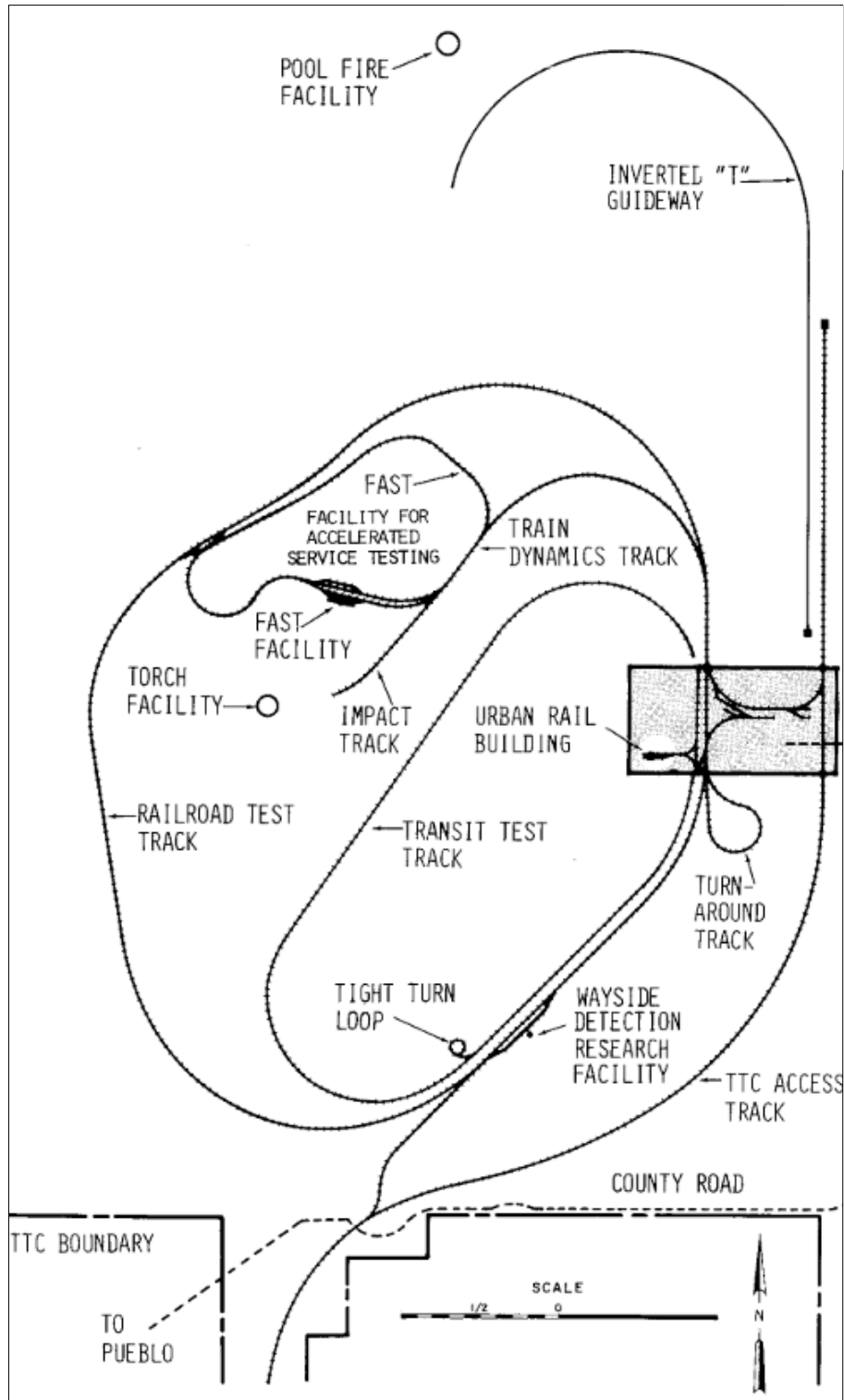
3.1.3 Gleis-Test

Für die Untersuchung von Rad-Schiene-Systemverschleiß eignen sich Tests im Streckennetz nur bedingt: Schienenverschleiß kann gut beobachtet werden, auch die auftretende Belastung kann bestimmt werden. Der Radverschleiß ist ebenfalls gut zu bestimmen (relevant für Instandhaltungsmaßnahmen); die Randbedingungen, unter welchen der Verschleiß entsteht, sind auf der Radseite nicht zu bestimmen. Es ist nicht nachvollziehbar, über welche Schienen(güten) in welchen Einbausituationen ein Rad abgerollt ist. Um den Systemverschleiß unter nachvollziehbaren Randbedingungen bestimmen zu können, ist die Notwendigkeit einer Teststrecke gegeben. Nur dort kann sichergestellt werden, dass eindeutig bestimmbare Prüfparameter vorliegen.

Das Transportation Technology Center (TTCI) bei Pueblo, Colorado (USA) ist eine Eisenbahnteststrecke mit einer Gesamtlänge von 77 km unterteilt in sieben Abschnitte. *Steele u.a.* berichteten von Verschleißtests am TTCI im Zuge der Heavy Haul Conference 1982⁷¹ (siehe 3.2.4, S. 60).

⁷⁰ Lucchini RS, „DYNAMISCHE PRÜFUNGEN AN RADSÄTZEN ROLLER RIG“.

⁷¹ Steele und Reiff, „Rail - It's behavior and relationship to total system wear“.

Abbildung 32: Layout des TTCI (1981)⁷²

In Abbildung 32 ist das Gelände des TTCI aus dem Jahre 1981 zu sehen.

⁷² Torpey, Ruggles, und Spencer, „Transportation Test Center - Rail Transit Services“, 10.

Die o. g. Verschleißtests wurden auf der FAST-Anlage unter definierten Bedingungen (Achslast, Einbausituation der Schiene etc.) durchgeführt. Dabei wurden Ergebnisse hinsichtlich Verschleiß und Schädigung erzielt.

In Deutschland wurden laut *Mädler u. a.* Verschleißtests an Schienen im Streckennetz der DB durchgeführt. Dabei wurde der Verschleiß jedoch ausschließlich auf der Schienenseite erfasst, nicht an den Rädern.⁷³

3.2 Vergleich der Untersuchungen

Nachfolgend werden die in Tabelle 8 gelisteten Untersuchungen aufgezeigt und verglichen. Zuvor wird der Fokus auf theoretische Überlegungen zum Verschleiß allgemein bzw. zu Verschleiß im Rad-Schiene-System gelegt.

Tabelle 8: Übersicht der Untersuchungen

Nr.	Test
ZST1	Zweischeiben-Test DB Systemtechnik Brandenburg-Kirchmöser (D)
ZST2	Zweischeiben-Test Railway Technical Centre, Derby (UK)
ZST3	Zweischeiben-Test R&D Centre for Iron & Steel, Steel Authority of India, Ranchi
ZST4	Zweischeiben-Test Department of Mechanical Engineering, University of Sheffield (UK)
ZST5	Zweischeiben-Test Southwest Jiaotong University, Chengdu (China)
ZST6	Zweischeiben-Test University of Science and Technology, Beijing (China)
ZST7	Zweischeiben-Test Fachhochschule Mannheim (D)
RSPS1	Rad-Schiene-Prüfstand Voestalpine Donawitz (A)
RSPS2	Rad-Schiene-Prüfstand DB Systemtechnik Brandenburg-Kirchmöser (D)
GT1	Gleis-Test TTCI Pueblo (Colorado/USA)
WT1	Lineartribometer-Test AC ² T research GmbH Wr. Neustadt

Im Anhang beigefügt ist eine komplette Übersicht über die Untersuchungen inkl. zugehöriger Literatur in Form einer Domain-Mapping-Matrix (siehe Anhang 5, Blatt 2).

⁷³ Mädler u. a., „Rail Materials - Alternatives and Limits“, 6–8.

3 Studien und Untersuchungen

Tabelle 9 zeigt die untersuchten Werkstoffpaarungen und die Häufigkeit ihres Vorkommens.

Tabelle 9: Übersicht untersuchter Werkstoffpaarungen

Radgüte / Schienengüte	R7	R8	ER9H	B6	C64M	geschmiedetes Rad	CL60	Class C	Class D
R260	4	2	1	1	1				
R320Cr	1			1					
R350HT	4	2	1	1	1				
R400HT	3	1	1		1				
1000B	1			1					
1100B	1			1					
1400B	1			1					
B430	1								
TB1400	1								
BS11									1
UICA									1
UICB									1
1% Chrome									1
RS-1						1			
RS-2						1			
RS-3						1			
MSS Clad		1							
A		1							
B		1							
U71Mn	1	1					1	1	1
U75V	1	1					1	1	1
PG4	1	1					1	1	1
PG5	1	1					1	1	1

3.2.1 Theoretische Überlegungen

Abgesehen von verschiedenen physischen Verschleißuntersuchungen gibt es auch theoretische Überlegungen zur Beschreibung von Verschleiß allgemein, aber auch auf das Rad-Schiene-System bezogen.

Archard entwickelte ein empirisches Modell zur Beschreibung von adhäsivem Verschleiß:

$$W = k_{ad} * \frac{F_N * s}{H} \quad (2)$$

Dabei ist W der adhäsiv bedingte volumetrische Verschleiß, F_N die Normalkraft, s der Gleitweg und k_{ad} ein Faktor für die Wahrscheinlichkeit zur Entstehung von Verschleißpartikeln. H bezeichnet die Härte des jeweilig betrachteten Systempartners, d. h. der Verschleiß des **weicheren Kontaktpartners** wird ausschließlich durch seine **eigene Härte** bestimmt.⁷⁴

Rabinowicz hat analog zum Verschleißgesetz von Archard einen Ansatz für abrasiven Verschleiß aufgestellt:

$$W = k_{ab} * \frac{F_N * s}{H} \quad (3)$$

Der Faktor k_{ab} steht hier für die Geometrie des abrasiv abgetragenen Kornes. Die bestimmende Härte H ist auch hier – analog zum abrasiven Verschleiß – der Wert des **weicheren** Systempartners.⁷⁵

Pointner beschreibt ein bereits von *Steele u. a.* entwickeltes Modell⁷⁶: Dieses basiert auf vier einfachen Basisgleichungen, die die vorherrschenden Zusammenhänge beschreiben (siehe (4), (5), (6) und (7)). Es stützt sich auf die Beobachtungen von *Rabinowicz*, der Aussagen zum Zusammenhang der Verschleißraten beider Kontaktpartners und deren Härten traf⁷⁷.

1. Materialeigenschaften:

*„Der Verschleiß eines Werkstoffes ist umgekehrt proportional zum Quadrat des Härteverhältnisses der Werkstoffe.“*⁷⁸

$$\text{Verschleiß} \sim \frac{1}{(\text{Härteverhältnis})^2} \quad (4)$$

⁷⁴ Archard, „Contact and rubbing of flat surfaces“; Sommer, Heinz, und Schöfer, *Verschleiß metallischer Werkstoffe*, 20.

⁷⁵ Rabinowicz, *Friction and Wear*, 136–40; Sommer, Heinz, und Schöfer, *Verschleiß metallischer Werkstoffe*, 21–22.

⁷⁶ Steele und Reiff, „Rail - It's behavior and relationship to total system wear“.

⁷⁷ Rabinowicz, „Wear Coefficients - Metals“, 501–2.

⁷⁸ Pointner, „Überlegungen zum Verschleiß im Rad-Schiene-System“, 1.

2. Geometrische Bedingungen (unter konstanter Last):

„Der Verschleiß ist umgekehrt proportional zur Kontaktfläche.“⁷⁹

$$\text{Verschleiß} \sim \frac{1}{\text{Kontaktfläche}} \quad (5)$$

3. Konfiguration des Verschleiß-Systems:

„Die Größe der Kontaktfläche hängt von der relativen Härte der Verschleißpartner ab.“⁸⁰

Für den weicheren Kontaktpartner gilt:

$$\text{Kontaktfläche} \sim \frac{1}{\text{Härteverhältnis}} \quad (6)$$

Für den härteren Kontaktpartner gilt:

$$\text{Kontaktfläche} \propto \text{Härte} \quad (7)$$

Wenn die oben genannten Gleichungen unter der Annahme konstanter Radhärte auf das System *Rad-Schiene* angewendet werden, sind zwei Bereiche zu unterscheiden, wie in Abbildung 33 (S. 43) zu erkennen:

- Entweder das Rad ist härter als die Schiene (links),
- oder die Schiene ist härter als das Rad (rechts).

Im Bereich **„Rad härter als die Schiene“**, unter Einfluss von Material und Kontaktfläche, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\text{Schieneverschleiß} \sim \frac{1}{\left(\text{Härteverhältnis} \frac{\text{Schiene}}{\text{Rad}}\right)^2} * \frac{1}{\text{Kontaktfläche}} \quad (8)$$

Durch Einsetzen der obigen Gleichungen bleibt:

$$\text{Schieneverschleiß} \sim \frac{1}{\text{Härteverhältnis} \frac{\text{Schiene}}{\text{Rad}}} \quad (9)$$

⁷⁹ Pointner, 2.

⁸⁰ Pointner, 3.

Durch analoges Vorgehen für den Radverschleiß ergibt sich dieser zu:

$$\text{Radverschleiß} \sim \left(\text{Härteverhältnis} \frac{\text{Schiene}}{\text{Rad}} \right) \quad (10)$$

In diesem Bereich ändert sich die Kontaktfläche bei Variation des Härteverhältnisses (Schienenhärte). Wichtig ist, die Radhärte ist für sämtliche Betrachtungen als konstant anzunehmen. Es ergeben sich damit lineare Zusammenhänge zwischen dem Härteverhältnis und den Verschleißraten: direkt für den Radverschleiß, umgekehrt für den Schienenverschleiß

Für den Bereich „**Schiene härter als das Rad**“ ergeben sich folgende Abhängigkeiten:

$$\text{Schienenverschleiß} \sim \frac{1}{\left(\text{Härteverhältnis} \frac{\text{Schiene}}{\text{Rad}} \right)^2} \quad (11)$$

$$\text{Radverschleiß} = \text{konst.} \quad (12)$$

Hier bleibt die Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene bei Veränderung des Härteverhältnisses konstant, somit bleibt nur der Einfluss der Schienenhärte übrig. Die Radverschleißrate bleibt dabei konstant, da sie nur durch die Radhärte bestimmt wird und diese bei vorliegender Betrachtung als gleichbleibend definiert ist. Für die Schienenverschleißrate ergibt sich eine quadratische Abhängigkeit vom Härteverhältnis Schiene/Rad. In diesem Bereich bleibt die Größe der Kontaktfläche bei Erhöhung der Schienenhärte konstant.⁸¹

An dieser Stelle festzuhalten ist, dass dieses Modell auf diversen Annahmen hinsichtlich des Berührkontaktes (oben genannte Zusammenhänge) basiert. Es ist nicht belegt, inwieweit diese Annahmen tatsächlich zutreffen. Hierzu wären Versuche notwendig, um die getroffenen Annahmen zu verifizieren. Insbesondere sind genannte Zusammenhänge teilweise vom Prinzip der Härteprüfung

⁸¹ Pointner, „Überlegungen zum Verschleiß im Rad-Schiene-System“; Steele und Reiff, „Rail - It's behavior and relationship to total system wear“; Pointner, „High strength rail steels-The importance of material properties in contact mechanics problems“.

3 Studien und Untersuchungen

abgeleitet (harter Prüfkörper tritt in weiches Material ein). Dem zugrunde liegt plastische Verformung, welche im Rad-Schiene-Kontakt nicht vorherrschend ist. Weiterführend wird hauptsächlich der Bereich des Härteverhältnisses >1 (hierzulande übliche Werkstoffkombinationen) betrachtet und speziell der Radverschleiß betrachtet.

Trägt man die vorliegenden Zusammenhänge gemeinsam in ein Diagramm mit doppellogarithmischer Achsenskalierung ein, entsteht Abbildung 33.

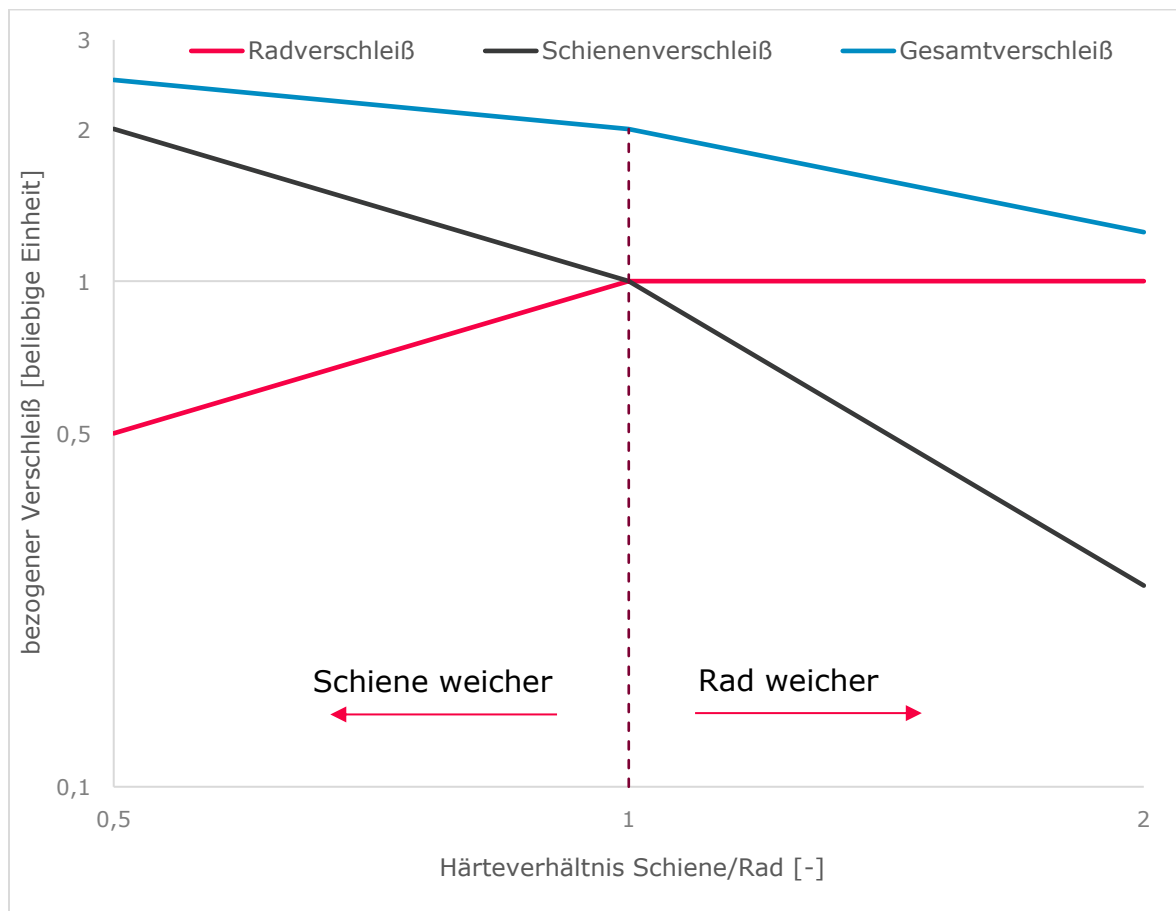


Abbildung 33: theoretisches Verschleißmodell⁸²

Laut *Mädler u. a.* sind die in Europa üblichen Räder typischerweise weicher als die eingesetzten Schienen (siehe Markierungen in Abbildung 34, S. 44). Es ist zu erkennen, dass die Härtebereiche der Schienen knapp bis deutlich über denen der Räder liegen. Damit befinden sich die Härteverhältnisse von den

⁸² nach: Steele und Reiff, „Rail - It's behavior and relationship to total system wear“, 149; Pointner, „Überlegungen zum Verschleiß im Rad-Schiene-System“, 14.

üblichen Rad-Schiene-Kombinationen im Schaubild in Abbildung 33 auf der rechten Seite im Bereich des weicheren Rades. In diesem Bereich, in dem das Härteverhältnis von Schiene zu Rad größer eins ist, ist der Radverschleiß unabhängig vom Härteverhältnis.

Das bedeutet, der Radverschleiß wird durch den **weicheren** Systempartner – dem Rad selbst – bestimmt. Dieses Teilergebnis stimmt mit den zuvor genannten Verschleißmodellen von Archard und Rabinowicz überein.

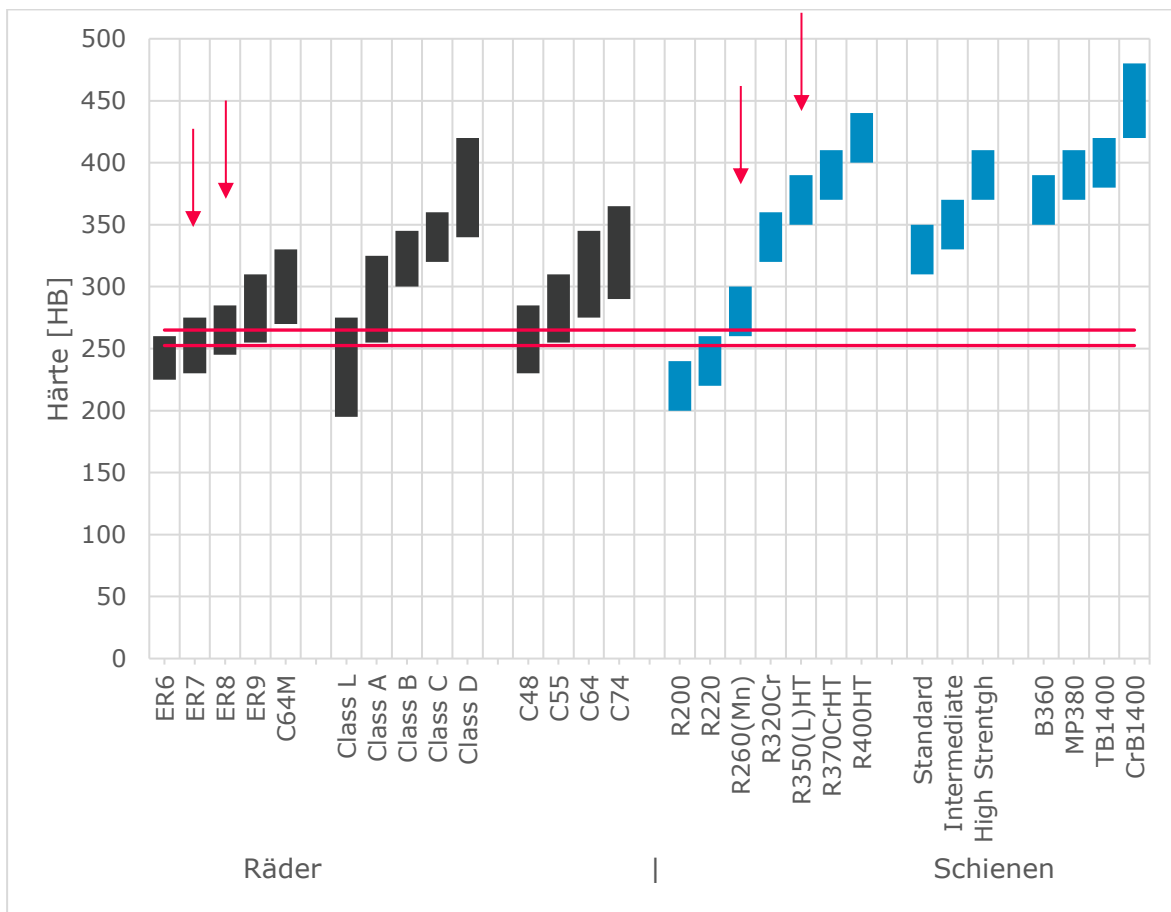


Abbildung 34: Härtebereiche von Rädern und Schienen⁸³

Zusammengefasst ist basierend auf den genannten theoretischen Überlegungen die Aussage zu treffen, dass der Verschleiß des weicheren Materials hauptsächlich vom weicheren Systempartner selbst beeinflusst wird. In herkömmlichen (in Europa üblichen) Rad-Schiene-Kontaktsystemen ist dies das Rad. Daraus lässt sich der Schluss ziehen, dass – **basierend auf den hier beschriebenen**

⁸³ nach: Mädler und Heyder, „Schienenfahrzeugtagung Dresden“, 14.

Annahmen und Modellen – der **Radverschleiß nicht von der Schienenhärte abhängt** und damit auch nicht von der Schienengüte.

3.2.2 Zweiseiben-Tests

Nachfolgend werden die durchgeführten Zweiseiben-Tests (siehe auch 3.1.1, S. 25) gegenübergestellt. Die Ergebnisse der Tests ZST1 bis ZST4 werden in Kapitel 3.3 (S. 63) verglichen. Die Ergebnisse von ZST6 und ZST7 können aus im jeweiligen Abschnitt angeführten Gründen nicht in einen Vergleich miteinbezogen werden.

3.2.2.1 ZST1 – Zweiseiben-Test DB Systemtechnik Brandenburg-Kirchmöser

Mädler u. a. berichten u. a. von Zweiseiben-Tests für die Erprobung von Schienenwerkstoffen. Diese wurden bei der *DB Systemtechnik GmbH* in Brandenburg-Kirchmöser durchgeführt. Ziel war es, das grundsätzliche Verhalten von Schienenstählen unter definierten Prüfbedingungen auf einem Amsler-Prüfstand zu untersuchen. Die zusammengefassten Randbedingungen der Tests sind in Tabelle 10 (S. 46) aufgelistet.

Ringförmige Proben mit 46 mm Außendurchmesser der zylindrischen Prüffläche wurden mit konstantem Schlupf von 3 %, resultierend aus den Drehzahlen von 450 rpm für die Schienen- und 436 rpm für die Radprobe, unter konstanter Radialbelastung von 3935 N gegeneinander abgerollt. Diese Kraft erzeugt einen Kontaktdruck von 1250 N/mm² nach dem Modell Hertz'scher Linienberührung (siehe Abbildung 26, S. 30). Zur Kühlung des Kontaktbereiches während der Versuchsdurchläufe wurde alle 20 Sekunden ein Tropfen Wasser auf die Kontaktfläche aufgebracht. Weitere Angaben zur Oberflächenbehandlung bzw. Oberflächenrauigkeit sowie der Orientierung der Proben im Ausgangsbau teil sind nicht genannt. Die Versuchsdauer ist mit 100.000 Überrollungen angegeben. Als Ergebnis sind die Verschleißmassen über die gesamte Versuchsdauer für die unterschiedlichen Werkstoffpaarungen angegeben. Um Vergleichbarkeit

herzustellen, wurden diese Ergebnisse in eine durchschnittliche Verschleißrate pro überrollter Länge umgerechnet (siehe Gleichung (16), S. 64).⁸⁴

Weiters ist diese Versuchsreihe in einem Projektbericht der *Newcastle University* sowie in einer Literaturrecherche von *Burstow* erwähnt.⁸⁵

Tabelle 10: ZST1 Übersicht⁸⁶

Durchmesser		
innen:	20	mm
außen (Abrolldurchmesser)	46	mm
Drehzahlen		
Radprobe:	436	rpm
Schienenprobe:	450	rpm
Schlupf:	3	%
Belastung		
Normalkraft:	3935	N
Kontaktdruck:	1250	N/mm ²
Versuchsdauer		
Überrollungen:	100000	Zyklen
Schmierung/Kühlung		
Medium:	Wasser	
Menge/Intervall:	1	Tropfen/20 s
Oberfläche		
Rauigkeit:	unbekannt	
Werkstoffe		
Rad 1:	R7	
Rad 2:	B6	
Schiene 1:	R260	
Schiene 2:	R320Cr	
Schiene 3:	R350HT	
Schiene 4:	1000B	
Schiene 5:	1100B	
Schiene 6:	1400B	

⁸⁴ Mädler u. a., „Schienenwerkstoffe - Alternativen und Grenzen“, 7–9; Mädler u. a., „Rail Materials - Alternatives and Limits“, 5–7.

⁸⁵ Newcastle University, „Improved model for the influence of vehicle conditions (wheel flats, speed, axle load) on the loading and subsequent deterioration of rails“, 18–22; Burstow, „Wheel / rail hardness and total 'system' wear“.

⁸⁶ nach: Mädler u. a., „Schienenwerkstoffe - Alternativen und Grenzen“, 7–9; Mädler u. a., „Rail Materials - Alternatives and Limits“, 5–7.

3.2.2.2 ZST2 - Zweiseiben-Test Railway Technical Centre, Derby (UK)

Bolton u. a. berichten über Zweiseiben-Tests zur Erforschung des Verschleißverhaltens von unterschiedlichen Rad-Schiene-Paarungen am *Railway Technical Centre* in Derby, UK. Die angewendeten Prüfparameter sind in Tabelle 11 (S. 48) gelistet.

Basis der Untersuchungen war eine Amsler-Prüfmaschine, bei der die untere Welle 1,104-mal schneller als die obere rotiert. Dadurch ergibt sich der Schlupf γ aus den Rollendurchmessern D_1 der Schienenprobe und D_2 der Radprobe zu:

$$\gamma = \frac{2 * (1,104 * D_2 - D_1)}{D_1 + 1,104 * D_2} \quad (13)$$

Der Durchmesser der Schienenprobe wurde mit 35 mm konstant gehalten, der der Radprobe für verschiedene Schlupfraten entsprechend angepasst. Die Last wurde mittels Spiralfeder, welche eine Rolle gegen die andere drückt, aufgebracht. Der maximale Kontaktdruck lässt sich wie folgt mittels vereinfachter Formel berechnen (siehe dazu auch Abbildung 26, S. 30):

$$P_0 = 0,418 * \left(\frac{L * E}{R} \right)^{1/2} \quad (14)$$

Dabei ist P_0 der maximale Kontaktdruck, E der Elastizitätsmodul, R der Ersatzradius $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$ der Probenradien und L die Linienlast im Kontakt. Die Kontaktbreite war in allen Fällen mit 5 mm festgelegt. Die Achsen der Probenrollen sind wie folgt in den Ausgangsbauteilen (Schienenköpfe und Räder) orientiert:

- Schienenprobe: Probenachse parallel zur Längsachse der Schiene
- Radprobe: Probenachse parallel zu einer Tangente an die Lauffläche

Die Probenoberflächen wurden auf eine mittlere Rautiefe von 0,5 μm geschliffen und vor jedem Testlauf mit Isopropanol gereinigt. Um die Oberflächentemperatur zu kontrollieren und damit die Bildung von Oxidschichten zu vermeiden, kam ein kontinuierlicher Strom getrockneter Luft auf beide Proben zum Einsatz.⁸⁷

⁸⁷ Bolton und Clayton, „Rolling—sliding wear damage in rail and tyre steels“.

Tabelle 11: ZST2 Übersicht⁸⁸

Durchmesser		
Radprobe:	variabel; um Schlupf einzustellen	
Schienenprobe:	35	mm
Drehzahlen		
Radprobe:	400	rpm
Schienenprobe:	362,32	rpm
Schlupf:	1, 2, 3, 5, 7 & 10	%
Belastung		
Kontakttdruck:	500 – 1300	N/mm ²
Schmierung/Kühlung		
Medium:	Luft	
Menge/Intervall:	kontinuierlich	
Oberfläche		
Rauigkeit:	0,5	µm
Werkstoffe		
Rad 1:	Class D	
Schiene 1:	BS11	
Schiene 2:	UICA	
Schiene 3:	UICB	
Schiene 4:	1% Chrome	

Zur Bestimmung der Verschleißraten wurden die Proben in regelmäßigen Abständen vom Prüfstand entfernt und gewogen. Nach einer gewissen Anzahl von Überrollungen stellt sich Steady-State-Verschleiß, quasi als stationärer Zustand mit konstantem Verschleiß pro Zyklus, ein. Dem zuvor geht ein Einlaufprozess, in dem sich der Verschleiß pro überrollter Länge ändert. Die in den Ergebnissen angeführten Verschleißraten beziehen sich auf den gleichmäßigen Verschleißzustand nach der Einlaufphase.

Die erste der beiden genannten Testserien zeigt als – hier relevantes – Ergebnis Verschleißraten von Schienen- und Radprobe in Abhängigkeit von Schlupf, welcher im Bereich von 1-10 % variiert wurde, und Kontaktdruck (500-

⁸⁸ nach: Bolton und Clayton.

1300 N/mm²). Diese Ergebnisse werden in der vorliegenden Arbeit behandelt (siehe 3.3, S. 63).⁸⁹

Auch diese Untersuchungen werden von *Burstow* in einer Übersichtsarbeit erwähnt.⁹⁰

3.2.2.3 ZST3 - Zweiseiben-Test R&D Centre for Iron & Steel, Steel Authority of India, Ranchi

Von *Singh u. a.* gibt es Berichte von Zweiseiben-Tests zur Verschleißuntersuchung im Roll-Gleit-Kontakt von verschiedenen Schienenstählen in Kombination mit einem Radstahl. Diese Untersuchungen wurden am *Research & Development Center for Iron and Steel* der *Steel Authority of India Ltd.* in Ranchi, Indien durchgeführt. Ziel war es, den Effekt unterschiedlicher Härten und des damit in Zusammenhang stehenden Lamellenabstandes des Perlits im Roll-Gleit-Kontakt sowie unter reinem Gleiten darzustellen. Letzteres wird in der vorliegenden Arbeit nicht weiter behandelt. Eine Übersicht über die Testbedingungen liefert Tabelle 12 (S. 50).

Die Achsrichtungen der Schienenproben in der Ausgangsschiene ist längs zur Schienenlängsrichtung, die der Radproben parallel zu Tangenten an den Radumfang. Beide Proben wiesen Durchmesser von 40 mm auf, die Kontaktbreite wird mit 10 mm angegeben. Die Formel zur Berechnung des Kontaktdruckes mit bereits eingesetzter Bedingung für den Vergleichsradius ergibt sich zu:

$$P_0 = 0,59 * \left(\frac{L * E}{R} \right)^{1/2} \quad (15)$$

Siehe dazu auch (14) bzw. Abbildung 26 (S. 30). Der zur Berechnung herangezogene Wert für den Elastizitätsmodul E ist mit 212.000 N/mm² angegeben. Der Radius R wird hier aufgrund derselben Abmessungen beider Rollen einfach eingesetzt. Dies erklärt den Unterschied der Formel im Vergleich zu (14) auf Seite 47. Der Bereich des angewendeten Kontaktdruckes für die unterschiedlichen Untersuchungsreihen erstreckt sich von 312 N/mm² bis

⁸⁹ Bolton und Clayton, 148.

⁹⁰ Burstow, „Wheel / rail hardness and total 'system' wear“.

696 N/mm². Variiert wurde außerdem die Drehzahl der angetriebenen Radprobe (200 rpm und 400 rpm). Der Schlupf wurde über alle Versuchsreihen konstant bei 10% gehalten. Die mittlere Oberflächenrauigkeit wurde durch Schleifen auf 1 µm eingestellt. Um Eintrag von Verschleißpartikeln in die Berührfläche zu vermeiden, wurden die Testflächen der Proben während der Tests kontinuierlich mittels Wolltuch vom Abtrag befreit.⁹¹

Tabelle 12: ZST3 Übersicht⁹²

Durchmesser		
Radprobe:	40	mm
Schienenprobe:	40	mm
Kontaktbreite:	10	mm
Drehzahlen		
Radprobe:	200 - 400	rpm
Schienenprobe:	180 - 360	rpm
Schlupf:	10	%
Belastung		
Kontaktdruck:	312 - 696	N/mm ²
Versuchsdauer		
Zeitdauer:	1	Stunde
Überrollungen:	12000/24000	Zyklen
Schmierung/Kühlung		
Medium:	keines/trocken	
Oberfläche		
Rauigkeit:	1	µm
Werkstoffe		
Rad 1:	geschmiedetes Rad	
Schiene 1:	RS-1	Standard-Schienenengüte in Indien
Schiene 2:	RS-2	Ersatz für UIC-860-90 Güte
Schiene 3:	RS-3	Werkstoff in Erprobung

Die Ergebnisse sind als Massenverlust pro überrollter Länge für unterschiedliche Kontaktdrücke sowohl für die Radprobe als auch die Schienenprobe angegeben. Die Versuchsdauer wurde jeweils mit einer Stunde konstant gehalten, weshalb

⁹¹ Singh und Singh, „Wear investigation of wheel and rail steels under conditions of sliding and rolling-sliding contact with particular regard to microstructural parameters“.

⁹² nach: Singh und Singh.

3 Studien und Untersuchungen

je nach Drehzahl unterschiedliche Überrollungen pro Versuch angeführt sind: 12000 Überrollungen bei einer Drehzahl von 200 rpm respektive 24000 bei 400 rpm. Neben den Härten der Werkstoffe sind auch die damit in Zusammenhang stehenden Lamellenabstände der perlitischen Schienenstähle mit den dazugehörigen Ergebnissen (Verschleißraten der Schienenstähle, deshalb in dieser Arbeit nicht dargestellt) verknüpft.

Die genannten Untersuchungen werden weiters in den Veröffentlichungen der *Newcastle University* und *Burstow* erwähnt.⁹³

3.2.2.4 ZST4 - Zweiseiben-Test Department of Mechanical Engineering, University of Sheffield (UK)

Christoforou u. a. berichten von Zweiseiben-Tests zur Erprobung von Premium-Schienenstählen, durchgeführt vom *Department of Mechanical Engineering* an der Universität von Sheffield, Großbritannien. Damit sollten Verschleißraten bei unterschiedlichen Schlupfraten zur Verschleißabschätzung unterschiedlicher Schienenstähle erarbeitet werden.

Die Tests wurden auf einer SUROS-Zweiseiben-Prüfmaschine (siehe 3.1.1, S. 25) durchlaufen, welche schematisch in Abbildung 35 dargestellt ist.

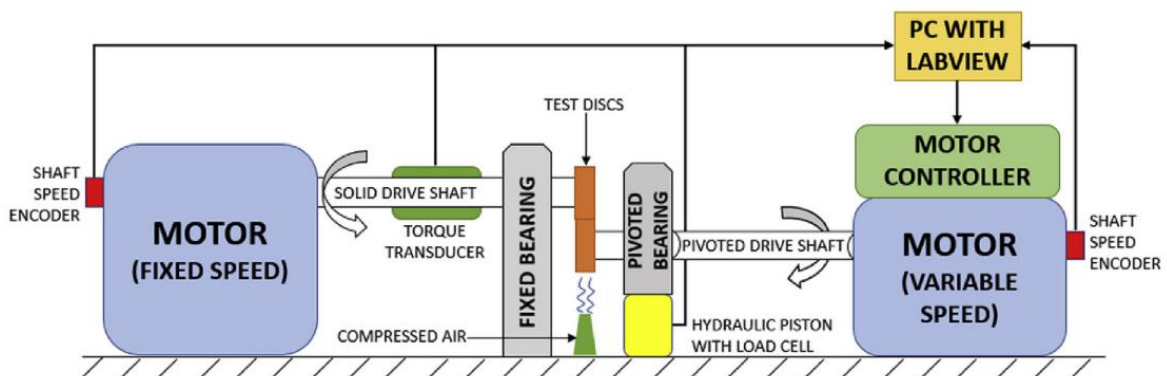


Abbildung 35: SUROS-Prüfmaschine⁹⁴

Die Orientierung der Prüfrollenachsen in den Ausgangswerkstücken ist, wie in Abbildung 36 zu erkennen, für die Schienenprobe in Schienenlängsrichtung und

⁹³ Newcastle University, „Improved model for the influence of vehicle conditions (wheel flats, speed, axle load) on the loading and subsequent deterioration of rails“; Burstow, „Wheel / rail hardness and total 'system' wear“.

⁹⁴ Christoforou, Fletcher, und Lewis, „Benchmarking of premium rail material wear“, 2.

für die Radprobe parallel zur Radachse (vgl. ZST2 in 3.2.2.2, S. 47 und ZST3 in 3.2.2.3, S. 49). Die auf der Maschine eingespannten Proben zeigt Abbildung 37.



Abbildung 36: Probenorientierung ZST4⁹⁵



Abbildung 37: Proben in SUROS-Maschine⁹⁶

Die Probendurchmesser sind jeweils mit 47 mm angegeben, die Kontaktbreite mit 10 mm. Zur Variation des Schlupfes wurde die Drehzahl der Radprobe von 404 rpm (entspricht 1% Schlupf) über 440 rpm (10% Schlupf) auf 480 rpm (20% Schlupf) verändert, während die der Schienenprobe konstant bei 400 rpm gehalten wurde. Der Kontaktdruck belief sich auf unveränderte 1500 N/mm².

Die durchschnittliche Härte der aus den R8-Radstahl gefertigten Proben betrug 300 HV bei 1 kg Belastung. Damit Abweichungen in der Fertigung die Tests nicht beeinflussen, wurden die Schienenstücke, aus denen die Probenrollen gefertigt wurden, zufällig aus verschiedenen Fertigungslosen ausgewählt. Dabei wurde die Härteverteilung am Umfang der Schienenproben berücksichtigt und mit den Ausgangsschienen verglichen (siehe Abbildung 38, S. 54).

Drei verschiedene Testreihen mit zuvor genannten Schlupfraten wurden durchgeführt:

⁹⁵ Christoforou, Fletcher, und Lewis, 3.

⁹⁶ aus: Christoforou, Fletcher, und Lewis, 3.

3 Studien und Untersuchungen

- 1% Schlupf: Versuchsdauer von 30.000 Überrollungen; Verschleißbestimmung alle 5000 Zyklen
- 10% Schlupf: Versuchsdauer von 10.000 Überrollungen; Verschleißbestimmung nach 1000, 2000, 3000 und 4000 Zyklen und am Testende
- 20% Schlupf: Versuchsdauer von 1000 Überrollungen, Verschleißbestimmung nach 500 Zyklen sowie am Versuchsende

Vor den Tests sowie nach jedem Wiegen wurden die Probenrollen in einem Aceton-Ultraschallbad gereinigt. Angaben zur Oberflächenbeschaffenheit sind nicht gegeben. In Tabelle 13 sind die Prüfparameter zusammengefasst.

Tabelle 13: ZST4 Übersicht⁹⁷

Durchmesser		
Radprobe:	47	mm
Schienenprobe:	47	mm
Kontaktbreite:	10	mm
Drehzahlen		
Radprobe:	404 - 480	rpm
Schienenprobe:	400	rpm
Schlupf:	1 - 20	%
Belastung		
Kontaktdruck:	1500	N/mm ²
Versuchsdauer		
Überrollungen:	1000/10000/30000	Zyklen
Schmierung/Kühlung		
Medium:	Luft	
Menge/Intervall:	kontinuierlich	
Werkstoffe		
Rad 1:	R8	
Schiene 1:	R260	
Schiene 2:	MSS Clad	R260 mit 1 mm Martensitschicht durch Laser-Auftragschweißen
Schiene 3:	R350HT	
Schiene 4:	A	mittlere RCF- & Verschleißresistenz
Schiene 5:	B	höchste RCF- & Verschleißresistenz

⁹⁷ nach: Christoforou, Fletcher, und Lewis, „Benchmarking of premium rail material wear“.

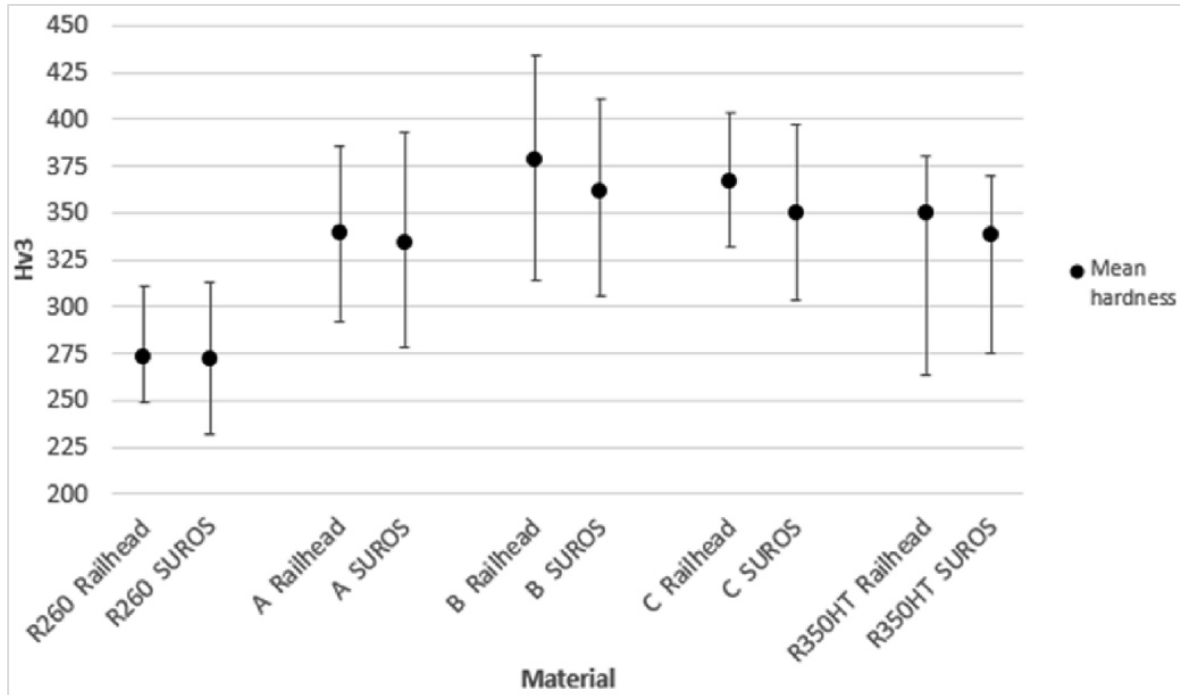


Abbildung 38: Härten der Schienenwerkstoffe und -proben von ZST4⁹⁸

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind Verschleißraten der Rad- und Schienenstähle für unterschiedliche Schlupfraten aufgetragen über die Versuchsdauer. Damit lässt sich die Änderung des Verschleißes bzw. der Verschleißrate über die Versuchsdauer darstellen (siehe 3.3, S. 63).⁹⁹

Neben *Christoforou u. a.* wird auch von *Lewis u. a.* über diese Versuchsreihen berichtet.¹⁰⁰

3.2.2.5 ZST5 – Zweiseiben-Test Southwest Jiaotong University, Chengdu (China)

Berichten von *Hu u. a.* zufolge wurden an der *Southwest Jiaotong University Chengdu* in China Zweiseiben-Tests von verschiedenen Werkstoffpaarungen für das System *Rad-Schiene* durchgeführt. Einflüsse der Anfangshärten, der Verfestigung während des Tests sowie des Härteverhältnisses fanden Berücksichtigung. Neben den hier weiter erläuterten Verschleißuntersuchungen wurden auch Rissbildung und -fortschritt betrachtet.

⁹⁸ Christoforou, Fletcher, und Lewis, 13.

⁹⁹ Christoforou, Fletcher, und Lewis, „Benchmarking of premium rail material wear“.

¹⁰⁰ Lewis u. a., „Investigation of the influence of rail hardness on the wear of rail and wheel materials under dry conditions (ICRI wear mapping project)“.

Tabelle 14 zeigt eine Übersicht über die Prüfparameter der Tests.

Tabelle 14: ZST5 Übersicht¹⁰¹

Durchmesser		
Radprobe:	50	mm
Schienenprobe:	50	mm
Kontaktbreite:	5	mm
Drehzahlen		
Radprobe:	495	rpm
Schienenprobe:	500	rpm
Schlupf:	1	%
Belastung		
Kontaktdruck:	1500	N/mm ²
Versuchsdauer		
Überrollungen:	25000	Zyklen
Werkstoffe		
Rad 1:	ER7	
Rad 2:	ER8	
Rad 3:	CL60	
Rad 4:	Class C	
Rad 5:	Class D	
Schiene 1:	U71Mn	chinesische Standardgüte
Schiene 2:	U75V	chinesische Standardgüte
Schiene 3:	PG4	Premiumgüte
Schiene 4:	PG5	Premiumgüte

Bei den hier beschriebenen Untersuchungen wurden die Kontaktparameter konstant gehalten (Kontaktdruck von 1500 N/mm², Schlupf 1%, Drehzahl von 500 rpm) und nur die Werkstoffe variiert, und zwar sowohl auf der Schienen- als auch auf der Radseite. Auch die Versuchsdauer war mit 25.000 Überrollungen für alle Werkstoffpaarungen dieselbe. Nach dieser Anzahl von Überrollungen ist zu erwarten, dass etwaige Einlaufvorgänge bereits abgeschlossen sind. Die verwendete Prüfmaschine ist der Typ MJP-30A chinesischer Bauart.

¹⁰¹ nach: Hu u. a., „Experimental study on wear properties of wheel and rail materials with different hardness values“; Hu u. a., „Investigation on wear and rolling contact fatigue of wheel-rail materials under various wheel/rail hardness ratio and creepage conditions“.

Angaben zur Oberflächenbeschaffenheit sowie zur Achsorientierung der Proben bezogen auf die Ausgangswerkstücke sind nicht genannt.

Als für die vorliegende Arbeit interessante Ergebnisse der Untersuchungen sind einerseits Verschleißraten pro überrollter Länge angegeben, andererseits Oberflächenhärten (vor und) nach den Tests.¹⁰²

3.2.2.6 ZST6 - Zweiseiben-Test University of Science and Technology Beijing (China)

Shi u. a. berichten von Zweiseiben-Tests für die Untersuchung des optimalen Härteverhältnisses zwischen Rad und Schiene, durchgeführt an der *University of Science and Technology Beijing* in China. Im Gegensatz zu den bisher genannten Untersuchungen wurde hierbei die Schienenhärte konstant gehalten und die Radhärte variiert. Deshalb sind die Ergebnisse dieser Tests nicht aussagekräftig hinsichtlich des Zusammenhanges zwischen Schienengüte und Radschädigung, welcher das zentrale Thema der vorliegenden Arbeit darstellt. Im Folgenden (Abschnitt 3.3, S. 63) werden die Ergebnisse dieses Tests nicht in den Vergleich einbezogen.¹⁰³

3.2.2.7 ZST7 - Zweiseiben-Test Fachhochschule Mannheim

Grebe u. a. erwähnen Zweiseiben-Tests zur Prüfung von Spurkranzschmiermitteln und angepassten Werkstoffpaarungen. Die Ergebnisse der Tests sind aus folgenden Gründen nicht in den Vergleich (siehe 3.3, S. 63) einzubeziehen:

- geschmierter Kontakt
- Schienengüten von Rillenschienen

Eine Besonderheit dieser Untersuchungen gilt es trotzdem hervorzuheben: Die verwendeten Probengeometrien des Amsler-Tests zielen darauf ab, den Rad-Schiene-Kontakt möglichst realitätsnah abzubilden. Die Form der Proben ist in Abbildung 39 gezeigt.¹⁰⁴

¹⁰² Hu u. a., „Experimental study on wear properties of wheel and rail materials with different hardness values“; Hu u. a., „Investigation on wear and rolling contact fatigue of wheel-rail materials under various wheel/rail hardness ratio and creepage conditions“.

¹⁰³ Shi u. a., „Hardness matching of rail/wheel steels for high-speed-train based on wear rate and rolling contact fatigue performance“.

¹⁰⁴ Grebe und Feinle, „Verschleißreduzierung an Rädern und Schienen durch Spurkranzschmierstoffe und angepasste Werkstoffpaarungen“.

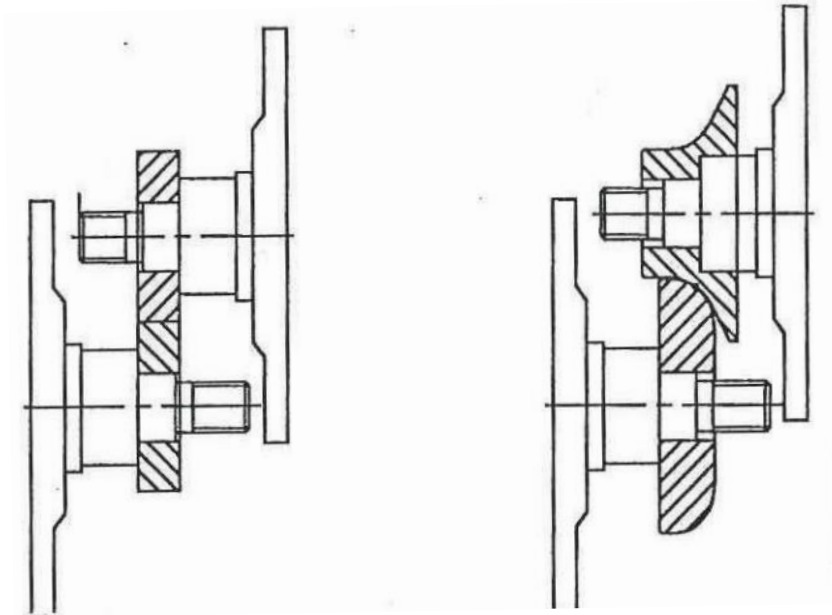


Abbildung 39: spezielle Probengeometrie des ZST7¹⁰⁵

Links ist die herkömmliche Anordnung bzw. Probengeometrie eines Zweischeiben-Tests gezeigt. Rechts hingegen ist die modifizierte Ausführung, zur Modellierung des Rad-Schiene-Kontaktes, zu erkennen (siehe dazu auch Abbildung 25, S. 29 bzw. 3.1.1, S. 25).

3.2.3 Rad-Schiene-Prüfstandtests

Nachfolgend wird auf zwei Versuchsreihen, durchgeführt auf Rad-Schiene-Prüfständen, eingegangen.

3.2.3.1 RSPS1 – Rad-Schiene-Prüfstandtest voestalpine Donawitz

Stock berichtet im Zuge einer Dissertation¹⁰⁶ von Rad-Schiene-Prüfstandtests verschiedener perlitischer und bainitischer Schienenwerkstoffe und einem Standardradwerkstoff unter trockenen und geschmierten Bedingungen. Für die vorliegende Arbeit sind nur die Ergebnisse hinsichtlich Verschleiß der trockenen Kontaktbedingungen von Relevanz. Durchgeführt wurden diese Untersuchungen am Rad-Schiene-Prüfstand der *voestalpine* in Donawitz (siehe 3.1.2.1, S. 31).

Tabelle 15 (S. 58) zeigt eine Übersicht über die Versuchsparameter.

¹⁰⁵ Grebe und Feinle, 51.

¹⁰⁶ Stock, „Influencing rolling contact fatigue and wear by different rail grades and contact conditions“.

Tabelle 15: RSPS1 Übersicht¹⁰⁷

Kontaktpartner		
Rad:	ÖBB R7 Güterwagenrad mit UIC ORE 1002 Radprofil	
Schienenprofil:	60E1	
Schienenneigung:	0	
Rollrichtung:	unidirektional	
Versuchslänge		
Überrollungen:	100000	Zyklen
Belastung		
Vertikallast:	23	t
	225,6	kN
Querlast:	4	t
	39,2	kN
Anlaufwinkel:	0	°
Temperatur (ca.):	25	°C
Werkstoffe		
Rad:	R7	
Schiene 1:	R260	
Schiene 2:	R350HT	
Schiene 3:	R400HT	
Schiene 4:	TB1400	Fabrikzustand
Schiene 5:	TB1400 (t)	1 h temperiert auf 550°C
Schiene 6:	B430	

Die einzelnen Tests wurden stets mit einer fabrikneuen Schiene sowie einem neuen oder reprofilierten Rad begonnen, die Oberfläche der Testpartner wurde dazu mit Reinigungsflüssigkeit gesäubert. Für einige Werkstoffpaarungen wurden mehrere Testreihen durchgeführt. Die angegebenen Ergebnisse dieser Tests sind die gemittelten Ergebnisse der einzelnen Versuche.

Als Ergebnisse der Untersuchungen sind Verschleißraten von Rad und Schiene als Verschleißfläche (also Querschnittsänderung des jeweiligen Profils) über die Versuchsdauer angegeben (siehe 3.3, S. 63).

Diese Untersuchungen werden in zahlreichen Literaturstellen erwähnt.¹⁰⁸

¹⁰⁷ nach: Stock.

¹⁰⁸ Technischer Kundendienst voestalpine, „TechText - Einfluss der Schienenhärte auf den Radverschleiß“; Stock, Eadie, und Oldknow, „Rail grade selection and friction management: a combined approach for

3.2.3.2 RSPS2 – DB Systemtechnik Brandenburg-Kirchmöser

Mädler u. a. nennen Rad-Schiene-Prüfstandsläufe zur Untersuchung von Werkstoffpaarungen für das System Rad-Schiene, durchgeführt von der *DB Systemtechnik GmbH* in Brandenburg-Kirchmöser. In Verwendung war dazu der Rad-Schiene-Prüfstand A mit Linearprüfeinheit (siehe 3.1.2.1, S. 31). Ziel dieser Untersuchungen war es, die Eignung von hochfesten Werkstoffen im Rad-Schiene-System und die Auswirkungen derer auf den jeweils anderen Systempartner.¹⁰⁹

In Tabelle 16 sind die Prüfparameter zusammengefasst.

Tabelle 16: RSPS2 Übersicht¹¹⁰

Kontaktpartner		
Radprofil:	S1002	
Schienenprofil:	60E2	
Versuchslänge		
Überrollungen:	100000	Zyklen
Gesamtbelastung:	2,4x10 ⁶	Lasttonnen
Belastung		
Vertikallast:	120	kN
Querlast:	10	kN
Anlaufwinkel:	5	mrad
	0,286	°
entsprechender Bogenradius:	700	m
Werkstoffe		
Rad 1:	ER7	
Rad 2:	ER8	
Rad 3:	C64M	
Schiene 1:	R260	
Schiene 2:	R350HT	
Schiene 3:	R400HT	

optimising rail-wheel contact"; Jörg und Stock, „Wärmebehandelte Schienengüte R400HT – Hochfeste Schienenstähle in Österreich und in der Schweiz"; Pietsch u. a., „Der Einsatz verschleißfester Schienenstähle im Bogen und deren Einfluss auf das Laufverhalten"; Jörg u. a., „Weiterentwicklung von Schienenstählen in Gesamtsystemsicht"; Stock und Pippan, „Rail grade dependent damage behaviour - Characteristics and damage formation hypothesis".

¹⁰⁹ Mädler und Heyder, „Schienenfahrzeugtagung Dresden"; Mädler und Heyder, „Weiches Rad und harte Schiene oder umgekehrt?"

¹¹⁰ nach: Mädler und Heyder, „Schienenfahrzeugtagung Dresden".

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind als Verschleißflächen der einzelnen Schienen- und Radwerkstoffe nach der kompletten Versuchsdauer angeführt.

3.2.4 Gleis-Tests

Steele u. a. berichteten im Zuge der zweiten *Heavy Haul Conference* im Jahr 1982 von Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses der Schiene auf den Systemverschleiß. Durchgeführt wurden diese Tests auf der Versuchsanlage des *TTCI* in Colorado (siehe 3.1.3, S. 36). Neben dem Verschleiß wurden Materialfluss, Verschweißungen sowie Ermüdung und Rissbildung untersucht.

Zu Beginn der Untersuchungen stehen, basierend auf *Rabinowicz'* Untersuchungen, theoretische Überlegungen. Diese finden sich auch in den Beschreibungen von *Pointner*, siehe 3.2.1 (S. 39)¹¹¹.

Die Ergebnisse der Verschleißmessungen an unterschiedlich eingebauten Schienen wurden auf vergleichbare Werte umgerechnet. Dies berücksichtigt verschiedene Kurvenradien, Überhöhungen etc. Vergleicht man die Untersuchungsergebnisse mit den zuvor getroffenen theoretischen bzw. mathematischen Überlegungen, bestätigen sich diese. Das tatsächliche Verhalten der Verschleißraten (bei konstanter Radhärte) folgt den erwarteten Trends, wenngleich auch mit stärkeren Ausprägungen als erwartet (siehe 3.3, S. 63).¹¹²

Auf das beschriebene theoretische Modell wird in der Literatur häufig verwiesen.¹¹³

3.2.5 Weitere Tests

Trausmuth u. a. berichten von Untersuchungen, durchgeführt bei der *AC²T research GmbH*, die sich von den bisher beschriebenen unterscheiden. Der Fokus hierbei liegt auf der Auswirkung von Schräglauf auf das Verschleißverhalten des Rad-Schiene-Systems.

¹¹¹ Pointner, „Überlegungen zum Verschleiß im Rad-Schiene-System“.

¹¹² Steele und Reiff, „Rail - It's behavior and relationship to total system wear“.

¹¹³ Shi u. a., „Hardness matching of rail/wheel steels for high-speed-train based on wear rate and rolling contact fatigue performance“; Lewis u. a., „Investigation of the influence of rail hardness on the wear of rail and wheel materials under dry conditions“; Pointner, „Überlegungen zum Verschleiß im Rad-Schiene-System“; Lewis u. a., „Investigation of the influence of rail hardness on the wear of rail and wheel materials under dry conditions (ICRI wear mapping project)“; Jörg u. a., „Weiterentwicklung von Schienenstählen in Gesamtsystemsicht“; Pietsch u. a., „Der Einsatz verschleißfester Schienenstähle im Bogen und deren Einfluss auf das Laufverhalten“; Stock und Pippan, „Rail grade dependent damage behaviour - Characteristics and damage formation hypothesis“.

Gestützt durch FEM-Simulationen wurde ein Modell entwickelt, das die reale Kontaktsituation des Rad-Schiene-Systems abbildet. Abbildung 40 zeigt das abgeleitete Modellsystem und die dort vorliegende Kontaktsituation.

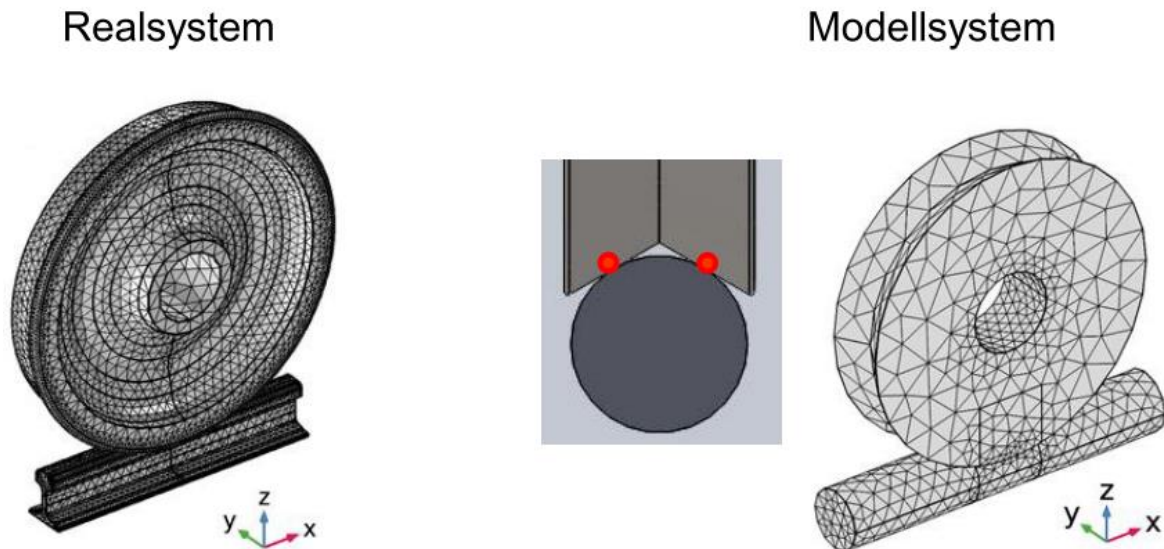


Abbildung 40: Ableitung des Modellsystems für WT1¹¹⁴

Das Prüfmodell wurde zur Testdurchführung auf einem Lineartribometer aufgebaut (siehe Abbildung 41, S. 62). Die Prüfrollen sind aus ganzen Rädern der Güten ER7 und ER9 gefertigt und wurden mit entsprechender Wärmebehandlung auf ein den Rädern ähnliches Härteniveau gebracht (siehe Abbildung 42, S. 62). Die vor den Tests gehärteten Prüfräder entsprechen ER7H und ER9H, im Gegensatz dazu steht das ungehärtete Referenzrad ER7G. Aus den Schienenköpfen von Schienen unterschiedlicher Güten (R260, R350HT und R400HT) wurden Prüfkörper in zwei unterschiedlichen Formen angefertigt (Abbildung 43, S. 62).

Die Versuchslänge ist mit 80.000 Zyklen angegeben. Es wurden verschiedene Versuchsreihen mit unterschiedlichen Werkstoffpaarungen sowie unterschiedlichen Schräglaufwinkeln (gerade, 0,3°, 0,6°) durchlaufen. Zur eingestellten Belastung liefert die durchsuchte Literatur leider keine Hinweise.

¹¹⁴ Trausmuth u. a., „Verschleiß- und Ermüdungsverhalten von Rad und Schiene“, 13.

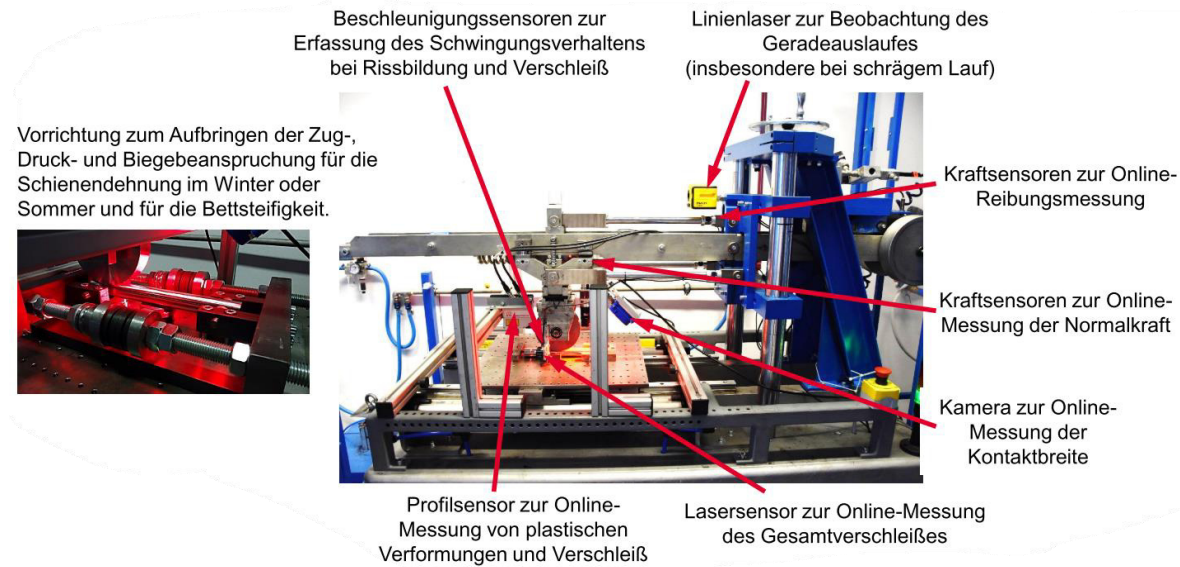


Abbildung 41: Versuchsaufbau WT1¹¹⁵

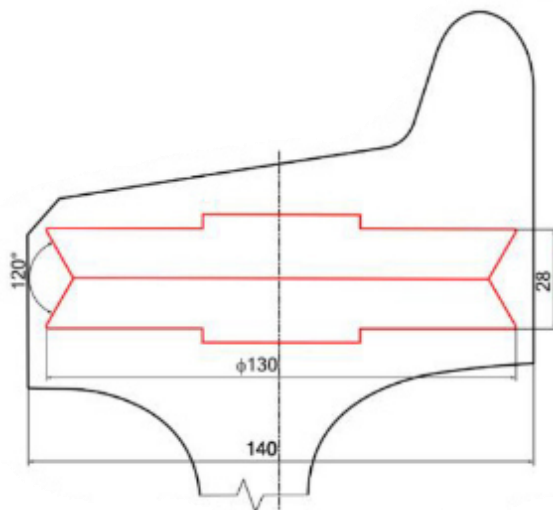


Abbildung 42: Radprobe WT1¹¹⁶

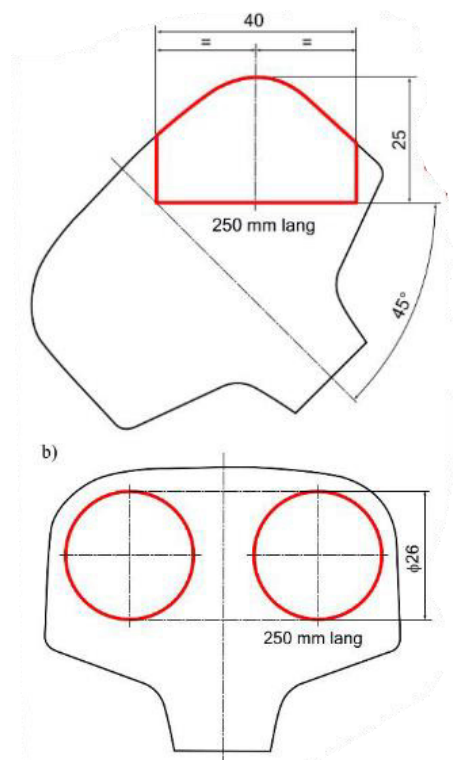


Abbildung 43: Schienenprobe WT1¹¹⁷

¹¹⁵ Trausmuth u. a., 17.

¹¹⁶ Trausmuth u. a., 19.

¹¹⁷ Trausmuth u. a., 20.

Tabelle 17 zeigt eine Übersicht über Parameter und geprüfte Werkstoffe.

Tabelle 17: WT1 Übersicht¹¹⁸

Versuchslänge		
Überrollungen:	80000	Zyklen
Belastung		
Schräglaufwinkel:	0; 0,3; 0,6	°
Werkstoffe		
Rad 1:	ER7R	Referenzprüfrad
Rad 2:	ER7H	gehärtet, ähnlich Eisenbahnrad
Rad 3:	ER9H	gehärtet, ähnlich Eisenbahnrad
Schiene 1:	R260	
Schiene 2:	R350HT	
Schiene 3:	R400HT	

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen sind als mittleres Verschleißvolumen pro Zyklus angegeben, sowohl für die Schienen- als auch die Radprobe (siehe 3.3).¹¹⁹

3.3 Vergleich der Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der zuvor beschriebenen Untersuchungen gezeigt. Je nach Test gibt es verschiedene Randbedingungen, von denen die Verschleißraten abhängig gemacht werden können. Die wichtigsten Erkenntnisse der jeweiligen Untersuchungsreihe sind hervorgehoben. Bei der Interpretation von Ergebnissen der Zweischeiben-Tests sei auf folgende Beobachtung hingewiesen: Bei einem Härteverhältnis nahe 1, ist es möglich, dass der gesamte Verschleiß nur an einer Probe auftritt.¹²⁰

Abbildung 44 (S. 64) zeigt das Resultat des ZST1. Hierbei handelt es sich um – aus Gründen der Vergleichbarkeit – umgerechnete Werte, bezogen auf die überrollte Länge. In der Literatur¹²¹ sind Absolutwerte der Verschleißmasse $V_{absolut}$ nach Versuchsende genannt. Die Umrechnung erfolgte nach Gleichung (16):

¹¹⁸ nach: Trausmuth u. a., „Verschleiß- und Ermüdungsverhalten von Rad und Schiene“.

¹¹⁹ Trausmuth u. a.; Trausmuth u. a., „Verschleiß- und Ermüdungsverhalten von Rad und Schiene bei betrieblichen Bedingungen unter Berücksichtigung zukünftiger Trends beim Materialeinsatz“.

¹²⁰ Brantner, „Persönliche Kommunikation“.

¹²¹ Mädler u. a., „Rail Materials - Alternatives and Limits“.

$$V_{pro\ Laenge} = V_{absolut} * \frac{1}{n_{Ueberrollungen} * d_{Pruefrolle} * \pi} \quad (16)$$

Dabei ist $n_{Ueberrollungen}$ die Anzahl der Umdrehungen der jeweiligen Probe und $d_{Pruefrolle}$ der Prüfrollendurchmesser. Damit ergibt sich $V_{pro\ Laenge}$ als durchschnittliche Verschleißmasse in μg pro überrollter Länge in m. Die angegebenen Verschleißmassen sind Mediane aus jeweils drei Versuchsreihen mit konstanter Schlupfrate von 3% und gleichem Kontaktdruck von 1250 N/mm^2 .

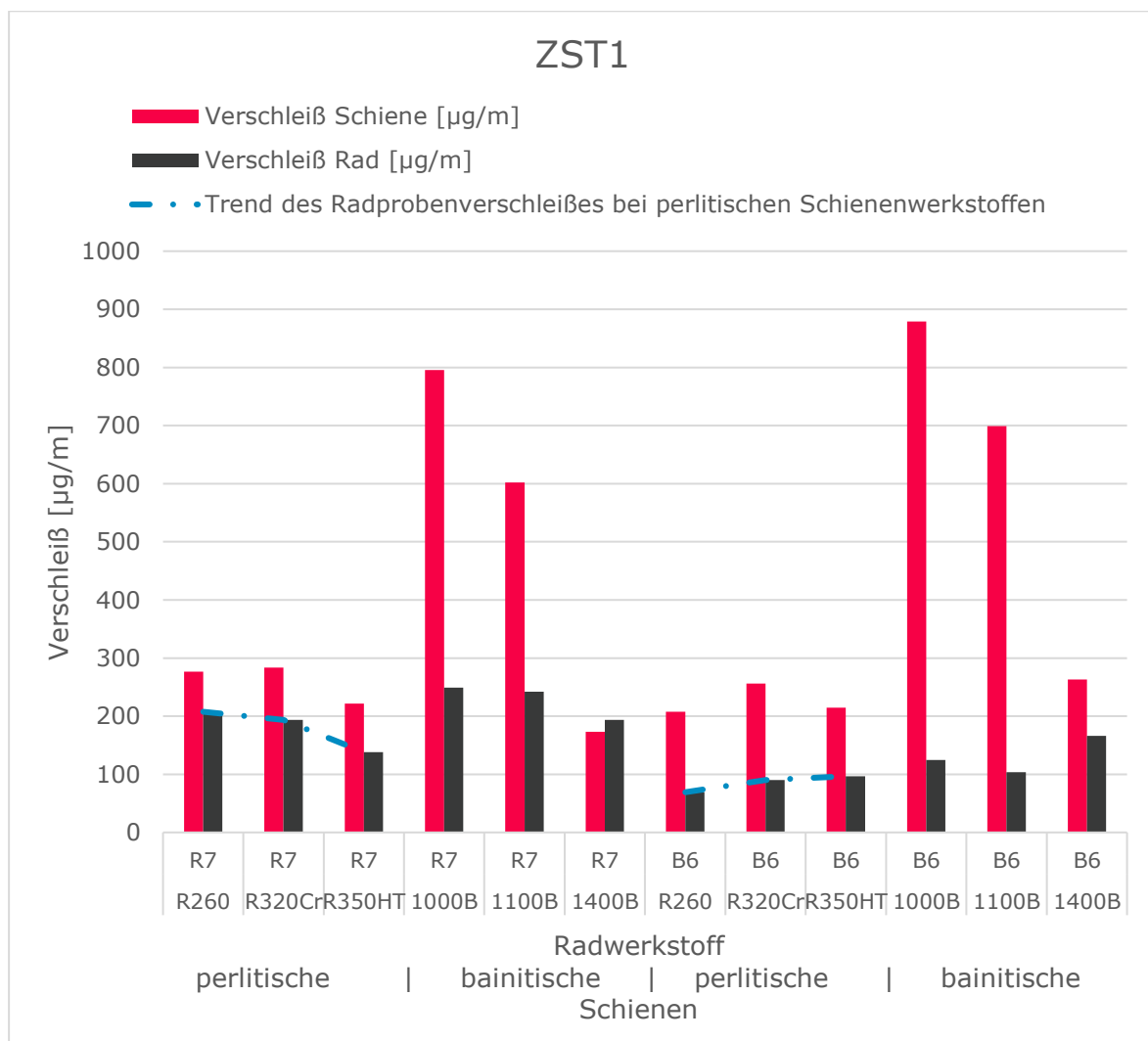


Abbildung 44: Ergebnisse des ZST1¹²²

¹²² eigene Auswertungen nach: Mädler u. a.

3 Studien und Untersuchungen

Erkennbar ist in Abbildung 44 das unterschiedliche Verhalten der beiden Radwerkstoffe: Während sich die Verschleißraten der Schienenproben über verschiedene Radprobenwerkstoffe nicht wesentlich verändern, verhalten sich die Radwerkstoffe tendenziell gegenläufig: Der Werkstoff R7 zeigt einen leicht abnehmenden Trend bei Zunahme der Schienenwerkstoffhärte, B6 hingegen einen zumindest leicht zunehmenden. Die Trends sind als blaue strichpunktierte Linie dargestellt. Weiters ist zu sehen, dass neben dem grundsätzlichen Verhalten auch das Niveau des Radverschleißes abhängig vom eingesetzten Radwerkstoff ist.

Generell ist anzumerken, dass bainitische Schienenwerkstoffe ein gänzlich anderes Verschleißverhalten zeigen als perlitische. Auch das Niveau des Radprobenverschleißes ist in Kombination mit bainitischen Schienenproben höher als mit perlitischen. An dieser Stelle soll an das Modell des Zweiseiben-Tests erinnert werden und damit an die Tatsache, dass sich diese Ergebnisse auf das Werkstoffverhalten, nicht aber auf das Systemverhalten von Rad und Schiene beziehen. Der Rad-Schiene-Kontakt wird nicht nachgebildet, nur die Werkstoffe entsprechen jenen aus dem tatsächlichen System.

In Abbildung 45 sind Ergebnisse des ZST2 abgebildet. Dafür ist keine Umrechnung notwendig, die in der Quelle verwendete Einheit entspricht der hier für den Vergleich verwendeten Verschleißmasse pro überrollter Länge. Es sind Verschleißraten verschiedener Werkstoffpaarungen über verschiedene Schlupfraten bei gleichem Kontaktdruck aufgetragen.

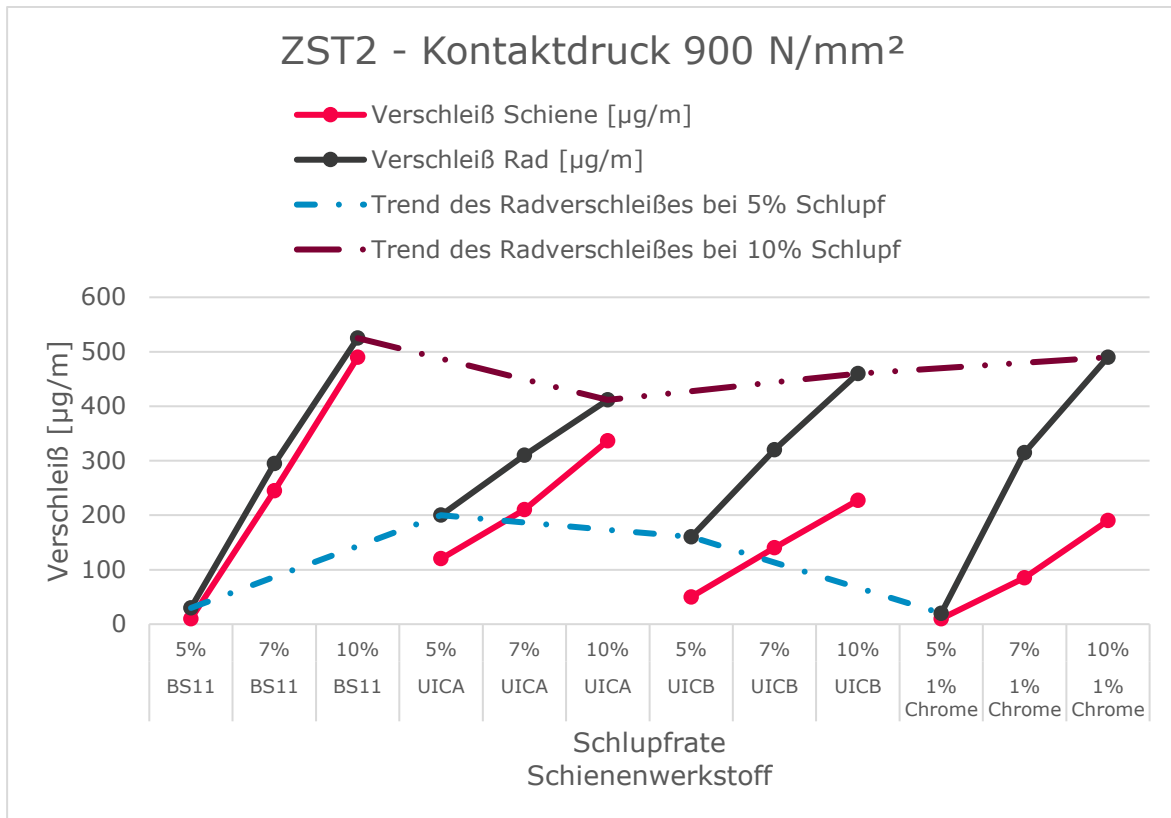


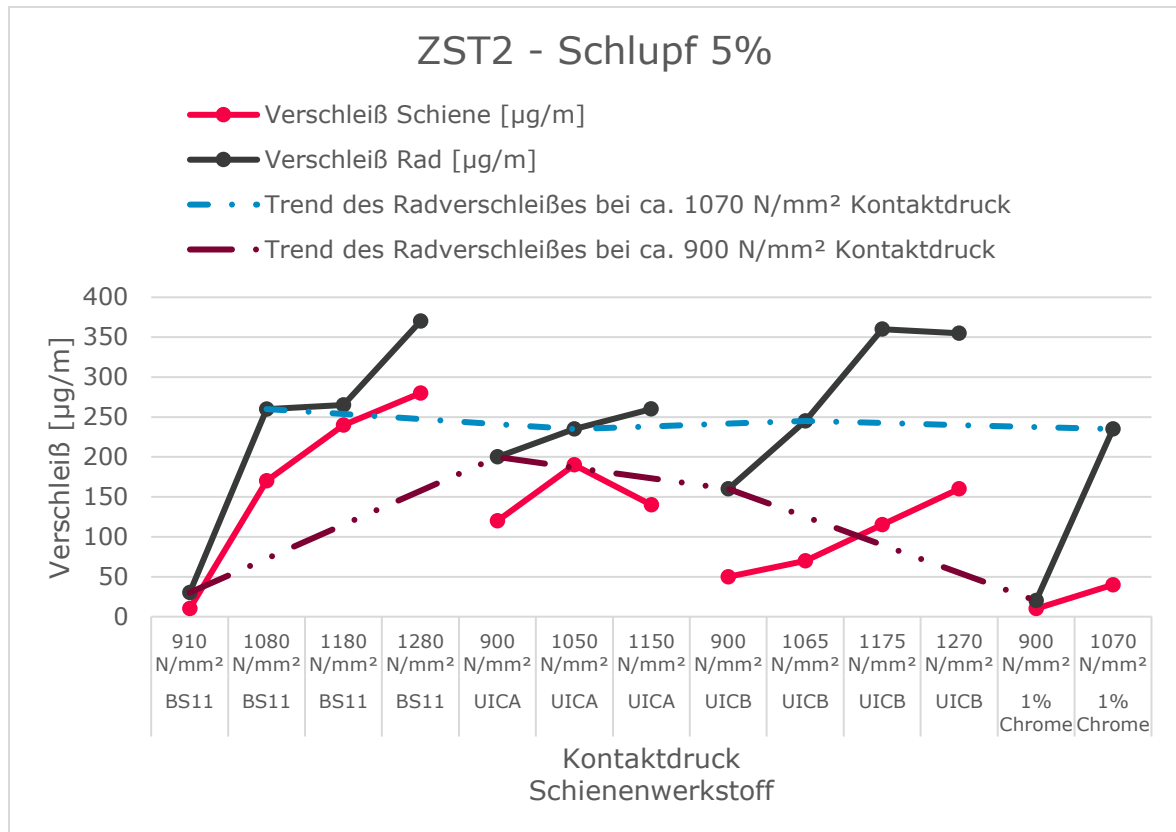
Abbildung 45: Ergebnisse des ZST2: konstanter Kontaktdruck 900 N/mm²¹²³

Zu sehen sind die gegenläufigen Trends im Werkstoffverhalten bei niedriger (5%) bzw. hoher Schlupfrate (10%). Die Trends im Verhalten des Radprobenverschleißes über verschiedene Schienenwerkstoffe zeigen die blaue strichpunktierte (5% Schlupf) bzw. die dunkelrote (10% Schlupf) strich-doppel-punktierte Linie. Hervorzuheben ist, der Bereich bei 10% Schlupf reicht je nach Schienenwerkstoff von 411 µg/m bis 525 µg/m, jener bei 5% Schlupf von 20 µg/m bis 200 µg/m. Dies weist darauf hin, dass die Verschleißrate der Radprobe bei konstantem Kontaktdruck bei kleinerer Schlupfrate deutlich vom Werkstoff des Kontaktpartners (Schienenprobe) beeinflusst wird. Dahingegen unterliegt der Radverschleiß bei hohem Schlupf deutlich kleineren Schwankungen über verschiedene Schienenprobenwerkstoffe.

Eine andere Sicht auf die Ergebnisse liefert Abbildung 46.

¹²³ eigene Auswertungen nach: Bolton und Clayton, „Rolling—sliding wear damage in rail and tyre steels“.

3 Studien und Untersuchungen

Abbildung 46: Ergebnisse des ZST2: konstanter Schlupf 5%¹²⁴

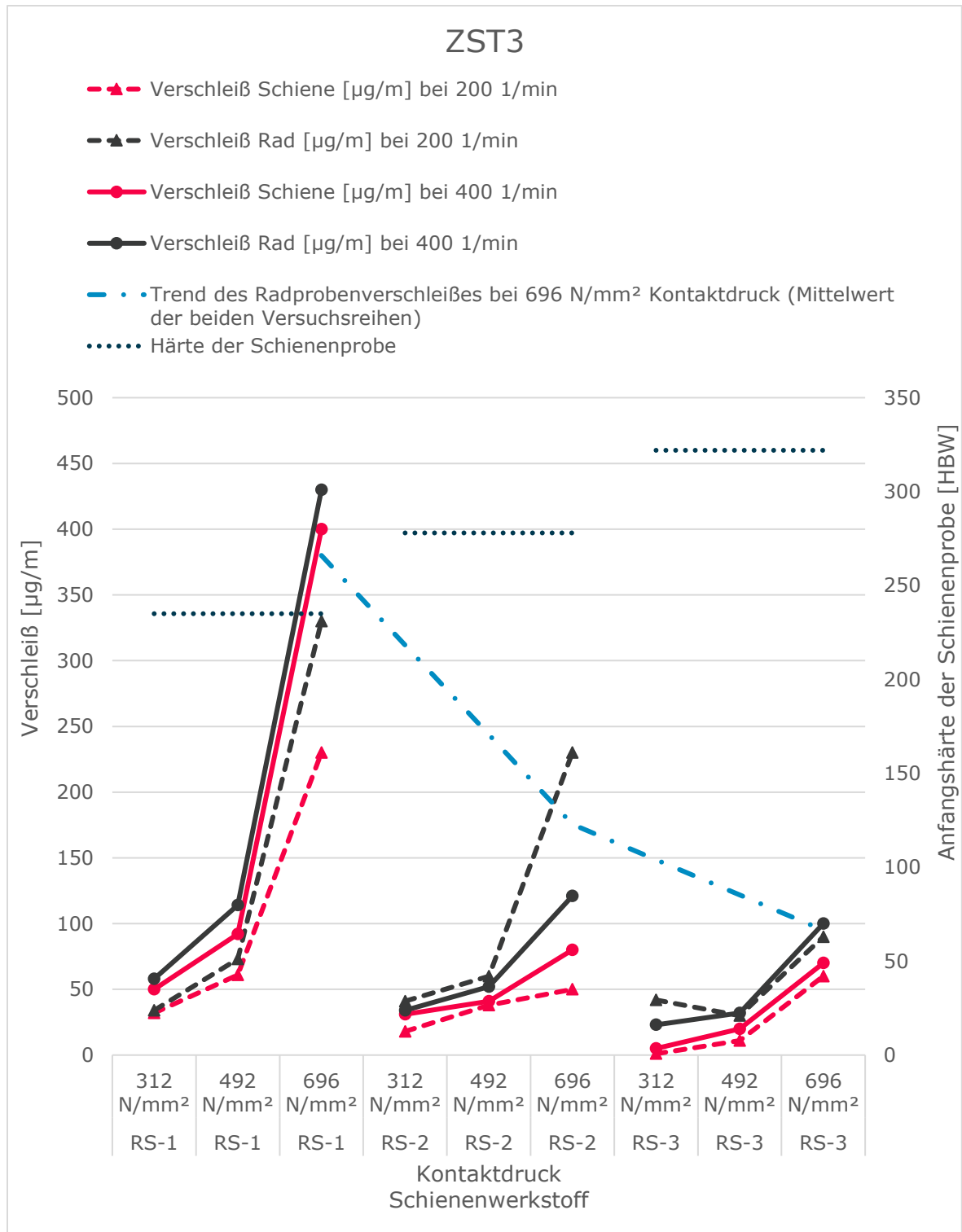
Hier sind Verschleißraten unterschiedlicher Werkstoffpaarungen abhängig vom Kontaktdruck bei gleicher Schlupfrate gezeigt. Die blaue strichpunktiierte Linie zeigt den Radprobenverschleiß bei (nahezu) gleichem Kontaktdruck von ungefähr 1070 N/mm² über die verschiedenen Schienenprobenwerkstoffe bei konstanter Schlupfrate von 5%. Es zeigt sich ein sehr konstantes Verschleißniveau der Radprobenrolle in Kontakt mit den vier verschiedenen Schienenprobenrollen. Das widerspricht dem Schluss aus der vorherigen Abbildung 45, jedoch liegt jetzt das Belastungsniveau etwas höher. Im Gegensatz dazu zeigt die dunkelrote strich-doppelpunktiierte Linie den Trend des Radprobenverschleißes bei ca. 900 N/mm². Es ist ein deutlich anderes Verhalten zu erkennen. Nach Kombination dieser Informationen lässt sich festhalten, dass das Belastungsniveau (Kontaktdruck, Schlupf) das Verschleißniveau wie auch das Verschleißverhalten der Radprobe beim Abrollen gegen unterschiedliche Werkstoffe unterschiedlich beeinflusst.

¹²⁴ eigene Auswertungen nach: Bolton und Clayton.

Abbildung 47 zeigt die Ergebnisse des ZST3. Es wurden Versuchsreihen mit unterschiedlichen Drehzahlen der Prüfrollen, d.h. unterschiedlichen Abrollgeschwindigkeiten, und konstantem Schlupf von 10% durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, das Verschleißverhalten der Werkstoffe wird durch die Probedrehzahlen nicht nennenswert beeinflusst. Der Radprobenverschleiß steigt in Kombination mit allen drei Schienenwerkstoffen mit zunehmendem Kontaktdruck stark an. Es zeigt sich eine deutliche Abnahme des Systemverschleißes bei Zunahme der Schienenhärte: Die blaue strichpunktierte Linie zeigt den Trend des Mittelwertes der beiden Radprobenverschleißraten aus den zwei Versuchsreihen. Die Anfangshärten der Schienenproben sind auf der Sekundärachse als Brinellhärte aufgetragen (punktierte Linien). Die Härte der Radprobe ist mit 227 HBW niedriger als die von allen drei Schienenproben (235 HB, 278 HB und 322 HB).

Die hier getesteten Werkstoffpaarungen unter den eingestellten Prüfbedingungen weisen auf eine Abhängigkeit des Radprobenverschleißes von der Schienenhärte (und damit auch der Schienengüte).

3 Studien und Untersuchungen

Abbildung 47: Ergebnisse des ZST3¹²⁵

¹²⁵ eigene Auswertungen nach: Singh und Singh, „Wear investigation of wheel and rail steels under conditions of sliding and rolling-sliding contact with particular regard to microstructural parameters“.

In Abbildung 48 sind Resultate einer Versuchsreihe des ZST4 mit einer Schlupfrate von 1% zu Versuchsende (nach 30.000 Überrollungen) dargestellt.

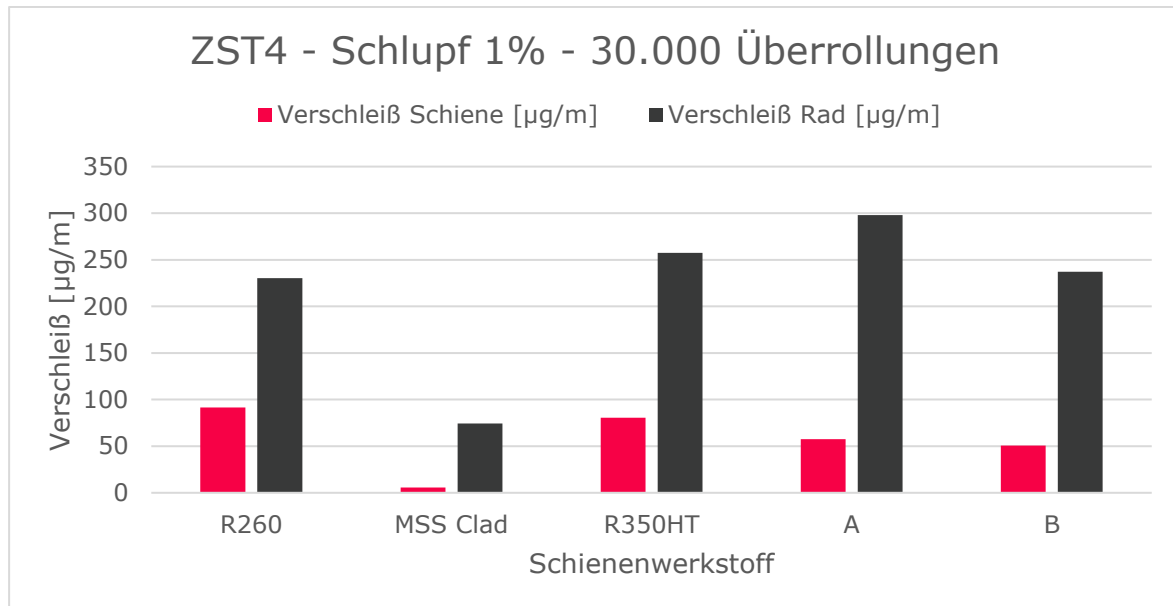


Abbildung 48: Ergebnisse des ZST4: 1% Schlupf – nach 30.000 Zyklen¹²⁶

Es ist bis auf eine Ausnahme (MSS Clad, hier nicht weiter betrachtet) ein näherungsweise einheitliches Verschleißniveau der Radprobe zu erkennen. Ein leichter Anstieg bei einem wärmebehandelten Schienenstahl im Vergleich zum naturharten Standardschienenstahl ist erkennbar.

Abbildung 49 zeigt den Verlauf der Schienen- und Radprobenverschleißraten über die Versuchsdauer. Hier ist zu erkennen, dass das Verhalten bezüglich des Verschleißes der beiden Radprobenwerkstoffe über die gesamte Versuchsdauer ähnlich ist, wobei der Verschleiß in Kombination mit der härteren Schiene stets wenig höher ist.

Die aufgrund der Ergebnisse von ZST2 aufgestellte Beobachtung, dass das Werkstoffverhalten von der Belastung (Kontaktdruck, Schlupf) beeinflusst wird, bestätigt sich beim Blick auf Abbildung 50. Hierbei handelt es sich um eine Darstellung der Ergebnisse der Versuchsreihe mit einer Schlupfrate von 10% und dem gleichen Kontaktdruck von 1500 N/mm² wie zuvor in Abbildung 48.

¹²⁶ eigene Auswertungen nach: Christoforou, Fletcher, und Lewis, „Benchmarking of premium rail material wear“.

3 Studien und Untersuchungen

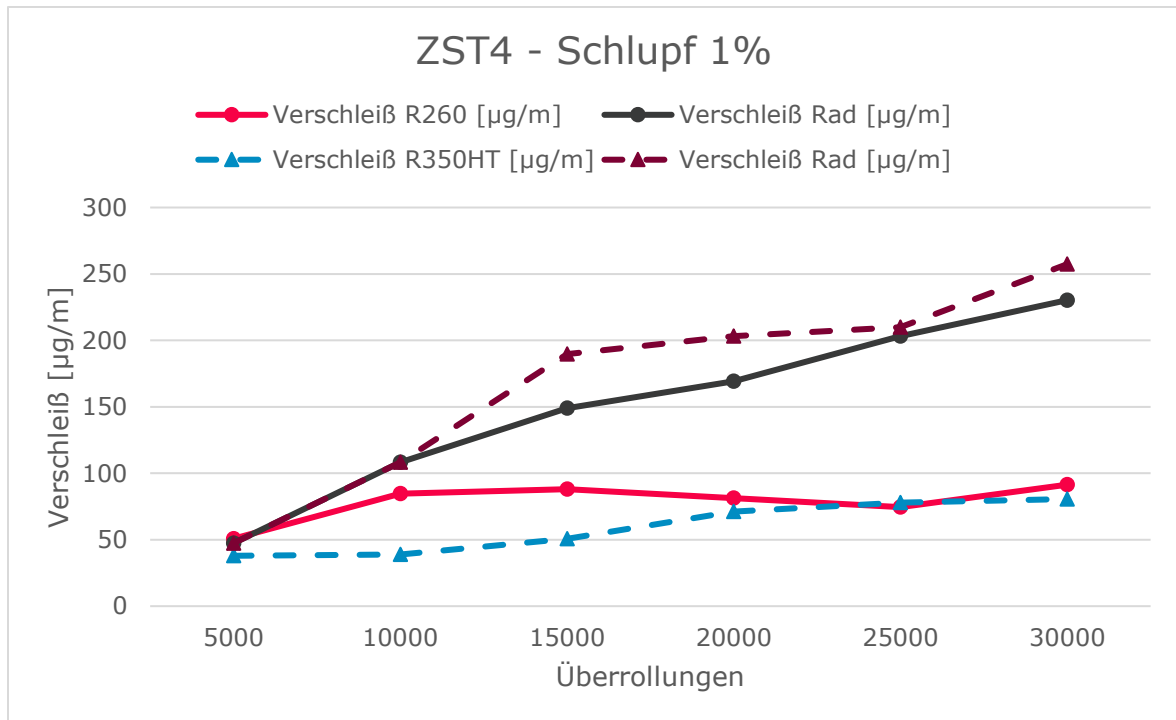


Abbildung 49: Ergebnisse des ZST4: Schlupfrate 1%¹²⁷

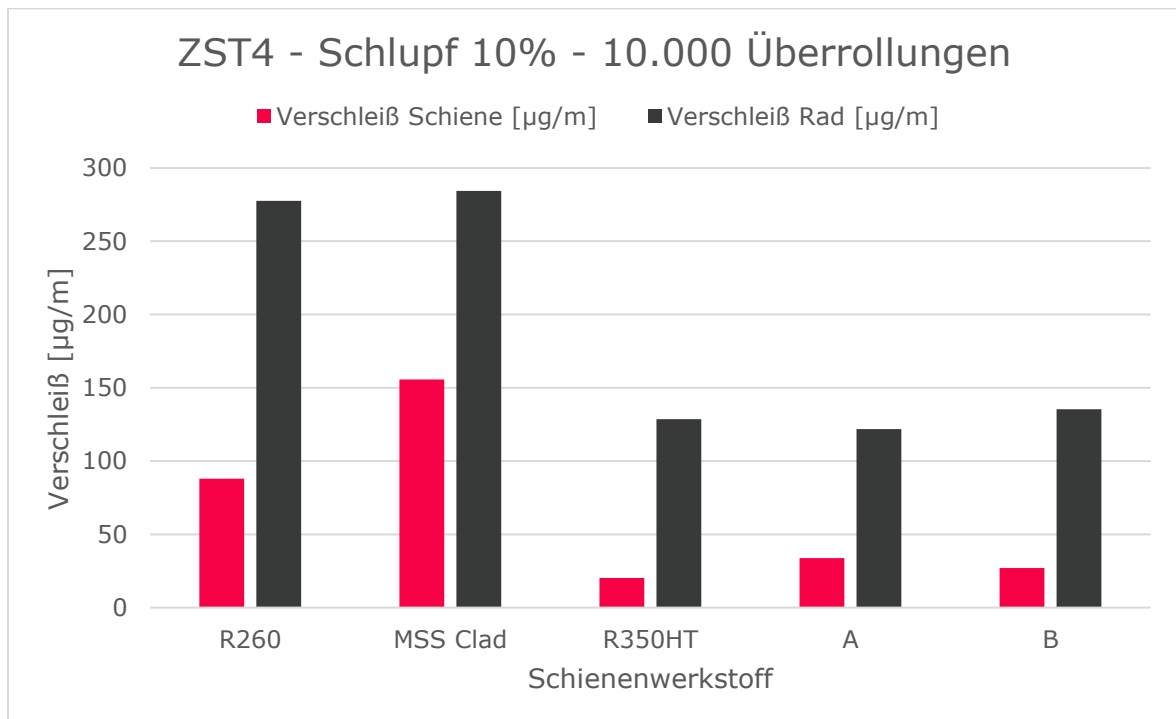


Abbildung 50: Ergebnisse des ZST4: 10% Schlupf – nach 10.000 Zyklen¹²⁸

¹²⁷ eigene Auswertungen nach: Christoforou, Fletcher, und Lewis.

¹²⁸ eigene Auswertungen nach: Christoforou, Fletcher, und Lewis.

Während der Verschleiß des Radwerkstoffes kombiniert mit dem Standardwerkstoff in etwa gleich hoch ist wie bei niedrigerer Schlupfrate (1%), verhält er sich kombiniert mit dem wärmebehandelten Schienenwerkstoff gänzlich anders: er zeigt eine halbierte Verschleißrate.

Abbildung 51 zeigt die Ergebnisse des ZST5 in Form von durchschnittlichen Verschleißraten unterschiedlicher Werkstoffpaarungen (4 Schienen-, 5 Radwerkstoffe). Um die Werkstoffe in Bezug nehmend auf die theoretischen Überlegungen richtig einzuordnen, sei angemerkt, dass das Härteverhältnis *Schiene/Rad* nur bei den ersten beiden Radwerkstoffen (ER7, ER8) größer als eins ist. Bei den anderen Radwerkstoffen wechselt das Härteverhältnis je nach Schienenwerkstoff von kleiner eins zu größer eins (separiert durch blaue Linie).

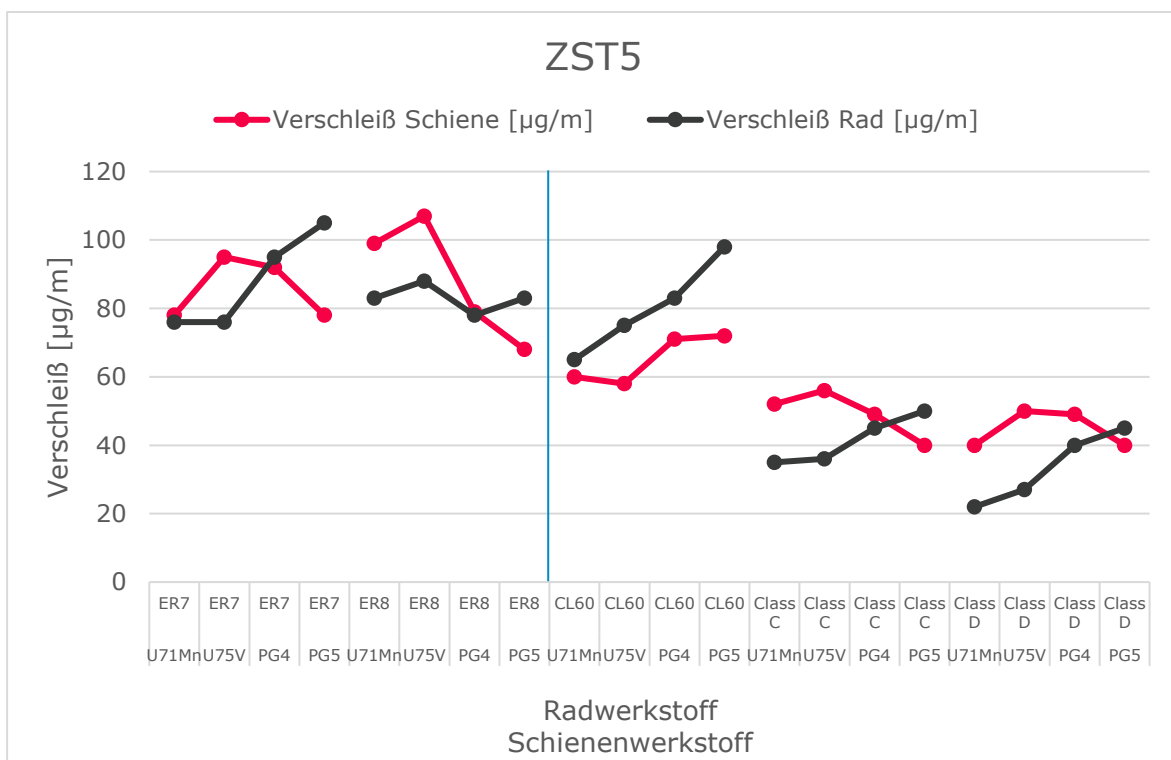


Abbildung 51: Ergebnisse des ZST5¹²⁹

Es ist eine gute Übersicht über das Verschleißverhalten der untersuchten Werkstoffpaarungen gegeben. Das Verhalten der in diesem Versuch untersuchten

¹²⁹ eigene Auswertungen nach: Hu u. a., „Experimental study on wear properties of wheel and rail materials with different hardness values“.

3 Studien und Untersuchungen

Radwerkstoffe zeigt in Kombination mit fast allen Schienenprobenwerkstoffen einen Anstieg des Radverschleißes bei härter werdender Schienenprobe.

Abbildung 52 und Abbildung 53 (S. 74) zeigen die Härten der eingesetzten Werkstoffe vor und nach den einzelnen Tests. Auffallend hierbei ist einerseits, dass die Härten der Schienenproben nach den Testläufen in der Größenordnung um 800 HV_{0,5} liegen. Andererseits ist zu erwähnen, dass die Endhärten der Radproben abhängig von der Härte des jeweiligen Kontaktpartners sind: Anfänglich härtere Schienenwerkstoffe führen zu größeren Verfestigungen der Radwerkstoffe.

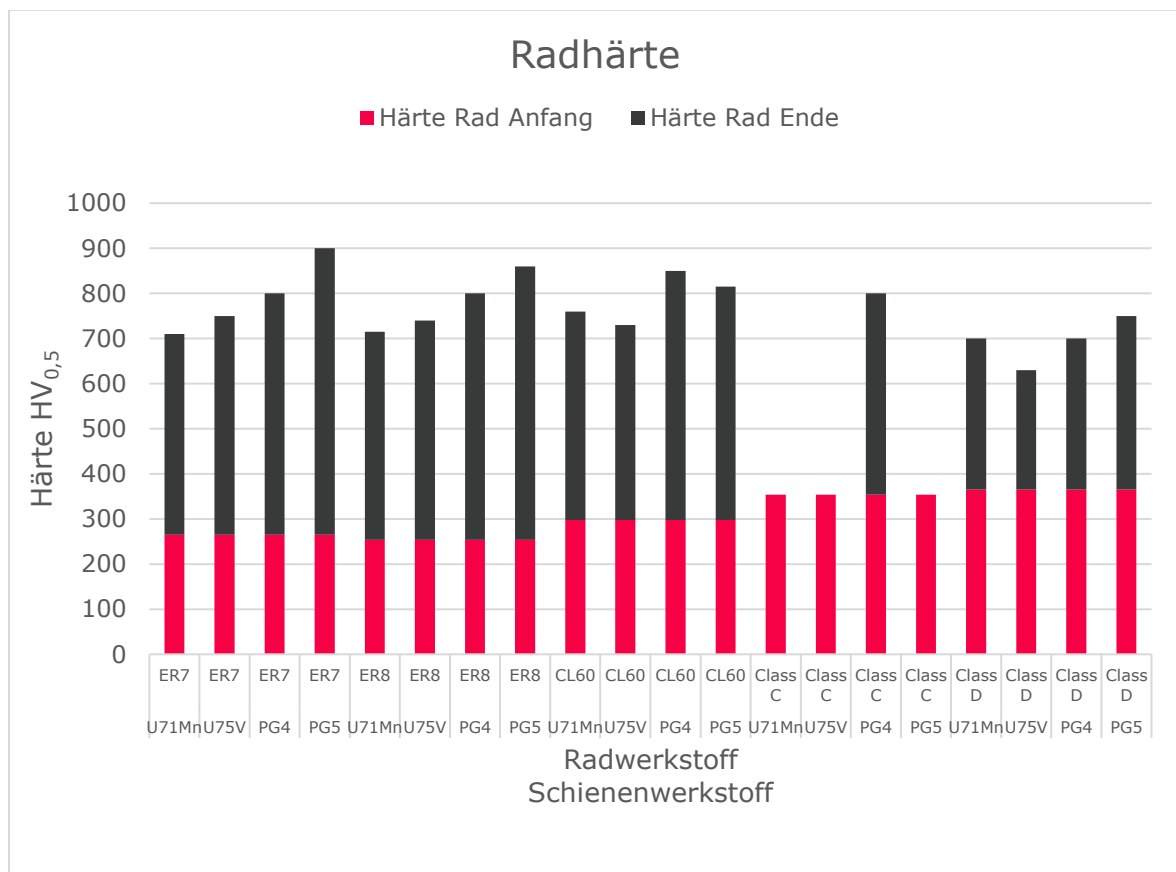


Abbildung 52: Ergebnisse des ZST5: Radhärten vor und nach dem Versuch¹³⁰

¹³⁰ eigene Auswertungen nach: Hu u. a., 5.

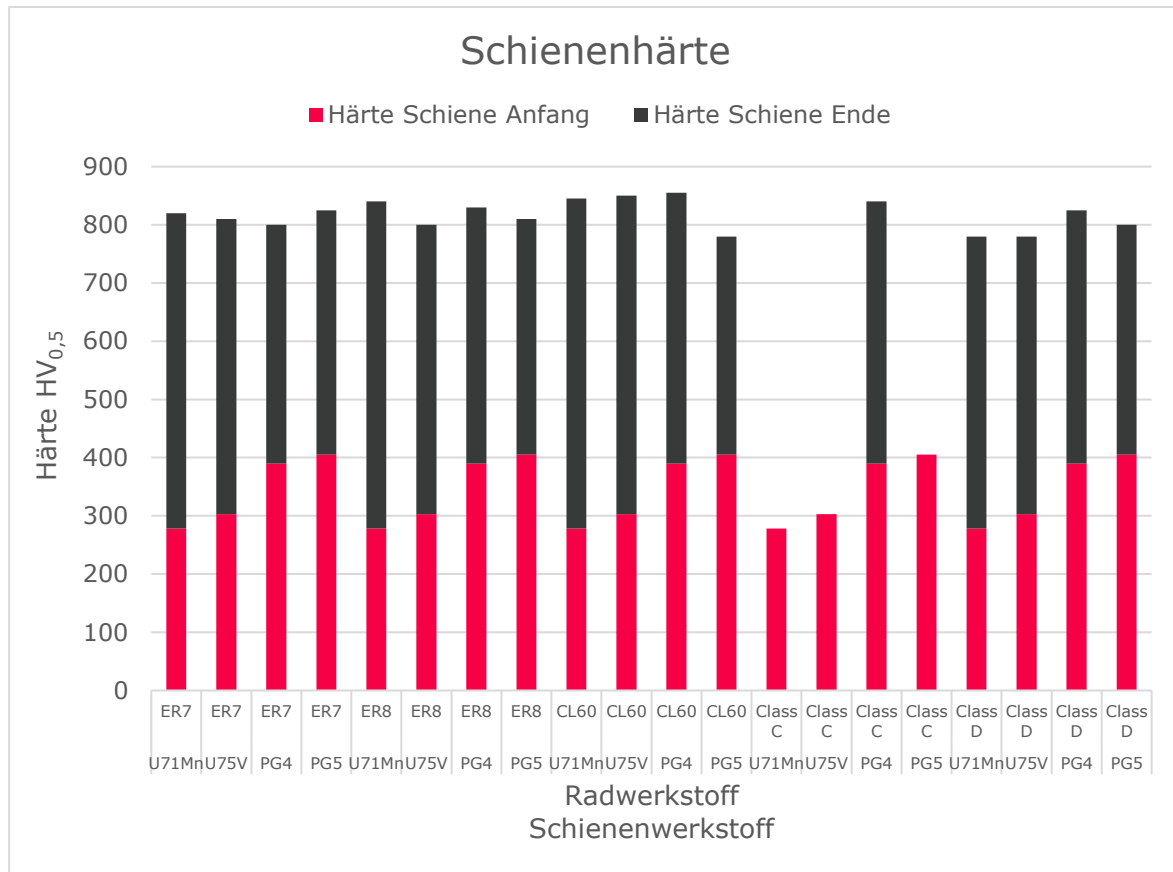
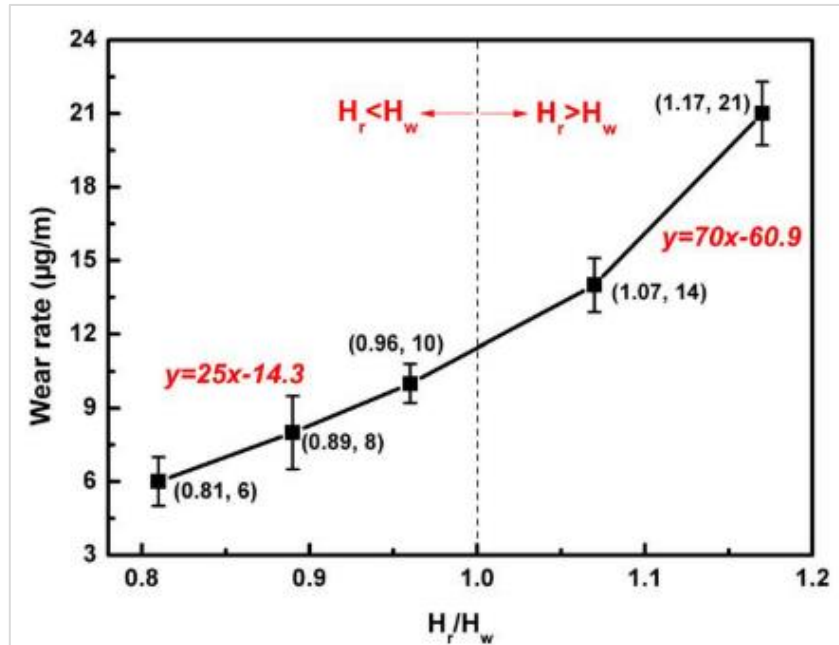


Abbildung 53: Ergebnisse des ZST5: Schienenhärten vor und nach dem Versuch¹³¹

Zusammenfassend ist zu sagen, die Verfestigung der Schienenproben endet ungefähr beim gleichen Niveau, unabhängig von der Ausgangshärte bzw. dem Kontaktpartner. Die Endhärte der Radprobenwerkstoffe wird von der Härte des Kontaktpartners sowie von der eigenen Ausgangshärte beeinflusst. Dabei zeigen sich bei größerer Anfangshärte niedrigere Endhärten.

In Abbildung 54 sind die Ergebnisse des ZST6 in Form der Radverschleißrate in Abhängigkeit des Härteverhältnisses zu sehen. Es zeigt sich erwartbares Verhalten: der Radverschleiß nimmt bei sinkender Radhärte (größer werdendes Verhältnis von Schienen- zu Radhärte) zu. Hier wurde die Schienenprobenhärte konstant gehalten und gegen verschiedene Radproben getestet.

¹³¹ eigene Auswertungen nach: Hu u. a., 5.

Abbildung 54: Ergebnisse des ZST6: Radverschleiß¹³²

Damit lässt sich keine Aussage zum Zusammenhang zwischen Schienengüte und Radverschleiß treffen. Es soll damit nur die Erwartung des Verhaltens bestätigt werden.

Abbildung 55 (S. 76) stellt die Resultate des RSPS1 zu Versuchsende, also nach 100.000 Überrollungen, dar. Betrachtet man die Versuche mit perlitischen Schienen (linke Hälfte: R260, R350HT und R400HT), ist deutlich die Abnahme des Schienenverschleißes bei Zunahme der Schienenhärte zu erkennen. Der Radverschleiß dagegen bleibt nahezu konstant (blaue strichpunktierte Linie). Ein anderes Verhalten legen die bainitischen Schienen zu Tage, sowohl beim Schienen- als auch beim Radverschleiß.

¹³² Shi u. a., „Hardness matching of rail/wheel steels for high-speed-train based on wear rate and rolling contact fatigue performance“, 6.

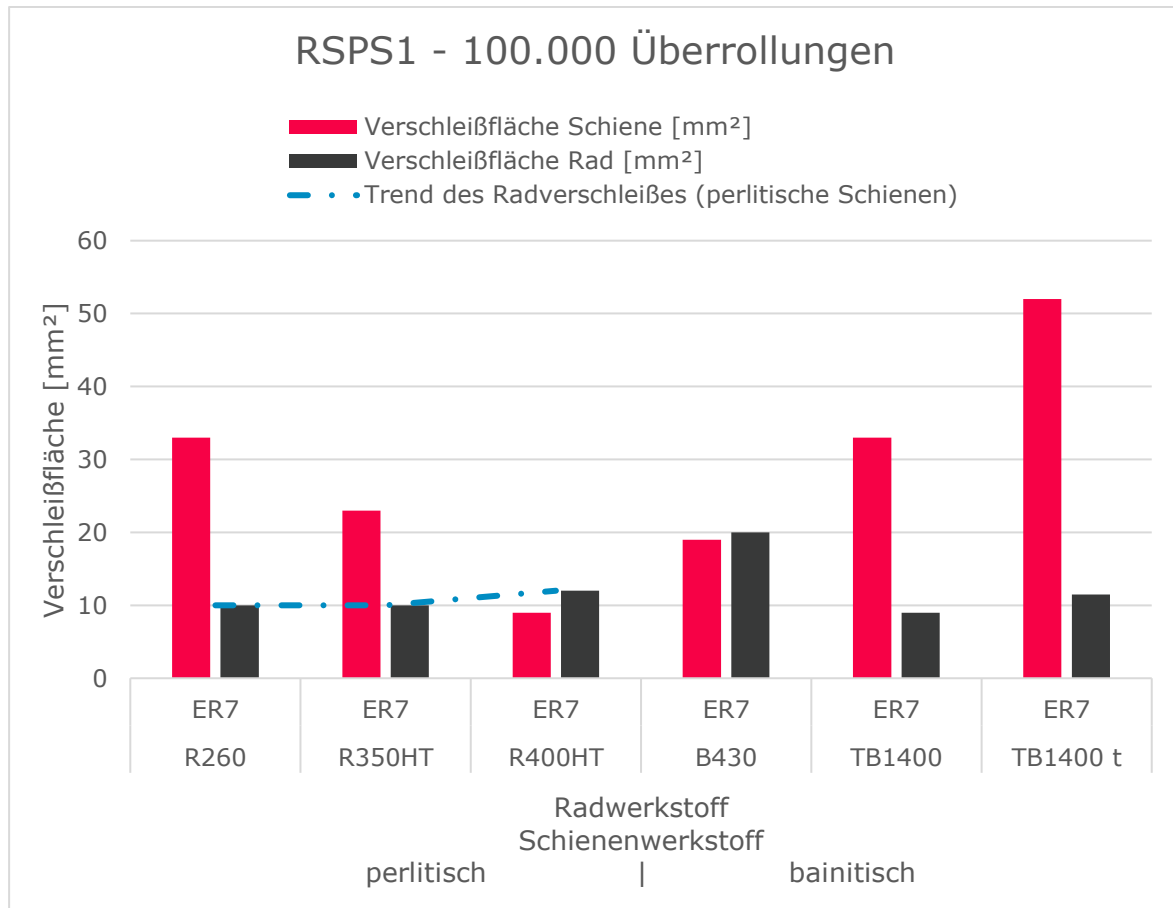
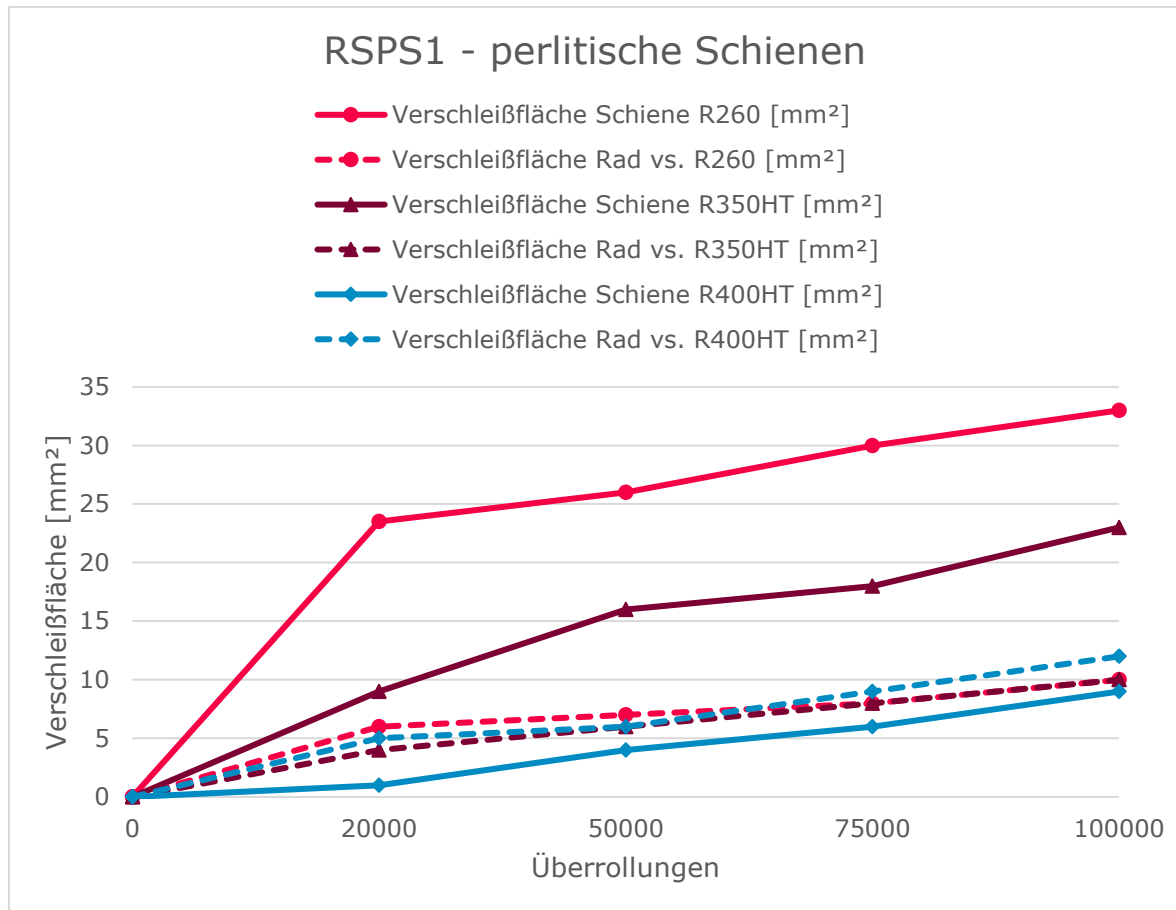


Abbildung 55: Ergebnisse des RSPS1: nach 100.000 Zyklen¹³³

Abbildung 56 liefert eine Abbildung der Verschleißraten der Versuchsreihen mit perlitischen Schienen über die Versuchsdauer. Dabei zeigt vor allem der Standardschienenwerkstoff R260 zu Versuchsbeginn einen hohen Verschleiß, was einem ausgeprägten Einlaufvorgang entspricht. Hervorzuheben ist, dass die Verschleißraten des Rades bei Einsatz unterschiedlicher Schienenwerkstoffe über die gesamte Versuchsdauer ein sehr ähnliches Verschleißniveau zeigen.

¹³³ eigene Auswertungen nach: Stock, „Influencing rolling contact fatigue and wear by different rail grades and contact conditions“.

Abbildung 56: Ergebnisse des RSPS1: perlitische Schienen¹³⁴

Unter den in diesem Versuch eingestellten Prüfparametern (v.a. Radlast von 23 t) ist kein Zusammenhang des Radverschleißes und der Schienengüte auszumachen: alle drei betrachteten perlitischen Schienen verursachen nahezu den gleichen Radverschleiß.

Ein anderes Verhalten der Verschleißraten zeigt RSPS2, wie in Abbildung 57 (S. 78) zu sehen: Hier zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit des Radverschleißes von der Schienengüte. Beim Wechsel von der naturharten Schienengüte R260 auf eine wärmebehandelte Schienengüte R350HT oder R400HT sinkt der Radverschleiß, abhängig vom Radwerkstoff, um den Faktor 5,7 (bei ER7) bis 7 (ER8). Zwischen den beiden wärmebehandelten Schienen ist nur mehr ein kleiner Unterschied im Radverschleiß zu vernehmen.

¹³⁴ eigene Auswertungen nach: Stock.

Im Vergleich zu RSPS1 ist erkennbar, dass die Definition der Prüfparameter das Ergebnis einer Untersuchung maßgeblich beeinflussen. Der Unterschied zwischen den beiden Tests (RSPS1 und RSPS2) ist neben den unterschiedlichen Belastungsniveaus und Schienenprofilen auch der Schräglauf im Fall des RSPS2.

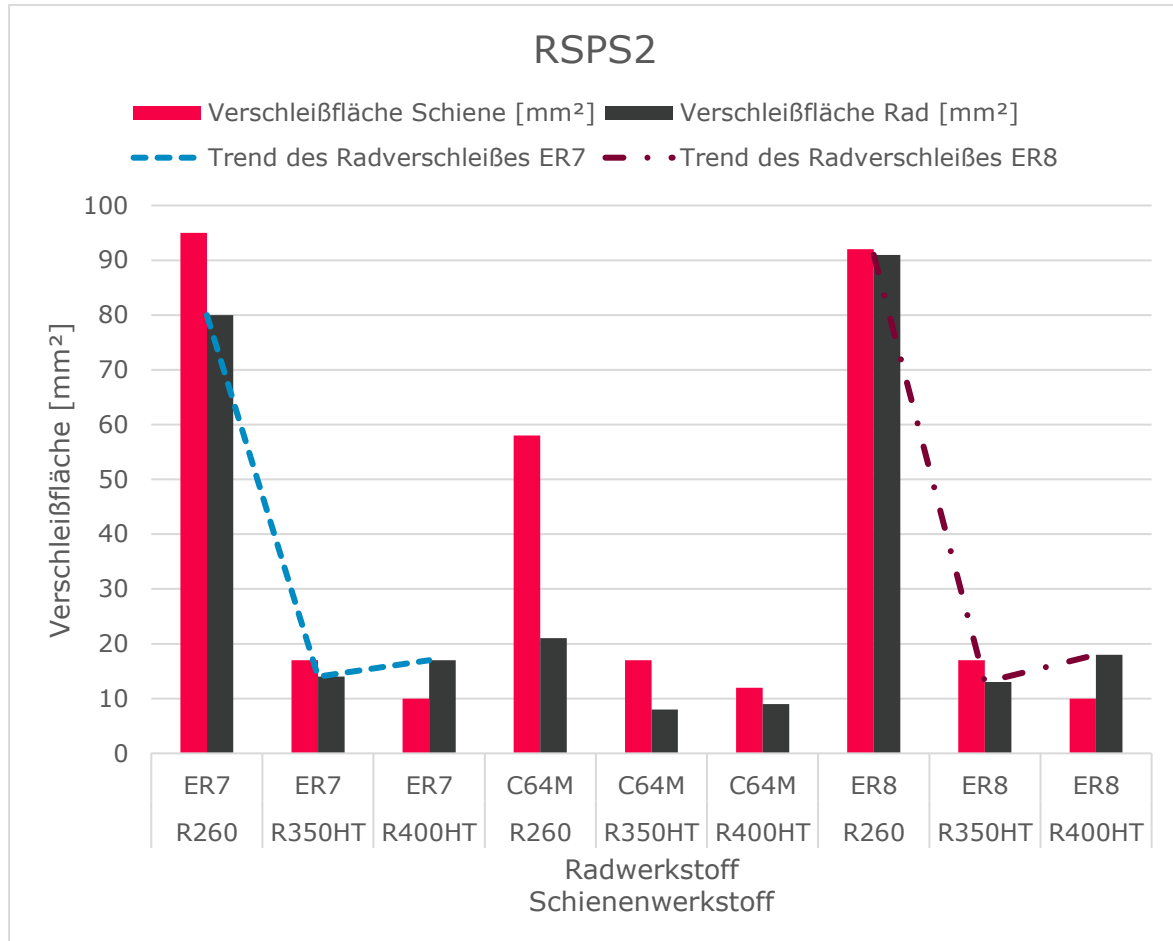
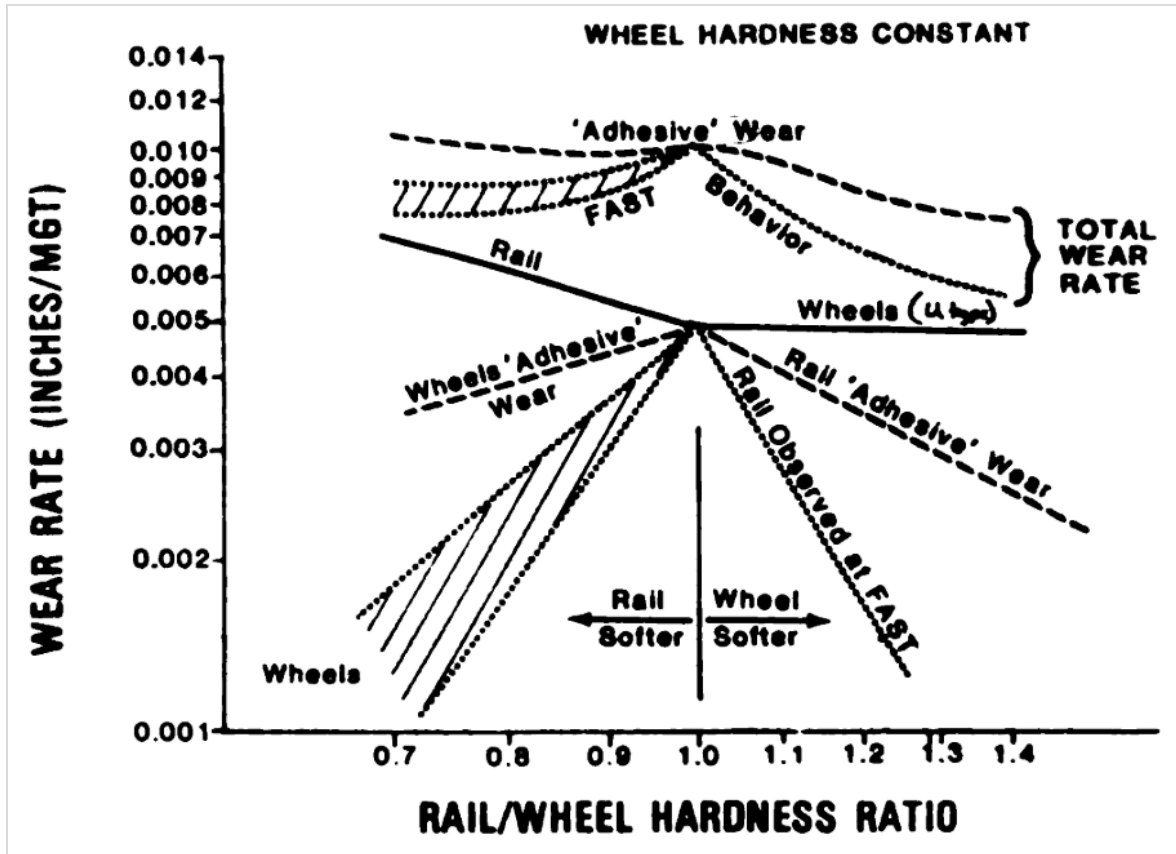


Abbildung 57: Ergebnisse des RSPS2¹³⁵

Die Resultate des RSPS2 zeigen eine eindeutige Abhängigkeit des Radverschleißes von der Schienengüte bzw. von der Anwendung einer Wärmebehandlung bei einer Radlast von ca. 12 t.

¹³⁵ eigene Auswertungen nach: Mädler und Heyder, „Schienenfahrzeugtagung Dresden“.

Abbildung 58: Ergebnisse des GT1¹³⁶

In Abbildung 58 sieht man die Ergebnisse des GT1 gemeinsam mit den erwarteten Ergebnissen der theoretischen Überlegungen (siehe auch 3.2.1, S. 39). Es ist zu erkennen, dass die gemessenen Ergebnisse der Untersuchung dem erwarteten Verhalten folgen, wengleich auch in stärkerer Ausprägung. Ausgehend vom Härteverhältnis von Schiene/Rad gleich 1, sinkt der tatsächliche Radverschleiß – hier als bezogener Verschleiß in Abhängigkeit der Belastung – („Wheels“) bei weicher werdender Schiene (von eins nach links) stärker ab als erwartet („Wheels ‚Adhesive‘ Wear“). Bei einem Härteverhältnis größer eins trifft der tatsächliche Radverschleiß die Erwartungen. Ähnliches, aber umgekehrtes Verhalten zeigt der beobachtete Schienenverschleiß: Bei einem Härteverhältnis kleiner eins entspricht er dem erwarteten Verschleiß, größer eins sinkt der Schienenverschleiß („Rail Observed at FAST“) stärker ab als erwartet („Rail ‚Adhesive‘ Wear“).

¹³⁶ Steele und Reiff, „Rail - It's behavior and relationship to total system wear“, 149.

Damit bestätigen die Untersuchungsergebnisse die mittels theoretischer Überlegungen gezeigten Zusammenhänge (siehe Abbildung 33, S. 43):

Für konstante Radhärte bleibt der Radverschleiß bei einem Härteverhältnis *Schiene/Rad* größer eins konstant bei gleicher kumulierter Belastung. Wird das Härteverhältnis kleiner eins, nimmt die Radverschleißrate ab. Die Schienenverschleißrate nimmt ab, wenn man sich von unten an das Härteverhältnis von eins nähert. Die Abnahme wird stärker, vergrößert man das Härteverhältnis weiter (über 1).

Die Resultate von WT1 für geraden bzw. schrägen Lauf sind in Abbildung 59 sowie Abbildung 60 (jeweils S. 81) zu sehen. Für ersteren Fall zeigt sich für alle Radwerkstoffe der höchste Verschleiß beim Abrollen auf dem Schienenwerkstoff R350HT. Die Abweichungen der einzelnen Verschleißraten sind nicht im Bereich von Größenordnungen, sodass die Radverschleißraten aller Versuchsreihen in einem Spektrum von 4 bis 10,3 μm^3 pro Zyklus liegen.

Bei Schräglauf von $0,3^\circ$ zeigt sich ein leicht erhöhtes Niveau des Radverschleißes (5,4 bis 15,8 μm^3 /Zyklus). Der Anstieg der Verschleißrate des Rades im Gegensatz zum Versuch mit Geradlauf ist umso größer je härter die Schienenprobe ist.

Besser zu erkennen ist dieses Verhalten in Abbildung 61 (S. 82), wo der Vergleich zwischen geradem und schrägem Lauf für einen Radwerkstoff dargestellt ist. Die hier dargestellten Zunahmen der Verschleißraten des Radwerkstoffes ER7H werden in Tabelle 18 (S. 82) ins Verhältnis zueinander gesetzt: Abgerollt auf einer Schienenprobe der Güte R260 verändert sich der Radprobenverschleiß bei Schräglauf nicht gegenüber dem Geradlauf. Bei einer R350HT-Probe nimmt der Radprobenverschleiß um das 1,28-fache zu bei einem Schräglaufwinkel von $0,3^\circ$ (im Gegensatz zum geraden Lauf). Zieht man den Versuch mit einer Schienenprobe der Güte R400HT zum Vergleich heran, ist eine Steigerung des Radprobenverschleißes um den Faktor 1,65 zu erkennen.

3 Studien und Untersuchungen

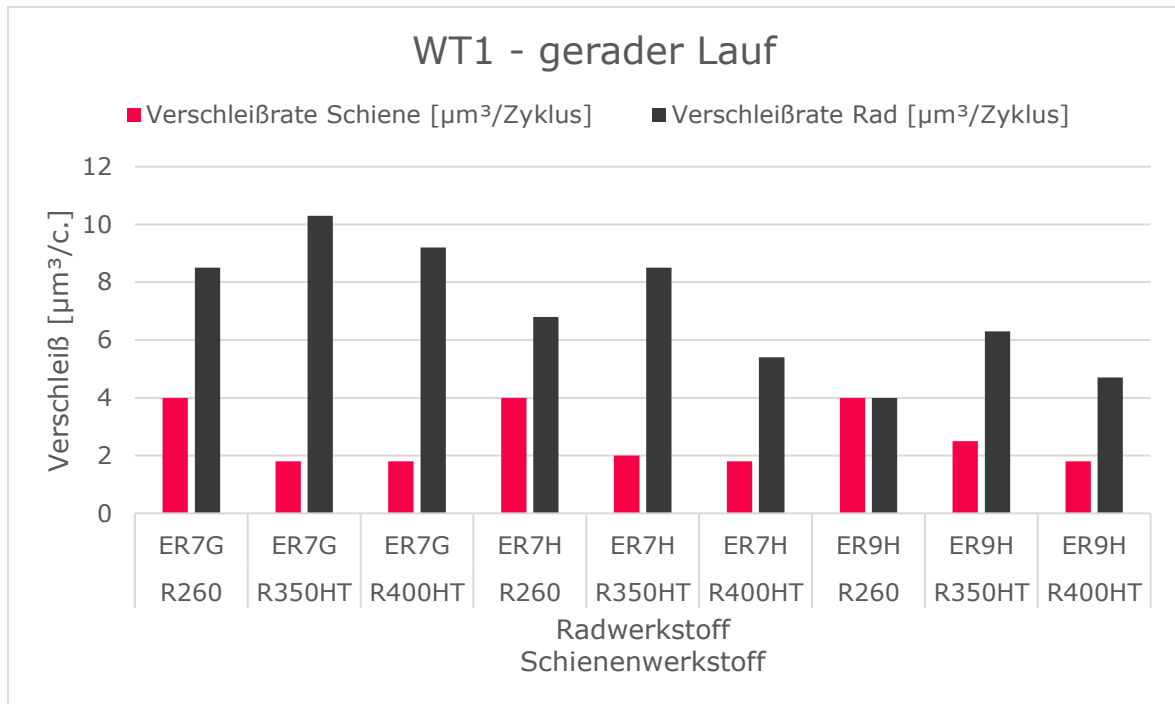


Abbildung 59: Ergebnisse des WT1: gerader Lauf¹³⁷

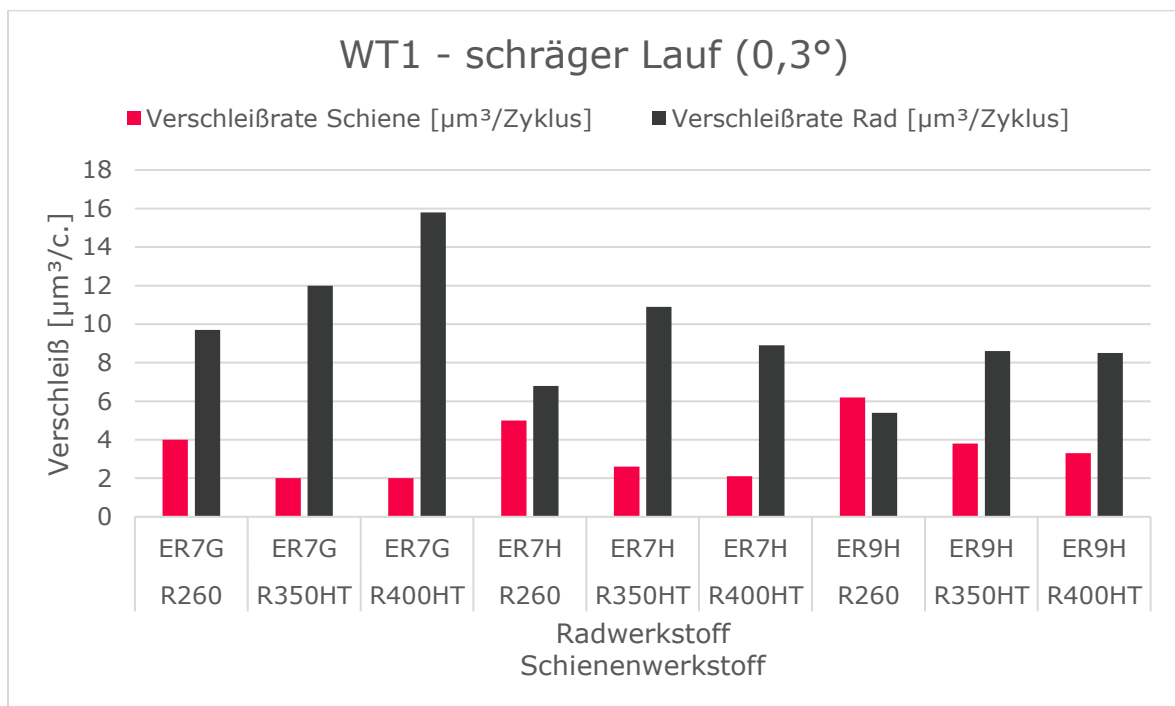


Abbildung 60: Ergebnisse des WT1: schräger Lauf (0,3°)¹³⁸

¹³⁷ eigene Auswertungen nach: Trausmuth u. a., „Verschleiß- und Ermüdungsverhalten von Rad und Schiene“.

¹³⁸ eigene Auswertungen nach: Trausmuth u. a.

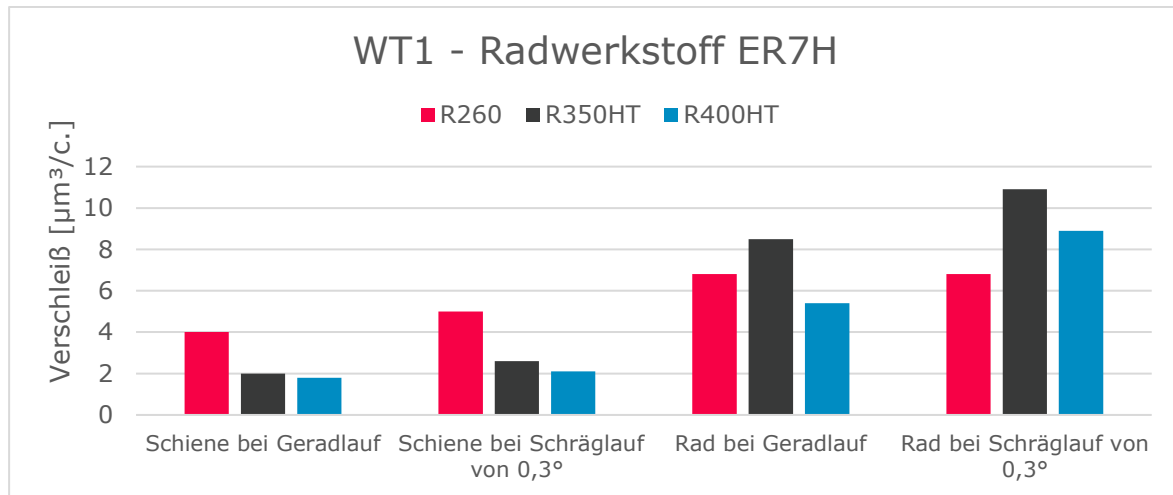


Abbildung 61: Ergebnisse des WT1: Radwerkstoff ER7H¹³⁹

Den Faktor der Verschleißzunahme des Rades bedingt durch Schräglauf zeigt Tabelle 18 für die unterschiedlichen Schienengüten.

Tabelle 18: Ergebnisse des WT1: Radverschleißzunahme durch Schräglauf

Schiene	Rad	Faktor der Zunahme
R260	ER7H	1,00
R350HT	ER7H	1,28
R400HT	ER7H	1,65

Dies unterstreicht das bereits genannte Verschleißverhalten: Speziell in dem hier betrachteten Modellversuch beeinflusst der Schräglauf den Radverschleiß umso mehr, je härter die Schienenprobe ist.

Zusammenfassend ist anzumerken, dass beim Blick auf die gezeigten Ergebnisse kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Schienengüte und Radverschleiß zu vernehmen ist. Es werden die unterschiedlichsten Verhaltensweisen hinsichtlich Verschleiß sichtbar, wodurch nachfolgende Diskussionen notwendig werden.

Zur besseren Übersicht sind die Randbedingungen sowie die Ergebnisse aller Untersuchungen im Anhang zusammengefasst, siehe Anhang 3 (S. X).

¹³⁹ eigene Auswertungen nach: Trausmuth u. a.

4 Diskussion der Ergebnisse

Bei Betrachtung der im vorangegangenen Abschnitt 3.3 (S. 63) wie auch in Anhang 4 (S. XXXV) gezeigten Resultate der diversen Untersuchungen ist zu bemerken, dass ein Vergleich der Absolutergebnisse nicht sinnvoll erscheint. Die Prüfparameter bzw. Testmethoden sind derart verschieden, sodass eine Gegenüberstellung des **Verhaltens** nötig ist. Weiters ist zu sehen, dass die in 3.2.1 (S. 39) besprochenen theoretischen Überlegungen sich nicht in allen Versuchsergebnissen widerspiegeln.

Die Diskussion der folgenden Fragestellungen soll einerseits die Ergebnisse der Untersuchungen interpretieren, die Übertragbarkeit auf das reale System hinterfragen sowie die Zusammenhänge zwischen Schienengüte und Verschleiß aufzeigen.

Was sagen die Untersuchungsergebnisse aus?

Betrachtet man die Ergebnisse aus dem vorhergehenden Abschnitt 3.3 wird deutlich, dass die anfangs gezeigten theoretischen Überlegungen (siehe 3.2.1) sich nicht in den Untersuchungsergebnissen der Prüfstandstests widerspiegeln. Dies lässt sich einerseits dadurch erklären, dass Prüfstandsszenarien – v.a. der Zweischeiben-Test – Modellabbildungen des realen Systems sind, somit abstrahieren sie die Realität mehr oder weniger. Der Gleis-Test (siehe 3.2.4) wiederum, bei dem der Rad-Schiene-Kontakt real und nicht modelliert ist, bestätigt die theoretischen Annahmen. Auf der anderen Seite sind die einzelnen Untersuchungen, selbst jene gleicher Art (z.B. Zweischeiben-Tests), hinsichtlich der Randbedingungen bzw. Werkstoffe derart unterschiedlich, dass ein direkter Vergleich der Absolutergebnisse nicht sinnvoll erscheint.

Über das ganze Spektrum der betrachteten Untersuchungen ist unterschiedliches Verhalten der Werkstoffe hinsichtlich Verschleiß zu beobachten: entweder steigt der Radverschleiß bei Erhöhung der Schienengüte leicht an, oder er bleibt gleich, oder er sinkt wenig bis deutlich ab. Eine eindeutige Aussage zum Verhalten des Radverschleißes in Abhängigkeit der Schienengüte ist an diesem Punkt nicht zu treffen, sondern bedarf weiterer Auswertungen.

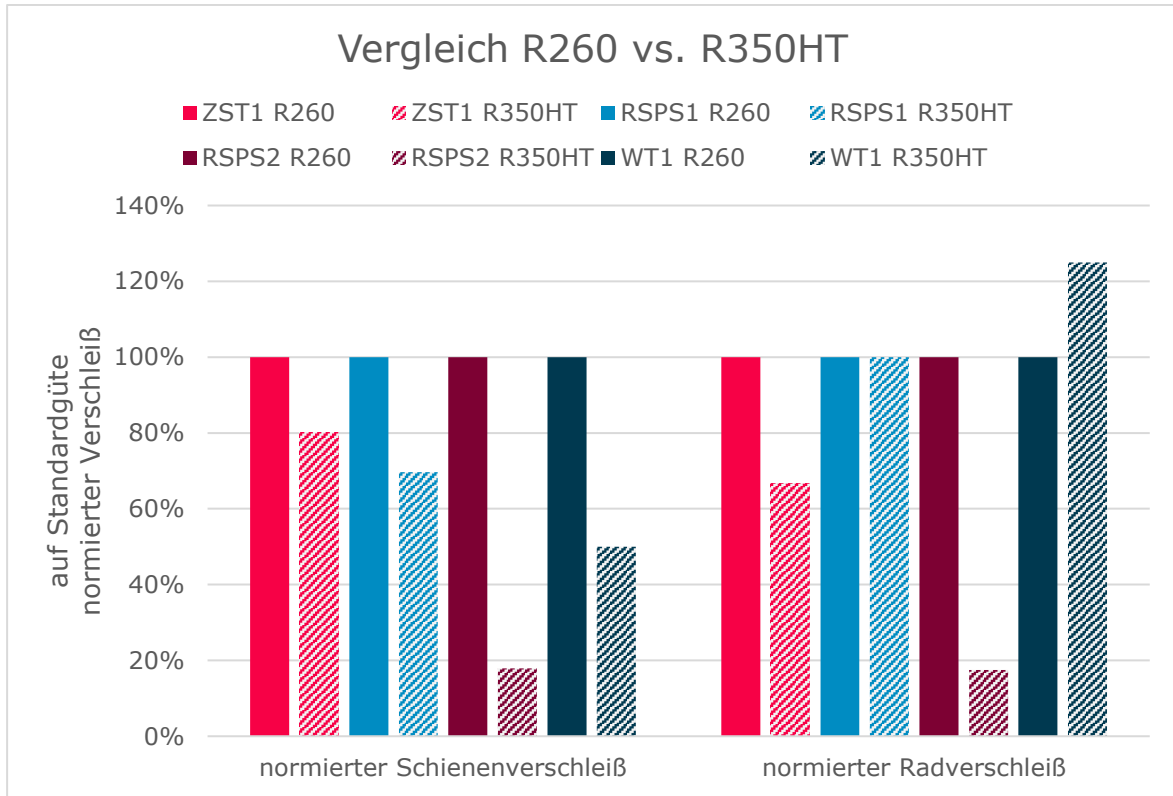


Abbildung 62: Vergleich der Ergebnisse: R260 vs. R350HT

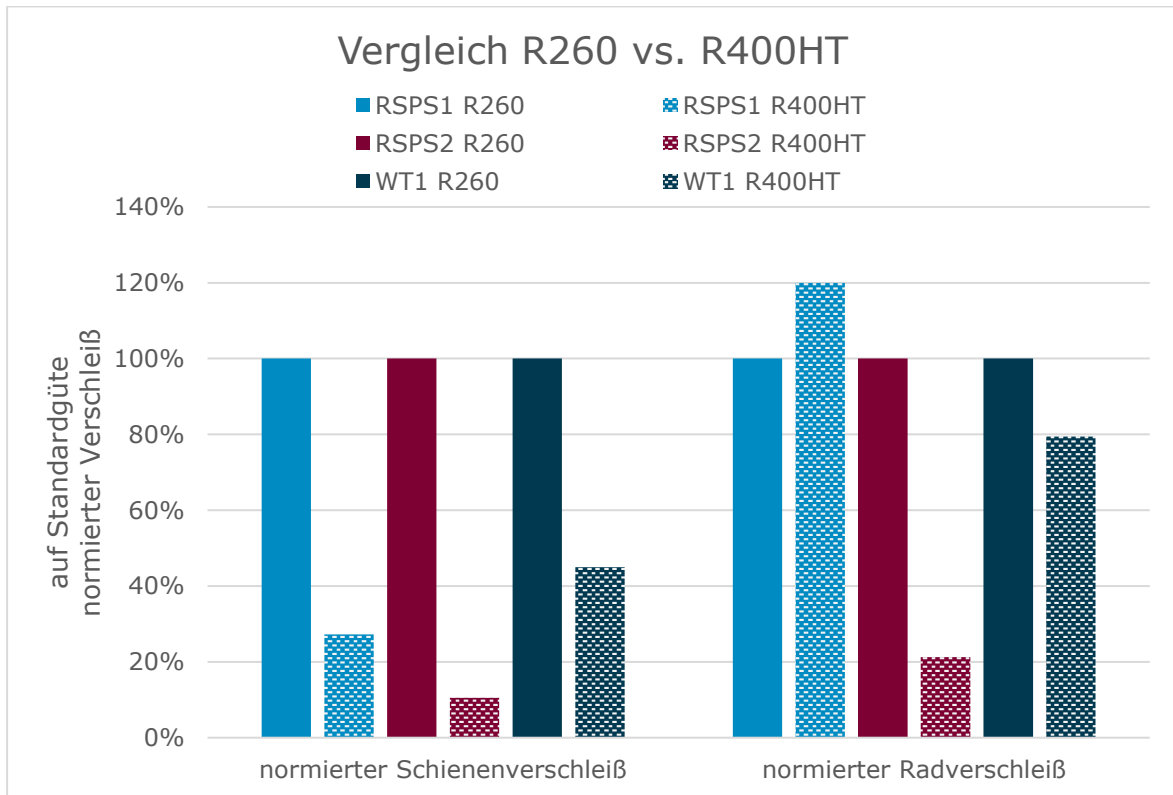


Abbildung 63: Vergleich der Ergebnisse: R260 vs. R400HT

4 Diskussion der Ergebnisse

Die beiden Darstellungen Abbildung 62 und Abbildung 63 zeigen den Vergleich des Verschleißverhaltens der Werkstoffpaarungen ER7-R260 vs. ER7-R350HT und ER7-R260 vs. ER7-R400HT. Dabei handelt es sich nach Tabelle 9 (S. 39) um die drei am häufigsten untersuchten Werkstoffkombinationen, auf welche sich dieser Vergleich beschränken soll. Gegenübergestellt werden hier Ergebnisse aus einem Zweiseiben-Test (ZST1), den beiden Rad-Schiene-Prüfstandtests (RSPS1 und RSPS2) und dem Lineartribometer-Test (WT1), also Ergebnisse aus vier Tests dreier unterschiedlicher Arten. Bezogen sind die Verschleißraten immer auf jene der Standardschiene der jeweiligen Versuchsreihe.

- Abbildung 62: Bei der Betrachtung des oberen Bildes ist zu erkennen, dass in einem Fall der Radverschleiß bei höherer Schienengüte um 25% ansteigt, in einem Fall gleich bleibt und zweimal absinkt (um 33% bzw. 82%).
- Abbildung 63: In der unteren Darstellung zeigt sich ein ähnliches Bild. Ein Anstieg um 20% und zweimal eine Verringerung (um 20% respektive 78%).

Die Ergebnisse für die **Verschleißraten der Schienen** zeigen einen eindeutigen Trend: der Schienenverschleiß sinkt bei Änderung der Schienengüte zu einer höheren Güte. Für den Radverschleiß kann kein eindeutiger Trend gefunden werden, weshalb weitere Betrachtungen notwendig sind. Tendenziell ist zu erkennen, dass die Abnahmen der Radverschleißraten deutlich größer sind als die Zunahmen. Im Folgenden wird versucht, einen anschaulichen Vergleich durch Einbeziehung der Belastungen wie Kontaktdruck und Schlupf zu erstellen.

Dazu werden in einem ersten Schritt die Daten der Resultate von ZST1, ZST3, ZST4 und ZST5 verwendet (siehe Tabelle Anhang 19, S. XXXV). Beobachtet werden soll der Bereich des Härteverhältnisses von Schiene zu Rad größer eins. Da dies für ZST2 nicht durchgehend gegeben ist, wird dieser Versuch in die folgenden Auswertungen nicht inkludiert. Diese Betrachtungen entsprechen der rechten Seite in Abbildung 33 (theoretisches Verschleißmodell, S. 43).

Die Verschleißwerte jedes Versuchs werden dazu folgendermaßen **normiert**: Der Schienen- bzw. Radverschleiß jeder Untersuchungsreihe (konstante Parameter, außer Schienengüte) wird auf den jeweiligen Verschleißwert beim

kleinsten Härteverhältnis über eins – und nicht bei genau eins, wie im theoretischen Modell – bezogen. Somit starten alle Versuchsreihen ausgehend vom niedrigsten Härteverhältnis bei einem normierten Verschleiß von eins. Der Begriff Versuchsreihe beschreibt einen Teil eines Versuches, bei dem alle Parameter (Kontaktdruck, Schlupf, Radhärte etc.) bis auf die Schienenhärte konstant gehalten werden. Für ein veranschaulichendes Berechnungsbeispiel werden die Ergebnisse einer Versuchsreihe (Radgüte ER7) des RSPS2 herangezogen (siehe Abbildung 57, S. 78): In Tabelle 19 sind die entsprechenden Werte aufgelistet: Verschleißergebnisse werden zusammen mit dem jeweiligen Härteverhältnis den entsprechenden Werkstoffkombinationen zugeordnet.

Tabelle 19: Werte für Normierungsbeispiel anhand RSPS2

Werkstoffkombination (WK)	Schienenverschleiß [mm ²] $v^{Schiene}(WK)$	Radverschleiß [mm ²] $v^{Rad}(WK)$	Härteverhältnis Schiene/Rad
ER7 – R260	95	80	1,094
ER7 – R350HT	17	14	1,472
ER7 – R400HT	10	17	1,66

$$v_{norm}^{Rad/Schiene}(WK) = \frac{v^{Rad/Schiene}(WK)}{v_{min. Härteverhältnis}} \quad (17)$$

Gleichung (17) zeigt die Berechnungsformel für den normierten Verschleiß $v_{norm}^{Rad/Schiene}(WK)$ in Abhängigkeit der Werkstoffkombination (WK). Bezogen werden die jeweiligen Verschleißwerte auf den Wert bei kleinstem Härteverhältnis $v_{min. Härteverhältnis}$ (hier bei Kombination ER7 – R260). Nach Durchführung der Normierung – jeweils für den Rad- und Schienenverschleiß getrennt –, erhält man die Ergebnisse nach Tabelle 20.

Tabelle 20: Ergebnisse des Normierungsbeispiels anhand RSPS2

Werkstoffkombination (WK)	normierter Schienenverschleiß $v_{norm}^{Schiene}(WK)$	normierter Radverschleiß $v_{norm}^{Rad}(WK)$
ER7 – R260	1	1
ER7 – R350HT	0,179	0,175
ER7 – R400HT	0,105	0,213

4 Diskussion der Ergebnisse

Es ist hierbei irrelevant, ob es sich bei den eingesetzten Verschleißwerten um Absolutwerte (RSPS: Verschleißfläche) oder bezogene Werte (ZST: Verschleißmasse pro überrollter Länge) handelt. Somit lässt sich Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungen herstellen.

Trägt man die zuvor normierten Daten – noch ohne Berücksichtigung der Belastung durch Pressung bzw. Schlupf – in ein Streudiagramm ein, erhält man Abbildung 64. Nicht unerwähnt soll die Tatsache bleiben, dass dabei Ergebnisse von unterschiedlichen Versuchsreihen, die auf unterschiedlichen Prüfständen durchgeführt wurden, miteinander verglichen werden. Die dadurch entstehende „Unschärfe“ wird in Kauf genommen, um weitere Parameter in eine gemeinsame Gegenüberstellung einbeziehen zu können.

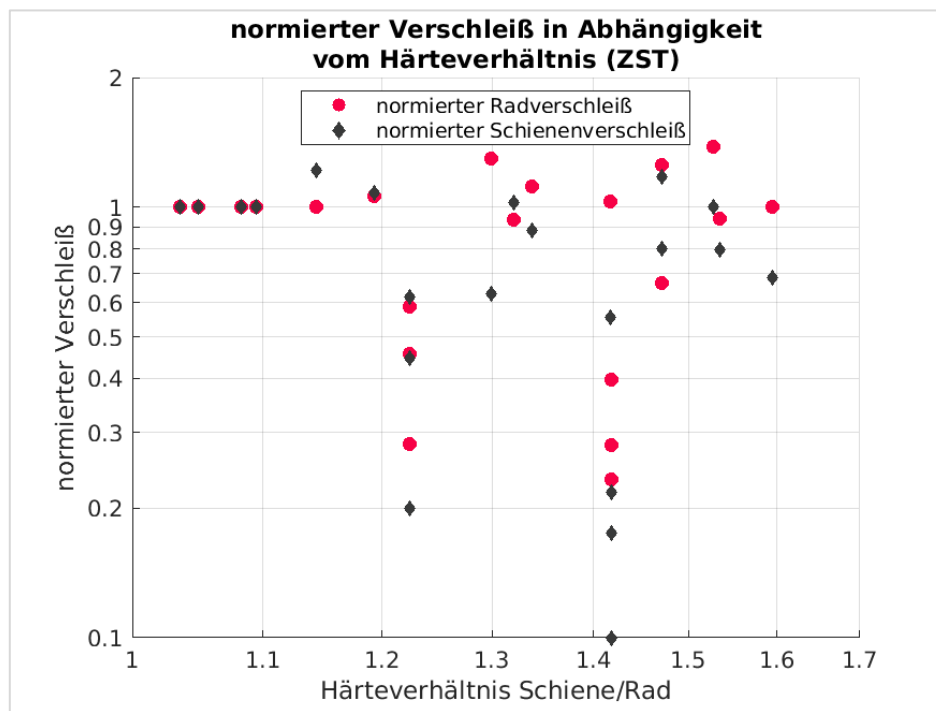


Abbildung 64: Verschleißraten für Härteverhältnis Schiene/Rad > 1 (ZST)

Den theoretischen Überlegungen¹⁴⁰ zufolge (siehe auch 3.2.1, S. 39), sollte der Radverschleiß – ausgehend von einem Härteverhältnis gleich eins – bei dessen Erhöhung konstant bleiben. Die hier abgebildeten Ergebnisse zeigen, dass die

¹⁴⁰ Steele und Reiff, „Rail - It's behavior and relationship to total system wear“; Pointner, „Überlegungen zum Verschleiß im Rad-Schiene-System“.

Datenpunkte aus den Untersuchungen deutlich von den Erwartungen abweichen. Vergleicht man Abbildung 64 (S. 87) mit Abbildung 33 (S. 43), ist zu erkennen, dass die eingetragenen Punkte nicht die Erwartungen, abgeleitet aus dem theoretischen Modell (über steigendem Härteverhältnis konstanter Radverschleiß und abfallender Schienenverschleiß), bestätigen. Einige weichen moderat nach oben, andere massiv nach unten ab.

Analog zu den Ergebnissen der Zweiseiben-Tests, sind in Abbildung 65 auf dieselbe Weise angepasste Ergebnisse der Rad-Schiene-Prüfstandtests dargestellt (basierend auf den Daten aus Tabelle Anhang 20, S. XLI). Auch hier zeigt sich, dass die Erwartungen des theoretischen Modells nur teilweise getroffen werden.

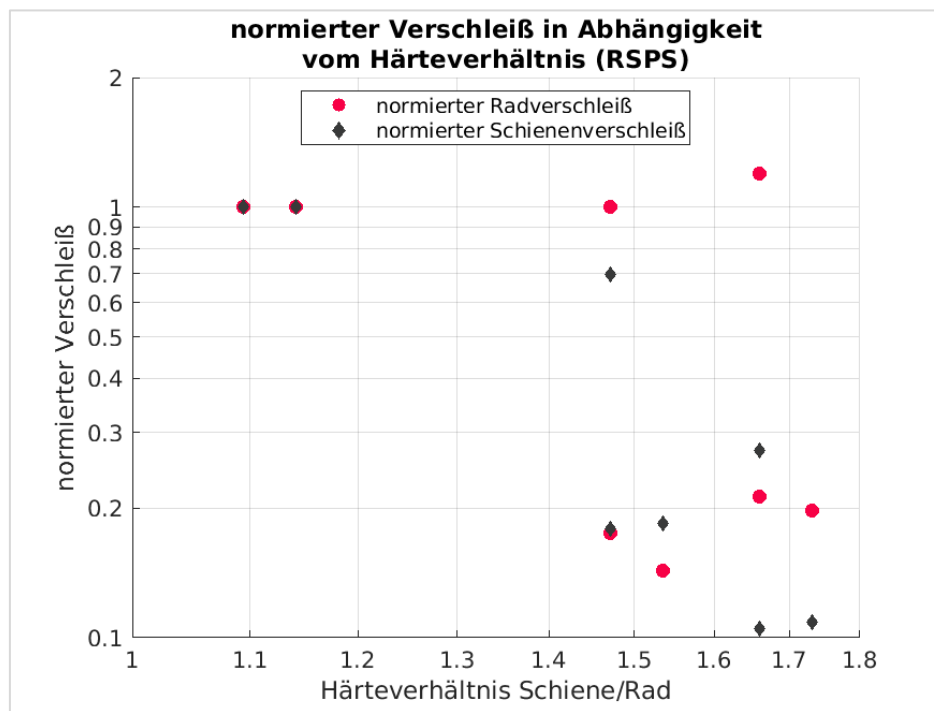


Abbildung 65: Verschleißraten für Härteverhältnis Schiene/Rad > 1 (RSPS)

Herauszufinden gilt es, ob sich anhand der Randbedingungen einer Untersuchung abschätzen lässt, wo die Ergebnisse in den obigen Diagrammen zu liegen kommen. Deshalb werden im nächsten Schritt die eben gezeigten Ergebnisse mit den Belastungen (Kontaktdruck und Schlupfrate bei ZST, vertikale & horizontale Belastung und Schräglaufwinkel bei RSPS) verknüpft. Die beiden Parameter *Härteverhältnis* sowie *normierter Verschleiß* werden somit um zwei bzw. drei zusätzliche Parameter erweitert.

4 Diskussion der Ergebnisse

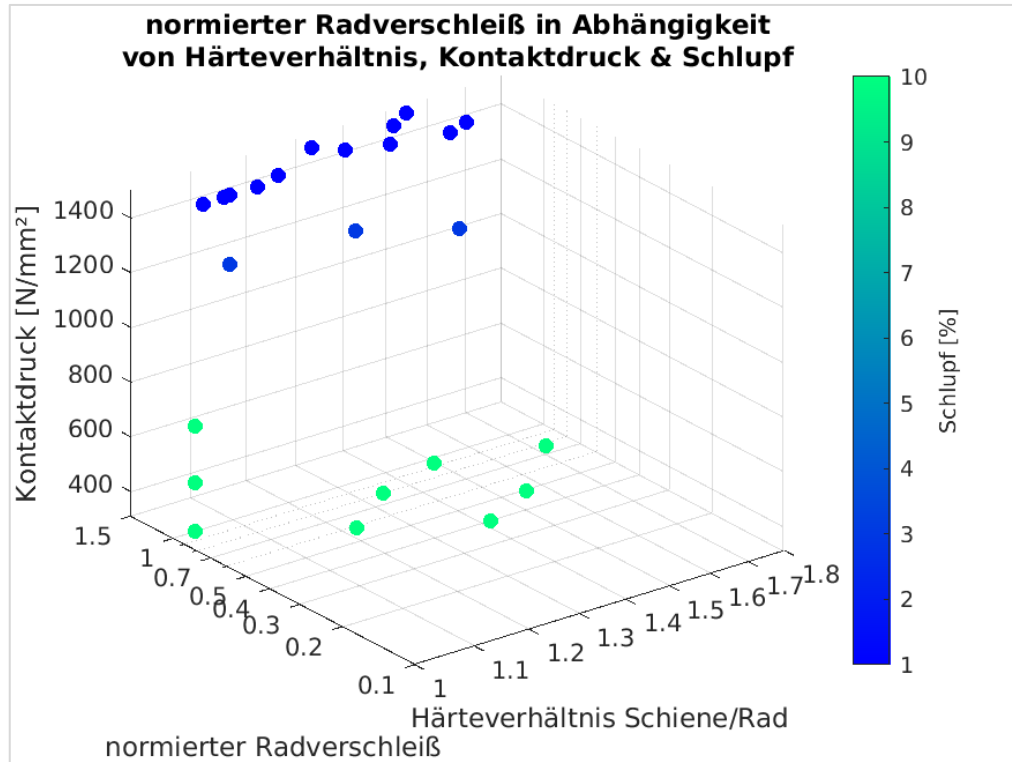


Abbildung 66: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Belastung (ZST)

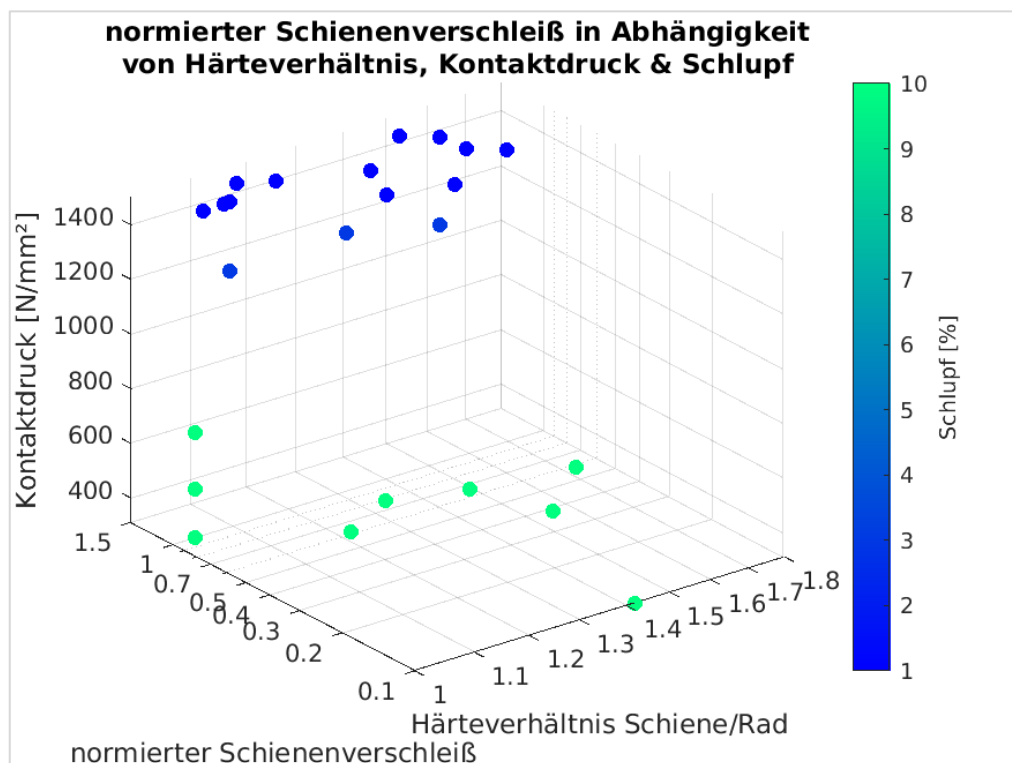


Abbildung 67: norm. Schienenverschleiß – Härteverhältnis, Belastung (ZST)

Die in Abbildung 66 und Abbildung 67 (jeweils S. 89) gezeigten Datenpunkte entsprechen jenen aus Abbildung 64 (S. 87), jedoch erweitert um die Parameter *Kontaktdruck* (z-Achse) und *Schlupfrate* (Farbskala). Hierbei ist schnell zu erkennen, dass die Kontaktbelastung entweder durch hohen Kontaktdruck oder hohen Schlupf erfolgt. Beides zusammen ist aufgrund hoher Reibungswärme im Kontakt für Verschleißuntersuchungen nicht sinnvoll anzuwenden.

Um den Zusammenhang von Kontaktdruck und Radverschleißrate anschaulich darzustellen, wird die in Abbildung 66 (S. 89) gezeigte Darstellung um die Dimension des Härteverhältnisses reduziert. Daraus erhält man Abbildung 68: Bereits hier ist zu erkennen, dass jene Datenpunkte, die einen normierten Radverschleiß größer eins zeigen, gleichzeitig auch bei den höchsten Kontaktdrücken liegen.

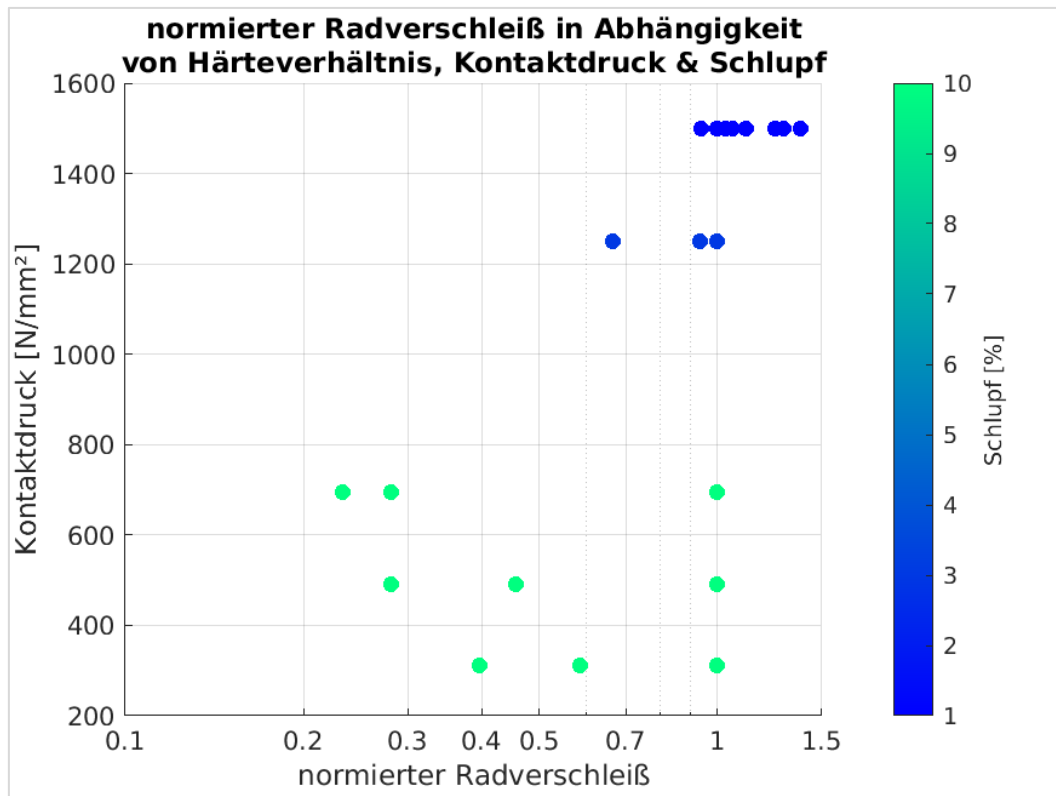


Abbildung 68: norm. Radverschleiß – Belastung (ZST)

Um eine bessere Übersicht zu schaffen und das Härteverhältnis wieder sichtbar zu machen, wird in Abbildung 69 (S. 91) auf die Darstellung des Schlupfes verzichtet und stattdessen der Kontaktdruck mittels Farbskala dargestellt. Da der Schlupf eher wenig Einfluss auf vorliegende Zusammenhänge zu haben scheint,

4 Diskussion der Ergebnisse

ist der Verzicht darauf eine hinnehmbare Vereinfachung. Die betrachtete Ebene hierbei ist die x-y-Ebene *Härteverhältnis – normierter Verschleiß* (vgl. Abbildung 64, S. 87).

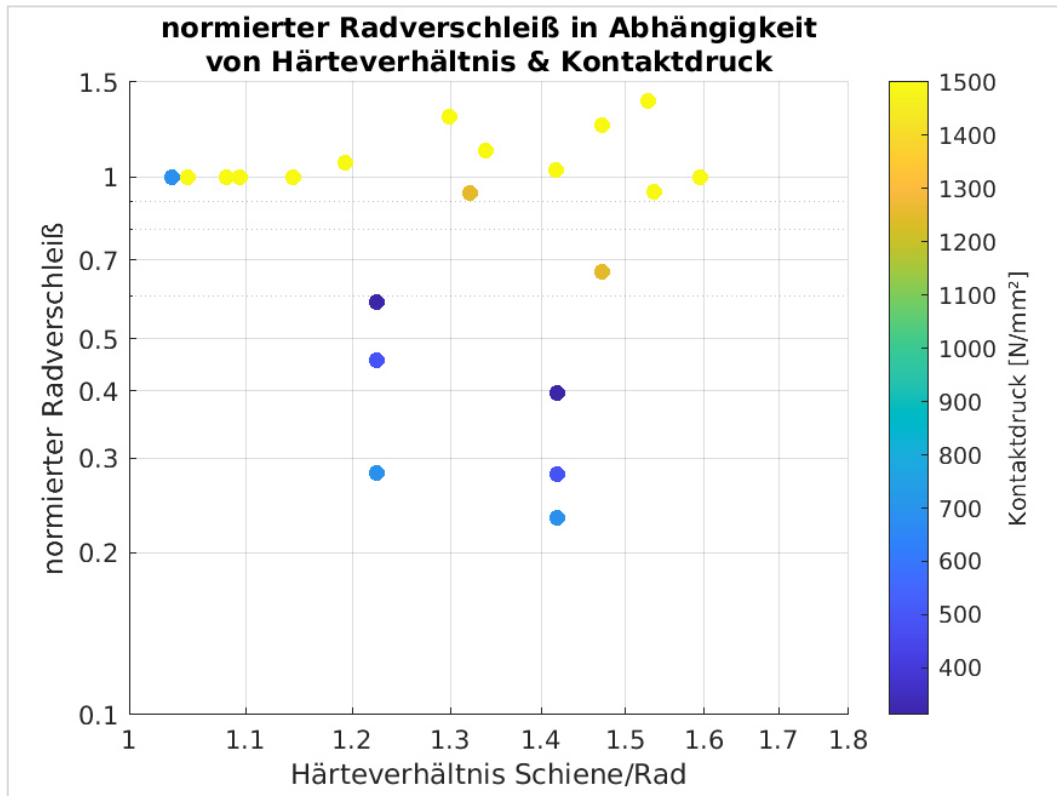


Abbildung 69: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Kontaktdruck (ZST)

Hier ist ein **Trend** wahrzunehmen: Ergebnisse hinsichtlich der Radverschleißrate zeigen eine Abhängigkeit vom Kontaktdruck. Bei **hohem Kontaktdruck** bleibt der **Verschleiß weitgehendst konstant**, wenn das Härteverhältnis erhöht wird. Bei **niedrigerer Belastung nimmt der Radverschleiß ab**, bei Zunahme des Härteverhältnisses. Weiters fällt auf, dass die sechs Punkte im unteren Bereich des normierten Radverschleißes bei Kontaktdrücken von 300 – 700 N/mm² ein unerwartetes Verhalten zeigen: Jene Versuchsreihe mit dem höchsten der drei Druckniveaus zeigt den größten Abfall des Radverschleißes (hellblaue Punkte, entsprechen 696 N/mm²), jene mit dem niedrigsten Kontaktdruck zeigt den geringsten Abfall der Verschleißrate (dunkelblaue Punkte, entsprechen 312 N/mm²). Die Absolutergebnisse (siehe Anhang 3, S. X) zeigen deutlich unterschiedliche Verschleißniveaus abhängig vom Kontaktdruck.

Dasselbe Vorgehen für den Schienenverschleiß – abgeleitet von Abbildung 67 (S. 93) – ergibt Abbildung 70 und Abbildung 71. Es ist ein dem Radverschleiß ähnliches Verhalten für den Schienenverschleiß (jeweils normiert) zu erkennen. Auch hier finden sich jene Versuchsreihen, die einen eher gleichbleibenden Schienenverschleiß verzeichnen, bei höherem Kontaktdruck und mittleren Härteverhältnissen. Gleichzeitig sind die Versuchsreihen mit abfallendem Schienenverschleiß bei ansteigendem Härteverhältnis bei niedrigem bis mittlerem Kontaktdruck angesiedelt.

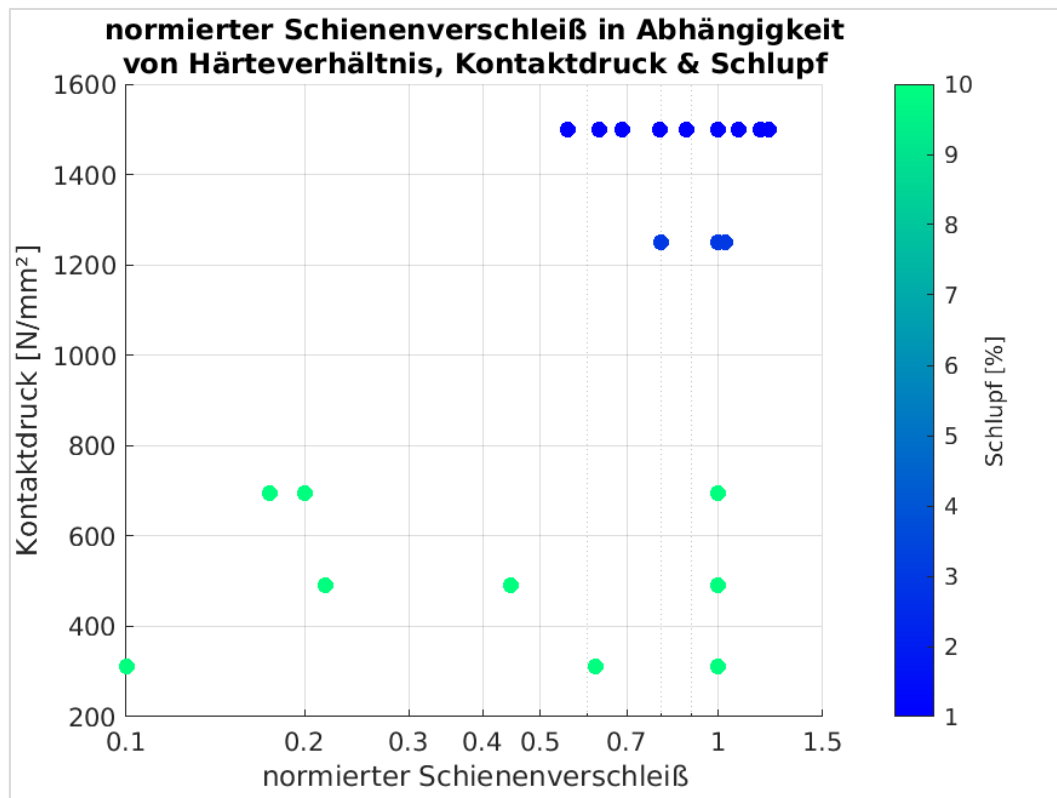


Abbildung 70: norm. Schienenverschleiß – Belastung (ZST)

Um weitere Vergleiche anstellen zu können, werden analog für die Resultate der Rad-Schiene-Prüfstandtests dieselben Auswertungen durchgeführt. Ausgehend von Abbildung 65 (S. 88) werden die fehlenden Parameter hinzugefügt und die Darstellungen somit um mehrere Dimensionen erweitert. In Abbildung 72 und Abbildung 73 (S. 94) sind die Datenpunkte aus Abbildung 65 um die *vertikale Belastung* (z-Achse), *horizontale Belastung* (Punktgröße) sowie den *Anlaufwinkel* (Farbskala) erweitert. Es wird ersichtlich, dass das Belastungsniveau der beiden Untersuchungen deutlich differiert.

4 Diskussion der Ergebnisse

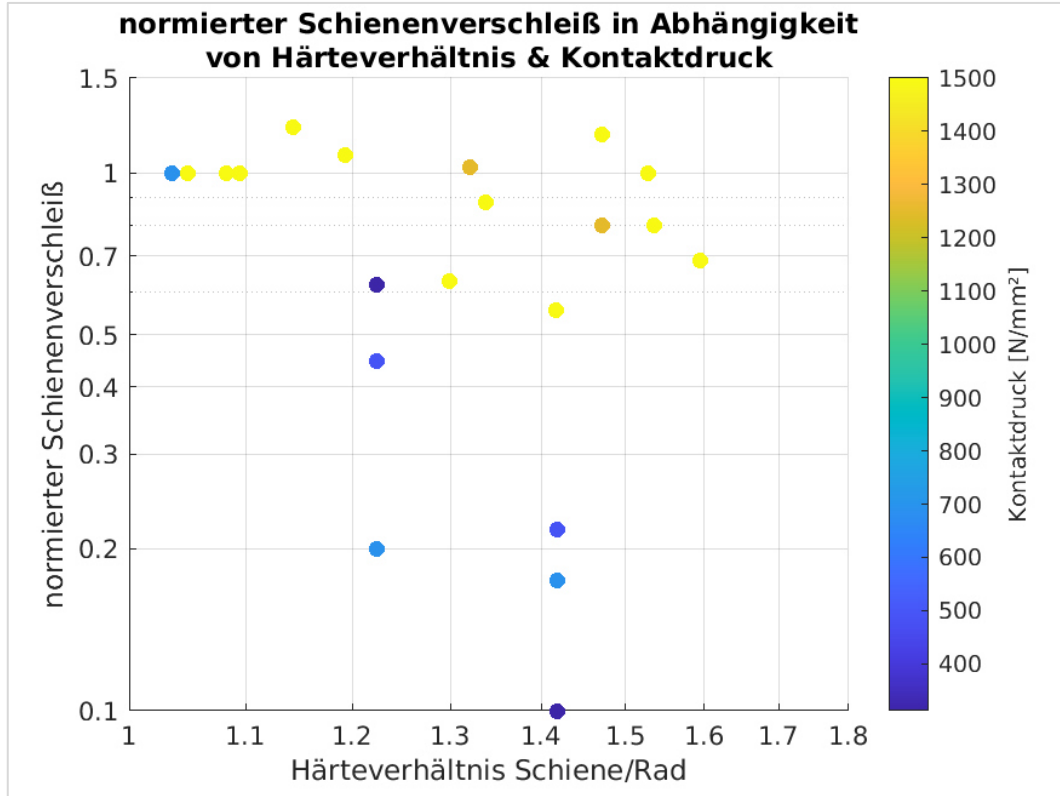


Abbildung 71: norm. Schienenverschleiß 3D – Härteverhältnis, Kontaktdruck (ZST)

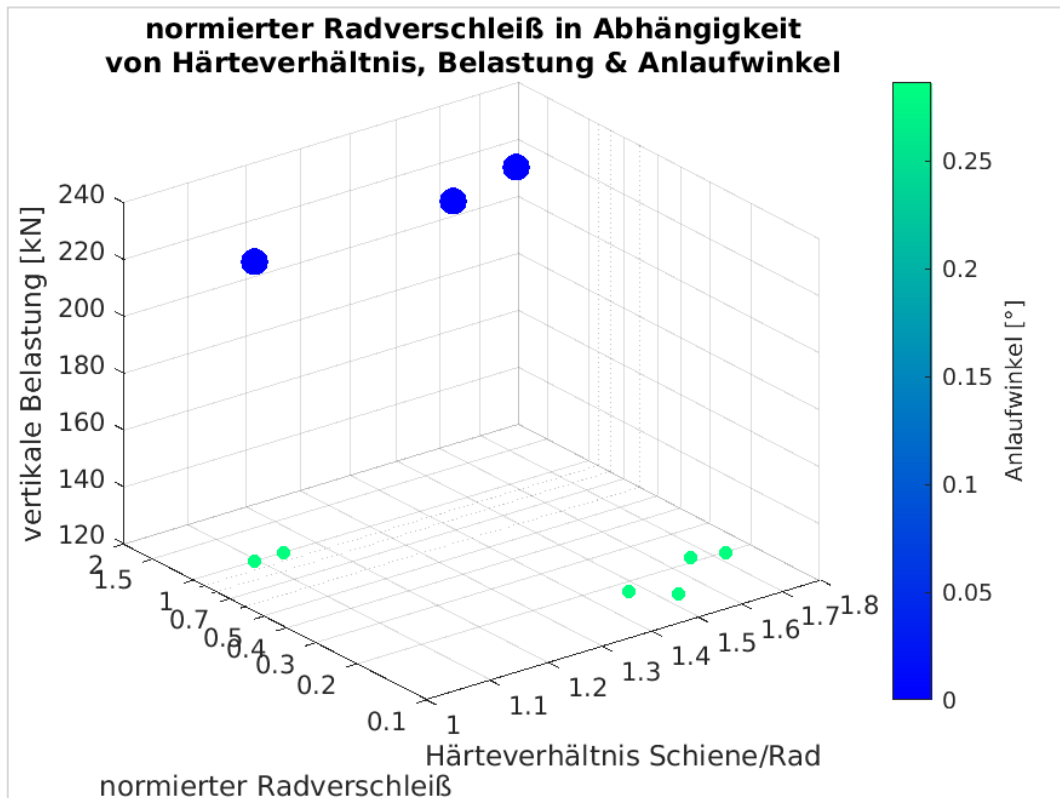


Abbildung 72: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Belastung (RSPS)

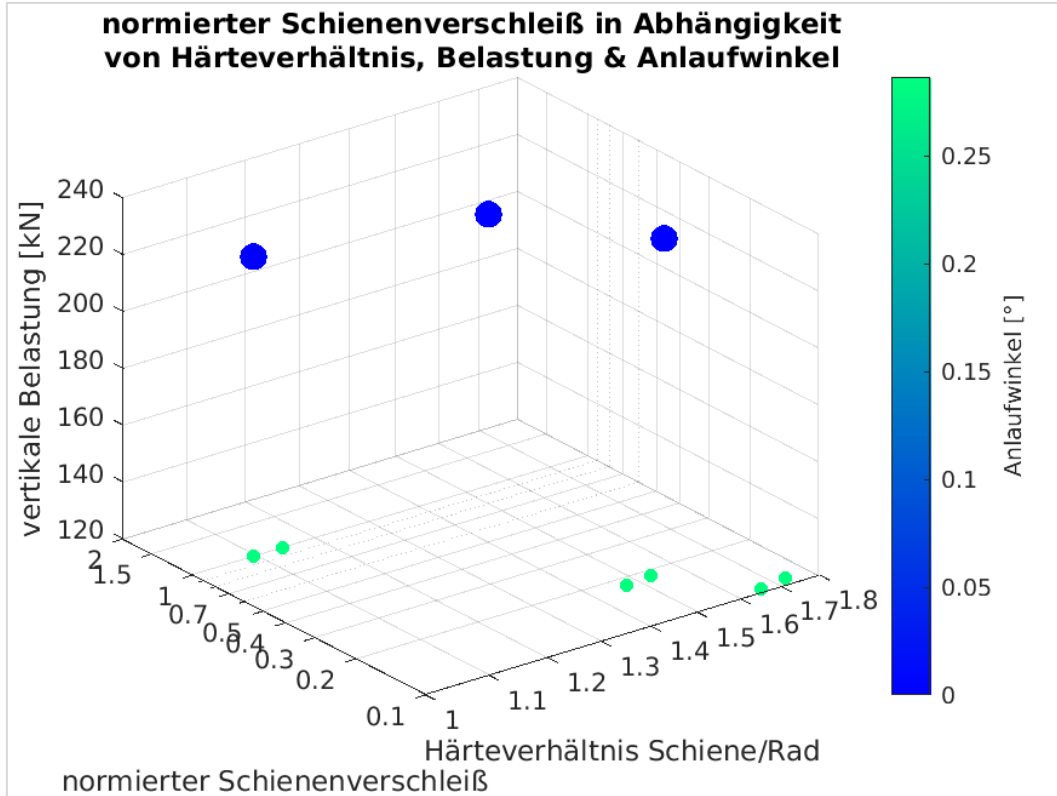


Abbildung 73: norm. Schienenverschleiß – Härteverhältnis, Belastung (RSPS)

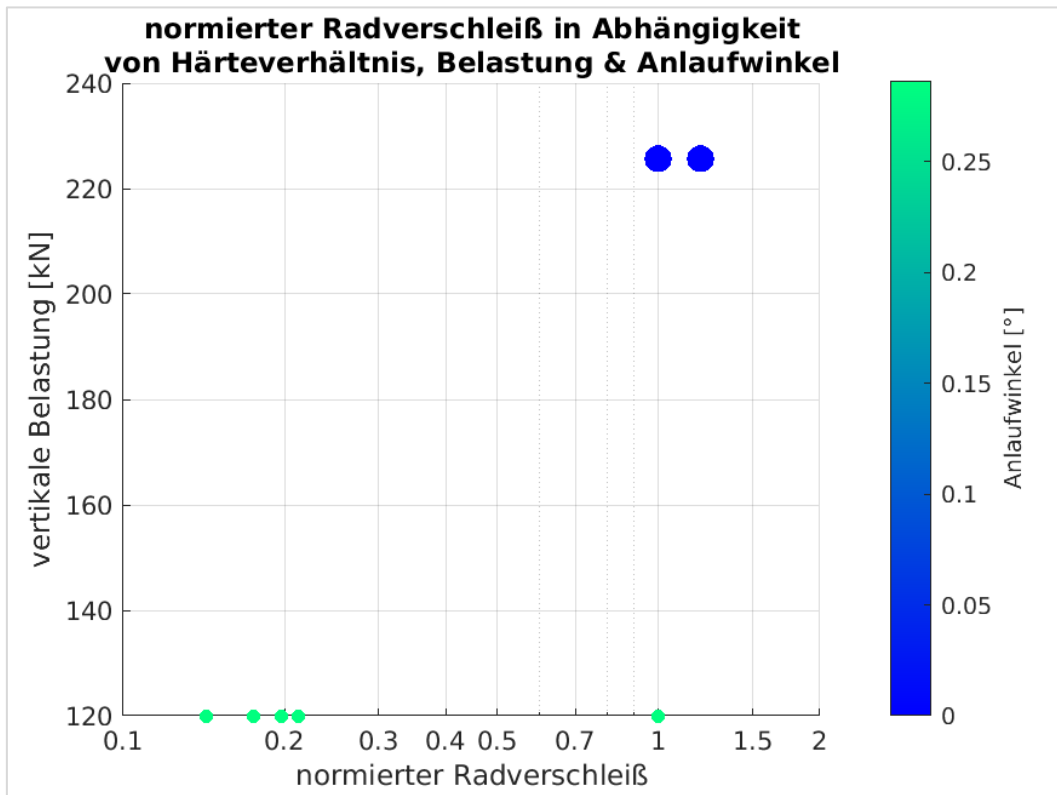


Abbildung 74: norm. Radverschleiß – Belastung (RSPS)

4 Diskussion der Ergebnisse

Die Reduktion der Dimensionen um das Härteverhältnis ergibt Abbildung 74: hier wird in der Ebene der normierte Radverschleiß abhängig von vertikaler und horizontaler Belastung sowie dem Anlaufwinkel gezeigt.

Hervorzuheben ist, dass die Vertikalbelastung im Falle des RSPS1 einer Achslast von 46 t entspricht, die des RSPS2 24,5 t. Vergleicht man also die am Prüfstand angewendeten Belastungen mit real auftretenden, sind die von RSPS2 deutlich näher an tatsächlichen Radbelastungen von Schienenfahrzeugen – in Europa sind Achslasten von 22,5 t zulässig¹⁴¹.

Ändert man die Perspektive – analog zu Abbildung 69 (S. 91) – und legt den Fokus wieder auf das Härteverhältnis, kommt man zu Abbildung 75.

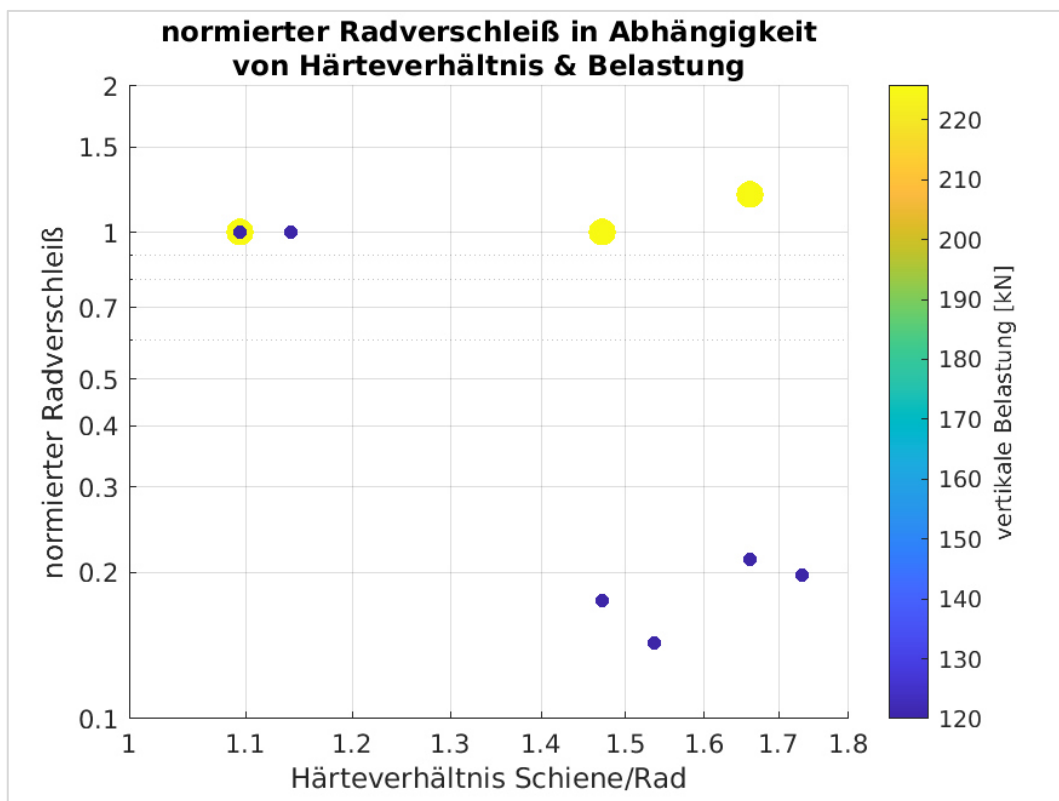


Abbildung 75: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Kräfte (RSPS)

¹⁴¹ Austrian Standards International, „EN 15528 - Bahnanwendungen – Streckenklassen zur Behandlung der Schnittstelle zwischen Lastgrenzen der Fahrzeuge und Infrastruktur“.

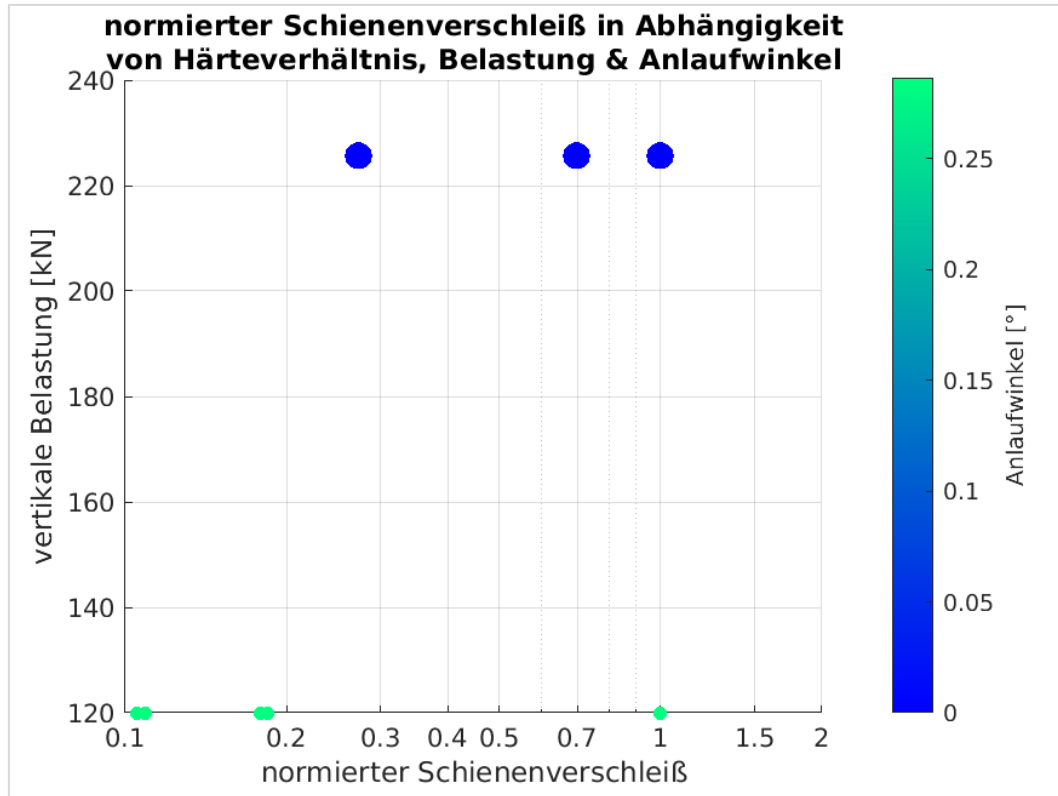


Abbildung 76: norm. Schienenverschleiß – Belastung (RSPS)

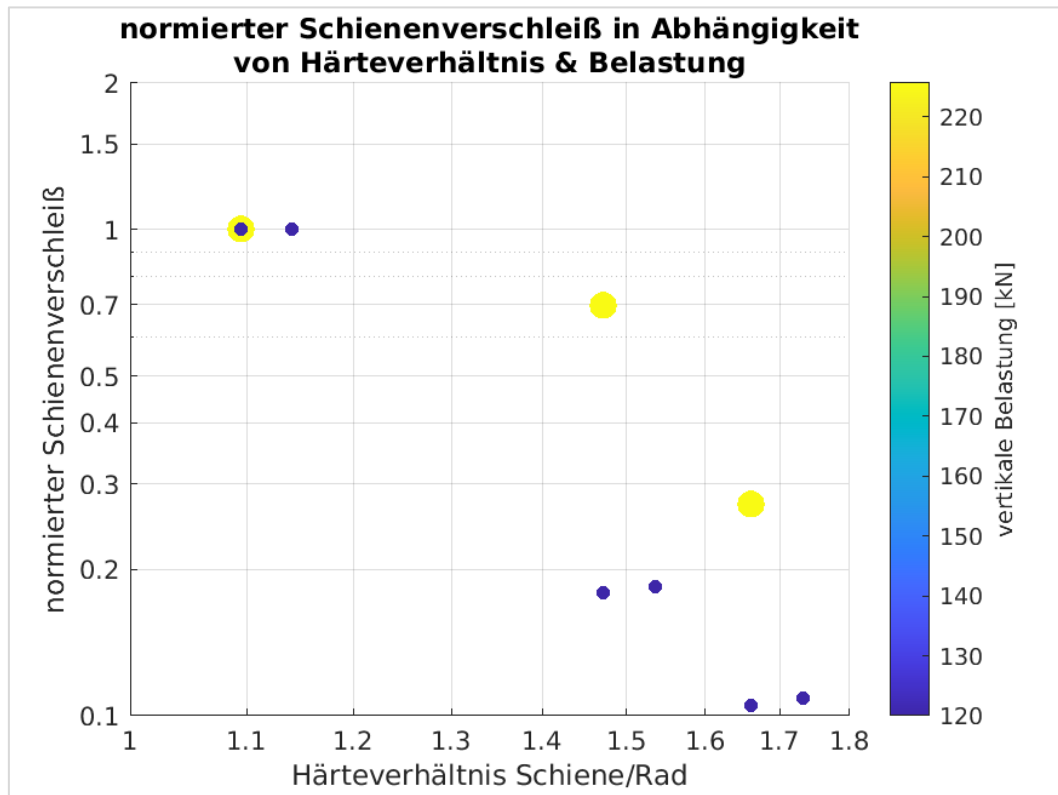


Abbildung 77: norm. Schienenverschleiß – Härteverhältnis, Kräfte (RSPS)

4 Diskussion der Ergebnisse

In Abbildung 76 ist der normierte Schienenverschleiß der Rad-Schiene-Prüfstandtests in Abhängigkeit von Härteverhältnis, vertikaler und horizontaler (Punktgröße) Belastung und Anlaufwinkel aufgetragen. Es zeigt sich das erwartete Verhalten: ansteigendes Härteverhältnis führt zum Absinken des Schienenverschleißes.

Abbildung 77 zeigt den normierten Schienenverschleiß in Abhängigkeit des Härteverhältnisses sowie der Kontaktkräfte (Farbskala \triangleq vertikal; Punktgröße \triangleq horizontal). Vor allem beim Radverschleiß ist – wie auch zuvor bei den Zweischeiben-Tests gezeigt – eine Abhängigkeit des Verschleißverhaltens vom Belastungsniveau gegeben: Es zeigt sich der **Trend**, dass bei hoher Belastung – in diesem Fall durch Horizontal- und Vertikalkräfte auf das Rad am Prüfstand – der Radverschleiß nahezu konstant bleibt; bei **Belastung durch bei Mischverkehr üblichen Achslasten nimmt der Radverschleiß bei Zunahme der Schienenhärte ab**.

Nachfolgend soll ein Vergleich der Belastungsniveaus zwischen den Zweischeiben-Tests und den Rad-Schiene-Prüfstandtests angestellt werden. Dazu wurde der Ansatz gewählt, den Belastungsparameter „Vertikalkraft“, welcher als Prüfparameter für die Rad-Schiene-Prüfstandtests stets angegeben ist, in Hertz'sche Pressung – also Kontaktdruck analog den Zweischeiben-Tests – zu überführen. Diese stark vereinfachte Modellbildung soll zur Veranschaulichung der dem Verschleißverhalten zugrunde liegenden Effekte dienen. Es ist **ausdrücklich darauf hinzuweisen**, dass das Modell des Hertz'schen Kontaktes im Bereich, in dem der Verschleiß hauptsächlich auftritt, **eine Näherung** darstellt. Es ist wie jede Modellbildung eine Vereinfachung. Daher wird dieses Modell auch nicht direkt zur Verschleißargumentation verwendet, sondern es erlaubt lediglich eine Größenordnung der Kontaktdrücke abzuschätzen sowie die auftretenden Zusammenhänge zu illustrieren. Die Einschränkung, dass der Hertz'sche Kontakt ausschließlich Normalkräfte berücksichtigt, wird hingenommen. In der Literatur wird die Annäherung des Rad-Schiene Kontaktes durch Hertz'sche Theorie als zulässig beschrieben¹⁴². Zu beachten ist, dass die zur Berechnung verwendete

¹⁴² Gleislauftechnik Müller, „Kontaktmechanik Rad-Schiene“, 10.

Geometrie (Schienenkopfradius) nicht konstant über die Versuchsdauer ist. Durch den Einlaufvorgang verändert sich das Schienenprofil. Es ist anzunehmen, dass die hier berechneten Hertz'schen Pressungen Maxima hinsichtlich des Kontaktdruckes darstellen. Anpassungsvorgänge durch Verschleiß vergrößern die Kontaktfläche und verringern dadurch die auftretenden Drücke.

Die Modellierung erfolgte durch einen Hertz'schen Kontakt von **Zylinder auf Zylinder** mit 90° zueinander gedrehten Achsen. Damit wird der Einfluss der Geometrie durch den Schienenkopfradius, je nach verwendetem Schienenprofil, berücksichtigt. Die Querkraft wird in dieser Betrachtung vereinfachend vernachlässigt, da sie im Verhältnis zur Vertikalkraft klein ist.

Das verwendete Formelwerk zur Bestimmung der auftretenden Kontaktdrücke lautet wie folgt¹⁴³:

Vergleichsradius R_v :

$$R_v = 2 * \frac{R_1 * R_2}{R_1 + R_2} \quad (18)$$

Vergleichs-Elastizitätsmodul E_v :

$$E_v = 2 * \frac{E_1 * E_2}{E_1 + E_2} \quad (19)$$

Vergleichs-Querkontraktionszahl μ_v :

$$\mu_v = \sqrt{\frac{E_1 * \mu_2^2 + E_2 * \mu_1^2}{E_1 + E_2}} \quad (20)$$

Kontaktdruck p_0 :

$$p_0 = 0,364 * \left[1 - \left(\frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2} \right)^2 \right]^{0,2} * \sqrt[3]{\frac{F}{R_v^2} * \left(\frac{E_v}{1 - \mu_v^2} \right)^2} \quad (21)$$

¹⁴³ Kunz, „Kontaktprobleme und ihre praktische Lösung“.

4 Diskussion der Ergebnisse

Die in obige Formeln eingesetzten Werte zeigt Tabelle 21. Der Elastizitätsmodul als auch die Querkontraktionszahl wurden für beide Kontaktpartner gleich angenommen, wodurch die Berechnung der Vergleichs-Werte entfallen kann und stattdessen direkt die entsprechenden Werte einzusetzen sind. Der Radius des Rades wurde mit 500 mm gewählt. Da Angaben in der Literatur fehlen, ist dieser Wert als Annahme zu verstehen.

Tabelle 21: Parameter für Hertz'sche Pressung

Radius des Rades R_1 :		500 mm	
Radius des Schienenkopfes R_2 :	für RSPS1:	300 mm	Schienenprofil 60E1
	für RSPS2:	200 mm	Schienenprofil 60E2
Kraft F :	für RSPS1:	225 kN	≅ 46 t Achslast
	für RSPS2:	120 kN	≅ 24,5 t Achslast
Elastizitätsmodul E :	210.000 N/mm ²	für beide Kontaktpartner	
Querkontraktionszahl μ :	0,3		

Durch Auswertung des Kontaktdruckes p_0 für die beiden Rad-Schiene-Prüfstandtests mit den entsprechenden Parametern ergeben sich 1581 N/mm² für RSPS1 respektive 1490 N/mm² für RSPS2.

Angeichts der großen Differenz der Belastungskräfte (beinahe Faktor 2) erscheint der Unterschied der Kontaktdrücke klein. Hier wird der große Einfluss der Geometrien der Kontaktpartner (laut Hertz'scher Theorie) deutlich: Im Falle des RSPS1 trifft eine große Kraft auf ein Schienenprofil, welches sich günstig auf den Kontaktdruck auswirkt. Im Gegensatz dazu trifft bei RSPS2 die moderate Kraft auf eine Geometrie, die die Pressung hoch werden lässt.

Der Bereich des Kontaktdruckes der in Abschnitt 3.2.2 (S. 45) behandelten Zweiseiben-Tests beläuft sich auf 312 – 1500 N/mm². Das obere Ende des Spektrums ist also im Bereich des Kontaktdruckes nach Hertz im Rad-Schiene-Kontakt. Es soll nun für jede Testmethode – und somit für die unterschiedlichen Systeme – jeweils eine Grenze gezogen werden, an der sich das Verschleißverhalten der untersuchten Proben ändert: Der Grenzwert für die Zweiseiben-Tests wird mit 1300 N/mm² gesetzt. Für die Rad-Schiene-Prüfstandtests wird

jener Druck, der in der Mitte zwischen den Belastungsniveaus liegt, gewählt: 1535 N/mm^2 . Da in den beiden Systemen deutlich unterschiedliche Kontaktbedingungen (Linienberührung bzw. realer Rad-Schiene-Kontakt) herrschen, weichen die Grenzwerte voneinander ab. Weiters ist festzuhalten, dass die hier gewählten Grenzwerte **ausschließlich zur Illustration** der Effekte dienen und **nicht als tatsächliche Kontaktdrücke** zu verstehen sind.

Trägt man die Verschleißraten über dem Härteverhältnis in ein Diagramm ein und visualisiert die beiden Bereiche (größer dem Grenzwert bzw. kleiner dem Grenzwert) durch Farben, entstehen Abbildung 78 und Abbildung 79 (jeweils S. 101). In den Darstellungen ist zu erkennen, dass sich die Radverschleißraten – sowohl bei den Zweischeiben-Tests als auch bei den Rad-Schiene-Prüfstandtests – jeweils über dem Grenzwert (rote Punkte) anders verhalten als darunter (blaue Punkte): **Über** dem jeweiligen **Grenzwert** zeigen die **Verschleißraten** bei Zunahme des Härteverhältnisses ein annähernd **konstantes Verhalten** (rot). **Unter** dem jeweiligen **Grenzwert** zeigt sich der **Radverschleiß abnehmend** bei steigendem Härteverhältnis.

Abbildung 80 und Abbildung 81 auf Seite 102 zeigen dieselben Darstellungen für den Schienenverschleiß. Hier ist die Grenze hinsichtlich des Verhaltens weniger deutlich zu erkennen (als beim Radverschleiß).

4 Diskussion der Ergebnisse

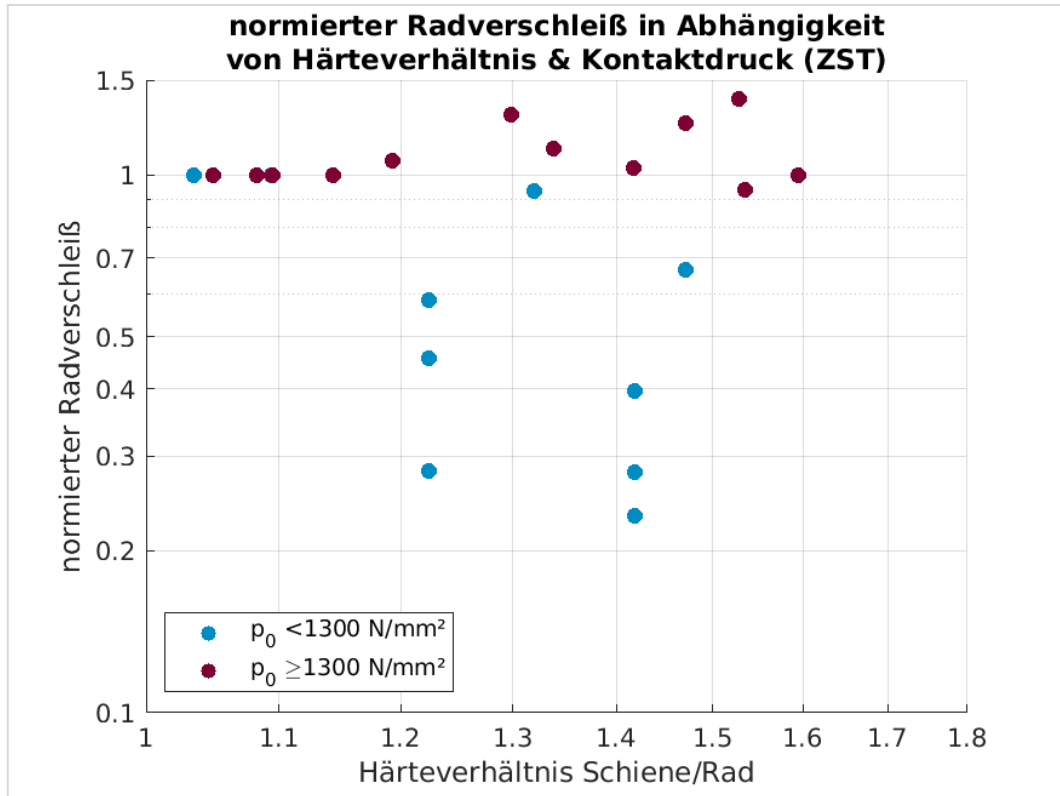


Abbildung 78: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Grenzwert (ZST)

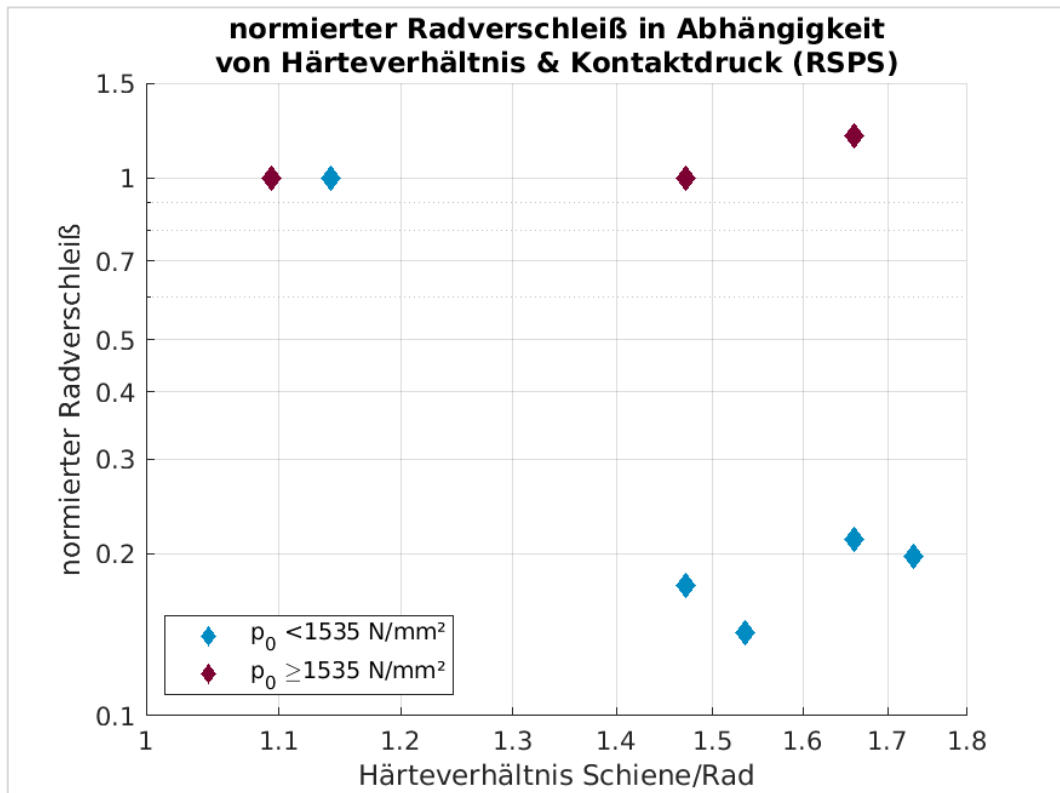


Abbildung 79: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Grenzwert (RSPS)

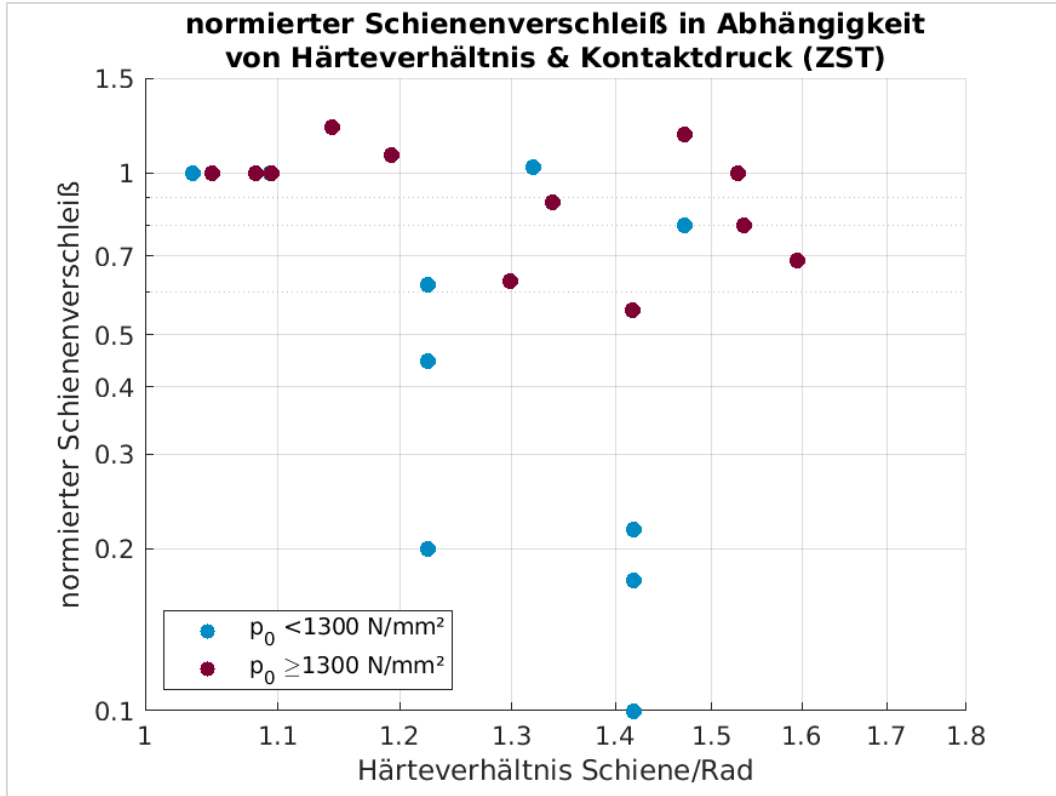


Abbildung 80: norm. Schienenverschleiß – Härteverhältnis, Grenzwert (ZST)

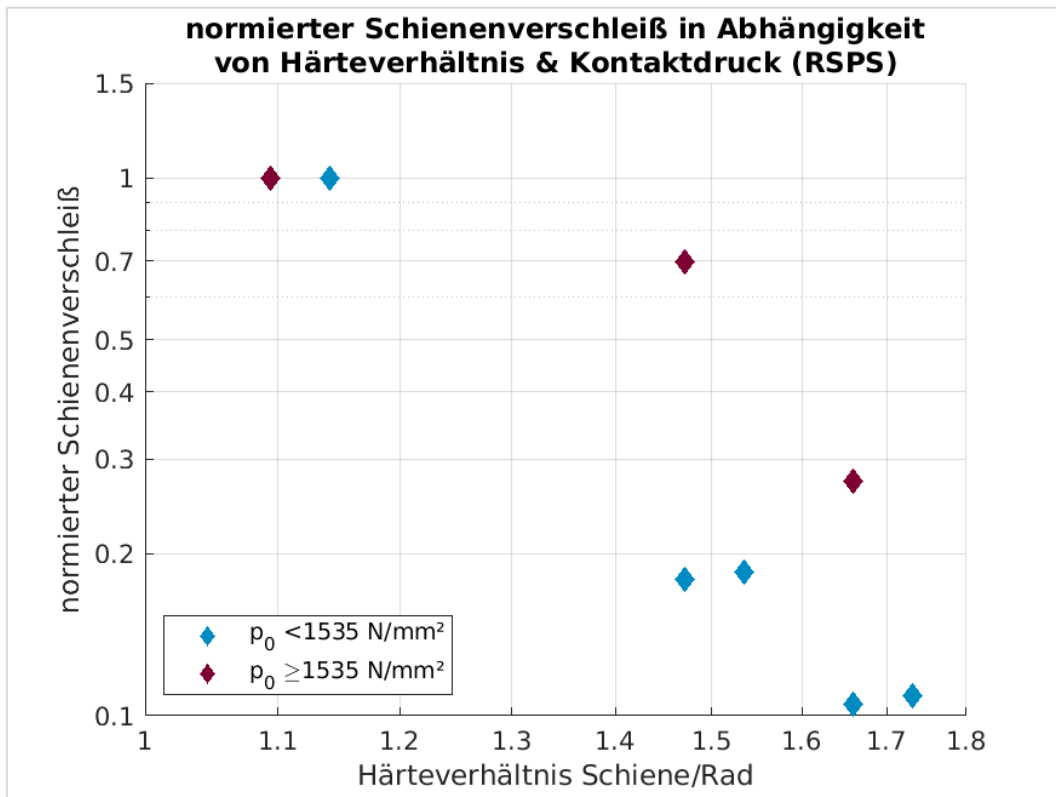
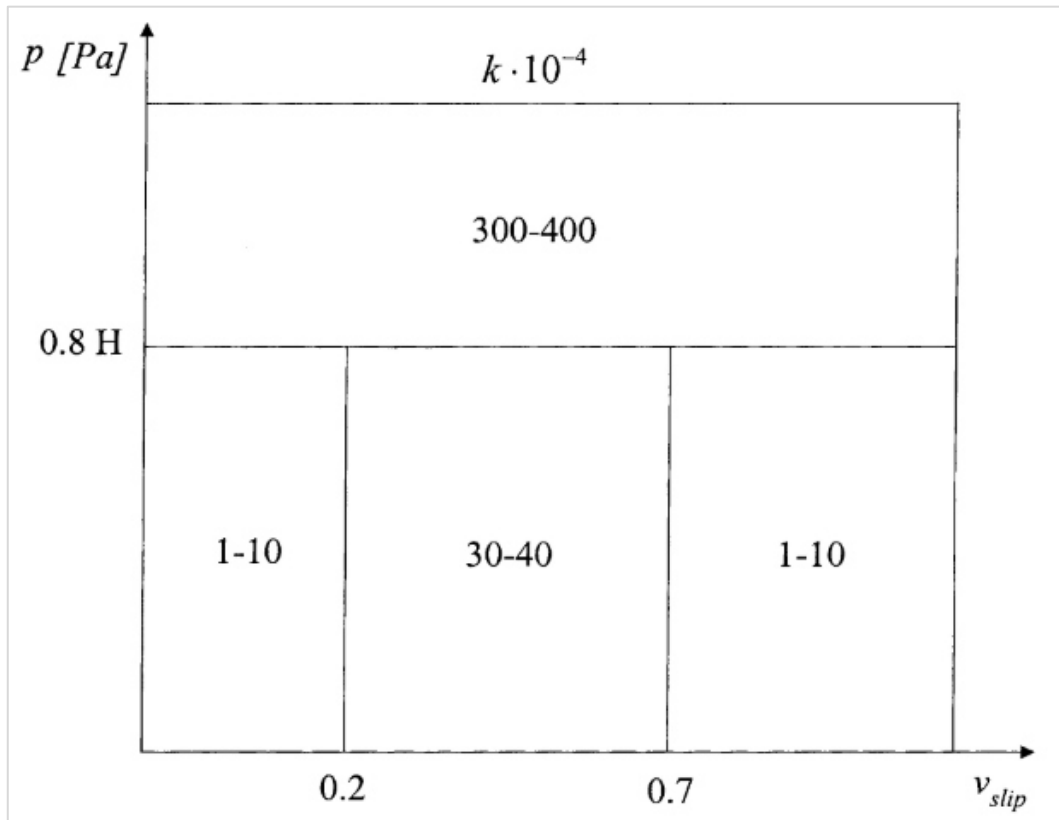


Abbildung 81: norm. Schienenverschleiß – Härteverhältnis, Grenzwert (RSPS)

4 Diskussion der Ergebnisse

Erklärung für die gezeigte Verhaltensweise kann der Wechsel des sogenannten *Verschleißregimes* sein. Dazu gibt es in der Literatur verschiedene Beschreibungen und Modelle: Als erstes sei das Verschleißmodell nach *Jendel* erwähnt¹⁴⁴. Dieses beschreibt das Verhalten eines Koeffizienten, der den Zusammenhang zwischen Verschleiß und Belastung repräsentiert. In Abbildung 82 ist eben dieser Faktor k über den Kontaktdruck p relativ zur Härte des verschleißenden Materials (vertikal) und den auftretenden Schlupf v_{slip} (horizontal) aufgetragen.

Abbildung 82: Verschleißmodell nach Jendel¹⁴⁵

Hier ist bei einem Kontaktdruck entsprechend dem 0,8-fachen der Härte des betrachteten Materials ein Sprung des Koeffizienten k um bis zu mehrere Größenordnungen (1-10 bzw. 30-40 springt auf 300-400) zu vernehmen. Bezieht man die zuvor eingeführte Grenze von 1535 N/mm² (für RSPS) auf die Härte der Radgüte R7 ($\sim 247 \text{ HB} \triangleq 260 \text{ HV} = 2550 \text{ N/mm}^2$), entspricht dies ungefähr

¹⁴⁴ Jendel, „Prediction of wheel profile wear - Comparisons with field measurements“.

¹⁴⁵ Jendel, 96.

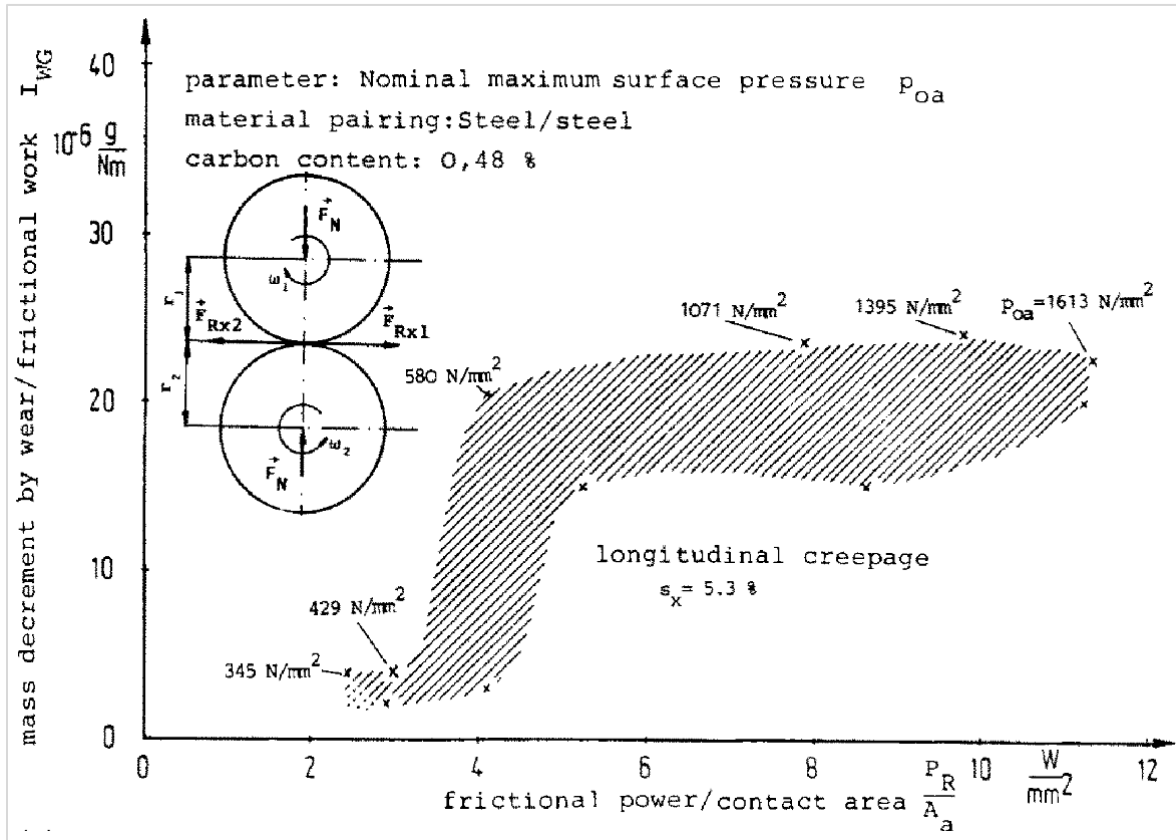
dem 0,6-fachen der Härte – andere betrachtete Radgüten weisen ähnliche Härteniveaus auf. Trotz dieser Abweichung der getroffenen Überlegungen und Annahmen vom vorliegenden Modell, zeigt es anschaulich, dass sich der Verschleiß bei Zunahme des Kontaktdruckes sprunghaft ändert. Weiters lässt sich dadurch das unterschiedliche Verhalten von Rad- und Schienenverschleiß (vgl. Abbildung 78, S. 101 und Abbildung 80, S. 102) erklären: Die Radhärte ist über eine Versuchsreihe konstant und damit auch der „Kippunkt“, also jener Kontaktdruck, an dem das Verschleißregime wechselt. Die Schienenhärte ist über den Verlauf der einzelnen Versuchsreihen nicht konstant, sondern variiert. Deshalb gibt es auch keine scharfe Grenze, an der sich das Verhalten des Schienenverschleißes ändert. Außerdem ist das Härteniveau der Schienen generell höher als das der Räder, damit geschieht auch der Wechsel des Verschleißregimes in einem Bereich höherer Kontaktdrücke.

Ein weiteres Modell zur Beschreibung des Verschleißverhaltens ist jenes nach Krause u. a.¹⁴⁶. Dieses beschreibt den Masseverlust durch Verschleiß pro eingebrachter Reibarbeit (vertikal) in Abhängigkeit von Reibleistung pro Kontaktfläche (horizontal). Abbildung 83 zeigt ein solches Modell, gültig für eine spezifische Werkstoffpaarung bei konstantem Schlupf.

Es ist deutlich zu erkennen, dass bei Überschreitung einer bestimmten spezifischen Reibleistung (hier bei ca. 4 W/mm²) der Verschleiß (pro eingebrachter Reibarbeit) sprunghaft ansteigt. Dies beweist – wie auch das zuvor beschriebene Modell –, dass sich das **Verschleißverhalten**, und nicht nur das Verschleißniveau, **mit dem Kontaktdruck ändert**. Wo genau sich diese Grenze, an der der Wechsel des Verschleißregimes stattfindet, befindet, ist für jedes System spezifisch festzulegen. Für die Veranschaulichung des Verschleißverhaltens im System *Rad-Schiene* soll dieser „Kippunkt“ nicht genau bestimmt werden, sondern nur dessen Existenz festgehalten werden. Denn daraus resultiert, dass bei der Verschleißbetrachtung zwischen hohen Kontaktdrücken (und damit Achslasten) und mittleren bis niedrigen Kontaktdrücken (entsprechend Achslasten) unterschieden werden muss.

¹⁴⁶ Krause und Poll, „Wear of wheel-rail surfaces“.

4 Diskussion der Ergebnisse

Abbildung 83: Verschleißmodell nach Krause und Poll¹⁴⁷

Anhand den vorliegenden Daten aus den betrachteten Untersuchungen lässt sich nicht genau definieren, bei welchem Kontaktdruck respektive bei welcher Achslast der Wechsel des Verschleißregimes tatsächlich geschieht. Es lässt sich der Bereich, in dem der Grenzwert liegt, auf Kontaktdrücke eingrenzen, die durch Achslasten zwischen 25 t und 46 t verursacht werden. Zur genaueren Untersuchung sind weitere Versuche notwendig.

Sind Untersuchungsergebnisse der Modellversuche auf das reale Rad-Schiene-System übertragbar?

Im Falle der **Zweischeiben-Tests** herrscht ein großer Abstraktionsgrad des Systems *Rad-Schiene*. Der Rad-Schiene-Kontakt wird nicht modelliert, sondern durch eine idealisierte Hertz'sche Linienberührung beschrieben. Diese Prüfmethode zeigt somit das **Werkstoffverhalten** sowie das Systemverhalten des

¹⁴⁷ aus: Krause und Poll, 115.

Prüfaggregats, nicht aber das **Systemverhalten** des Systems **Rad-Schiene** hinsichtlich Verschleiß.¹⁴⁸

Für die **Rad-Schiene-Prüfstandtests** gilt: Sie zeigen einen geringen Abstraktionsgrad hinsichtlich des Rad-Schiene-Kontaktes und bieten ein reales Abbild des Systems *Rad-Schiene*. Die gegebenen Einschränkungen hinsichtlich Dynamik bzw. Prüfgeschwindigkeiten sind für Verschleißbetrachtungen hinnehmbar. Der Rad-Schiene-Prüfstand gibt das **Systemverhalten** wieder. An den zuvor durchgeführten Auswertungen ist zu sehen, dass dieses Systemverhalten mitunter vom Werkstoffverhalten geprägt ist: Die Abhängigkeit vom Kontaktdruck (bzw. der Kontaktkraft), welcher das Werkstoffverhalten bestimmt, ist auch hier zu erkennen.

Wie wirkt sich die Schienengüte auf den tatsächlichen Radverschleiß aus?

Nach der Betrachtung verschiedener Untersuchungen (theoretische Überlegungen, Zweischeiben-Tests, Rad-Schiene-Prüfstandtests, Gleistest sowie ein weiterer) sind einige Aussagen bezüglich dieser Frage zu treffen:

Ausgehend von den Theorien hinsichtlich Berührkontakt und Berührgeometrie im System *Rad-Schiene* (siehe 2.2, S. 4) ist festzuhalten, dass Abweichungen von der Sollgeometrie, wie verschlissene Profile von Rad und Schiene oder ein nicht optimal konfiguriertes System von Rad und Schiene (Abweichung von Spurweite, Schienenneigung etc.), den weiteren Verschleiß verstärken. Daraus kann ein **Zusammenhang zwischen Schienengüte und Systemverschleiß** hergeleitet werden: ist eine Schiene verschleißfest, also hoher Güte, bleibt das Sollprofil länger bestehen. Dadurch wird der Kontakt näher an der Designgeometrie gehalten und der Verschleiß des Rades ebenfalls positiv beeinflusst (im Sinne einer Verringerung).¹⁴⁹

¹⁴⁸ Fantecelle Strey u. a., „Comparison of rolling contact fatigue damage between railway wheels and twin-disc test specimens“.

¹⁴⁹ Pietsch u. a., „Der Einsatz verschleißfester Schienenstähle im Bogen und deren Einfluss auf das Laufverhalten“.

4 Diskussion der Ergebnisse

Theoretische Überlegungen zum Verschleiß im Rad-Schiene-System (siehe 3.2.1, S. 39) führen allgemeine Verschleißmodelle von *Archard*¹⁵⁰ und *Rabinowicz*¹⁵¹ auf den Rad-Schiene-Kontakt über. Das Ergebnis ist ein theoretisches Verschleißmodell, welches erwartbaren Rad- und Schienenverschleiß abhängig vom Verhältnis $\frac{\text{Schienenhärte}}{\text{Radhärte}}$ zeigt. Der in den USA durchgeführte Gleistest bestätigt die erwarteten Verschleißraten: Im Großen und Ganzen stimmen theoretischer und gemessener Verschleiß überein. Daraus ergibt sich folgender theoretischer Zusammenhang zwischen Schienengüte und Systemverschleiß: **Weist die Schiene eine größere Härte als das Rad auf, ändert eine Steigerung der Schienenhärte den Radverschleiß nicht. Gleichzeitig wird der Schienenverschleiß mit steigender Güte reduziert.**

Verschiedene Prüfstandversuche unterschiedlicher Art zeigen auf den ersten Blick keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen Schienengüte und Radverschleiß. Die Varianz unterschiedlicher Untersuchungsergebnisse zeigen Abbildung 62 und Abbildung 63 (jeweils auf S. 84). Nach weiteren Analysen und unter Einbeziehung der Belastungen in den Vergleich, sind folgende Zusammenhänge wahrzunehmen: **Unter hohen Kontaktdrücken bei Zweischeiben-Tests bzw. hohen Kräften am Rad-Schiene-Prüfstand neigen Radwerkstoffe zu näherungsweise konstantem Verschleiß bei Vergrößerung des Härteverhältnisses (Schiene/Rad), bei niedrigem Belastungsniveau hingegen zeigt sich ein abnehmendes Verhalten.** Dies gilt sowohl für Zweischeiben-Tests als auch – in ähnlicher Form – für Rad-Schiene-Prüfstandtests.

Aus diesen Erkenntnissen lässt sich ableiten, dass der Zusammengang zwischen realem Radverschleiß und Schienengüte durch zwei Effekte beschrieben wird:

- einerseits dem **Werkstoffverhalten** im Berührungskontakt,
 - andererseits dem **Verschleißverhalten aufgrund geometrischer Konfiguration;**
- Zusammengeführt ergibt sich daraus das **Systemverhalten.**

¹⁵⁰ Archard, „Contact and rubbing of flat surfaces“.

¹⁵¹ Rabinowicz, *Friction and Wear*; Rabinowicz, „Wear Coefficients - Metals“.

5 Résumé

Nach Betrachtung *theoretischer Überlegungen* zu Berührgeometrie sowie Verschleiß allgemein und Analyse der Resultate von

- fünf *Zweischeiben-Tests*,
- zwei *Rad-Schiene-Prüfstandtests*,
- einem *Gleistest*,
- sowie einem *weiteren Prüfstandtest*, durchgeführt auf einem Lineartribometer,

zeigt sich, dass sich für Standardachslasten ein anderes Verschleißregime einstellt als bei Heavy-Haul-Betrieb. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnis lassen sich auf die eingangs gestellte **Forschungsfrage**

Wie ist der Zusammenhang zwischen Schienengüte und damit der Härte der Schienenlaufläche und verschiedenen Schädigungsmechanismen (v.a. Verschleiß) am Rad?

folgende **Antworten** geben:

Abhängig vom Kontaktdruck und damit dem wirkenden Verschleißregime stellen sich folgende Zusammenhänge ein:

- 1.) *Bei Kontaktdrücken, die durch in Europa übliche Achslasten des Mischverkehrs verursacht werden, nimmt der Radverschleiß bei steigender Schienenhärte ab.*
- 2.) *Bei höheren Kontaktdrücken (und damit Achslasten von Heavy-Haul-Anwendungen) bleibt der Radverschleiß bei steigender Schienenhärte annähernd konstant.*

Es können verschiedene Zusammenhänge aufgezeigt werden, die einerseits aus geometrischen Bedingungen, andererseits aus dem Werkstoffverhalten herrühren:

- Aufgrund **geometrischer Konfiguration** des Systems *Rad-Schiene* führt der Einsatz einer **verschleißfesteren Schiene höherer Güte** in einem gut eingestellten System zu besseren Kontaktbedingungen. Diese

wiederum **reduzieren**, bedingt durch den geringeren Schienenverschleiß, auch **den Radverschleiß**.

- Das **Werkstoffverhalten** hinsichtlich Verschleiß zeigt eine Abhängigkeit von der aufgetragenen Belastung (Kontaktdruck, Schlupf, Schräglauf etc.). Prüfstandversuche belegen, dass bei **ansteigender Schienenhärte** der **Radverschleiß** bei **hohen Kontaktkräften konstant** bleibt, bei **niedrigen Kontaktdrücken absinkt**.

Die Kompatibilität der Profile von Rad und Schiene (Profiltyp, Zustand des Profils) sowie deren Anordnung zueinander (Schienenneigung, Spurweite) bestimmen den Berührungskontakt und weiterführend das Verhalten des Radsatzes im Gleis (Sinuslauf, Radialstellung). Daraus geht hervor, dass der Systemverschleiß abhängig von der grundsätzlichen geometrischen Konfiguration des Systems *Rad-Schiene* ist. Weiters ist aber die Konfiguration abhängig vom Verschleißzustand – damit hängt auch der weitere Verschleiß vom aktuellen Verschleißzustand ab. Daraus ergibt sich der **Zusammenhang**, dass eine **verschleißfeste Schiene** – die lange profilhaltig bleibt – den Systemverschleiß auch durch **Senkung des Radverschleißes** reduziert.

Modellversuche wie der Zweiseiben-Test zeigen das Verschleißverhalten verschiedener Werkstoffpaarungen. Hierbei zeigt sich eine Abhängigkeit vom Belastungsniveau. Ähnliches bringen die Rad-Schiene-Prüfstandtests zu Tage. Hier ist bei Radlasten, die der maximalen Achslast eines typischen Schienenfahrzeuges (22,5 t) entsprechen, eine Abnahme des Radverschleißes bei Erhöhung der Schienengüte zu erkennen. Bei Erhöhung der Achslast über einen Grenzwert hinaus ist mit dem Wechsel des Verschleißregimes zu rechnen. Damit geht auch die Änderung im Verschleißverhalten einher. Wie hoch dieser Grenzwert liegt, kann mit den vorliegenden Daten nicht bestimmt werden. Dazu und um das exakte Verständnis der gezeigten Zusammenhänge zu erlangen, bedarf es weiterer Versuche. Vorschläge hierzu sind dem Abschnitt 6 zu entnehmen.

6 Ausblick und Empfehlung

Optimierung zukünftiger Untersuchungen

Bei der Analyse verschiedener Untersuchungen (siehe 3.2 und 3.3) fällt auf, dass die durchgeführten Tests weder einheitlich noch in irgendeiner Weise genormt sind. Bei den Zweischeiben-Tests kommen verschiedene Prüfmaschinen, teilweise sind es umgebaute Drehmaschinen, zum Einsatz, die Rad-Schiene-Prüfstände sind Einzelanfertigungen. Auch die Proben der Zweischeiben-Tests weisen unterschiedliche Abmessungen auf, wodurch auch die Kontaktparameter andere sind. Dadurch fällt es schwer, Untersuchungsergebnisse verschiedener Prüfreihe miteinander zu vergleichen.

Um aussagekräftige Vergleiche zu erhalten, wäre es wünschenswert, dass die Prüfstandsläufe und -aufbauten sowie auch die Proben nach Regelwerken standardisiert werden. Damit würde die Vergleichbarkeit verbessert werden bzw. überhaupt erst entstehen. Jeder Prüfstand beeinflusst durch seine eigene Dynamik (Schwingungen etc.) die Versuchsergebnisse. Somit entstehen beim Vergleich von Resultaten, die auf unterschiedlichen Prüfständen ermittelt wurden, immer gewisse Unschärfen.

Zusätzlich ist es von Bedeutung, bei Veröffentlichung von Untersuchungsergebnissen wichtige Angaben anzuführen, wie z.B. Anzahl durchgeführter Versuchsreihen, Streubreite der Ergebnisse, Eigenschaften des Prüfstandes, Raumklima (Temperatur/Feuchtigkeit) etc., vor allem jedoch die **vollständigen** Eigenschaften der Proben. Zudem sollten Verschleißraten und gegebenenfalls Verschleißprofile als Verläufe über die Versuchsdauer angegeben werden (regelmäßiges Messen erforderlich), nicht nur als Endergebnisse zu Versuchsende. Dadurch können Einlaufvorgänge identifiziert und bewertet werden, denn der in dieser Phase entstehende Verschleiß kann das Gesamtergebnis massiv beeinflussen.

Vorschläge für Versuche

Um die Einflüsse auf den Rad- bzw. Schienenverschleiß von

- Belastung (Achslast)
- Schienenprofil und
- Schienengüte

entkoppelt voneinander bewerten zu können, sind weitere Versuchsreihen wünschenswert. In Tabelle 22 sind hierfür empfohlene Versuchsparameter gelistet.

Tabelle 22: Parameter Versuchsvorschlag

Rad	konstant (Güte, Profil etc.)		
Belastung (\triangleq Achslast)	24 t	46 t	
Schienenprofil	60E1	60E2	
Schienengüte	R260	R350HT	R400HT
Querkraft	entsprechend zu modellierendem Bogenradius einstellen		konstant
Längskraft	keine	freies Rollen	
Schräglauf	entsprechend zu modellierendem Bogenradius einstellen		konstant
Schienenneigung	1:40	konstant	
Schmierung	keine	trockener Kontakt	
Anzahl	jeweils 3 Versuchsreihen, bei Ausreißern innerhalb einer Serie: 4		

Durch geeignete Variation der angeführten Parameter *Belastung, Profil und Güte der Schiene* lassen sich mit einer Minimalzahl an Versuchsreihen die verschiedenen Einflüsse identifizieren. Tabelle 23 zeigt die sechs notwendigen Konfigurationen.

Tabelle 23: Versuchsvorschlag

Belastung (\triangleq Achslast)	Profil	Güte
24 t	60E1	R260
46 t	60E1	R260
24 t	60E2	R260
24 t	60E1	R400HT
46 t	60E1	R400HT
24 t	60E2	R400HT

Geht man von drei Versuchsreihen pro Konfiguration aus (mehr sind nur bei Ausreißern notwendig), ergeben sich mindestens 18 durchzuführende Versuchsreihen. Damit lassen sich wie folgt die entsprechenden Einflüsse identifizieren:

- **Güte:** Vergleicht man die Zeilen 1-3 mit den Zeilen 4-6, lässt sich der Einfluss der Güte auf das Verschleißverhalten erkennen. Weicht hier das Verhalten der beiden Güten deutlich voneinander ab, muss die Güte R350HT ebenfalls voll untersucht werden.
- **Belastung:** Beim Vergleich der Zeile 1 mit Zeile 2, respektive 4 mit 5, wird der Einfluss der Achslast auf den Verschleiß ersichtlich.
- **Geometrie:** Vergleicht man Zeile 1 mit Zeile 3 (bzw. 4 mit 6) wird der Einfluss des Schienenprofils auf das Verschleißverhalten deutlich. Zu beobachten ist hierbei die Veränderung des Profils über die Versuchsdauer.

Der notwendige Versuchsumfang für die Güte R350HT richtet sich nach den gewonnenen Ergebnissen für R260 und R400HT: Zeigen diese ähnliches Verhalten, kann angenommen werden, dass die verbleibende Güte ebenfalls ähnlich reagiert. Bei deutlich abweichendem Verhalten muss entsprechend untersucht werden, in welche Richtung sich die Ergebnisse der Güte R350HT bewegen.

Mit Hilfe dieser Versuche können die verschiedenen Einflüsse der diversen Parametern getrennt voneinander bewertet werden. Damit lassen sich die auftretenden Zusammenhänge besser verstehen und die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse untermauern. Möchte man feststellen, bei welcher Belastung eine Änderung des Verschleißverhaltens (Wechsel des Verschleißregimes) eintritt, sind die einzustellenden Lasten entsprechend zu wählen.

7 Literaturverzeichnis

- Archard, J. F. „Contact and rubbing of flat surfaces“. *Journal of Applied Physics* 24, Nr. 8 (1953): 981–88. <https://doi.org/10.1063/1.1721448>.
- Austrian Standards International. „EN 13262 - Bahnanwendungen — Radsätze und Drehgestelle — Räder — Produktanforderungen“, 2021.
- . „EN 13674-1 Bahnanwendungen — Oberbau — Schienen Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m“, 2017.
- . „EN 13715:2020 - Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Räder - Radprofile“, 2020.
- . „EN 15302 - Bahnanwendungen - Parameter der Rad-Schiene-Kontaktgeometrie - Definitionen und Berechnungsmethoden“, 2021.
- . „EN 15313 - Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Radsatzinstandhaltung“, 2016.
- . „EN 15528 - Bahnanwendungen — Streckenklassen zur Behandlung der Schnittstelle zwischen Lastgrenzen der Fahrzeuge und Infrastruktur“, 2015.
- Bevan, Adam, Paul Molyneux-Berry, Bridget Eickhoff, und Mark Burstow. „Development and validation of a wheel wear and rolling contact fatigue damage model“. *Wear* 307, Nr. 1–2 (September 2013): 100–111. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.08.004>.
- Bolton, P.J., und P. Clayton. „Rolling—sliding wear damage in rail and tyre steels“. *Wear* 93, Nr. 2 (Jänner 1984): 145–65. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(84\)90066-8](https://doi.org/10.1016/0043-1648(84)90066-8).
- Brantner, Hans-Peter. „Persönliche Kommunikation“, 24. Jänner 2022.
- Burstow, Mark. „Wheel / rail hardness and total ‘system’ wear“. *Vehicle / Track System Intercade Comittee*, Nr. 1 (2012): 1–4.
- Cantini, Stefano, und Steven Cervello. „The competitive role of wear and RCF: Full scale experimental assessment of artificial and natural defects in railway wheel treads“. *Wear* 366–367 (2016): 325–37. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.06.020>.
- Christoforou, P., D. I. Fletcher, und R. Lewis. „Benchmarking of premium rail material wear“. *Wear* 436–437, Nr. January (2019). <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202990>.
- Czichos, Horst, und Erich Santner. „Tribologische Beanspruchung“. In *Tribologie-Handbuch*, herausgegeben von Horst Czichos und Karl-Heinz Habig, 4. Aufl., 29–92. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2010.
- DB Systemtechnik GmbH, und Steve Goebel. „Prüfeinrichtungen“, 2018. <https://www.db-systemtechnik.de/dbst-de/Technik/Pruefeinrichtungen/Rad-Schiene-Kontakt-6254066>.
- Fantecelle Strey, Nathan, Andrei Bavaresco Rezende, Rodrigo da Silva Miranda, Solange Tamara da Fonseca, Paulo Roberto Mei, und Cherlio Scandian. „Comparison of rolling contact fatigue damage between railway wheels and twin-

- disc test specimens". *Tribology International* 160, Nr. April (2021): 107037.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2021.107037>.
- Fengler, Wolfgang. „Spurführung“. Dresden, o. J.
- Fletcher, D. I., und J. H. Beynon. „The influence of lubricant type on rolling contact fatigue of pearlitic rail steel“. *Tribology Series* 36 (1. Jänner 1999): 299–310.
[https://doi.org/10.1016/S0167-8922\(99\)80051-0](https://doi.org/10.1016/S0167-8922(99)80051-0).
- Gleisbau-Welt. „Verschleiß und Schienenfehler“. Lexikon. Zugegriffen 8. Jänner 2022.
<https://www.gleisbau-welt.de/lexikon/infrastruktur/oberbau/schienen/verschleiss-und-schienenfehler>.
- Gleislauftechnik Müller. „Berührgeometrische Interaktion“, o. J.
- . „Kontaktmechanik Rad-Schiene“, o. J.
- Grebe, Markus. *Tribometrie - Anwendungsnahe tribologische Prüftechnik als Mittel zur erfolgreichen Produktentwicklung*. Tübingen: expert verlag GmbH, 2021.
<https://books.google.at/books?id=dQZAEAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=de#v=onepage&q&f=false>.
- Grebe, Markus, und Paul Feinle. „Verschleißreduzierung an Rädern und Schienen durch Spurkranzschmierstoffe und angepasste Werkstoffpaarungen“. *Eisenbahningenieur* 52, Nr. 4 (2001): 48–57.
- Haigermoser, Andreas. „Schienenfahrzeuge“. Vorlesungsskriptum. Graz, 2002.
- Hansmann, Fabian, Wolfgang Nemetz, und Richard Spoor. *Keeping Track of Track Geometry*, 2021.
- Hertz, H. „Über die Berührung fester elastischer Körper“. *Journal für die reine und angewandte Mathematik* 171 (1881): 156–71.
- Hu, Y., M. Watson, M. Maiorino, L. Zhou, W. J. Wang, H. H. Ding, R. Lewis, u. a. „Experimental study on wear properties of wheel and rail materials with different hardness values“. *Wear*, Nr. September 2020 (2021).
<https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203831>.
- Hu, Y., L. Zhou, H.H. Ding, G.X. Tan, R. Lewis, Q.Y. Liu, J. Guo, und W.J. Wang. „Investigation on wear and rolling contact fatigue of wheel-rail materials under various wheel/rail hardness ratio and creepage conditions“. *Tribology International* 143, Nr. November 2019 (2020).
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106091>.
- Jendel, Tomas. „Prediction of wheel profile wear - Comparisons with field measurements“. *Wear* 253, Nr. 1–2 (2002): 89–99.
[https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(02\)00087-X](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(02)00087-X).
- Jörg, Albert, und Richard Stock. „Wärmebehandelte Schienengüte R400HT — Hochfeste Schienenstähle in Österreich und in der Schweiz“. *ZEVrail* 136, Nr. Sonderheft InnoTrans 2012 (2012): 72–79.
- Jörg, Albert, Alexander Zlatnik, Stephan Scheriau, und Julian Wiedorn. „Weiterentwicklung von Schienenstählen in Gesamtsystemsicht“. *Der Eisenbahningenieur*, Nr. September (2018): 5–9.

7 Literaturverzeichnis

- Kahneman, Daniel. *Schnelles Denken, Langsames Denken (Thinking, Fast and Slow)*, 2011.
- Knothe, Klaus, und Sebastian Stichel. *Schienenfahrzeugdynamik. Schienenfahrzeugdynamik*, 2003.
- Krause, Hans, und Gerhard Poll. „Wear of wheel-rail surfaces“. *Wear* 113, Nr. 1 (1. Dezember 1986): 103–22. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(86\)90060-8](https://doi.org/10.1016/0043-1648(86)90060-8).
- Kunz, J. „Kontaktprobleme und ihre praktische Lösung“. *Konstruktion*, Nr. 11–12 (2009): 54–58.
- Lewis, R., P. Christoforou, W. J. Wang, A. Beagles, M. Burstow, und S. R. Lewis. „Investigation of the influence of rail hardness on the wear of rail and wheel materials under dry conditions (ICRI wear mapping project)“. *Wear* 430–431, Nr. May (2019): 383–92. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.05.030>.
- Lewis, R., W. J. Wang, M. Burstow, und S. R. Lewis. „Investigation of the influence of rail hardness on the wear of rail and wheel materials under dry conditions“. *Civil-Comp Proceedings* 110, Nr. April (2016). <https://doi.org/10.4203/ccp.110.151>.
- Linsel, Ralf, und Klaus Meißner. „Schienen und Schienenschweißen“. In *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*, herausgegeben von Wolfgang Fengler und Lothar Fendrich, 69102, 2019.
- Lucchini RS. „DYNAMISCHE PRÜFUNGEN AN RADSÄTZEN ROLLER RIG“. Zugegriffen 4. November 2021. <https://lucchinirs.com/de/portfolio/dynamische-prufungen-an-radsatzen-roller-rig/>.
- Mädler, K., A. Zoll, R. Heyder, und M. Brehmer. „Rail Materials - Alternatives and Limits“. *8th World Congress on Railway Research*, Nr. May 2008 (2008): 1–9.
- Mädler, Katrin. „Der Rad-Schiene-Kontakt — Werkstoffeinsatz aus Systemsicht“. *Materials Testing* 53, Nr. 4 (2011): 180–87. <https://doi.org/10.3139/120.110212>.
- Mädler, Katrin, und Manfred Bannasch. „Werkstoffeinsatz in Schienenfahrzeugrädern - Alternativen und Grenzen“. *ZEV Rail Glasers Annalen* 130, Nr. 10 (2006): 428–35.
- Mädler, Katrin, und René Heyder. „Schienenfahrzeugtagung Dresden“. In *Internationale Schienenfahrzeugtagung Dresden*, 2012.
- . „Weiches Rad und harte Schiene oder umgekehrt?“, 2015.
- Mädler, Katrin, Andreas Zoll, René Heyder, und Marcel Brehmer. „Schienenwerkstoffe - Alternativen und Grenzen“. *ZEV Rail Glasers Annalen* 132, Nr. 11–12 (2008): 496–503.
- Newcastle University. „Improved model for the influence of vehicle conditions (wheel flats, speed, axle load) on the loading and subsequent deterioration of rails“, 2009.
- Pietsch, Lorenz, Wolf-Dieter Jussel, Martin Joch, Lukas Prettnner, Efstratios Dartzalis, und Albert Jörg. „Der Einsatz verschleißfester Schienenstähle im Bogen und deren Einfluss auf das Laufverhalten“. *ZEV Rail* 140, Nr. 11/12 (2016).

- Pointner, Peter. „High strength rail steels-The importance of material properties in contact mechanics problems“. *Wear* 265, Nr. 9–10 (2008): 1373–79. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.03.015>.
- . „Überlegungen zum Verschleiß im Rad-Schiene-System“, 1997.
- Pointner, Peter, Alfred Moser, und Georg Prskawetz. Method of heat treating rails. EP0088746, issued 1983. <https://data.epo.org/publication-server/document?iDocId=126013&iFormat=2>.
- Rabinowicz, Ernest. *Friction and Wear*. New York: Wiley, 1965. <http://www.worldcat.org/oclc/1674190>.
- . „Wear Coefficients - Metals“. In *Wear control handbook*, herausgegeben von M.B. Peterson und W.O. Winer, 475–506. New York: ASME, 1980.
- Rießberger, Klaus. „Das Zusammenwirken von Rad und Schiene“. In *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*, herausgegeben von Wolfgang Fengler und Lothar Fendrich, 1–40, 2019.
- Schelle, Henning. „Radverschleißreduzierung für eine Güterzuglokomotive durch optimierte Spurführung“. Technische Universität Berlin, 2014.
- Schuminetz, Tobias. „Rad auf Schiene“. *Bahnbilder*, 2007. <https://www.bahnbilder.de/bild/deutschland~gueterwagen~sonstige/144051/rad-auf-schiene---das-ist.html>.
- Shi, Xiaojiao, Qingzhi Yan, Xiaoxin Zhang, Guijiang Diao, Chenchen Zhang, Zhiyuan Hong, Zefeng Wen, und Xuesong Jin. „Hardness matching of rail/wheel steels for high-speed-train based on wear rate and rolling contact fatigue performance“. *Materials Research Express* 6, Nr. 6 (2019). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab072d>.
- Singh, U. P., und Ramakant Singh. „Wear investigation of wheel and rail steels under conditions of sliding and rolling-sliding contact with particular regard to microstructural parameters“. *Wear* 170, Nr. 1 (1993): 93–99. [https://doi.org/10.1016/0043-1648\(93\)90355-P](https://doi.org/10.1016/0043-1648(93)90355-P).
- Six, Klaus, und Martin Rosenberger. „Schadensbilder auf der Schiene/am Rad“, 2012.
- Sommer, Karl, Rudolf Heinz, und Jörg Schöfer. *Verschleiß metallischer Werkstoffe. Erscheinungsformen sicher beurteilen*. 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-17851-2>.
- Steele, R, und R P Reiff. „Rail - It’s behavior and relationship to total system wear“. *Proceedings of the 2nd Heavy Haul Conference*, 1982, 115–64.
- Stock, R., und R. Pippan. „Rail grade dependent damage behaviour - Characteristics and damage formation hypothesis“. *Wear* 314, Nr. 1–2 (2014): 44–50. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.11.029>.
- Stock, R, D Eadie, und K Oldknow. „Rail grade selection and friction management: a combined approach for optimising rail–wheel contact“. *Ironmaking & Steelmaking* 40, Nr. 2 (1. Februar 2013): 108–14. <https://doi.org/10.1179/1743281212Y.0000000038>.

7 Literaturverzeichnis

- Stock, Richard. „Influencing rolling contact fatigue and wear by different rail grades and contact conditions“. Montanuniversität Leoben, 2011. www.voestalpine.com.
- . „Wheel-Rail Damage Mechanisms“, o. J. <http://www.wheel-rail-seminars.com/archives/2018/pc-papers/presentations/PC05.pdf>.
- Technischer Kundendienst voestalpine. „TechText - Einfluss der Schienenhärte auf den Radverschleiß“, 2013.
- . „TechText - Rad-Schiene Prüfstand“, 2015.
- Torpey, Jodi, Melville Ruggles, und Paul Spencer. „Transportation Test Center - Rail Transit Services“. Whashington, 1981.
- Trausmuth, A, E Badisch, St Schamberger, und R Schmid. „Verschleiß- und Ermüdungsverhalten von Rad und Schiene bei betrieblichen Bedingungen unter Berücksichtigung zukünftiger Trends beim Materialeinsatz“, 9–11, o. J.
- Trausmuth, A, R Schmid, St Schamberger, M Vorhofer, M Rodriguez Ripoll, und E Badisch. „Verschleiß- und Ermüdungsverhalten von Rad und Schiene“. In *Schienenfahrzeugtagung*. Dresden, 2020.
- Vanovsek, Wolfgang. „Auswahl eines Härtemittels zur Herstellung perlitischer und bainitischer Schienen und Ermittlung der optimalen Prozessparameter“. Montanuniversität Leoben, 2006.
- Veit, Peter. „Persönliche Kommunikation“, 15. Dezember 2021.
- Wiedorn, Julian, Christoph Kammerhofer, und Stephan Scheriau. „340 Dobain HSH – Schienenwerkstoff gegen Head Checks“. *EI-Eisenbahningenieur*, Nr. April (2021): 31–35.

Anhang

Inhaltsverzeichnis Anhang

Anhang 1	Radschäden	I
Anhang 2	Schienenschäden	VII
Anhang 3	Vergleich der Untersuchungen	X
	ZST1.....	X
	ZST2.....	XII
	ZST3.....	XVI
	ZST4.....	XIX
	ZST5.....	XXII
	RSPS1.....	XXVI
	RSPS2.....	XXX
	WT1.....	XXXII
Anhang 4	Vergleich der Ergebnisse.....	XXXV
	Zweischeiben-Tests	XXXV
	Rad-Schiene-Prüfstandtests	XLI
Anhang 5	Beilagen	XLVII

Abbildungsverzeichnis Anhang

Abbildung Anhang 1: Flachstelle	I
Abbildung Anhang 2: Materialauftragung	I
Abbildung Anhang 3: Ausbröckelung	II
Abbildung Anhang 4: Abblätterung	II
Abbildung Anhang 5: Eindrückungen	III
Abbildung Anhang 6: Einzelriss quer	III
Abbildung Anhang 7: Netzmuster - Krötenhaut.....	III
Abbildung Anhang 8: Rollkontaktermüdung	III
Abbildung Anhang 9: Überwalzung	IV
Abbildung Anhang 10: Ausbröckelung an der Fase	IV
Abbildung Anhang 11: Mulde in der Lauffläche	IV
Abbildung Anhang 12: Hohlraum	IV
Abbildung Anhang 13: Beschädigung des Spurkranzes	V
Abbildung Anhang 14: Schaden ausgehend von Kennzeichnung	V
Abbildung Anhang 15: Schäden an einer Bohrung.....	VI

Abbildung Anhang 16: Materialtrennung	VI
Abbildung Anhang 17: thermisch überbeanspruchter Radreifen	VI
Abbildung Anhang 18: verschlissene Schiene	VII
Abbildung Anhang 19: Head Checks.....	VII
Abbildung Anhang 20: Verschleiß und Verformung von Bogenschienen.....	VIII
Abbildung Anhang 21: Schlupfwellen	IX
Abbildung Anhang 22: Squat	IX
Abbildung Anhang 23: Seriensquat	IX
Abbildung Anhang 24: Ergebnisse ZST1	XI
Abbildung Anhang 25: Ergebnisse ZST2 1/2.....	XV
Abbildung Anhang 26: Ergebnisse ZST2 2/2.....	XV
Abbildung Anhang 27: Ergebnisse ZST3	XVIII
Abbildung Anhang 28: Ergebnisse ZST4 1/2.....	XX
Abbildung Anhang 29: Ergebnisse ZST4 2/2.....	XXI
Abbildung Anhang 30: Ergebnisse ZST5 1/3.....	XXIV
Abbildung Anhang 31: Ergebnisse ZST5 2/3.....	XXV
Abbildung Anhang 32: Ergebnisse ZST5 3/3.....	XXV
Abbildung Anhang 33: Ergebnisse RSPS1 1/2.....	XXVIII
Abbildung Anhang 34: Ergebnisse RSPS1 2/2.....	XXIX
Abbildung Anhang 35: Ergebnisse RSPS2	XXXI
Abbildung Anhang 36: Ergebnisse WT1 1/3.....	XXXII
Abbildung Anhang 37: Ergebnisse WT1 2/3.....	XXXIII
Abbildung Anhang 38: Ergebnisse des WT1 3/3.....	XXXIV
Abbildung Anhang 39: normierter Verschleiß (ZST).....	XXXVI
Abbildung Anhang 40: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Belastung (ZST)	XXXVII
Abbildung Anhang 41: norm. Schienenverschleiß – Härteverhältnis, Belastung (ZST)	XXXVII
.....	
Abbildung Anhang 42: norm. Radverschleiß – Belastung (ZST)	XXXVIII
Abbildung Anhang 43: norm. Schienenverschleiß – Belastung (ZST)	XXXVIII
Abbildung Anhang 44: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Kontaktdruck (ZST)	XXXIX
.....	
Abbildung Anhang 45: norm. Schienenverschleiß – Härteverhältnis, Kontaktdruck (ZST)	XXXIX
.....	
Abbildung Anhang 46: norm. Radverschleiß - Härteverhältnis, Grenzwert (ZST)	XL
Abbildung Anhang 47: norm. Schienenverschleiß - Härteverhältnis, Grenzwert (ZST)	XL
Abbildung Anhang 48: normierter Verschleiß (RSPS).....	XLII
Abbildung Anhang 49: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Belastung (RSPS) .	XLIII

Anhang

Abbildung Anhang 50: norm. Schienenverschleiß – Härteverhältnis, Belastung (RSPS)	XLIII
Abbildung Anhang 51: norm. Radverschleiß – Belastung (RSPS)	XLIV
Abbildung Anhang 52: norm. Schienenverschleiß – Belastung (RSPS)	XLIV
Abbildung Anhang 53: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Kräfte (RSPS)	XLV
Abbildung Anhang 54: norm. Schienenverschleiß – Härteverhältnis, Kräfte (RSPS)	XLV
Abbildung Anhang 55: norm. Radverschleiß - Härteverhältnis, Grenzwert (RSPS)	XLVI
Abbildung Anhang 56: norm. Schienenverschleiß - Härteverhältnis, Grenzwert (RSPS)	XLVI

Tabellenverzeichnis Anhang

Tabelle Anhang 1: Übersicht ZST1	X
Tabelle Anhang 2: Ergebnisse ZST1	XI
Tabelle Anhang 3: Übersicht ZST2	XII
Tabelle Anhang 4: Ergebnisse ZST2 1/2	XIII
Tabelle Anhang 5: Ergebnisse ZST2 2/2	XIV
Tabelle Anhang 6: Übersicht ZST3	XVI
Tabelle Anhang 7: Ergebnisse ZST3	XVII
Tabelle Anhang 8: Ergebnisse ZST4	XIX
Tabelle Anhang 9: Ergebnisse ZST4 1/2	XX
Tabelle Anhang 10: Ergebnisse ZST4 2/2	XXI
Tabelle Anhang 11: Übersicht ZST5	XXII
Tabelle Anhang 12: Ergebnisse ZST5	XXIII
Tabelle Anhang 13: Übersicht RSPS1	XXVI
Tabelle Anhang 14: Ergebnisse RSPS1	XXVII
Tabelle Anhang 15: Übersicht RSPS2	XXX
Tabelle Anhang 16: Ergebnisse RSPS2	XXXI
Tabelle Anhang 17: Übersicht WT1	XXXII
Tabelle Anhang 18: Ergebnisse WT1	XXXIII
Tabelle Anhang 19: Ergebnisdaten für weitere Betrachtung (ZST)	XXXV
Tabelle Anhang 20: Ergebnisdaten für weitere Betrachtung (RSPS)	XLI

Anhang 1 Radschäden

Im Folgenden werden die im Anhang C der europäischen Norm EN 15313 genannten Schäden von Rädern gelistet und kurz beschrieben, sowie in Bildern gezeigt¹⁵².

- Schäden für alle Arten von Rädern:
 - **Flachstelle:** Abflachung an der Lauffläche, eine oder mehrere ovale Flächen sichtbar (Abbildung Anhang 1)
 - **Materialauftragung:** Aufschweißungen von Bremssohlen- oder Schienenmaterial (Abbildung Anhang 2)



Abbildung Anhang 1: Flachstelle¹⁵³



Abbildung Anhang 2: Materialauftragung¹⁵⁴

- **Ausbröckelungen und Löcher:** durch Ermüdung gelöste Materialteile an der Radoberfläche (Abbildung Anhang 3)

¹⁵² Austrian Standards International, „EN 15313 - Bahnanwendungen - Radsätze und Drehgestelle - Radsatzinstandhaltung“, 65–89.

¹⁵³ Austrian Standards International, 65.

¹⁵⁴ Austrian Standards International, 67.

- **Abblätterung:** über den ganzen Umfang auftretende abgelöste Schalen der Lauffläche (Abbildung Anhang 4)



Abbildung Anhang 3: Ausbröckelung¹⁵⁵



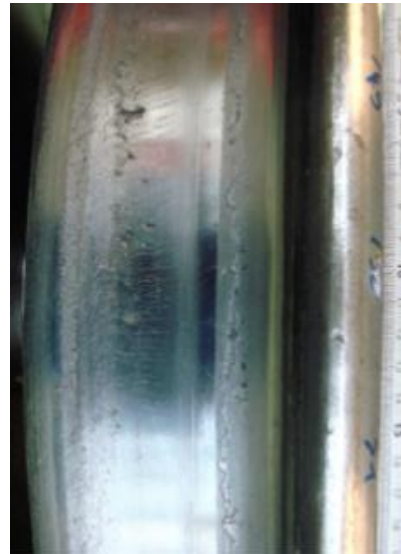
Abbildung Anhang 4: Abblätterung¹⁵⁶

- **Eindrückungen auf der Lauffläche:** unregelmäßige oder linienförmige Eindrückungen, einzeln oder über den gesamten Umfang (Abbildung Anhang 5)
- **Laufflächenquerrisse – Einzelrisse:** thermisch (radialer Verlauf) oder mechanisch (verzweigter Verlauf) induzierte Risse, normal zur Radumfangsrichtung, einzeln oder mehrere über den Umfang verteilt (Abbildung Anhang 6)
- **Rundlaufabweichungen:** bleibende Verformung im Kontaktbereich, Polygonisierung oder einzelne Abplattung
- **„Krötenhaut“, Spalling:** durch thermischen Einfluss der Klotzbremse erzeugtes netzartiges Rissmuster (Abbildung Anhang 7)
- **Rollkontaktermüdung:** aus zyklischer Beanspruchung der Lauffläche resultierende Ermüdungsrisse an der Oberfläche (Abbildung Anhang 8)
- **Wärmerisse:** thermisch induzierte Risse, entstehen im Bereich von übergreifenden Bremssohlen (Radkranzkante oder Spurkranz)

¹⁵⁵ Austrian Standards International, 67.

¹⁵⁶ Austrian Standards International, 67.

Anhang 1: Radschäden

Abbildung Anhang 5: Eindrückungen¹⁵⁷Abbildung Anhang 6: Einzelriss quer¹⁵⁸Abbildung Anhang 7: Netzmuster - Krötenhaut¹⁵⁹Abbildung Anhang 8: Rollkontaktermüdung¹⁶⁰

- **Überwälzung:** pilzartige Ausformung an der abgefasten Kante der Radaußenseite (Abbildung Anhang 9)

¹⁵⁷ aus: Austrian Standards International, 69.

¹⁵⁸ aus: Austrian Standards International, 70.

¹⁵⁹ Austrian Standards International, 73.

¹⁶⁰ Austrian Standards International, 74.

- **Schädigung an der Fase:** Eindrückungen oder Ausbröckelungen an der Fase der Radaußenkante (Abbildung Anhang 10)

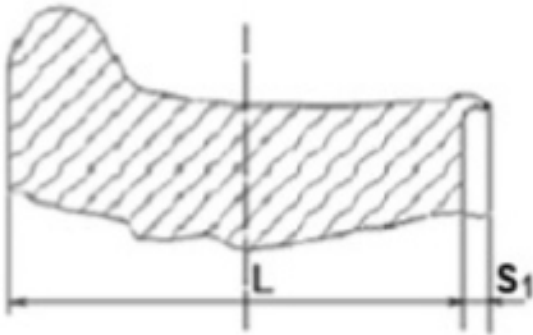


Abbildung Anhang 9: Überwalzung¹⁶¹



Abbildung Anhang 10: Ausbröckelung an der Fase¹⁶²

- **Mulden und Rillen** auf der Lauffläche: durch die Klotzbremse verursachter mulden- oder rillenförmiger Materialabtrag, führt zur Veränderung des Radprofils (Abbildung Anhang 11)
- **Hohllauf** („falscher Spurkranz“): konzentrierter Verschleiß in der Laufflächenmitte (Abbildung Anhang 12)



Abbildung Anhang 11: Mulde in der Lauffläche¹⁶³

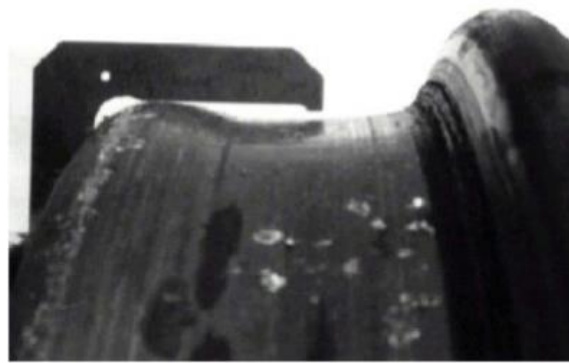


Abbildung Anhang 12: Hohllauf¹⁶⁴

- **Schäden am Spurkranz:** Ausbröckelungen, Verformungen oder Aufschweißungen im Bereich des Spurkranzes

¹⁶¹ aus: Austrian Standards International, 76.

¹⁶² Austrian Standards International, 77.

¹⁶³ Austrian Standards International, 78.

¹⁶⁴ Austrian Standards International, 79.

Anhang 1: Radschäden

- **Radiale Berührspuren und Beschädigungen an der inneren Radkranzstirnfläche:** blanke Oberfläche durch Berührung oder Beschädigungen an der Radkranzstirnfläche (Abbildung Anhang 13)
- **Schäden, die von Kennzeichnungen ausgehen:** Risse, die von den Kerben der Kennzeichnungssymbole ausgehen, können zu Brüchen des Radkranzes oder -reifens führen (Abbildung Anhang 14)

Abbildung Anhang 13: Beschädigung des Spurkranzes¹⁶⁵Abbildung Anhang 14: Schaden ausgehend von Kennzeichnung¹⁶⁶

- **Schäden durch Spankerben:** durch Spannbacken der Radsatzdrehmaschine verursachte Kerben können Risse induzieren
- **Scharfkantige umlaufende Schäden:** Risse oder Beschädigungen in Umfangsrichtung am Radsteg oder Radkörper
- **Scharfkantiger radialer Schaden:** schräg bis normal (45° ... 90°) zur Umfangsrichtung angeordneter Schaden am Radsteg
- **Schäden an den Bohrungen des Radstegs:** an Bohrungen am Radsteg oder Radkörper ausgehende radiale und/oder tangentiale Risse (Abbildung Anhang 15)
- **Risse an der Radnabe:** von der Ölabbpressbohrung ausgehende, meist radial (selten auch tangential) verlaufende Risse in die Nabe

¹⁶⁵ Austrian Standards International, 81.¹⁶⁶ Austrian Standards International, 82.

- Schäden an bestimmten Rädern
 - **Materialtrennungen** unter der Oberfläche von Vollrädern: parallel zur Lauffläche angeordnete Materialtrennung unterhalb der Oberfläche, kann zum Verlust eines Laufflächenteils führen (Abbildung Anhang 16)
 - **Schäden am Radsteg** von Vollrädern: meist durch thermische Belastung (Klotzbremse oder als Bremsfläche genutzter Radsteg) induzierte Schäden oder Risse
 - **Thermische Überbeanspruchung** bereifter Räder: durch Klotzbremse eingebrachte Überhitzung des Radreifens (Verdrehung von diesem möglich), Materialauftragungen bzw. Anschmelzungen von Bremssohlen möglich, teilweise auch Überhitzungsflecken (Abbildung Anhang 17)

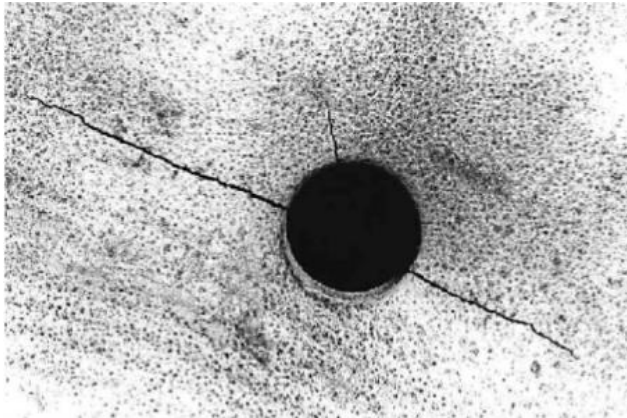


Abbildung Anhang 15: Schäden an einer Bohrung¹⁶⁷

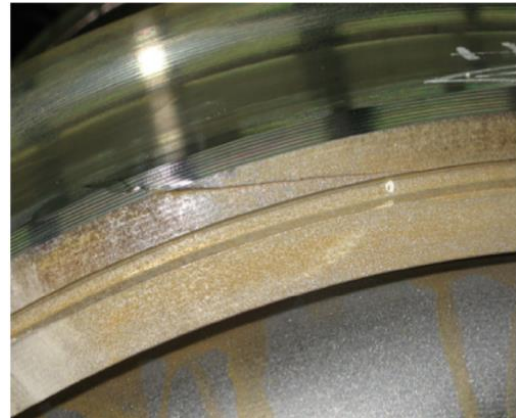


Abbildung Anhang 16: Materialtrennung¹⁶⁸



Abbildung Anhang 17: thermisch überbeanspruchter Radreifen¹⁶⁹

¹⁶⁷ Austrian Standards International, 85.

¹⁶⁸ Austrian Standards International, 87.

¹⁶⁹ Austrian Standards International, 89.

Anhang 2 Schienenschäden

Nachfolgend werden die häufigsten Schienenschäden gezeigt und kurz beschrieben.¹⁷⁰

- **Verschleiß an der Außenschiene:** Materialabtrag und plastische Verformung durch Anlaufen der Spurkränze an der bogenäußeren Schiene (Abbildung Anhang 18 und Abbildung Anhang 20)
- **Verformung an der Innenschiene:** Abflachung an der Außenseite der Innenschiene (Abbildung Anhang 20)
- **Head Checks:** durch Rollkontaktermüdung und Schubspannungen durch Traktion/Bremsen verursachte Risse an der Schienenoberfläche im Bereich des Fahrspiegels (Abbildung Anhang 19)



Abbildung Anhang 18: verschlissene Schiene¹⁷¹



Abbildung Anhang 19: Head Checks¹⁷²

¹⁷⁰ Six und Rosenberger, „Schadensbilder auf der Schiene/am Rad“; Stock, „Wheel-Rail Damage Mechanisms“; Veit, „Persönliche Kommunikation“; Gleisbau-Welt, „Verschleiß und Schienenfehler“.

¹⁷¹ Six und Rosenberger, „Schadensbilder auf der Schiene/am Rad“, 11.

¹⁷² Stock, „Wheel-Rail Damage Mechanisms“, 30.

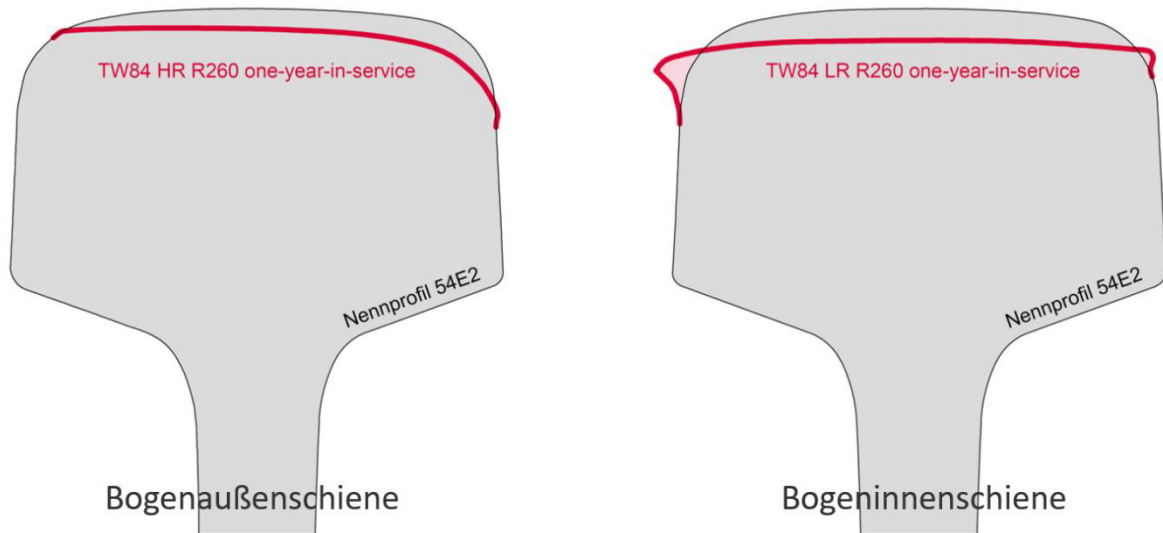


Abbildung Anhang 20: Verschleiß und Verformung von Bogenschienen¹⁷³

- **Schlupfwellen:** Torsionsschwingungen der Radsatzwellen verursachter Schlup resultiert in plastischer Verformung sowie Materialabtrag (Abbildung Anhang 21)
- **Squats:** einzeln oder periodisch auftretende nierenförmige Einsenkung der Schienenoberfläche, von dort ausgehende Risse mit möglichen Ausbröckelungen; gilt als Systemversagen, da nicht eine einzelne Ursache identifiziert werden kann (Abbildung Anhang 22 und Abbildung Anhang 23)
- **Schienenbruch:** durch temperaturbedingte Spannungen kann die Schiene bei bestehenden Vorschädigungen gerade brechen; aufgrund von Rissen (ausgehend von HC oder Squats) kann es zum Trümmerbruch kommen

¹⁷³ Gleisbau-Welt, „Verschleiß und Schienenfehler“ Quelle: voestalpine Schienen.

Anhang 2: Schienenschäden



Abbildung Anhang 21:
Schlupfwellen¹⁷⁴



Abbildung Anhang 22: Squat¹⁷⁵



Abbildung Anhang 23: Seriensquat¹⁷⁶

¹⁷⁴ Gleisbau-Welt Quelle: voestalpine Schienen.

¹⁷⁵ Stock, „Wheel-Rail Damage Mechanisms“, 35.

¹⁷⁶ Stock, 35.

Anhang 3 Vergleich der Untersuchungen

ZST1

Tabelle Anhang 1: Übersicht ZST1¹⁷⁷

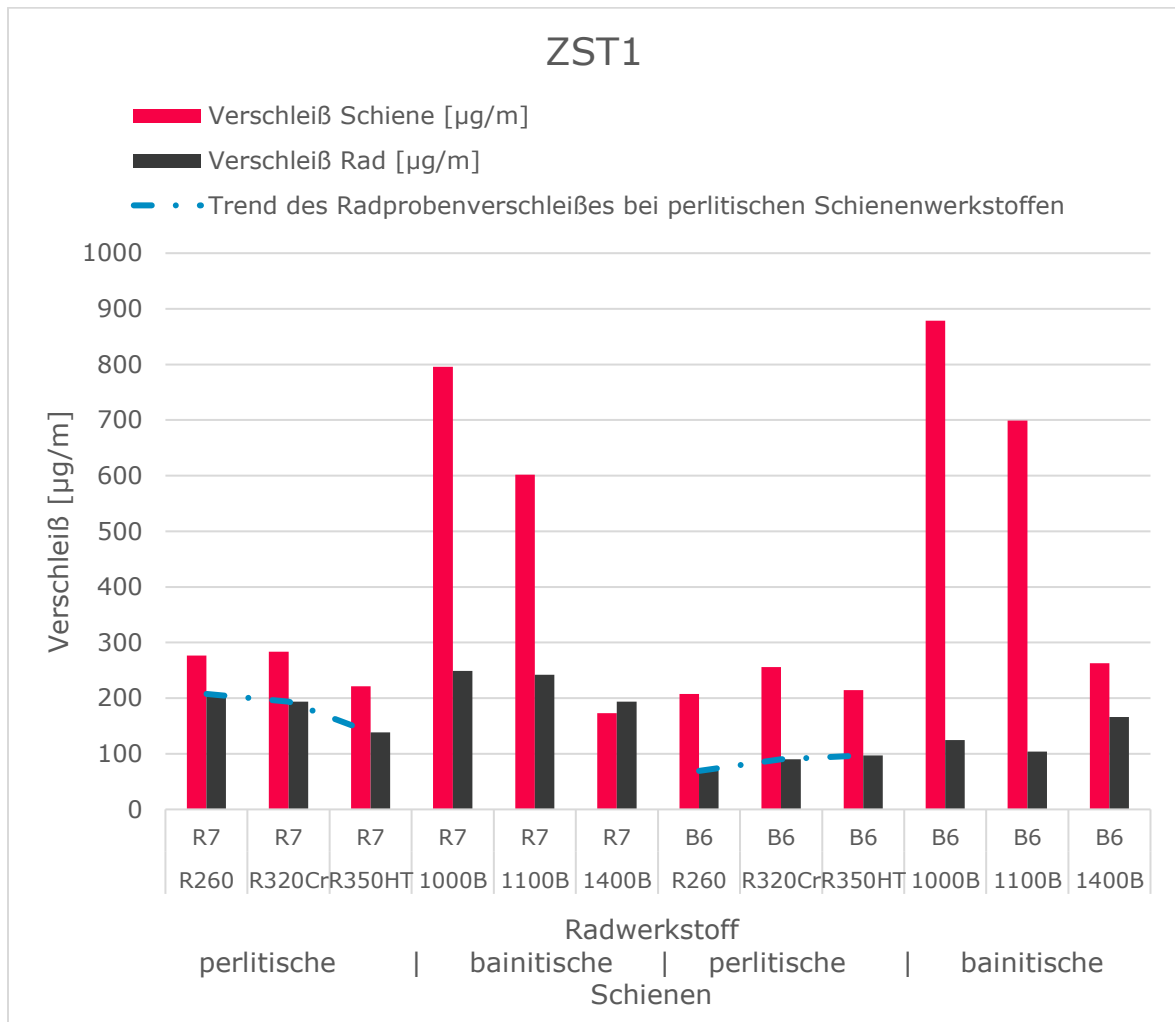
Durchmesser		
innen:	20	mm
außen (Abrolldurchmesser)	46	mm
Drehzahlen		
Radprobe:	436	rpm
Schienenprobe:	450	rpm
Schlupf:	3	%
Belastung		
Normalkraft:	3935	N
Kontaktdruck:	1250	N/mm ²
Versuchsdauer		
Überrollungen:	100000	Zyklen
Schmierung/Kühlung		
Medium:	Wasser	
Menge/Intervall:	1	Tropfen/20 s
Oberfläche		
Rauigkeit:	unbekannt	
Werkstoffe		
Rad 1:	R7	
Rad 2:	B6	
Schiene 1:	R260	
Schiene 2:	R320Cr	
Schiene 3:	R350HT	
Schiene 4:	1000B	
Schiene 5:	1100B	
Schiene 6:	1400B	

¹⁷⁷ nach: Mädler u. a., „Schienenwerkstoffe - Alternativen und Grenzen“, 7–9; Mädler u. a., „Rail Materials - Alternatives and Limits“, 5–7.

Anhang 3: Vergleich der Untersuchungen

Tabelle Anhang 2: Ergebnisse ZST1¹⁷⁸

Test	Schiene	Rad	Drehzahl Schiene [1/min]	Drehzahl Rad [1/min]	Kontakt-druck [N/mm ²]	Schlupf [%]	Überrollungen	Verschleiß Schiene [µg/m]	Verschleiß Rad [µg/m]	Verschleiß Schiene [g]	Verschleiß Rad [g]
ZST1	R260	R7	450	436	1250	3	100000	276,7912054	207,593404	4	3
ZST1	R320Cr	R7	450	436	1250	3	100000	283,7109855	193,7538438	4,1	2,8
ZST1	R350HT	R7	450	436	1250	3	100000	221,4329643	138,3956027	3,2	2
ZST1	1000B	R7	450	436	1250	3	100000	795,7747155	249,1120848	11,5	3,6
ZST1	1100B	R7	450	436	1250	3	100000	602,0208717	242,1923047	8,7	3,5
ZST1	1400B	R7	450	436	1250	3	100000	172,9945034	193,7538438	2,5	2,8
ZST1	R260	B6	450	436	1250	3	100000	207,593404	69,19780134	3	1
ZST1	R320Cr	B6	450	436	1250	3	100000	256,031865	89,95714175	3,7	1,3
ZST1	R350HT	B6	450	436	1250	3	100000	214,5131842	96,87692188	3,1	1,4
ZST1	1000B	B6	450	436	1250	3	100000	878,8120771	124,5560424	12,7	1,8
ZST1	1100B	B6	450	436	1250	3	100000	698,8977936	103,796702	10,1	1,5
ZST1	1400B	B6	450	436	1250	3	100000	262,9516451	166,0747232	3,8	2,4

Abbildung Anhang 24: Ergebnisse ZST1¹⁷⁹¹⁷⁸ eigene Auswertungen nach: Mädler u. a., „Rail Materials - Alternatives and Limits“.¹⁷⁹ eigene Auswertungen nach: Mädler u. a.

ZST2

Tabelle Anhang 3: Übersicht ZST2¹⁸⁰

Durchmesser		
Radprobe:	variabel; um Schlupf einzustellen	
Schienenprobe:	35	mm
Drehzahlen		
Radprobe:	400	rpm
Schienenprobe:	362,32	rpm
Schlupf:	1, 2, 3, 5, 7 & 10	%
Belastung		
Kontaktdruck:	500 – 1300	N/mm ²
Schmierung/Kühlung		
Medium:	Luft	
Menge/Intervall:	kontinuierlich	
Oberfläche		
Rauigkeit:	0,5	µm
Werkstoffe		
Rad 1:	Class D	
Schiene 1:	BS11	
Schiene 2:	UICA	
Schiene 3:	UICB	
Schiene 4:	1% Chrome	

¹⁸⁰ nach: Bolton und Clayton, „Rolling—sliding wear damage in rail and tyre steels“.

Anhang 3: Vergleich der Untersuchungen

Tabelle Anhang 4: Ergebnisse ZST2 1/2¹⁸¹

Test	Schiene	Rad	Drehzahl Schiene [1/min]	Drehzahl Rad [1/min]	Kontakt- druck [N/mm ²]	Schlupf [%]	Verschleiß Schiene [µg/m]	Verschleiß Rad [µg/m]
ZST2	BS11	Class D	362	400	500	1	0	0
ZST2	BS11	Class D	362	400	500	2	0	0
ZST2	BS11	Class D	362	400	500	3	0	10
ZST2	BS11	Class D	362	400	500	5	0	10
ZST2	BS11	Class D	362	400	500	7	0	10
ZST2	BS11	Class D	362	400	500	10	90	10
ZST2	BS11	Class D	362	400	700	1	0	0
ZST2	BS11	Class D	362	400	700	2	10	0
ZST2	BS11	Class D	362	400	700	3	10	15
ZST2	BS11	Class D	362	400	700	5	10	15
ZST2	BS11	Class D	362	400	700	7	15	160
ZST2	BS11	Class D	362	400	700	10	240	265
ZST2	BS11	Class D	362	400	950	1	10	0
ZST2	BS11	Class D	362	400	940	2	10	0
ZST2	BS11	Class D	362	400	930	3	10	25
ZST2	BS11	Class D	362	400	910	5	10	30
ZST2	BS11	Class D	362	400	900	7	245	295
ZST2	BS11	Class D	362	400	900	10	490	525
ZST2	BS11	Class D	362	400	1080	1	10	0
ZST2	BS11	Class D	362	400	1080	2	15	0
ZST2	BS11	Class D	362	400	1080	3	80	60
ZST2	BS11	Class D	362	400	1080	5	170	260
ZST2	BS11	Class D	362	400	1080	7	330	480
ZST2	BS11	Class D	362	400	1060	10	480	690
ZST2	BS11	Class D	362	400	1195	3	110	60
ZST2	BS11	Class D	362	400	1180	5	240	265
ZST2	BS11	Class D	362	400	1180	7	430	510
ZST2	BS11	Class D	362	400	1140	10	600	715
ZST2	BS11	Class D	362	400	1280	3	140	100
ZST2	BS11	Class D	362	400	1280	5	280	370
ZST2	UICA	Class D	362	400	500	10	120	125
ZST2	UICA	Class D	362	400	700	7	155	190
ZST2	UICA	Class D	362	400	700	10	280	265
ZST2	UICA	Class D	362	400	900	5	120	200
ZST2	UICA	Class D	362	400	900	7	210	310
ZST2	UICA	Class D	362	400	900	10	336,7	411,7
ZST2	UICA	Class D	362	400	1050	5	190	235
ZST2	UICA	Class D	362	400	1050	7	250	435
ZST2	UICA	Class D	362	400	1050	10	340	470
ZST2	UICA	Class D	362	400	1150	3	75	80
ZST2	UICA	Class D	362	400	1150	5	140	260
ZST2	UICA	Class D	362	400	1150	7	265	530
ZST2	UICA	Class D	362	400	1100	10	300	445

¹⁸¹ eigene Auswertungen nach: Bolton und Clayton.

Tabelle Anhang 5: Ergebnisse ZST2 2/2¹⁸²

Test	Schiene	Rad	Drehzahl Schiene [1/min]	Drehzahl Rad [1/min]	Kontakt- druck [N/mm ²]	Schlupf [%]	Verschleiß Schiene [µg/m]	Verschleiß Rad [µg/m]
ZST2	UICB	Class D	362	400	500	3	0	10
ZST2	UICB	Class D	362	400	500	5	0	10
ZST2	UICB	Class D	362	400	500	7	0	10
ZST2	UICB	Class D	362	400	500	10	70	130
ZST2	UICB	Class D	362	400	700	3	0	15
ZST2	UICB	Class D	362	400	700	5	0	15
ZST2	UICB	Class D	362	400	700	7	55	150
ZST2	UICB	Class D	362	400	700	10	160	270
ZST2	UICB	Class D	362	400	900	1	0	10
ZST2	UICB	Class D	362	400	900	3	0	30
ZST2	UICB	Class D	362	400	900	5	50	160
ZST2	UICB	Class D	362	400	900	7	140	320
ZST2	UICB	Class D	362	400	900	10	227,5	460
ZST2	UICB	Class D	362	400	1065	3	10	50
ZST2	UICB	Class D	362	400	1065	5	70	245
ZST2	UICB	Class D	362	400	1065	7	140	435
ZST2	UICB	Class D	362	400	1065	10	185	460
ZST2	UICB	Class D	362	400	1140	3	10	70
ZST2	UICB	Class D	362	400	1140	7	155	510
ZST2	UICB	Class D	362	400	1175	3	40	155
ZST2	UICB	Class D	362	400	1175	5	115	360
ZST2	UICB	Class D	362	400	1270	2	10	30
ZST2	UICB	Class D	362	400	1270	3	55	160
ZST2	UICB	Class D	362	400	1270	5	160	355
ZST2	UICB	Class D	362	400	1270	7	200	690
ZST2	UICB	Class D	362	400	1270	10	200	580
ZST2	1% Chrome	Class D	362	400	500	7	0	10
ZST2	1% Chrome	Class D	362	400	500	10	0	100
ZST2	1% Chrome	Class D	362	400	700	3	0	10
ZST2	1% Chrome	Class D	362	400	700	5	0	10
ZST2	1% Chrome	Class D	362	400	700	7	50	20
ZST2	1% Chrome	Class D	362	400	700	10	100	260
ZST2	1% Chrome	Class D	362	400	900	1	0	20
ZST2	1% Chrome	Class D	362	400	900	2	0	20
ZST2	1% Chrome	Class D	362	400	900	3	0	20
ZST2	1% Chrome	Class D	362	400	900	5	10	20
ZST2	1% Chrome	Class D	362	400	900	7	85	315
ZST2	1% Chrome	Class D	362	400	900	10	190	490
ZST2	1% Chrome	Class D	362	400	1070	1	0	20
ZST2	1% Chrome	Class D	362	400	1070	2	0	40
ZST2	1% Chrome	Class D	362	400	1070	3	10	67,5
ZST2	1% Chrome	Class D	362	400	1070	5	40	235
ZST2	1% Chrome	Class D	362	400	1070	7	145	480
ZST2	1% Chrome	Class D	362	400	1070	10	225	725

¹⁸² eigene Auswertungen nach: Bolton und Clayton.

Anhang 3: Vergleich der Untersuchungen

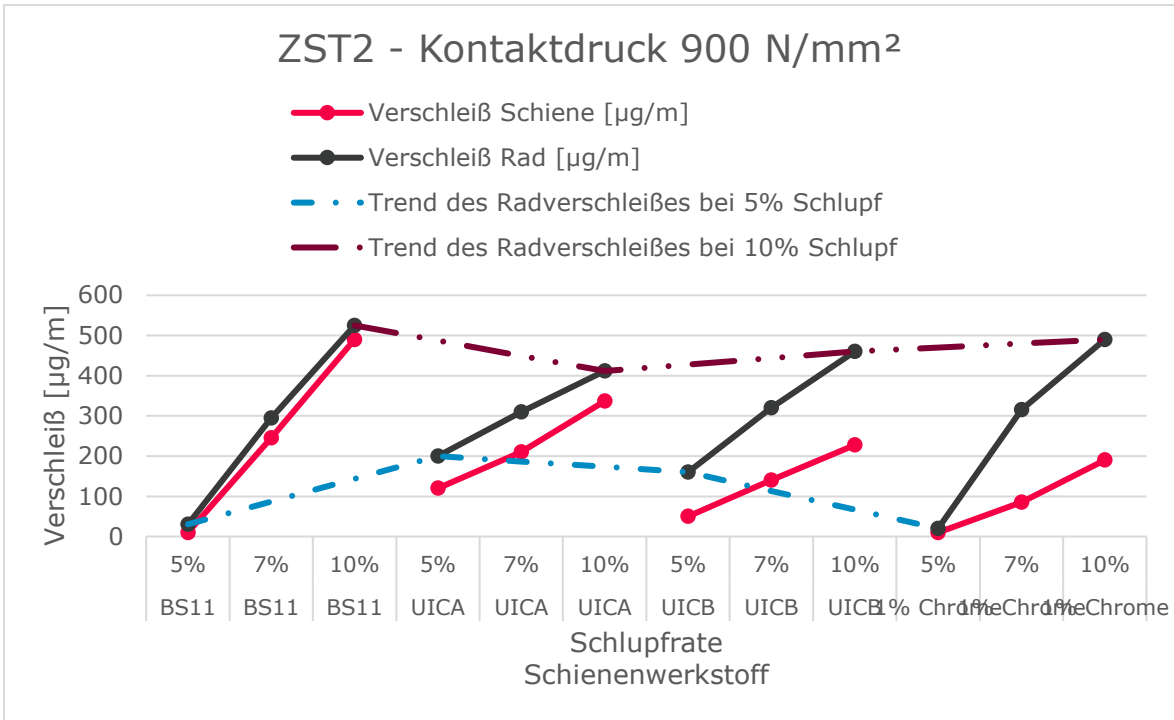


Abbildung Anhang 25: Ergebnisse ZST2 1/2¹⁸³

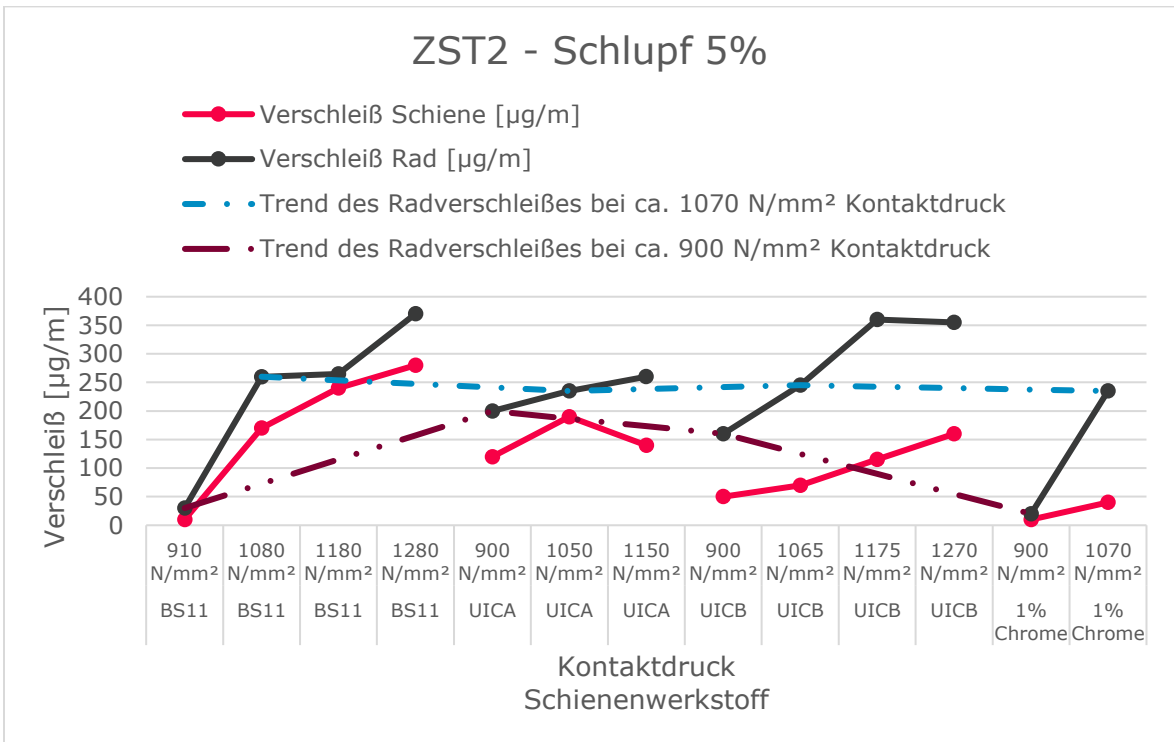


Abbildung Anhang 26: Ergebnisse ZST2 2/2¹⁸⁴

¹⁸³ eigene Auswertungen nach: Bolton und Clayton.

¹⁸⁴ eigene Auswertungen nach: Bolton und Clayton.

ZST3

Tabelle Anhang 6: Übersicht ZST3¹⁸⁵

Durchmesser		
Radprobe:	40	mm
Schienenprobe:	40	mm
Kontaktbreite:	10	mm
Drehzahlen		
Radprobe:	200 - 400	rpm
Schienenprobe:	180 - 360	rpm
Schlupf:	10	%
Belastung		
Kontaktdruck:	312 - 696	N/mm ²
Versuchsdauer		
Zeitdauer:	1	Stunde
Überrollungen:	12000/24000	Zyklen
Schmierung/Kühlung		
Medium:	keines/trocken	
Oberfläche		
Rauigkeit:	1	µm
Werkstoffe		
Rad 1:	geschmiedetes Rad	
Schiene 1:	RS-1	Standard-Schienenengüte in Indien
Schiene 2:	RS-2	Ersatz für UIC-860-90 Güte
Schiene 3:	RS-3	Werkstoff in Erprobung

¹⁸⁵ nach: Singh und Singh, „Wear investigation of wheel and rail steels under conditions of sliding and rolling-sliding contact with particular regard to microstructural parameters“.

Anhang 3: Vergleich der Untersuchungen

Tabelle Anhang 7: Ergebnisse ZST3¹⁸⁶

Test	Schiene	Rad	Drehzahl		Härte Anfang	Härte Rad	Einheit Härte	Kontakt- druck [N/mm ²]	Schlupf [%]	Überrollu ngen	Verschleiß Schiene [μg/m]	Verschleiß β Rad [μg/m]	inverse Wurzel des Lamellenabstandes [μm ^{^(-1/2)}]
			Schiene [1/min]	Rad [1/min]									
ZST3	RS-1	Wrought Wheel	180	200	235	227	HBW	312	10	12000	32	34	1,49
ZST3	RS-1	Wrought Wheel	180	200	235	227	HBW	492	10	12000	61	73	1,49
ZST3	RS-1	Wrought Wheel	180	200	235	227	HBW	696	10	12000	230	330	1,49
ZST3	RS-1	Wrought Wheel	360	400	235	227	HBW	312	10	24000	50	58	1,49
ZST3	RS-1	Wrought Wheel	360	400	235	227	HBW	492	10	24000	92	114	1,49
ZST3	RS-1	Wrought Wheel	360	400	235	227	HBW	696	10	24000	400	430	1,49
ZST3	RS-2	Wrought Wheel	180	200	278	227	HBW	312	10	12000	18	41	2,24
ZST3	RS-2	Wrought Wheel	180	200	278	227	HBW	492	10	12000	38	60	2,24
ZST3	RS-2	Wrought Wheel	180	200	278	227	HBW	696	10	12000	50	230	2,24
ZST3	RS-2	Wrought Wheel	360	400	278	227	HBW	312	10	24000	31	34	2,24
ZST3	RS-2	Wrought Wheel	360	400	278	227	HBW	492	10	24000	41	52	2,24
ZST3	RS-2	Wrought Wheel	360	400	278	227	HBW	696	10	24000	80	121	2,24
ZST3	RS-3	Wrought Wheel	180	200	322	227	HBW	312	10	12000	1	42	3,54
ZST3	RS-3	Wrought Wheel	180	200	322	227	HBW	492	10	12000	11	30	3,54
ZST3	RS-3	Wrought Wheel	180	200	322	227	HBW	696	10	12000	60	90	3,54
ZST3	RS-3	Wrought Wheel	360	400	322	227	HBW	312	10	24000	5	23	3,54
ZST3	RS-3	Wrought Wheel	360	400	322	227	HBW	492	10	24000	20	32	3,54
ZST3	RS-3	Wrought Wheel	360	400	322	227	HBW	696	10	24000	70	100	3,54

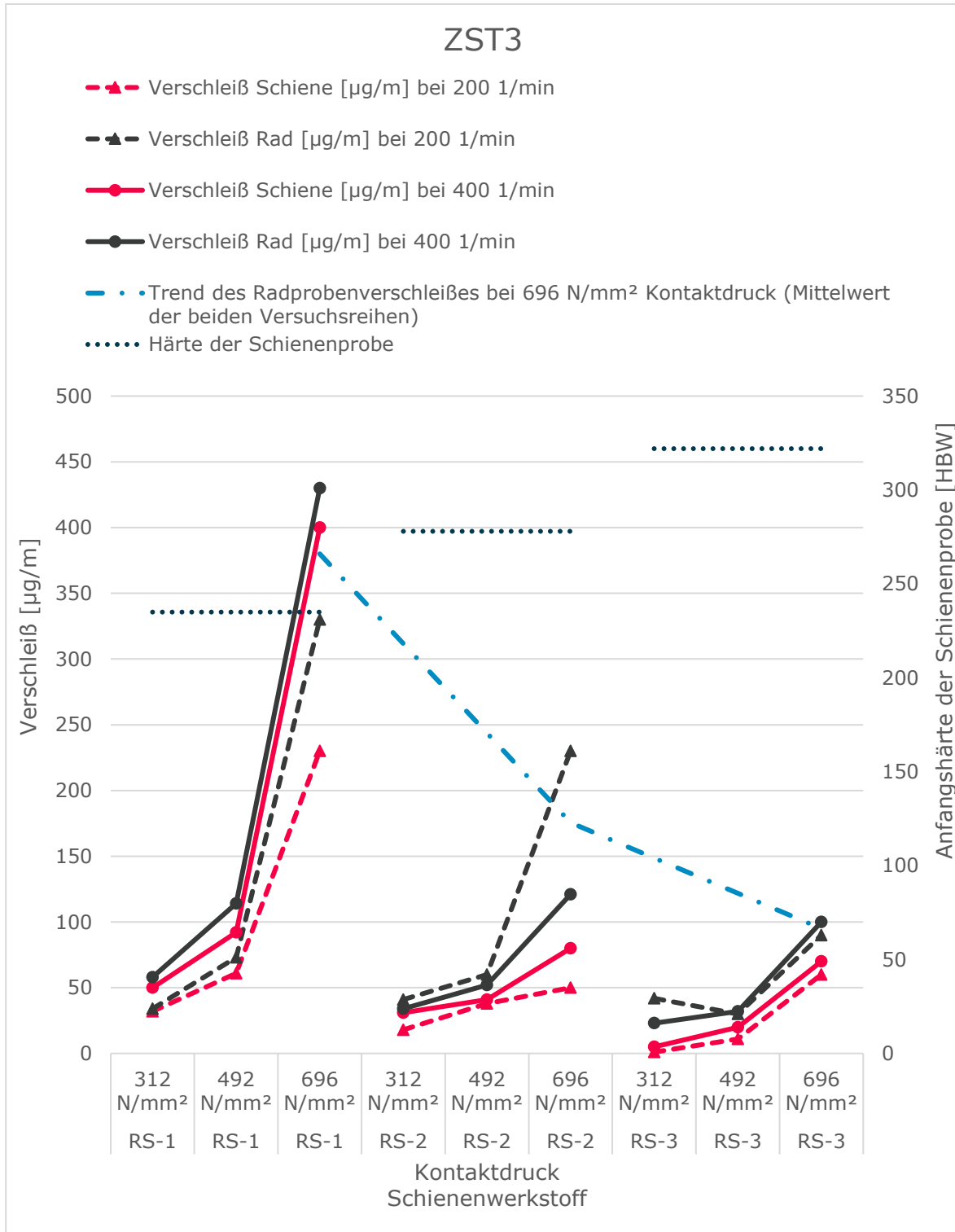


Abbildung Anhang 27: Ergebnisse ZST3¹⁸⁷

¹⁸⁶ eigene Auswertungen nach: Singh und Singh.

¹⁸⁷ eigene Auswertungen nach: Singh und Singh.

Anhang 3: Vergleich der Untersuchungen

ZST4

Tabelle Anhang 8: Ergebnisse ZST4¹⁸⁸

Durchmesser		
Radprobe:	47	mm
Schienenprobe:	47	mm
Kontaktbreite:	10	mm
Drehzahlen		
Radprobe:	404 - 480	rpm
Schienenprobe:	400	rpm
Schlupf:	1 - 20	%
Belastung		
Kontaktdruck:	1500	N/mm ²
Versuchsdauer		
Überrollungen:	1000/10000/30000	Zyklen
Schmierung/Kühlung		
Medium:	Luft	
Menge/Intervall:	kontinuierlich	
Werkstoffe		
Rad 1:	R8	
Schiene 1:	R260	
Schiene 2:	MSS Clad	R260 mit 1 mm Martensitschicht durch Laser-Auftragschweißen
Schiene 3:	R350HT	
Schiene 4:	A	mittlere RCF- & Verschleißresistenz
Schiene 5:	B	höchste RCF- & Verschleißresistenz

¹⁸⁸ nach: Christoforou, Fletcher, und Lewis, „Benchmarking of premium rail material wear“.

Tabelle Anhang 9: Ergebnisse ZST4 1/2¹⁸⁹

Test	Schiene	Rad	Drehzahl Schiene [1/min]	Drehzahl Rad [1/min]	Kontakt-druck [N/mm ²]	Schlupf [%]	Überrollungen	Verschleiß Schiene [µg/m]	Verschleiß Rad [µg/m]	Verschleiß Schiene [µg/cycle]	Verschleiß Rad [µg/cycle]
ZST4	R260	R8	400	404	1500	1	5000	51	47	7,5	7
ZST4	R260	R8	400	404	1500	1	10000	85	108	12,5	16
ZST4	R260	R8	400	404	1500	1	15000	88	149	13	22
ZST4	R260	R8	400	404	1500	1	20000	81	169	12	25
ZST4	R260	R8	400	404	1500	1	25000	74	203	11	30
ZST4	R260	R8	400	404	1500	1	30000	91	230	13,5	34
ZST4	R260	R8	400	440	1500	10	10000	88	278	13	41
ZST4	R260	R8	400	480	1500	20	1000	16254	16593	2400	2450
ZST4	MSS Clad	R8	400	404	1500	1	5000	13	108	1,9	16
ZST4	MSS Clad	R8	400	404	1500	1	10000	6	41	0,9	6
ZST4	MSS Clad	R8	400	404	1500	1	15000	6	44	0,85	6,5
ZST4	MSS Clad	R8	400	404	1500	1	20000	5	51	0,8	7,5
ZST4	MSS Clad	R8	400	404	1500	1	25000	5	64	0,8	9,5
ZST4	MSS Clad	R8	400	404	1500	1	30000	6	74	0,85	11
ZST4	MSS Clad	R8	400	440	1500	10	10000	156	284	23	42
ZST4	MSS Clad	R8	400	480	1500	20	1000	339	2032	50	300
ZST4	R350HT	R8	400	404	1500	1	5000	38	47	5,6	7
ZST4	R350HT	R8	400	404	1500	1	10000	39	108	5,75	16
ZST4	R350HT	R8	400	404	1500	1	15000	51	190	7,5	28
ZST4	R350HT	R8	400	404	1500	1	20000	71	203	10,5	30
ZST4	R350HT	R8	400	404	1500	1	25000	78	210	11,5	31
ZST4	R350HT	R8	400	404	1500	1	30000	81	257	11,9	38
ZST4	R350HT	R8	400	440	1500	10	1000	156	738	23	109
ZST4	R350HT	R8	400	440	1500	10	2000	81	271	12	40
ZST4	R350HT	R8	400	440	1500	10	3000	20	142	3	21
ZST4	R350HT	R8	400	440	1500	10	4000	14	115	2	17
ZST4	R350HT	R8	400	440	1500	10	10000	20	129	3	19
ZST4	R350HT	R8	400	480	1500	20	500	6773	13545	1000	2000
ZST4	R350HT	R8	400	480	1500	20	1000	3386	12191	500	1800

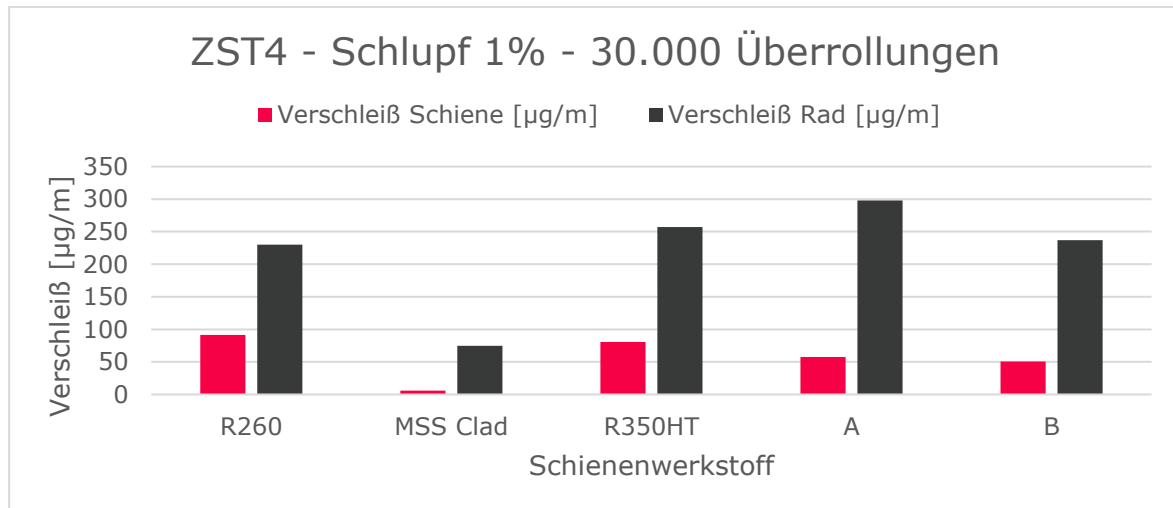


Abbildung Anhang 28: Ergebnisse ZST4 1/2¹⁹⁰

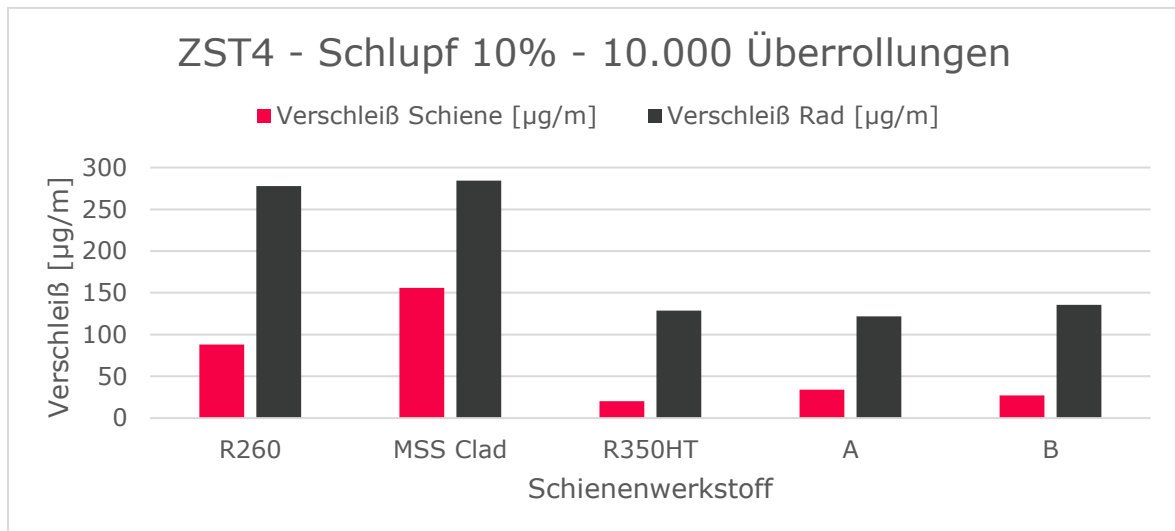
¹⁸⁹ eigene Auswertungen nach: Christoforou, Fletcher, und Lewis.

¹⁹⁰ eigene Auswertungen nach: Christoforou, Fletcher, und Lewis.

Anhang 3: Vergleich der Untersuchungen

Tabelle Anhang 10: Ergebnisse ZST4 2/2¹⁹¹

Test	Schiene	Rad	Drehzahl Schiene [1/min]	Drehzahl Rad [1/min]	Kontakt-druck [N/mm ²]	Schlupf [%]	Überrollungen	Verschleiß Schiene [µg/m]	Verschleiß Rad [µg/m]	Verschleiß Schiene [µg/cycle]	Verschleiß Rad [µg/cycle]
ZST4 A	R8	R8	400	404	1500	1	5000	34	54	5	8
ZST4 A	R8	R8	400	404	1500	1	10000	61	88	9	13
ZST4 A	R8	R8	400	404	1500	1	15000	68	152	10	22,5
ZST4 A	R8	R8	400	404	1500	1	20000	64	223	9,5	33
ZST4 A	R8	R8	400	404	1500	1	25000	54	237	8	35
ZST4 A	R8	R8	400	404	1500	1	30000	58	298	8,5	44
ZST4 A	R8	R8	400	440	1500	10	1000	379	691	56	102
ZST4 A	R8	R8	400	440	1500	10	2000	142	271	21	40
ZST4 A	R8	R8	400	440	1500	10	3000	47	135	7	20
ZST4 A	R8	R8	400	440	1500	10	4000	34	102	5	15
ZST4 A	R8	R8	400	440	1500	10	10000	34	122	5	18
ZST4 A	R8	R8	400	480	1500	20	500	5418	8804	800	1300
ZST4 A	R8	R8	400	480	1500	20	1000	1693	6434	250	950
ZST4 B	R8	R8	400	404	1500	1	5000	27	47	4	7
ZST4 B	R8	R8	400	404	1500	1	10000	29	115	4,25	17
ZST4 B	R8	R8	400	404	1500	1	15000	37	149	5,5	22
ZST4 B	R8	R8	400	404	1500	1	20000	44	223	6,5	33
ZST4 B	R8	R8	400	404	1500	1	25000	41	230	6	34
ZST4 B	R8	R8	400	404	1500	1	30000	51	237	7,5	35
ZST4 B	R8	R8	400	440	1500	10	1000	122	461	18	68
ZST4 B	R8	R8	400	440	1500	10	2000	74	237	11	35
ZST4 B	R8	R8	400	440	1500	10	3000	27	122	4	18
ZST4 B	R8	R8	400	440	1500	10	4000	20	102	3	15
ZST4 B	R8	R8	400	440	1500	10	10000	27	135	4	20
ZST4 B	R8	R8	400	480	1500	20	500	3725	13545	550	2000
ZST4 B	R8	R8	400	480	1500	20	1000	2370	16931	350	2500

Abbildung Anhang 29: Ergebnisse ZST4 2/2¹⁹²¹⁹¹ eigene Auswertungen nach: Christoforou, Fletcher, und Lewis.¹⁹² eigene Auswertungen nach: Christoforou, Fletcher, und Lewis.

ZST5

Tabelle Anhang 11: Übersicht ZST5¹⁹³

Durchmesser		
Radprobe:	50	mm
Schienenprobe:	50	mm
Kontaktbreite:	5	mm
Drehzahlen		
Radprobe:	495	rpm
Schienenprobe:	500	rpm
Schlupf:	1	%
Belastung		
Kontaktdruck:	1500	N/mm ²
Versuchsdauer		
Überrollungen:	25000	Zyklen
Werkstoffe		
Rad 1:	ER7	
Rad 2:	ER8	
Rad 3:	CL60	
Rad 4:	Class C	
Rad 5:	Class D	
Schiene 1:	U71Mn	chinesische Standardgüte
Schiene 2:	U75V	chinesische Standardgüte
Schiene 3:	PG4	Premiumgüte
Schiene 4:	PG5	Premiumgüte

¹⁹³ nach: Hu u. a., „Experimental study on wear properties of wheel and rail materials with different hardness values“; Hu u. a., „Investigation on wear and rolling contact fatigue of wheel-rail materials under various wheel/rail hardness ratio and creepage conditions“.

Anhang 3: Vergleich der Untersuchungen

Tabelle Anhang 12: Ergebnisse ZST5¹⁹⁴

Test	Schiene	Rad	Drehzahl Schiene		Drehzahl Rad		Härte Schiene		Härte Rad		Härte Ende		Einheit		Kontakt- druck [N/mm ²]	Schlupf [%]	Überrollu- ngen	Verschleiß Schiene [µg/m]	Verschleiß Rad [µg/m]
			[1/min]	[1/min]	Anfang	Ende	Anfang	Ende	Ende	Ende	Härte	Härte							
ZST5	U71Mn	ER7	500	495	278	265	820	710	HV_0,5	1500	1	25000	78	76					
ZST5	U75V	ER7	500	495	303	265	810	750	HV_0,5	1500	1	25000	95	76					
ZST5	PG4	ER7	500	495	390	265	800	800	HV_0,5	1500	1	25000	92	95					
ZST5	PG5	ER7	500	495	405	265	825	900	HV_0,5	1500	1	25000	78	105					
ZST5	U71Mn	ER8	500	495	278	254	840	715	HV_0,5	1500	1	25000	99	83					
ZST5	U75V	ER8	500	495	303	254	800	740	HV_0,5	1500	1	25000	107	88					
ZST5	PG4	ER8	500	495	390	254	830	800	HV_0,5	1500	1	25000	79	78					
ZST5	PG5	ER8	500	495	405	254	810	860	HV_0,5	1500	1	25000	68	83					
ZST5	U71Mn	CL60	500	495	278	298	845	760	HV_0,5	1500	1	25000	60	65					
ZST5	U75V	CL60	500	495	303	298	850	730	HV_0,5	1500	1	25000	58	75					
ZST5	PG4	CL60	500	495	390	298	855	850	HV_0,5	1500	1	25000	71	83					
ZST5	PG5	CL60	500	495	405	298	780	815	HV_0,5	1500	1	25000	72	98					
ZST5	U71Mn	Class C	500	495	278	354			HV_0,5	1500	1	25000	52	35					
ZST5	U75V	Class C	500	495	303	354			HV_0,5	1500	1	25000	56	36					
ZST5	PG4	Class C	500	495	390	354	840	800	HV_0,5	1500	1	25000	49	45					
ZST5	PG5	Class C	500	495	405	354			HV_0,5	1500	1	25000	40	50					
ZST5	U71Mn	Class D	500	495	278	365	780	700	HV_0,5	1500	1	25000	40	22					
ZST5	U75V	Class D	500	495	303	365	780	630	HV_0,5	1500	1	25000	50	27					
ZST5	PG4	Class D	500	495	390	365	825	700	HV_0,5	1500	1	25000	49	40					
ZST5	PG5	Class D	500	495	405	365	800	750	HV_0,5	1500	1	25000	40	45					

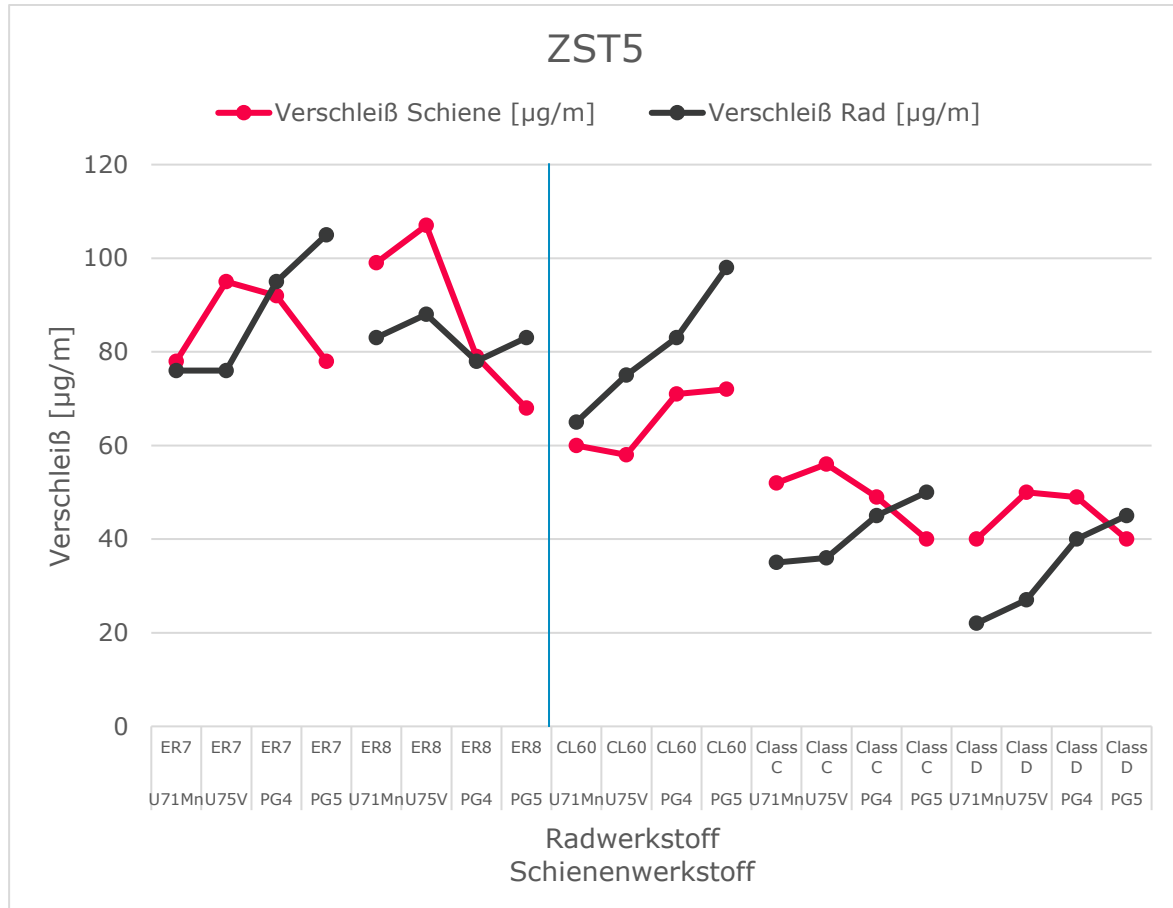


Abbildung Anhang 30: Ergebnisse ZST5 1/3¹⁹⁵

¹⁹⁴ eigene Auswertungen nach: Hu u. a., „Experimental study on wear properties of wheel and rail materials with different hardness values“.

¹⁹⁵ eigene Auswertungen nach: Hu u. a.

Anhang 3: Vergleich der Untersuchungen

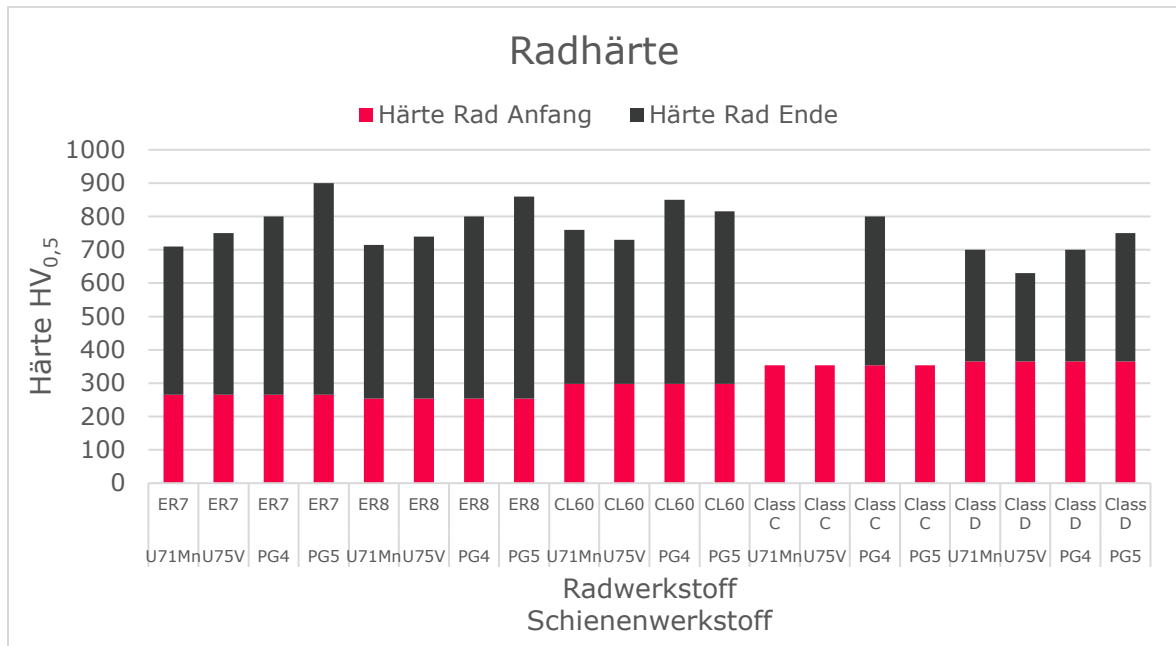


Abbildung Anhang 31: Ergebnisse ZST5 2/3¹⁹⁶

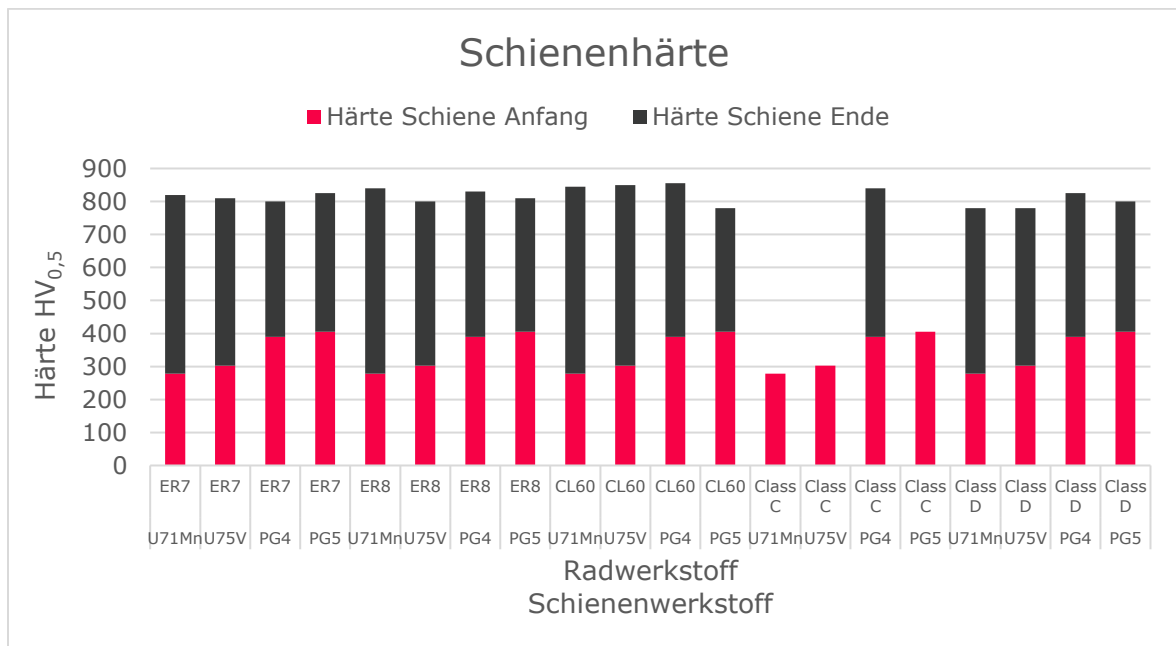


Abbildung Anhang 32: Ergebnisse ZST5 3/3¹⁹⁷

¹⁹⁶ eigene Auswertungen nach: Hu u. a.

¹⁹⁷ eigene Auswertungen nach: Hu u. a.

RSPS1

Tabelle Anhang 13: Übersicht RSPS1¹⁹⁸

Kontaktpartner		
Rad:	ÖBB R7 Güterwagenrad mit UIC ORE 1002 Radprofil	
Schienenprofil:	60E1	
Schienenneigung:	0	
Rollrichtung:	unidirektional	
Versuchslänge		
Überrollungen:	100000	Zyklen
Belastung		
Vertikallast:	23	t
Querlast:	4	t
Anlaufwinkel:	0	°
Temperatur (ca.):	25	°C
Werkstoffe		
Rad:	R7	
Schiene 1:	R260	
Schiene 2:	R350HT	
Schiene 3:	R400HT	
Schiene 4:	TB1400	Fabrikzustand
Schiene 5:	TB1400 (t)	1 h temperiert auf 550°C
Schiene 6:	B430	

¹⁹⁸ nach: Stock, „Influencing rolling contact fatigue and wear by different rail grades and contact conditions“.

Anhang 3: Vergleich der Untersuchungen

Tabelle Anhang 14: Ergebnisse RSPS1¹⁹⁹

Test	Schiene	Rad	Überrollungen	Verschleißfläche Schiene [mm ²]	Verschleißfläche Rad [mm ²]
RSPS1	R260	ER7	20000	23,5	6
RSPS1	R260	ER7	50000	26	7
RSPS1	R260	ER7	75000	30	8
RSPS1	R260	ER7	100000	33	10
RSPS1	R350HT	ER7	20000	9	4
RSPS1	R350HT	ER7	50000	16	6
RSPS1	R350HT	ER7	75000	18	8
RSPS1	R350HT	ER7	100000	23	10
RSPS1	R400HT	ER7	20000	1	5
RSPS1	R400HT	ER7	50000	4	6
RSPS1	R400HT	ER7	75000	6	9
RSPS1	R400HT	ER7	100000	9	12
RSPS1	B430	ER7	20000	7	10
RSPS1	B430	ER7	50000	12	13
RSPS1	B430	ER7	75000	16	16
RSPS1	B430	ER7	100000	19	20
RSPS1	TB1400	ER7	20000	13	4
RSPS1	TB1400	ER7	50000	23	6
RSPS1	TB1400	ER7	75000	29	8
RSPS1	TB1400	ER7	100000	33	9
RSPS1	TB1400 t	ER7	20000	22	7
RSPS1	TB1400 t	ER7	50000	42	9
RSPS1	TB1400 t	ER7	75000	48	11
RSPS1	TB1400 t	ER7	100000	52	11,5

¹⁹⁹ eigene Auswertungen nach: Stock.

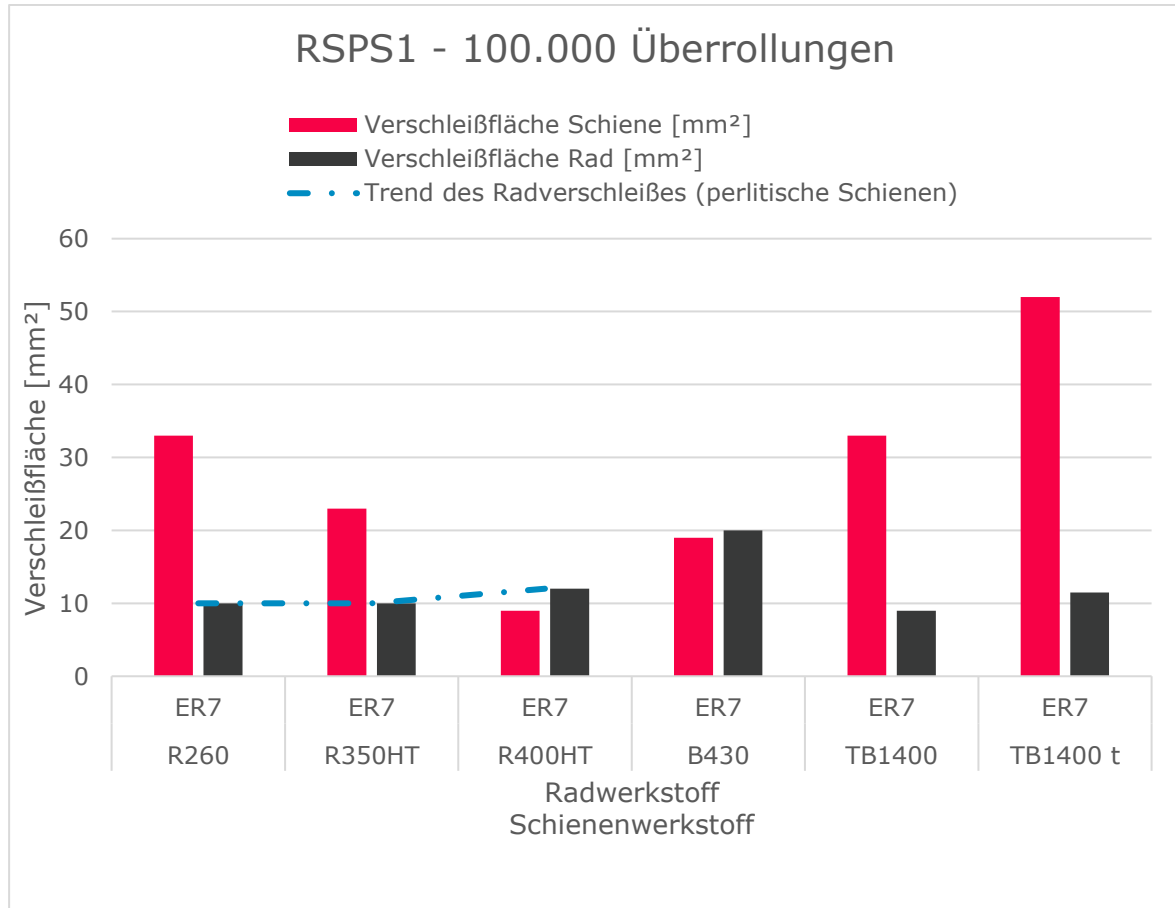
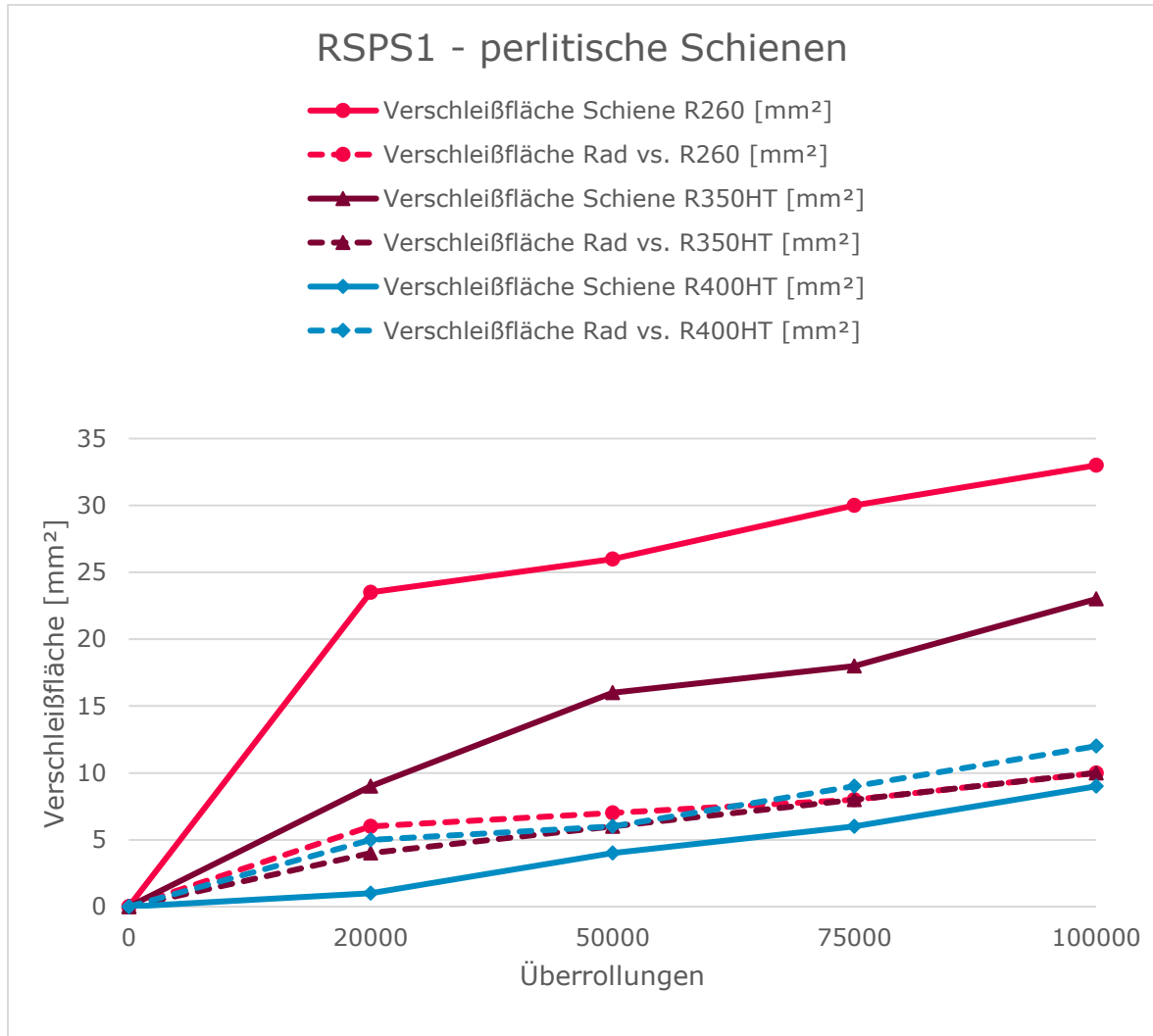


Abbildung Anhang 33: Ergebnisse RSPS1 1/2²⁰⁰

²⁰⁰ eigene Auswertungen nach: Stock.

Anhang 3: Vergleich der Untersuchungen

Abbildung Anhang 34: Ergebnisse RSPS1 2/2²⁰¹²⁰¹ eigene Auswertungen nach: Stock.

RSPS2

Tabelle Anhang 15: Übersicht RSPS2²⁰²

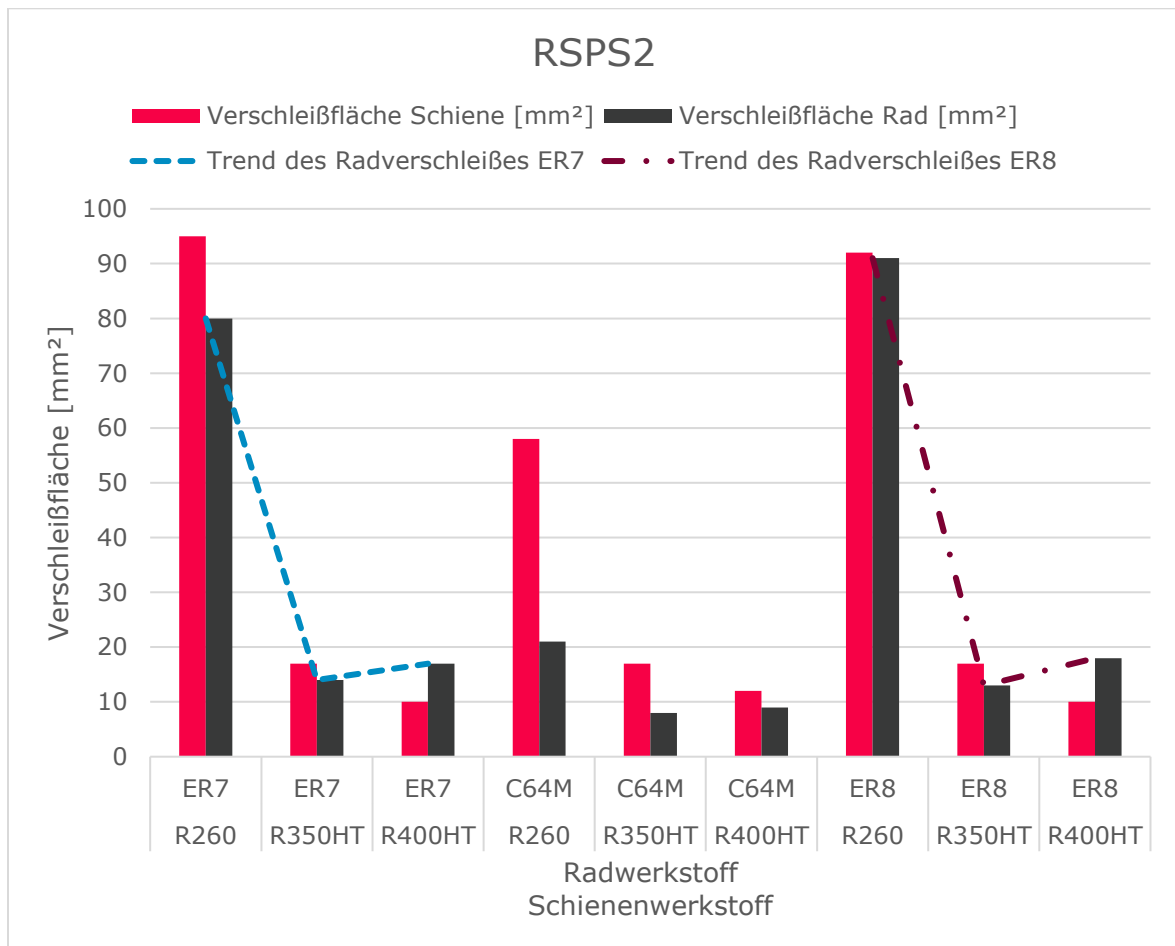
Radprofil:	S1002	
Schienenprofil:	60E2	
Versuchslänge		
Überrollungen:	100000	Zyklen
Gesamtbelastung:	2,4x10 ⁶	Lasttonnen
Belastung		
Vertikallast:	120	kN
Querlast:	10	kN
Anlaufwinkel:	5	mrad
	0,286	°
entsprechender Bogenradius:	700	m
Werkstoffe		
Rad 1:	ER7	
Rad 2:	ER8	
Rad 3:	C64M	
Schiene 1:	R260	
Schiene 2:	R350HT	
Schiene 3:	R400HT	

²⁰² nach: Mädler und Heyder, „Schienenfahrzeugtagung Dresden“.

Anhang 3: Vergleich der Untersuchungen

Tabelle Anhang 16: Ergebnisse RSPS2²⁰³

Test	Schiene	Rad	Überrollungen	Verschleißfläche Schiene [mm ²]	Verschleißfläche Rad [mm ²]
RSPS2	R260	ER7	100000	95	80
RSPS2	R260	ER8	100000	92	91
RSPS2	R260	C64M	100000	58	21
RSPS2	R350HT	ER7	100000	17	14
RSPS2	R350HT	ER8	100000	17	13
RSPS2	R350HT	C64M	100000	17	8
RSPS2	R400HT	ER7	100000	10	17
RSPS2	R400HT	ER8	100000	10	18
RSPS2	R400HT	C64M	100000	12	9

Abbildung Anhang 35: Ergebnisse RSPS2²⁰⁴²⁰³ eigene Auswertungen nach: Mädler und Heyder.²⁰⁴ eigene Auswertungen nach: Mädler und Heyder.

WT1

Tabelle Anhang 17: Übersicht WT1²⁰⁵

Versuchslänge		
Überrollungen:	80000	Zyklen
Belastung		
Schräglaufwinkel:	0; 0,3; 0,6	°
Werkstoffe		
Rad 1:	ER7R	Referenzprüfrad
Rad 2:	ER7H	gehärtet, ähnlich Eisenbahnrad
Rad 3:	ER9H	gehärtet, ähnlich Eisenbahnrad
Schiene 1:	R260	
Schiene 2:	R350HT	
Schiene 3:	R400HT	

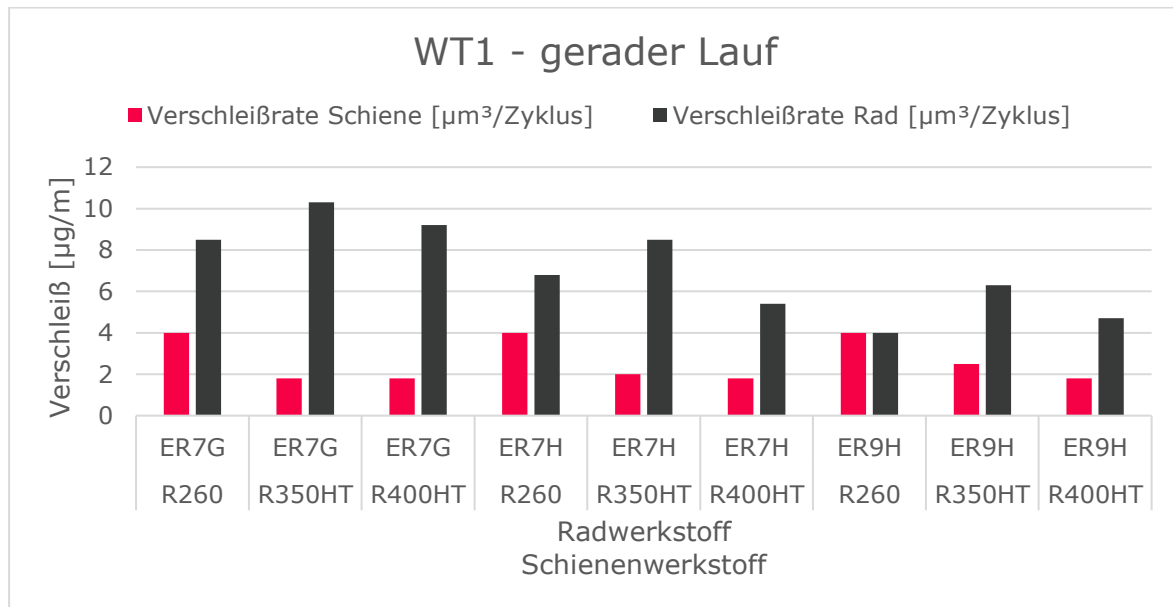
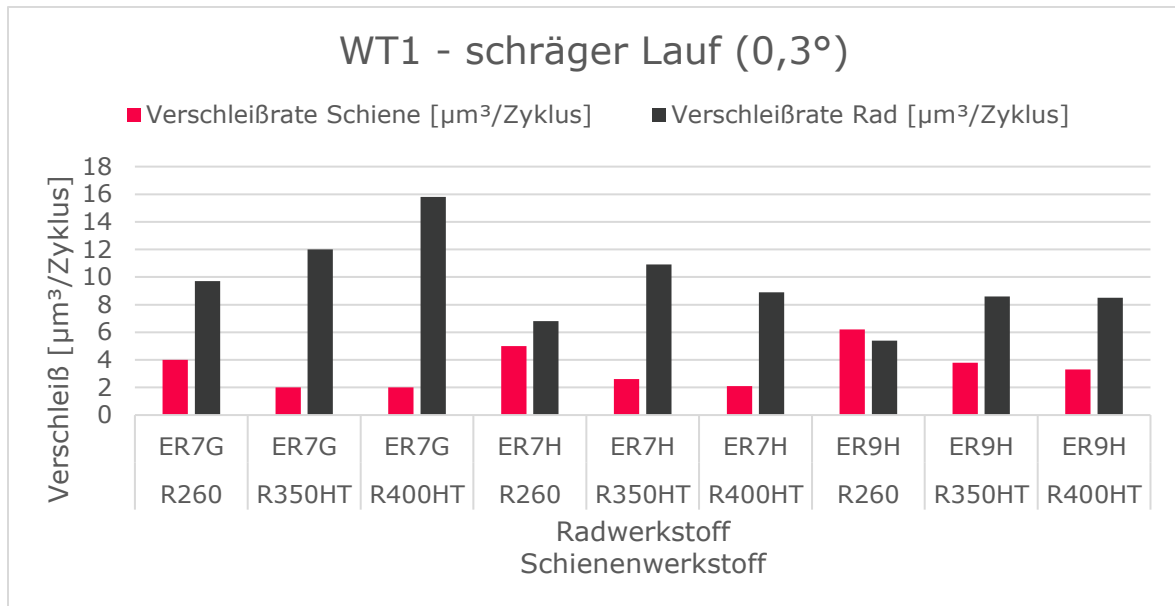


Abbildung Anhang 36: Ergebnisse WT1 1/3²⁰⁶

²⁰⁵ nach: Trausmuth u. a., „Verschleiß- und Ermüdungsverhalten von Rad und Schiene“.

²⁰⁶ eigene Auswertungen nach: Trausmuth u. a.

Anhang 3: Vergleich der Untersuchungen

Abbildung Anhang 37: Ergebnisse WT1 2/3²⁰⁷Tabelle Anhang 18: Ergebnisse WT1²⁰⁸

Test	Schiene	Rad	Schräglaufwinkel [°]	Verschleißrate Schiene [$\mu\text{m}^3/\text{Zyklus}$]	Verschleißrate Rad [$\mu\text{m}^3/\text{Zyklus}$]	Verschleißrate gesamt [$\mu\text{m}^3/\text{Zyklus}$]
WT1	R260	ER7G	0	4	8,5	12,5
WT1	R260	ER7G	0,3	4	9,7	13,7
WT1	R350HT	ER7G	0	1,8	10,3	12,1
WT1	R350HT	ER7G	0,3	2	12	14
WT1	R400HT	ER7G	0	1,8	9,2	11
WT1	R400HT	ER7G	0,3	2	15,8	17,8
WT1	R260	ER7H	0	4	6,8	10,8
WT1	R260	ER7H	0,3	5	6,8	11,8
WT1	R350HT	ER7H	0	2	8,5	10,5
WT1	R350HT	ER7H	0,3	2,6	10,9	13,5
WT1	R400HT	ER7H	0	1,8	5,4	7,2
WT1	R400HT	ER7H	0,3	2,1	8,9	11
WT1	R400HT	ER7H	0,6	4,2	14,1	18,3
WT1	R260	ER9H	0	4	4	8
WT1	R260	ER9H	0,3	6,2	5,4	11,6
WT1	R350HT	ER9H	0	2,5	6,3	8,8
WT1	R350HT	ER9H	0,3	3,8	8,6	12,4
WT1	R400HT	ER9H	0	1,8	4,7	6,5
WT1	R400HT	ER9H	0,3	3,3	8,5	11,8
WT1	R400HT	ER9H	0,6	6	10,3	16,3

²⁰⁷ eigene Auswertungen nach: Trausmuth u. a.²⁰⁸ eigene Auswertungen nach: Trausmuth u. a.

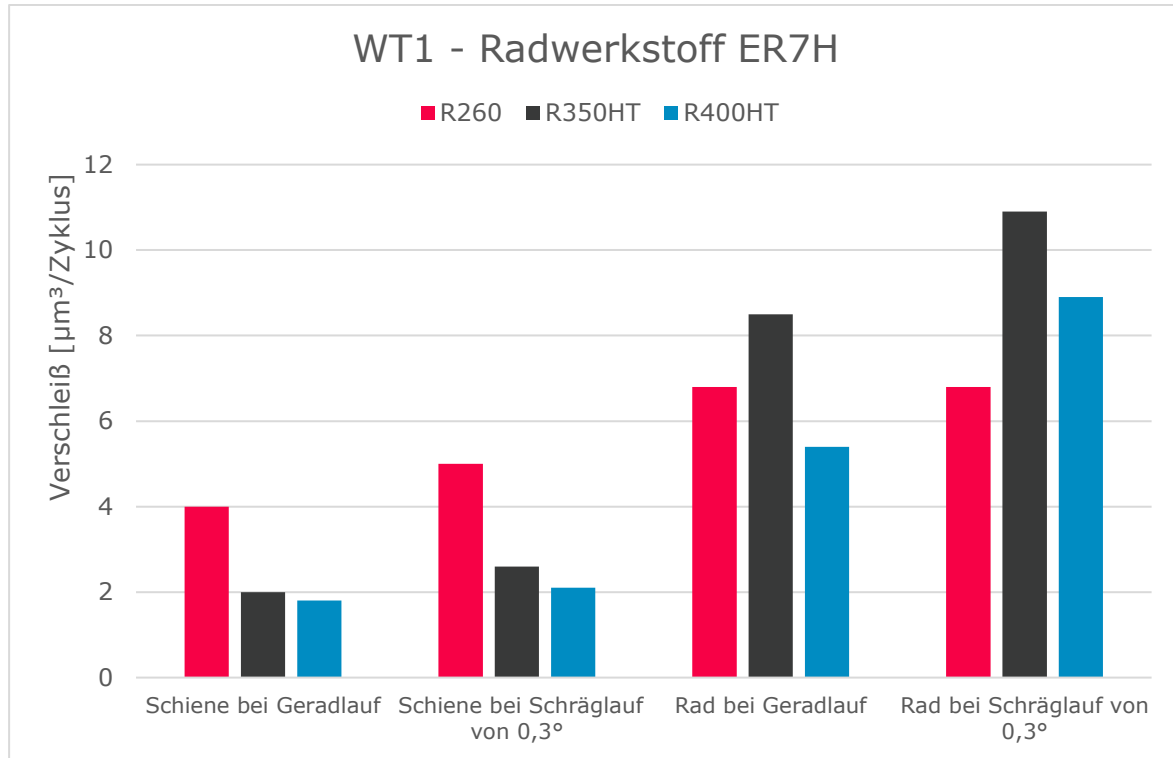


Abbildung Anhang 38: Ergebnisse des WT1 3/3²⁰⁹

²⁰⁹ eigene Auswertungen nach: Trausmuth u. a.

Anhang 4: Vergleich der Ergebnisse

Anhang 4 Vergleich der Ergebnisse

Zweischeiben-Tests

Tabelle Anhang 19: Ergebnisdaten für weitere Betrachtung (ZST)

Test	Schiene	Rad	Härte Schiene Anfang	Härte Rad Anfang	Einheit Härte	Härteverhältnis Schiene/Rad	Kontaktdruck [N/mm ²]	Schlupf [%]	Verschleiß Schiene [µg/m]	Verschleiß Rad [µg/m]	norm. Schienenverschleiß	norm. Radverschleiß
ZST1	R260	R7	290	265	HB	1,094339623	1250	3	276,791205	207,593404	1	1
ZST1	R320Cr	R7	350	265	HB	1,320754717	1250	3	283,710986	193,753844	1,025	0,933333333
ZST1	R350HT	R7	390	265	HB	1,471698113	1250	3	221,432964	138,395603	0,8	0,666666667
ZST5	U71Mn	R7	278	265	HV_0,5	1,049056604	1500	1	78	76	1	1
ZST5	U75V	R7	303	265	HV_0,5	1,143399626	1500	1	95	95	1	1
ZST5	PG4	R7	390	265	HV_0,5	1,471698113	1500	1	92	95	1,217948718	1,25
ZST5	PG5	R7	405	265	HV_0,5	1,528301887	1500	1	78	105	1,179487179	1,381578947
ZST14	R260	R8	275	254	HV3	1,082677165	1500	1	91	230	1	1
ZST4	R350HT	R8	340	254	HV3	1,338582677	1500	1	81	257	0,881481481	1,117647059
ZST4	A	R8	330	254	HV3	1,299212598	1500	1	58	298	0,62962963	1,294117647
ZST4	B	R8	360	254	HV3	1,417322835	1500	1	51	237	0,555555556	1,029411765
ZST5	U71Mn	R8	278	254	HV_0,5	1,094488189	1500	1	99	83	1	1
ZST5	U75V	R8	303	254	HV_0,5	1,192913386	1500	1	107	88	1,080808081	1,060240964
ZST5	PG4	R8	390	254	HV_0,5	1,535433071	1500	1	79	78	0,797979798	0,939759036
ZST5	PG5	R8	405	254	HV_0,5	1,594488189	1500	1	68	83	0,686868687	1
ZST3	RS-1	Wrought Wheel	235	227	HB	1,035242291	312	10	50	58	1	1
ZST3	RS-2	Wrought Wheel	278	227	HB	1,224669604	312	10	31	34	0,62	0,586206897
ZST3	RS-3	Wrought Wheel	322	227	HB	1,418502203	312	10	5	23	0,1	0,396551724
ZST3	RS-1	Wrought Wheel	235	227	HB	1,035242291	492	10	92	114	1	1
ZST3	RS-2	Wrought Wheel	278	227	HB	1,224669604	492	10	41	52	0,445652174	0,456140351
ZST3	RS-3	Wrought Wheel	322	227	HB	1,418502203	492	10	20	32	0,217391304	0,280701754
ZST3	RS-1	Wrought Wheel	235	227	HB	1,035242291	696	10	400	430	1	1
ZST3	RS-2	Wrought Wheel	278	227	HB	1,224669604	696	10	80	121	0,2	0,281395349
ZST3	RS-3	Wrought Wheel	322	227	HB	1,418502203	696	10	70	100	0,175	0,23255814
ZST4	R260	R8	275	254	HV3	1,082677165	1500	1	91	230	1	1
ZST4	R350HT	R8	340	254	HV3	1,338582677	1500	1	81	257	0,881481481	1,117647059
ZST4	A	R8	330	254	HV3	1,299212598	1500	1	58	298	0,62962963	1,294117647
ZST4	B	R8	360	254	HV3	1,417322835	1500	1	51	237	0,555555556	1,029411765

Quellen der Härtewerte:

- Für ZST1:
 - o Schiene: Annahme nach Schienengüte
 - o Rad: aus Literatur von ZST5 (mittels Vergleichstabelle angepasst)
- Für ZST3: Angaben lt. Literatur
- Für ZST4:
 - o Schiene: Angabe lt. Literatur
 - o Rad: aus Literatur von ZST5 (mittels Vergleichstabelle angepasst)
- Für ZST5: Angaben lt. Literatur

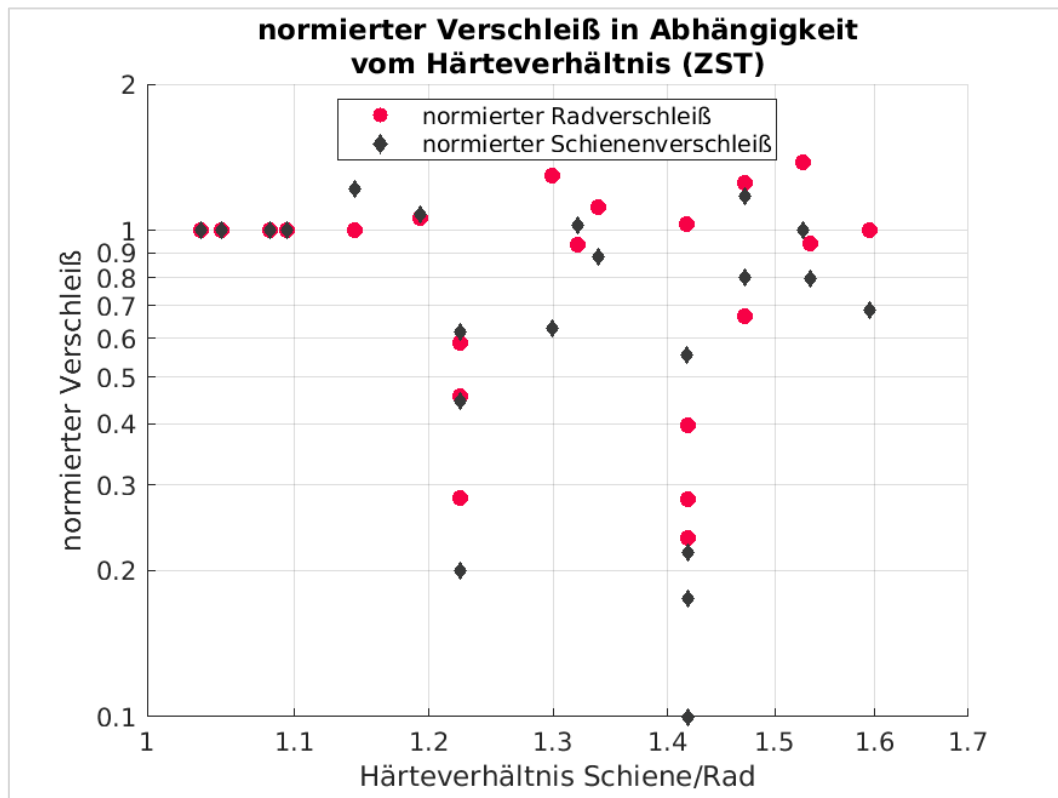


Abbildung Anhang 39: normierter Verschleiß (ZST)

Anhang 4: Vergleich der Ergebnisse

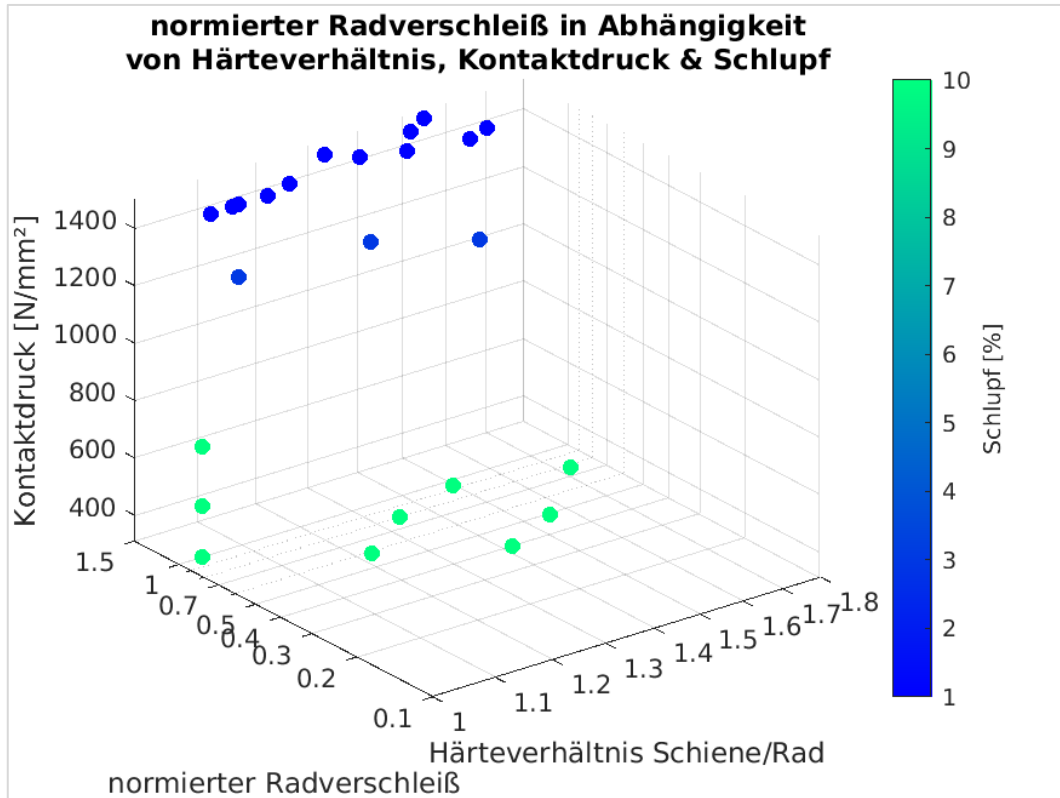


Abbildung Anhang 40: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Belastung (ZST)

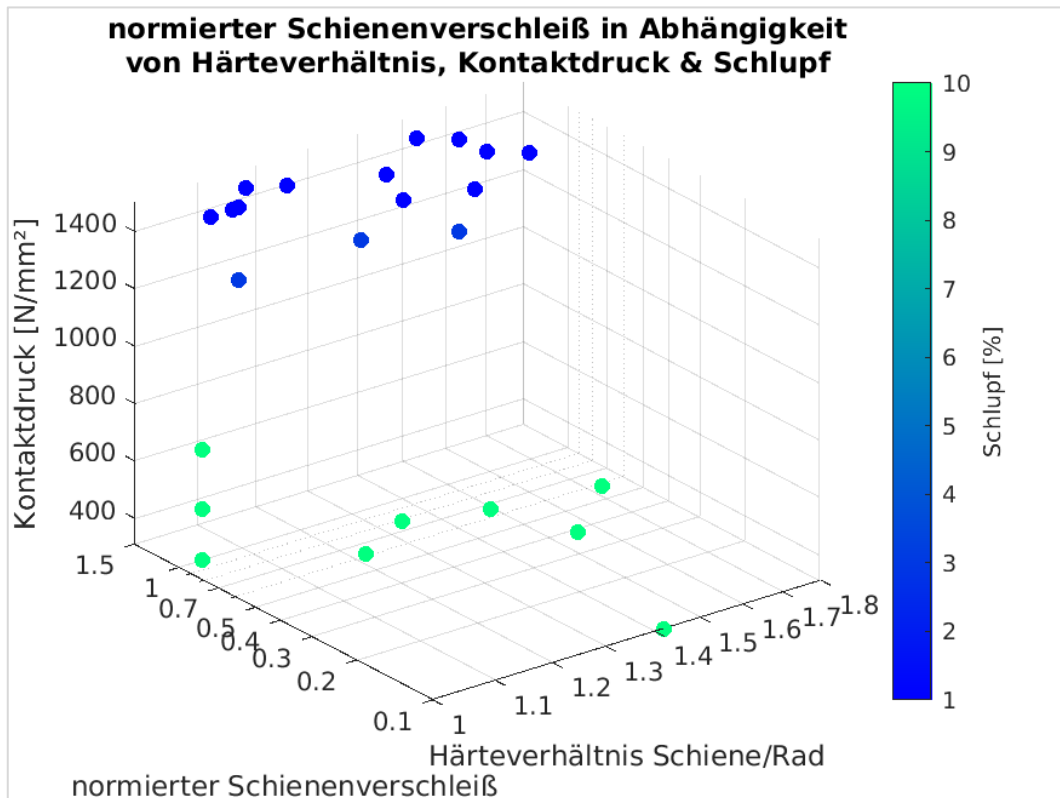


Abbildung Anhang 41: norm. Schienenverschleiß – Härteverhältnis, Belastung (ZST)

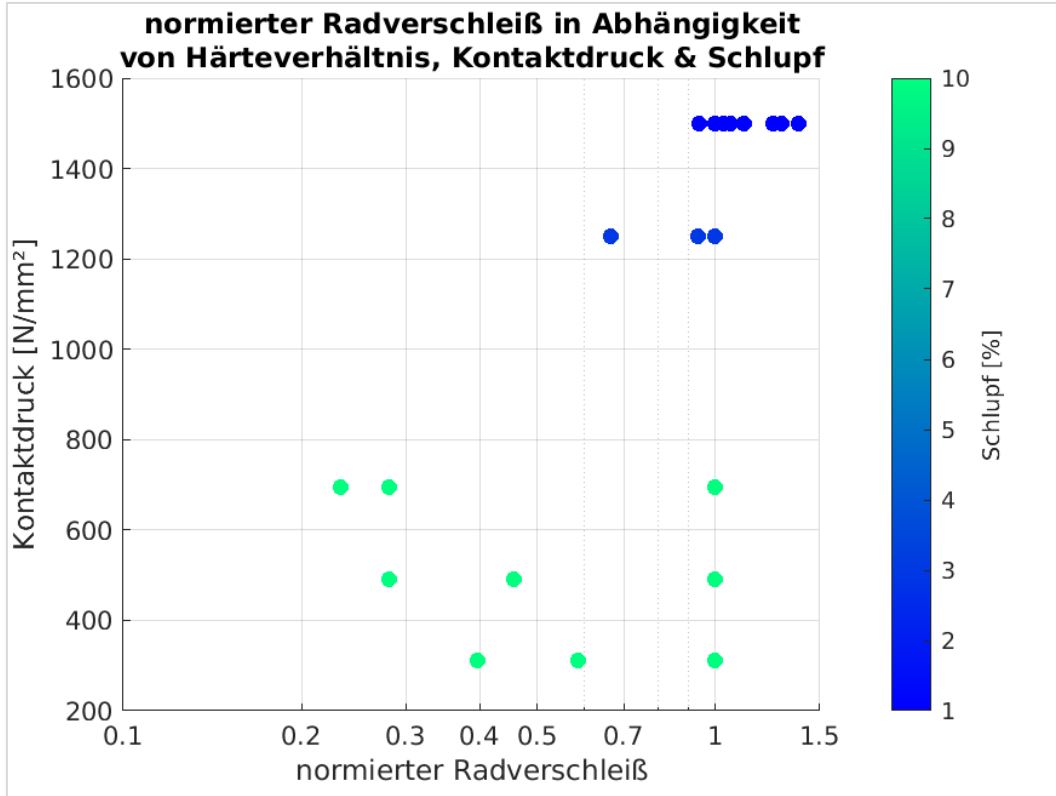


Abbildung Anhang 42: norm. Radverschleiß – Belastung (ZST)

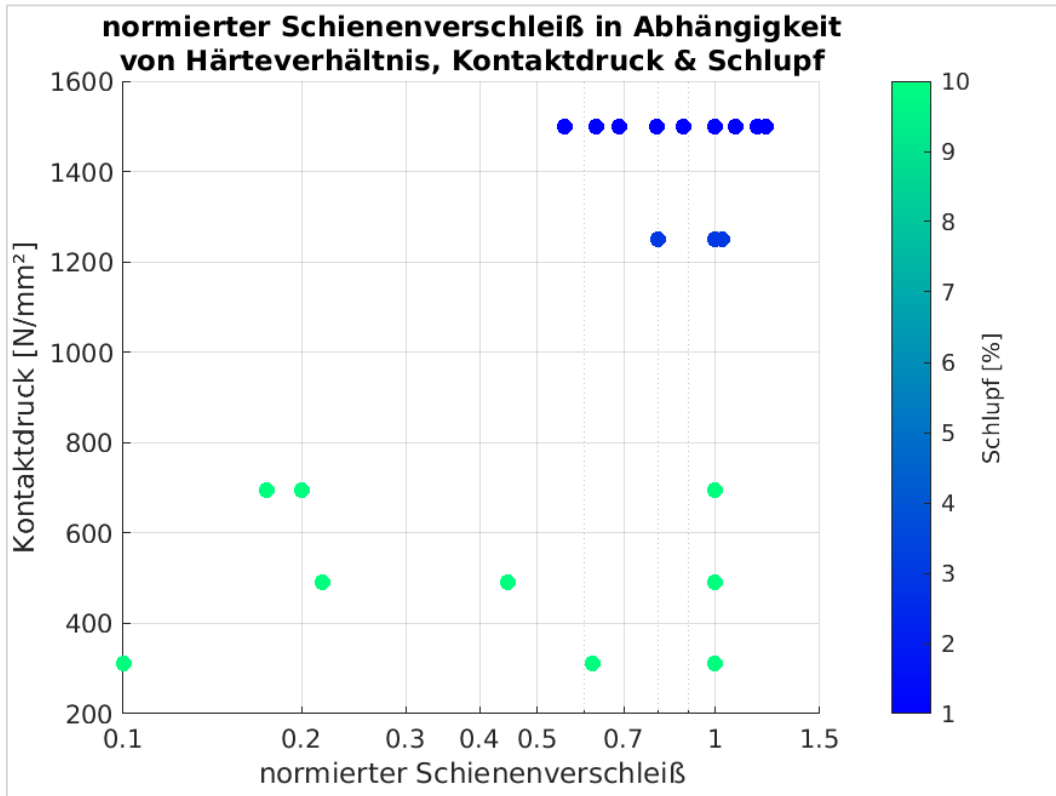


Abbildung Anhang 43: norm. Schienenverschleiß – Belastung (ZST)

Anhang 4: Vergleich der Ergebnisse

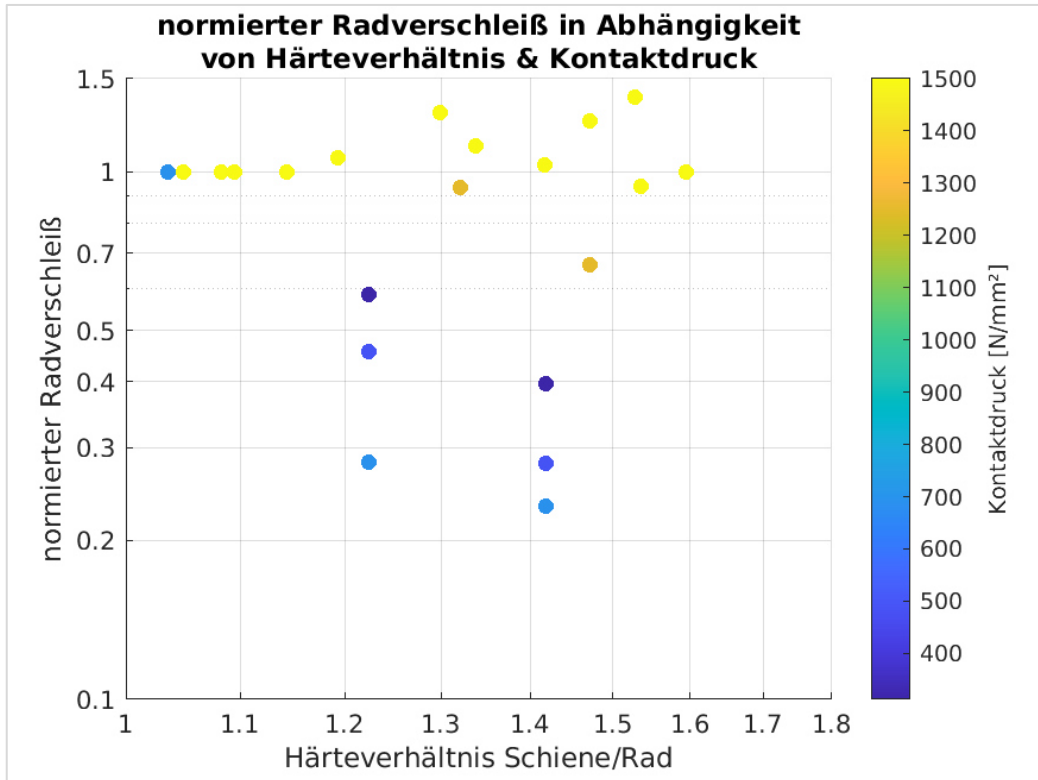


Abbildung Anhang 44: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Kontaktdruck (ZST)

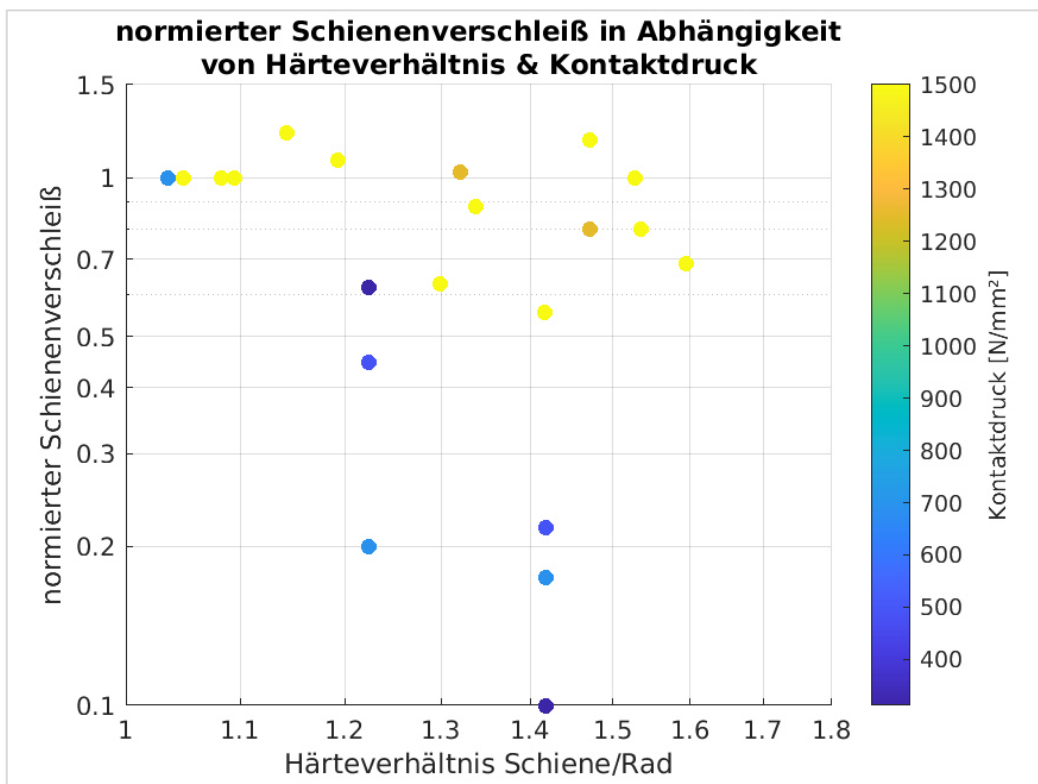


Abbildung Anhang 45: norm. Schienenverschleiß – Härteverhältnis, Kontaktdruck (ZST)

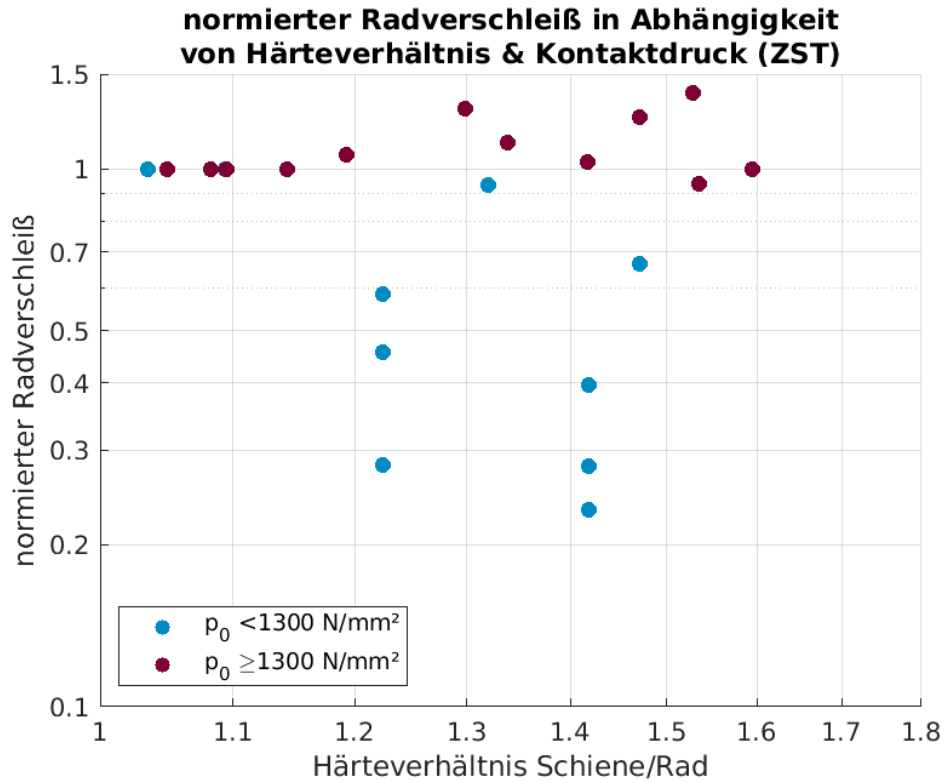


Abbildung Anhang 46: norm. Radverschleiß - Härteverhältnis, Grenzwert (ZST)

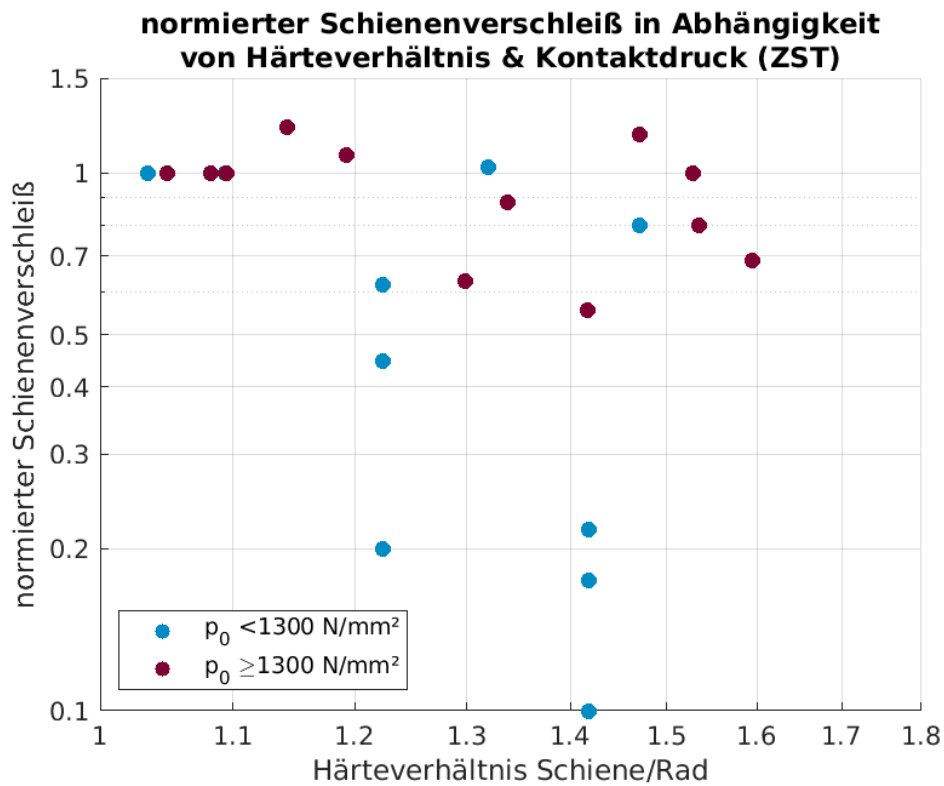


Abbildung Anhang 47: norm. Schienenverschleiß - Härteverhältnis, Grenzwert (ZST)

Anhang 4: Vergleich der Ergebnisse

Rad-Schiene-Prüfstandtests

Tabelle Anhang 20: Ergebnisdaten für weitere Betrachtung (RSPS)

Test	Härte Schiene		Härte Rad		Einheit	Härteverhältnis	Belastung verikal [kN]	Belastung horizontal [kN]	Anlaufwinkel [°]	Verschleißfläche Schiene [mm ²]	Verschleißfläche Rad [mm ²]	norm. Schienenverschleiß	norm. Radverschleiß
	Rad	Anfang	Rad	Anfang									
RSPS1 R260	R7	290	R7	265	HB	1,094339623	225,63	39,24	0	33	10	1	1
RSPS1 R350HT	R7	390	R7	265	HB	1,471698113	225,63	39,24	0	23	10	0,696969697	1
RSPS1 R400HT	R7	440	R7	265	HB	1,660377358	225,63	39,24	0	9	12	0,272727273	1,2
RSPS2 R260	R7	290	R7	265	HB	1,094339623	120	10	0,286	95	80	1	1
RSPS2 R350HT	R7	390	R7	265	HB	1,471698113	120	10	0,286	17	14	0,178947368	0,175
RSPS2 R400HT	R7	440	R7	265	HB	1,660377358	120	10	0,286	10	17	0,105263158	0,2125
RSPS2 R260	R8	290	R8	254	HB	1,141732283	120	10	0,286	92	91	1	1
RSPS2 R350HT	R8	390	R8	254	HB	1,535433071	120	10	0,286	17	13	0,184782609	0,142857143
RSPS2 R400HT	R8	440	R8	254	HB	1,732283465	120	10	0,286	10	18	0,108695652	0,197802198

Quellen der Härtewerte:

- Für RSPS1:
 - o Schiene: Annahme nach Schienengüte
 - o Rad: aus Literatur von ZST5 (mittels Vergleichstabelle angepasst)
- Für RSPS2
 - o Schiene: Annahme nach Schienengüte
 - o Rad: aus Literatur von ZST5 (mittels Vergleichstabelle angepasst)

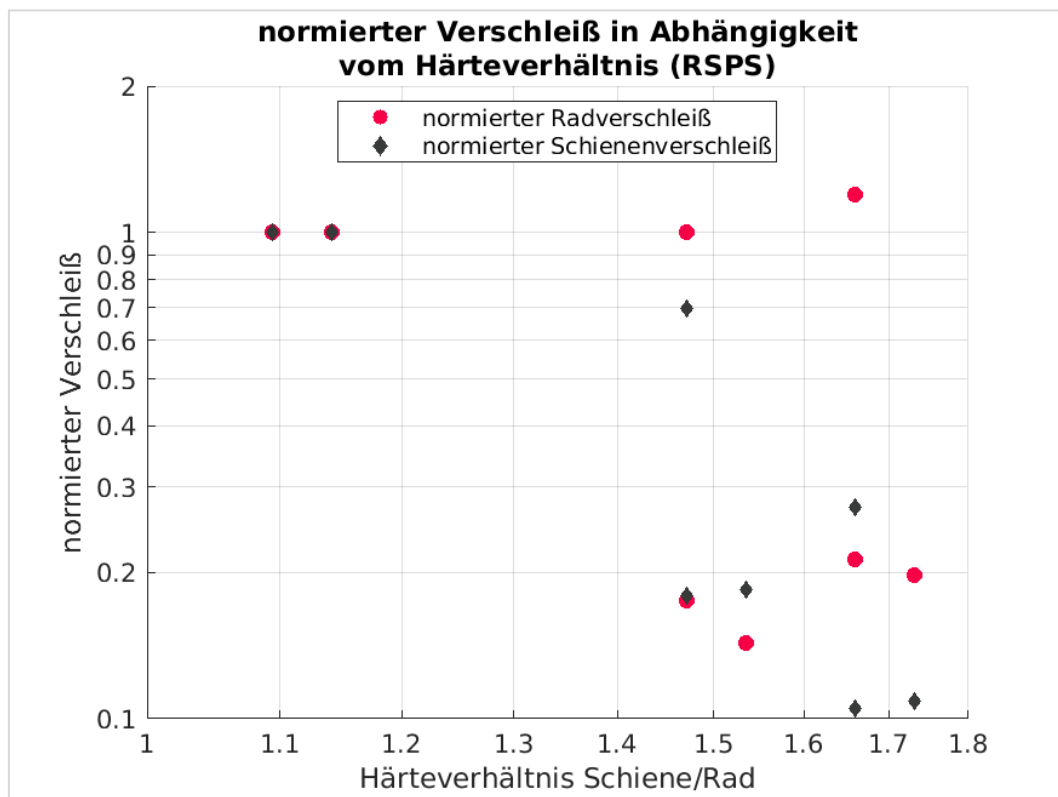


Abbildung Anhang 48: normierter Verschleiß (RSPS)

Anhang 4: Vergleich der Ergebnisse

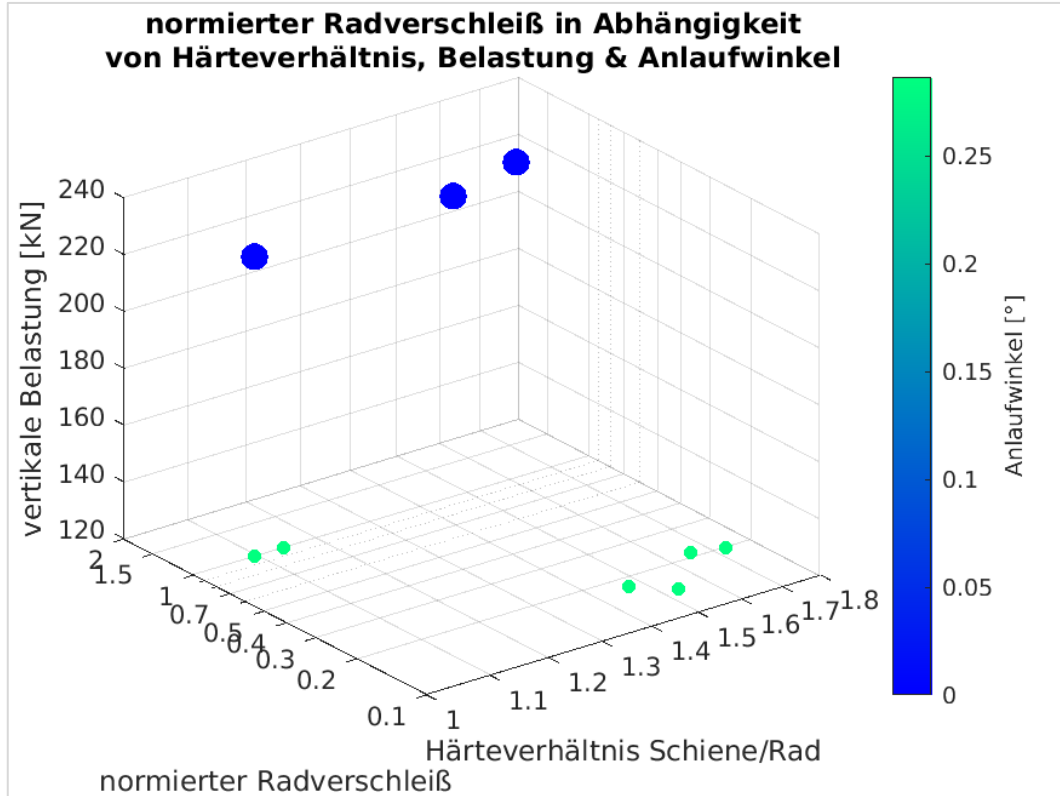


Abbildung Anhang 49: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Belastung (RSPS)

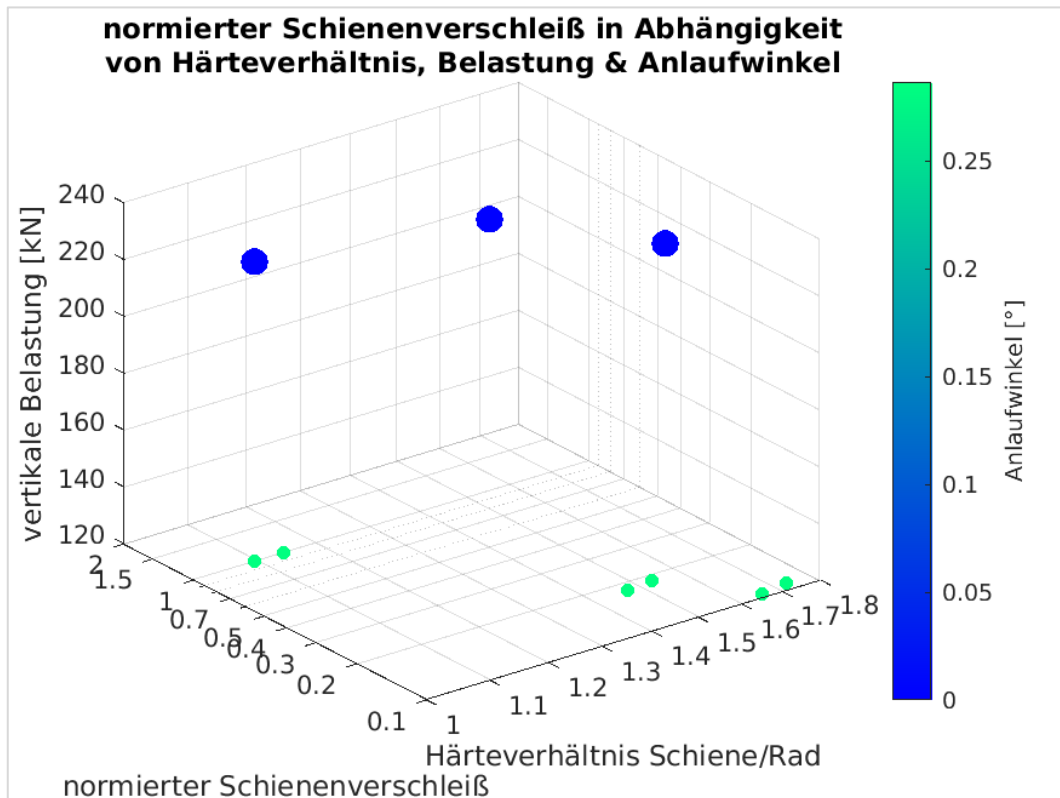


Abbildung Anhang 50: norm. Schienenverschleiß – Härteverhältnis, Belastung (RSPS)

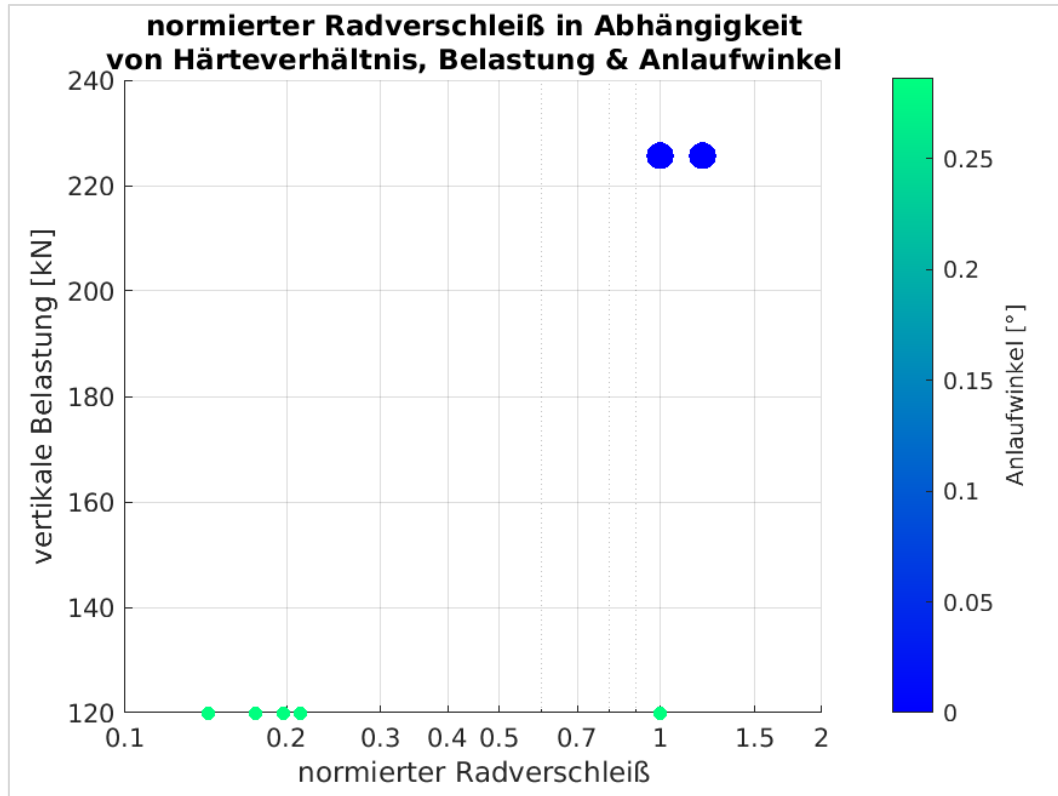


Abbildung Anhang 51: norm. Radverschleiß – Belastung (RSPS)

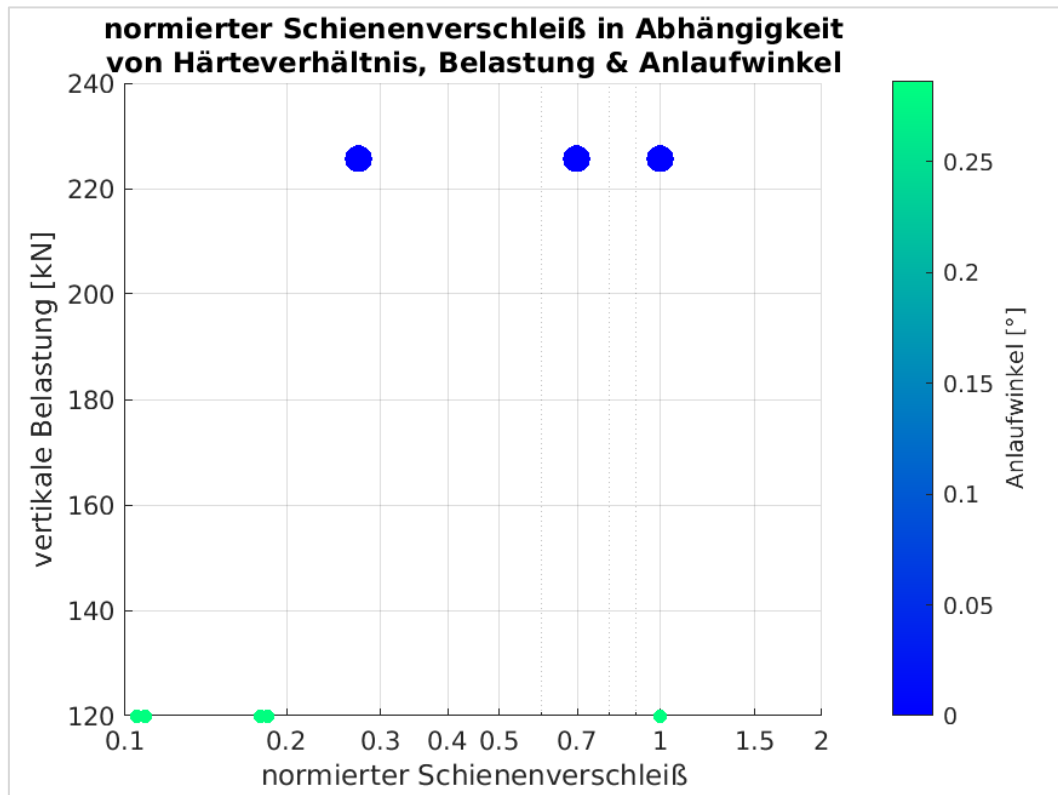


Abbildung Anhang 52: norm. Schienenverschleiß – Belastung (RSPS)

Anhang 4: Vergleich der Ergebnisse

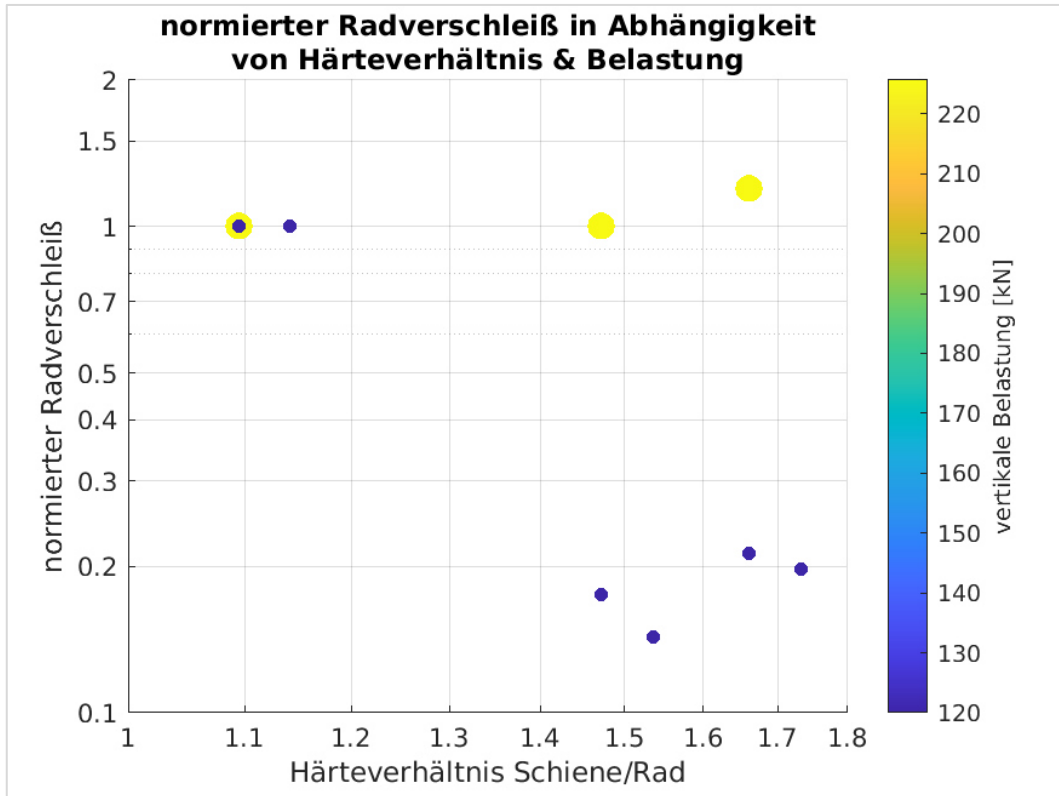


Abbildung Anhang 53: norm. Radverschleiß – Härteverhältnis, Kräfte (RSPS)

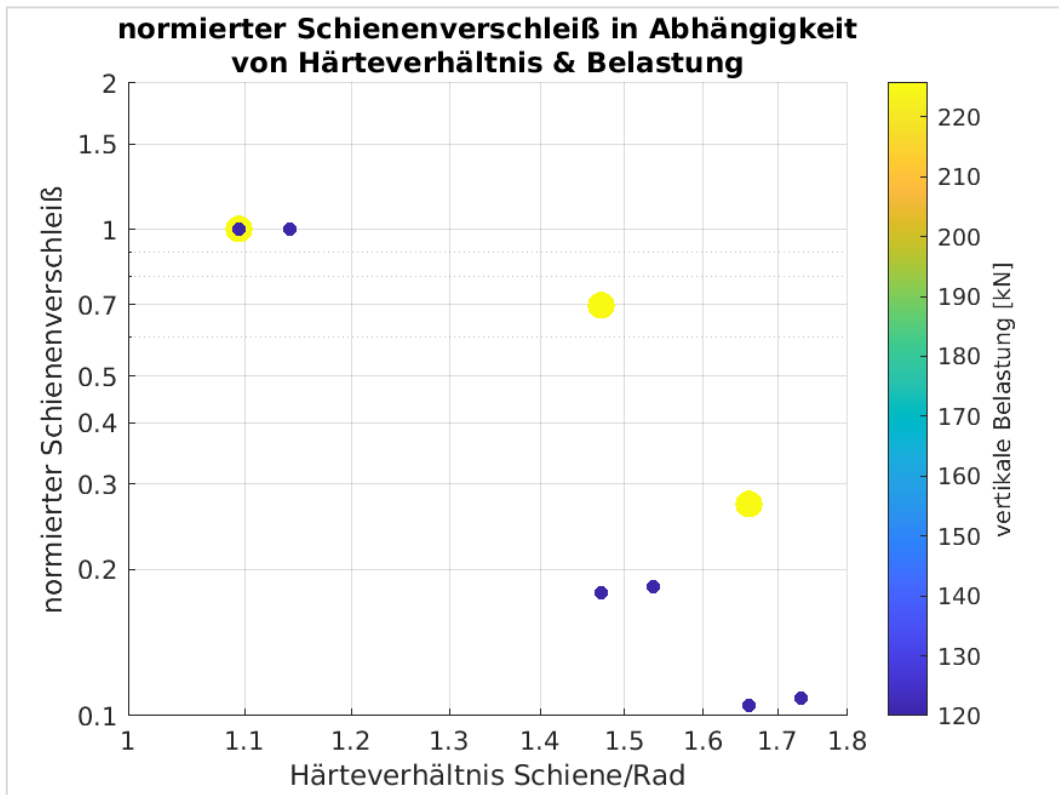


Abbildung Anhang 54: norm. Schienenverschleiß – Härteverhältnis, Kräfte (RSPS)

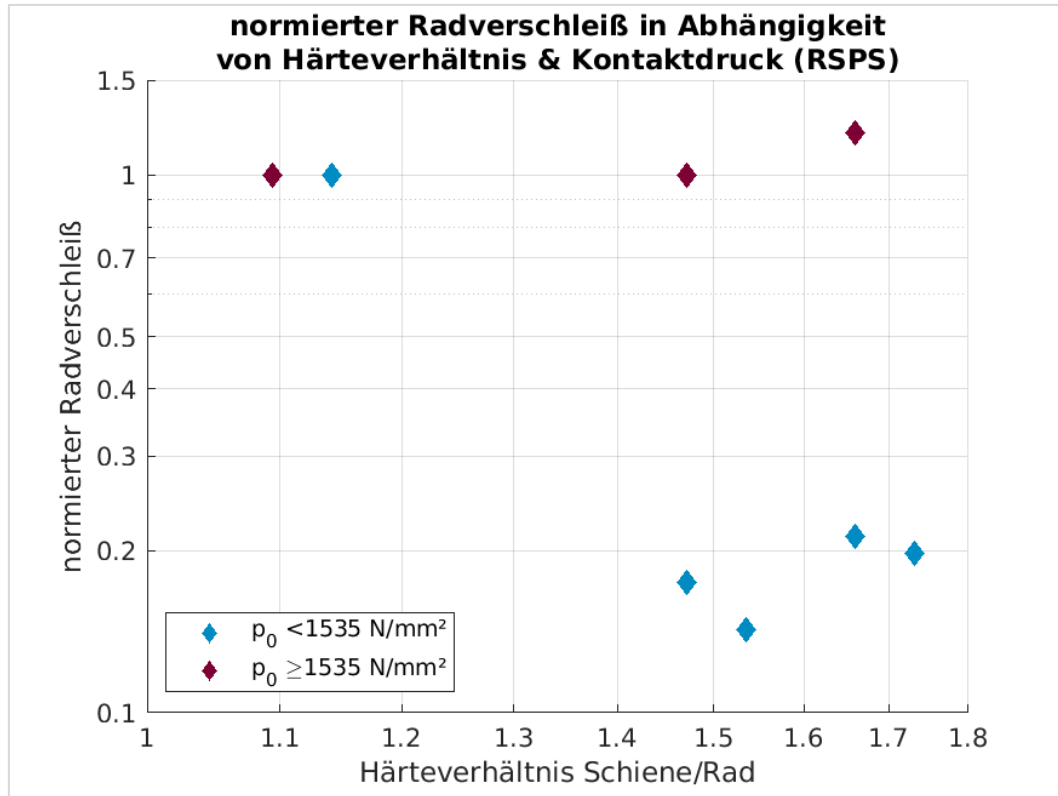


Abbildung Anhang 55: norm. Radverschleiß - Härteverhältnis, Grenzwert (RSPS)

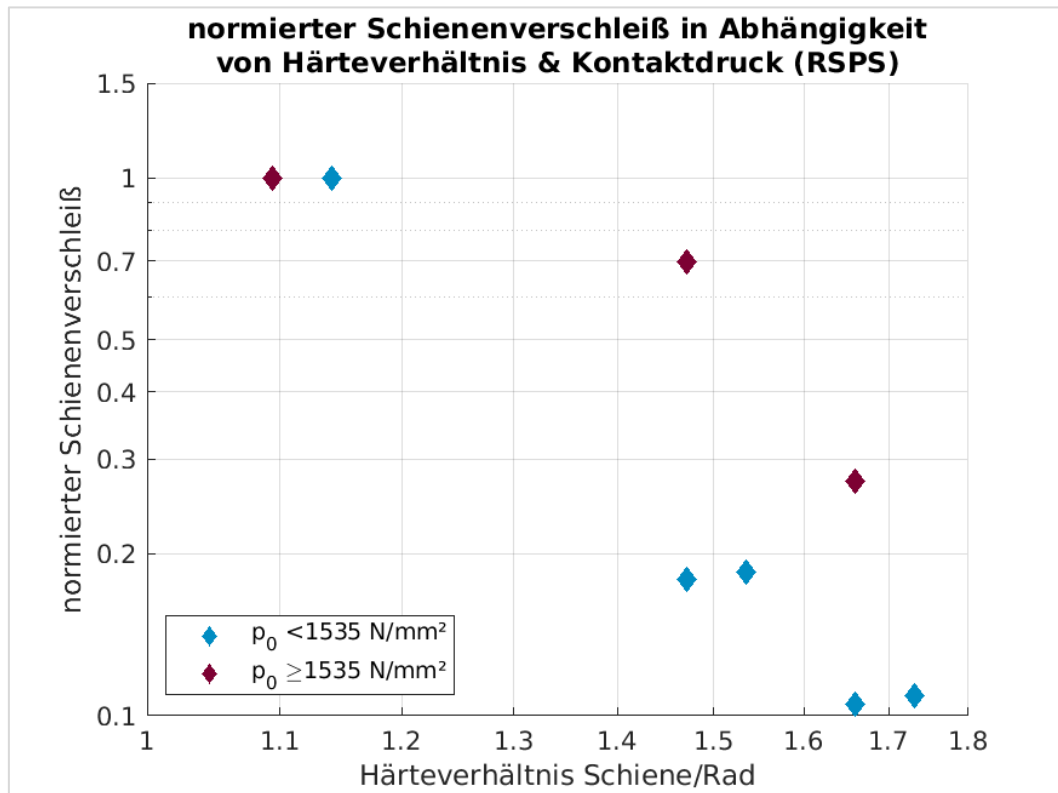
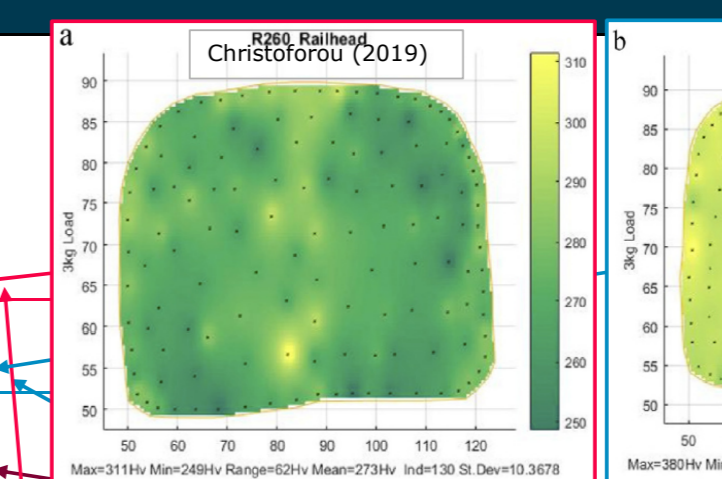
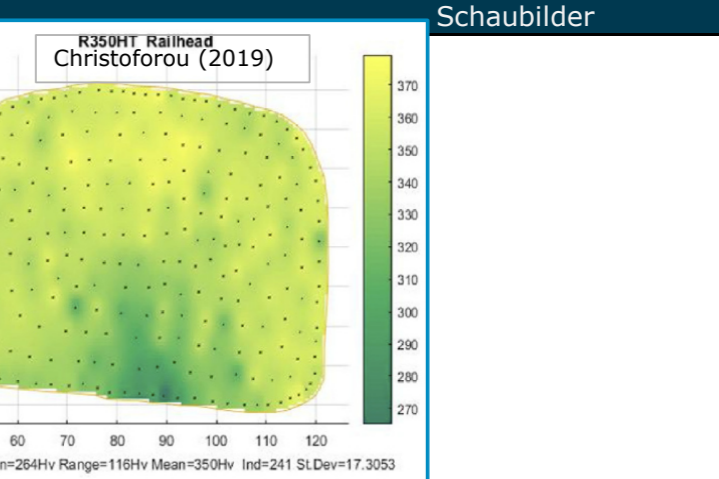

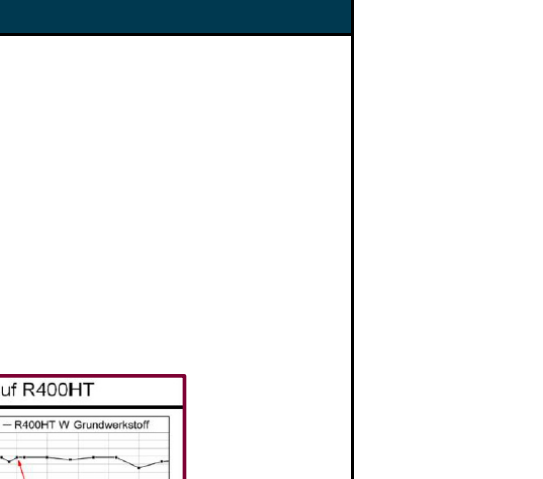
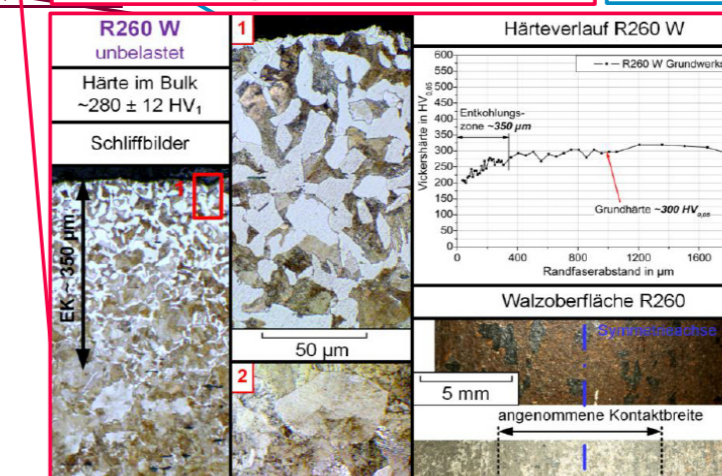
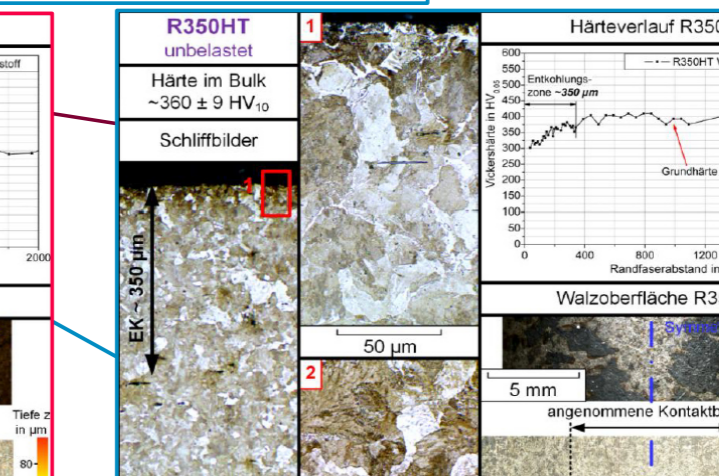
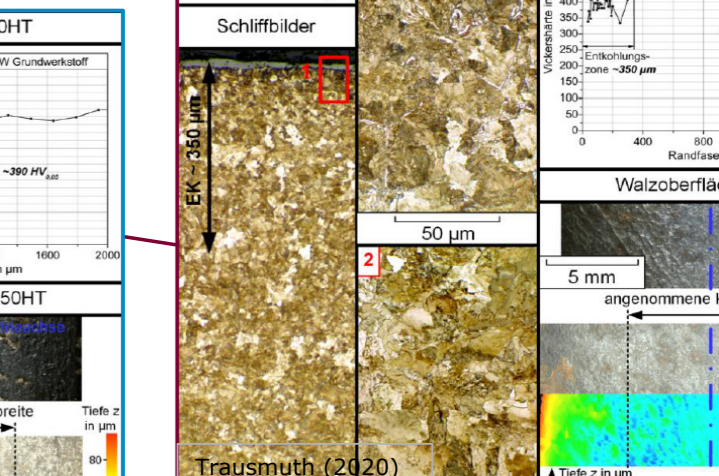
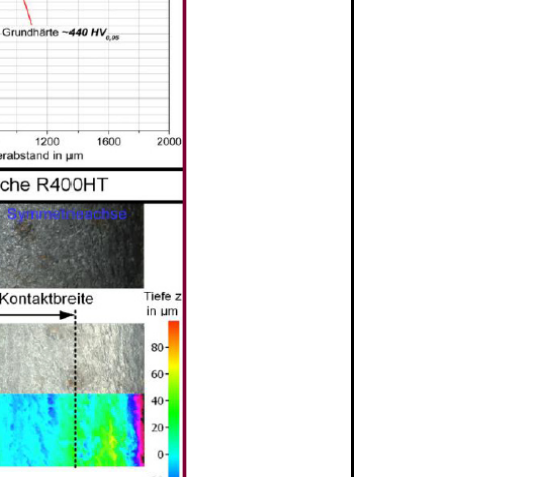
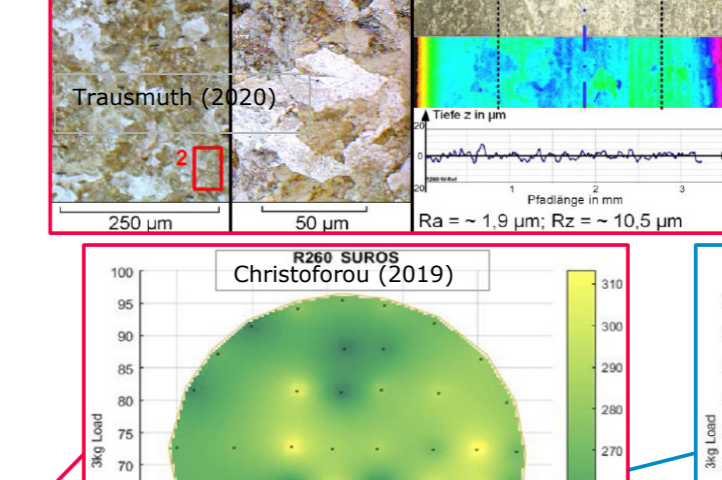


Abbildung Anhang 56: norm. Schienenverschleiß - Härteverhältnis, Grenzwert (RSPS)

Anhang 5 Beilagen

Blatt 1: Werkstoffübersicht

Blatt 2: Übersicht der betrachteten Untersuchungen

Schienenwerkstoffe															Anmerkung	Quelle	Schaubilder	
EN 13674-1																		
Güte																		
prozentuelle Massenanteile																		
Stahlsorte	C	Si	Mn	P (max)	S (max)	Cr	Al (max)	V (max)	N (max)	O	H	Zugfestigkeit	Bruchdehnung (min)	Härte auf der Radschleife	Mpa(m) ^{1/2} Einzelwert	Mpa(m) ^{1/2} Bruchzähigkeit min. K _c Mittelwert		
R260	0,38 - 0,62	0,13 - 0,60	0,65 - 1,25	0,04	0,04	<= 0,15	0,004	0,03	0,01			680	14	210 - 240	30	35		
R220	0,48 - 0,62	0,18 - 0,62	0,98 - 1,30	0,03	0,03	<= 0,15	0,004	0,03	0,01			770	12	220 - 260	30	35		
R260M	0,60 - 0,82	0,13 - 0,62	0,62 - 1,25	0,03	0,03	<= 0,15	0,004	0,03	0,01			880	10	260 - 300	26	29		
R260Mn	0,53 - 0,77	0,13 - 0,62	1,25 - 1,75	0,03	0,03	<= 0,15	0,004	0,03	0,01			880	10	260 - 300	26	29		
R320Cr	0,58 - 0,82	0,48 - 1,12	0,75 - 1,25	0,025	0,03	0,75 - 1,25	0,004	0,2	0,01			1080	9	320 - 360	24	26		
R350HT	0,70 - 0,82	0,13 - 0,60	0,65 - 1,25	0,025	0,03	<= 0,15	0,004	0,03	0,01			1175	9	350 - 390	30	29		
R370CrHT	0,70 - 0,82	0,13 - 0,60	0,65 - 1,25	0,025	0,03	<= 0,30	0,004	0,03	0,01			1175	9	350 - 390	26	29		
R400HT	0,68 - 0,84	0,38 - 1,02	0,65 - 1,15	0,025	0,025	0,35 - 0,65	0,004	0,03	0,01			1280	9	370 - 410	26	29		
R400HT	0,68 - 1,07	0,18 - 0,62	0,95 - 1,35	0,025	0,025	<= 0,30	0,004	0,03	0,01			1280	8	400 - 440	26	29		
ZST1:	Güte																	
prozentuelle Massenanteile																		
Stahlsorte	C	Mn	Cr	N/mm²	%	BHN												
R260	0,6 - 0,8			>= 880		>= 1000												
R320Cr	0,6 - 0,8	0,8 - 1,2		>= 1080		1175												
R350HT	0,6 - 0,8			>= 1100		>= 1100												
1000B	<= 0,1	3,5		>= 1000		>= 1100												
1100B	<= 0,1	3,5		>= 1100		>= 1100												
1400B	<= 0,4	2,8		>= 1400		>= 1400												
ZST2:	Güte																	
prozentuelle Massenanteile																		
Stahlsorte	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo										
BS11	0,53	0,26	1,07	0,021	0,024	0,01	0,02	0,01										
UIC4	0,73	0,26	1,06	0,009	0,026	0,01	0,01	0,01										
UICB	0,62	0,22	1,48	0,022	0,023	0,01	0,01	0,01										
1% Chrome	0,7	0,14	1,18	0,024	0,029	1,08	0,01	0,01										
ZST3:	Güte																	
prozentuelle Massenanteile																		
Stahlsorte	C	Mn	Cr	V	Nb	Zugfestigkeit	Bruchdehnung	Härte	inverse Wurzel des Lamellenabstandes									
RS-1	0,52	0,96				720	>= 14	235	1,49									
RS-2	0,61	1,4				960	>= 14	278	2,24									
RS-3	0,62	1,09	0,9	0,2	0,026	1100	>= 10	322	3,54									
ZST4:	Güte																	
prozentuelle Massenanteile																		
Stahlsorte	C	Si	Mn	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Co	W	HB					
R260													272 +/- 20					
MSS C1ad	0,22	0,18	0,87	< 0,003	0,011	< 0,01	2,25	9,53	0,24	0,27	1,22	0,46	338 +/- 22					
R350HT													334 +/- 20					
A													362 +/- 24					
B																		
ZST5:	Güte																	
prozentuelle Massenanteile																		
Stahlsorte	C	Si	Mn	P	S	N/mm²	%	Bruchdehnung	HV 0,6									
U71Mn	0,65 - 0,75	0,15 - 0,58	0,70 - 1,20	<= 0,025	<= 0,025	>= 880	>= 10	278 +/- 12										
PG4	0,71 - 0,80	0,30 - 0,70	0,75 - 1,05	<= 0,025	<= 0,025	>= 980	>= 10	303 +/- 14										
PG4	0,75 - 0,82	0,70 - 1,05	0,50 - 0,83	<= 0,025	<= 0,025	390 +/- 15												
PG5	0,90 - 0,95	0,48 - 0,52	0,94 - 1,02	0,01 - 0,014	0,04 - 0,07	405 +/- 17												
RSPS1:	Güte																	
prozentuelle Massenanteile																		
Stahlsorte	C	Si	V	Mo	Ni	Cr	N/mm²	%	Bruchdehnung	HB								
R260																		
R350HT																		
R400HT	0,8		0,15	0,15	0,2	0,5	1400	> 9	> 430									
R430	0,4	1,1	0,1	0,4		1,1	1400	> 9	> 400									
RSPS2:	Güte																	
prozentuelle Massenanteile																		
Stahlsorte	C	Si	V	Mo	Ni	Cr	N/mm²	%	Bruchdehnung	HB								
R260																		
R350HT																		
R400HT																		
WT1:	Güte																	
HV 10																		
Stahlsorte																		
R260															290 +/- 12			
R350HT															360 +/- 9			
R400HT															390 +/- 10			

Radwerkstoffe															Anmerkung	Quelle	Schaubilder			
EN 13262:																				
Güte																				
max. prozentuelle Massenanteile																				
Stahlsorte	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V	Cr + Mo + Ni	N/mm²	%	Bruchdehnung	Bruchzähigkeit min. K _c Einzelwert	Mpa(m) ^{1/2} Mittelwert	Mpa(m) ^{1/2} Bruchzähigkeit min. K _c Einzelwert	Zugfestigkeit (Kermminderung im Verhältnis zum Radkranz)	Bruchdehnung	Härte
ER6	0,48	40	0,75	0,02	0,015	0,3	0,3	0,08	0,3	0,06	0,5	780 - 900	>= 15	80	100	100	>= 100	>= 16	>= 225	
ER8	0,52	40	0,8	0,02	0,015	0,3	0,3	0,08	0,3	0,06	0,5	820 - 940	>= 14	70	80	110	>= 110	>= 16	>= 235 - 245	
ER8	0,56	40	0,8	0,02	0,015	0,3	0,3	0,08	0,3	0,06	0,5	860 - 980	>= 13			120	>= 16	>= 245		
ERS8	0,59	1,1	1,1	0,02	0,015	0,3	0,3	0,08	0,3	0,06	0,6	900 - 1020	>= 13			110	>= 14	>= 250		
ER8	0,6	40	0,8	0,02	0,015	0,3	0,3	0,08	0,3	0,06	0,5	900 - 1050	>= 12			130	>= 14	>= 255		
ZST1:	Güte																			
prozentuelle Massenanteile																				
Stahlsorte	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Sn										
Class D	0,65	0,24	0,71	0,046	0,026	0,15	0,18	0,03	0,26	0,031										
ZST3:	Güte																			
proz. Massenanteile																				
Stahlsorte	C	Mn	BHN																	
geschmiedetes Rad	0,6	0,72	227																	
ZST4:	Güte																			
prozentuelle Massenanteile																				
Stahlsorte	C	Si	Mn	P	S	N/mm²	%	Bruchdehnung (min)	HV 0,5											
ER7	0,5	0,33	0,44	0,006	0,01	0,17	0,029	>= 14	265 +/- 6											
ER8	0,54	0,33	0,75	0,005	0,007	0,177	0,029	>= 13	254 +/- 7											
ER6	0,61	0,29	0,74	0,006	0,009	0,143	0,029	>= 10	295 +/- 11											
Class C	0,69	0,76	0,76	0,007	0,008	0,028	0,029		354 +/- 10											
Class D	0,72	0,83	0,8	0,007	0,011	0,198	0,028		365 +/- 9											
RSPS1:	Güte																			
prozentuelle Massenanteile																				
Stahlsorte	C	Si	V	Mo	Ni	Cr	N/mm²	%	Bruchdehnung	HB										
R7																				
RSPS2:	Güte																			
HV																				
Stahlsorte																				
ER7															230 - 275					
ER8															245 - 285					
C64M															270 - 330					
WT1:	Güte																			
HV 1																				
Stahlsorte																				
ER7H															303 +/- 9					
ER8H															337 +/- 16					

