

DIPLOMARBEIT

Master Thesis

Das Verschleißverhalten von Rillenschienen in engen Bögen für das Anlagenmanagement der Wiener Straßenbahn

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

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

Univ.Ass. Dipl.-Ing.
Peter Tauschitz

E230
Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich für Eisenbahnwesen, Verkehrswirtschaft und Seilbahnen

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Thomas Hammer, BSc
0726396
Hauffgasse 37/2/4
A-1110 Wien

Florian Pototschnig, BSc
0627926
Zieglergasse 51/2/14
A-1070 Wien

Wien, 12.11.2013

Ort, Datum

Unterschrift

Unterschrift

Danksagung

An dieser Stelle danken wir all jenen, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Unser Dank gilt Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Ostermann sowie Herrn Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Peter Tauschitz für die hervorragende Betreuung seitens des Instituts für Verkehrswissenschaften der Technischen Universität Wien.

Ebenso danken wir Herrn Dipl.-Ing. Dr. Markus Ossberger und den Mitarbeitern der Wiener Linien für die fachliche Unterstützung während der Erstellung dieser Diplomarbeit.

Besonderer Dank gilt unseren Studienkollegen und Freunden für die unzähligen Fachgespräche und nützlichen Tipps zu dieser Arbeit, vor allem jedoch für die schönen Jahre während unserer gemeinsamen Studienzeit.

Abschließend möchten wir uns herzlich bei unseren Familien für die Unterstützung während unseres Studiums bedanken.

Kurzfassung

Die Erhöhung des Anteils des Öffentlichen Verkehrs¹ in Wien führt bei der Wiener Straßenbahn zu einer Verdichtung des Angebots und einer damit verbundenen steigenden Belastung des Fahrwegs bzw. zu steigenden Instandhaltungskosten. Aus diesem Grund kommt der Optimierung des Anlagenmanagements, insbesondere der Investitions- und Instandhaltungsstrategie, eine große Bedeutung zu.

Die Beanspruchungen der Gleise durch den Fahrbetrieb führen zu Abnützung und Verschleiß der Schienen. Der Schienenverschleiß stellt in diesem Zusammenhang ein maßgebendes Qualitätsmerkmal des Gleises dar, wobei die zeitliche Verschleißentwicklung für die Erneuerungsplanung des Anlagenmanagements entscheidend ist.

In dieser Arbeit wird eine Methodik zur Optimierung des Anlagenmanagements vorgestellt, mit welcher optimierte Fahrwegstrategien verfolgt werden können. Zur Umsetzung dieser Methodik sind aus technischer Sicht umfangreiche Kenntnisse des gebrauchsbedingten Verschleißverhaltens der Schiene und dessen Einflussfaktoren erforderlich.

Eine besonders hohe Belastung durch den Betrieb ergibt sich für Schienen in engen Bögen. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit beispielhaft zwei Bögen aus dem Wiener Straßenbahnnetz gewählt, um das Verschleißverhalten zu untersuchen. Dazu werden die Messdaten unterschiedlicher Messmethoden ausgewertet, analysiert, verglichen und beurteilt. Hauptaugenmerk der Beurteilung liegt bei den erfassbaren Verschleißparametern, der Messdatengenauigkeit, der Messdatenaufbereitung und der Verortungsgenauigkeit.

Ziel der Arbeit ist, festzustellen, welches der eingesetzten Messsysteme ausreichende Ergebnisse für die Verschleißparameter liefert und für die Umsetzung der Methodik zur Optimierung des Anlagenmanagements geeignet ist. Weiters wird auf Basis der Messergebnisse die Verschleißentwicklung in engen Bögen untersucht und verglichen.

Ziel ist es, aus der Verschleißentwicklung und dem Verschleißverlauf Rückschlüsse zum Laufverhalten der Fahrzeugtypen zu ziehen und die zeitliche Verschleißentwicklung für enge Bögen in Abhängigkeit der Befahrung zu bestimmen.

Die Kenntnisse der zeitlichen Verschleißentwicklung ist Grundlage für eine Prognose der Instandhaltungsplanung und der Gleisliedauer.

Diese Vorgehensweise ermöglicht eine genaue Planung der Instandhaltung und hat zum Ziel, die Gleisliedauer zu verlängern und dadurch die Lebenszykluskosten zu reduzieren.

¹ Modal Split des Öffentlichen Verkehrs von 40 % als Ziel bis 2020 nach „Masterplan Verkehr Wien 2003“

Abstract

Increasing the share of public transportation² in Vienna has led to a denser offer of the Vienna tramway network and a respective increase in the burden on the tracks as well rising maintenance costs. The optimization of the infrastructure management, in particular the investment and maintenance strategy, is therefore of great importance.

The burden placed on the tracks by the increased tramway traffic leads to the wear and tear of the rails. The wear of the rails in this context represents a decisive quality characteristic of the tracks, and the rate of the wear development is crucial for the renewal planning of the infrastructure management.

This paper introduces a methodology for the optimization of the infrastructure management in which optimized infrastructure strategies can be followed. From a technical perspective, the implementation of this methodology requires extensive knowledge of normal use and wear behavior of rails and the factors that influence their wear development.

Tight curves are an area where a particularly high burden is placed on the tracks during operation. Therefore, two curves in the Vienna tramway network were selected to serve as an example for examining the wear behavior of the rails. For this purpose measurement data from different measurement methods were evaluated, analyzed, compared and assessed. The main focus of the assessment was the detectable wear parameters, the accuracy of the measurement data, the processing of the measurement data and the localization accuracy.

The aim of this paper is to determine which of the measurement systems used provides satisfactory results for the wear parameters and is suitable for the implementation of the methodology to optimize the infrastructure management. Furthermore, the wear development in tight curves is examined and compared on the basis of the measurement results.

The aim is to draw conclusions from the wear development and the wear process regarding the operating behavior of the vehicle types and to determine the rate of wear development in tight curves in relation to the amount of tramway traffic.

Knowledge of the rate of wear development is the basis for predicting track maintenance planning and the service life of the rails.

This approach enables accurate maintenance planning and aims to extend the service life of the rails and thereby reduce the life cycle costs.

² Modal share of public transportation of 40% targeted by 2020, according to "Transport Master Plan Vienna 2003"

Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen

A	Annuität	m	Abstand der Messkreisebenen
a	Beschleunigung	N	Normalkraft
A_G	Aufmischungsgrad	Q	Qualität
Align	Seitenlage	Q_F	Radaufstandskraft
a_q	nicht ausgeglichene Querbeschleunigung	R	Bogenradius
B	Radaufstandsweite	r	Radrückenabstand
b	Verschlechterungsrate	r_R	Radradius
BW	Barwert	s	Spurmaß
C	Kapitalwert	S	Spurweite
CEV	Kohlenstoffäquivalent	S_S	Spurspiel
C_K	Konstante für Übergangsbogen	Surf	Längshöhenlage
d	Spurkranzdicke	S_x	Längsschlupf
D	Überhöhung	S_y	Querschlupf
f	Frequenz	T	Rillentiefe
F_A	Auftragsfläche	t	Zeit
F_E	Einbrandsfläche	T_x	Längsreibkräfte
$FKV_{hor.}$	Fahrkopfseitenverschleiß	T_y	Querreibkräfte
$FKV_{vert.}$	Fahrkopfhöhenverschleiß	v	Geschwindigkeit
GFT	gemeinsame Fahrflächentangente	V	Verwindung
GGE	Gemeinsame Geometrieebene	VS	Verglichene Schienenabnutzung
GPS	Global Position System	W	Rillenweite
h	Spurkranzhöhe	Y	Profilsseitenkraft
h_f	Pfeilhöhe	ZW	Zeitwert der Zahlung
i	kalkulatorischer Zinssatz	α	Anfahrwinkel
IRR	Interner Zinssatz	α_0	Tangentenschnittwinkel
K	Krümmung	β	Spurkranzwinkel
k	Leitkreisabstand	γ	Neigung der Kegelmantellinie
KB	Kontrollbreite	γ_e	äquivalente Neigung der Kegelmantellinie
KWF	Kapitalwiedergewinnungsfaktor	Δa	Ruck
l	Leitmaß	λ	Wellenlänge
l_B	Bogenlänge	λ_e	äquivalente Konizität
LB	Leitkopfbreite	φ	Orientierung
$LKV_{hor.}$	Leitkopfseitenverschleiß		

Abkürzungen

Abb.	Abbildung
AIT	Austrian Institute of Technology (ehem. ARC - Austria Research Centers)
AS	Aufmerksamkeitsschwelle
B	Kreisbogen
B6	Hauptabteilung Bau- und Anlagenmanagement der WL
B63	Fachabteilung Bahnbau der WL
B64	Fachabteilung Oberbau und Geodäsie der WL
BOStrab	Verordnung über den Bau- und Betrieb der Straßenbahn
CAT	Corrugation Analysis Trolley
DB	Deutsche Bahn AG
DWM	Mängelbehebungskosten
EisbG	Eisenbahngesetz
ES	Eingriffsschwelle
F5	Fachabteilung Fahrzeugtechnik der WL
G	Gerade
HASTUS	Fahr- und Dienstplansystem der WL
HSH	Head Special Hardened
IS	Inertialsystem
ISDB	Infrastrukturdatenbank der WL
Kap.	Kapitel
LCC	Lebenszykluskosten
LUMP	longest unique matching path
ÖBB	Österreichische Bundesbahnen AG
SBB	Schweizerische Bundesbahnen AG
SES	Sicherheitseingriffsschwelle
SGP	Simmering-Graz-Pauker
SMS	Sicherheitsmanagementsystem
StrabVO	Straßenbahnverordnung
Tab.	Tabelle
TG	Thermographie
Ü	Übergangsbogen
ULF	Ultra Low Floor
UP	Unter-Pulver
US	Ultraschall
V45	Fachabteilung Fahrplan der WL
VOEST	voestalpine Schienen GmbH
WL	Wiener Linien GmbH & Co KG
WST	Wirbelstromtechnik
ZT	Ziviltechniker/in
RMS	Root Mean Square (quadratisches Mittel)
ÖPNV	Öffentlicher Personen Nahverkehr
ÖV	Öffentlicher Verkehr

Inhaltsverzeichnis

1	<u>GRUNDLAGEN.....</u>	<u>1</u>
1.1	DIE SCHIENE (OBERBAU DER WIENER STRAßENBAHN)	1
1.1.1	DIE RILLENSCHIENE	1
1.1.2	MÄßBEZEICHNUNGEN UND GLEISPARAMETER	4
1.1.3	DIE FESTE FAHRBAHN DER WIENER STRAßENBAHN	8
1.2	RAD (FAHRZEUGTYPEN DER WIENER STRAßENBAHN)	9
1.2.1	NIEDERFLURSTRAßENBAHN – ULF	10
1.2.2	HOCHFLURSTRAßENBAHN – E.....	12
1.2.3	SPURKRANZFORM.....	12
1.3	RAD-SCHIENE SYSTEM	13
1.3.1	MÄßBEZEICHNUNGEN UND BEGRIFFE	13
1.3.2	DER RAD-SCHIENE KONTAKT.....	18
1.3.3	KRÄFTE AN RAD UND SCHIENE	21
1.3.4	FAHRZEUGSTELLUNG IM ENGEN BOGEN	23
1.3.5	DER RAUMBEDARF DES SPURKRANZES	24
1.4	SCHIENENFEHLER UND –VERSCHLEIß.....	25
1.4.1	SCHIENENFEHLER.....	26
1.4.2	SCHIENENVERSCHLEIß.....	29
1.5	INSTANDHALTUNGSMÄßNAHMEN UND GLEISTAUSCH	34
1.5.1	AUFTRAGSCHWEIßEN	35
1.5.2	SCHIENENSCHLEIFEN.....	39
1.5.3	BERICHTIGUNG VON GLEISLAGEFEHLERN	39
1.5.4	GLEISTAUSCH.....	39
1.5.5	EINGRIFFSSCHWELLEN	40
1.6	GLEISVERMESSUNG.....	40
1.6.1	WARUM WIRD GEMESSEN?.....	40
1.6.2	SCHIENENMESSSYSTEME ALLGEMEIN	42
1.6.3	MESSUNG VON GLEISPARAMETERN UND FAHRFLÄCHENSCHÄDEN.....	44
1.6.4	MESSSYSTEM GLEISMESSWAGEN E6117.....	51
1.6.5	MESSSYSTEM MESSREG ^{CDM}	60
1.6.6	MESSSYSTEM CALIPRI	64
1.6.7	MESSSYSTEM SCHIEBELEHREN.....	65
1.6.8	RIFFELMESSSYSTEM CAT.....	66
2	<u>INSTANDHALTUNG UND ANLAGENMANAGEMENT.....</u>	<u>67</u>
2.1	EINLEITUNG	67
2.1.1	ANLAGENMANAGEMENT FÜR DEN FAHRWEG.....	69
2.1.2	WIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG VON FAHRWEGSTRATEGIEN.....	70
2.2	METHODIK DES OPTIMISIERTEN ANLAGENMANAGEMENTS	73
2.2.1	STRATEGIE FAHRWEG – STUFE 1	74
2.2.2	STRATEGIE FAHRWEG – STUFE 2.....	80
3	<u>ANWENDUNG DER MESSSYSTEME</u>	<u>81</u>
3.1	SCHIENENPROFILMESSUNG BOGEN GRINZING.....	81
3.1.1	MESSERGEBNISSE GLEISMESSWAGEN (GRINZING).....	85
3.1.2	MESSERGEBNISSE MESSREG ^{CDM} (GRINZING).....	88
3.1.3	MESSERGEBNISSE CALIPRI (GRINZING).....	89

3.1.4	MESSERGERBNISSSE SCHIEBELEHREN (GRINZING).....	90
3.2	SCHIENENPROFILMESSUNG BOGEN ALSZEILE/VOLLBADGASSE.....	92
3.2.1	MESSERGERBNISSSE GLEISMESSWAGEN (ALSZEILE).....	96
3.2.2	MESSERGERBNISSSE MESSREG ^{CDM} (ALSZEILE).....	99
3.2.3	MESSERGERBNISSSE CALIPRI (ALSZEILE).....	100
3.2.4	MESSERGERBNISSSE SCHIEBELEHREN (ALSZEILE).....	101
3.3	GEGENÜBERSTELLUNG DER MESSERGERBNISSSE.....	103
3.3.1	BOGEN GRINZING.....	103
3.3.2	BOGEN ALSZEILE/VOLLBADGASSE.....	106
4	<u>ANALYSE DER ERGEBNISSSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN.....</u>	<u>109</u>
4.1	BEURTEILUNG DER MESSSYSTEME.....	109
4.1.1	MESSSYSTEM GLEISMESSWAGEN.....	109
4.1.2	MESSSYSTEM MESSREG ^{CDM}	110
4.1.3	MESSSYSTEM CALIPRI.....	111
4.1.4	MESSSYSTEM SCHIEBELEHREN.....	111
4.1.5	SCHLUSSFOLGERUNGEN ZU DEN MESSSYSTEMEN.....	112
4.2	VERSCHLEIßVERLAUF IM BOGEN.....	113
4.2.1	SCHLUSSFOLGERUNGEN ZUM VERSCHLEIßVERLAUF.....	115
4.3	ZEITLICHE VERSCHLEIßENTWICKLUNG.....	115
4.3.1	SCHLUSSFOLGERUNGEN ZUR VERSCHLEIßENTWICKLUNG.....	116
4.4	LIEGEDAUERPROGNOSE.....	118
4.4.1	SCHLUSSFOLGERUNGEN ZUR LIEGEDAUERPROGNOSE.....	120
5	<u>ZUSAMMENFASSUNG.....</u>	<u>121</u>
6	<u>AUSBLICK.....</u>	<u>123</u>
7	<u>ABBILDUNGSVERZEICHNISS.....</u>	<u>124</u>
8	<u>TABELLENVERZEICHNISS.....</u>	<u>126</u>
9	<u>LITERATURVERZEICHNISS.....</u>	<u>127</u>

ANHANG.....A-J

A.	DAS STRAßENBAHNNETZ DER WIENER LINIEN.....	1
B.	ORGANIGRAMM DER WIENER LINIEN.....	1
C.	RILLEN-SCHIENENPROFILI DER WIENER LINIEN.....	1-4
D.	REGELPLÄNE OBERBAU DER WIENER LINIEN.....	1-2
E.	SPURKRANZFORMEN DER WIENER LINIEN.....	1-2
F.	RILLEN-AUFWEITUNG.....	1
G.	SKIZZE SCHMIERANLAGE.....	1
H.	SCHWEIßANWEISUNG B64.....	1
J.	PHOTOS DER UNTERSUCHTEN BÖGEN.....	1-4

1 Grundlagen

1.1 Die Schiene (Oberbau der Wiener Straßenbahn)

Der Oberbau von urbanen Straßenbahnstrecken besteht aus dem Gleisrost und der Schienenbettung und spielt für das Anlagenmanagement eine maßgebende Rolle. Der Gleisrost gliedert sich in das System Rillenschiene-Spurstange, die Schienenbettung erfolgt meist durch das System „Feste Fahrbahn“ (siehe Kap. 1.1.3).

Weichen, Kreuzungen und Sonderoberbauformen, wie etwa das Rasengleis, sind nicht Teil dieser Arbeit. Des Weiteren wird der Untergrund und Unterbau des Fahrweges nicht behandelt und als normgerecht ausgeführt betrachtet.

1.1.1 Die Rillenschiene

Die Rillenschienen bei Straßenbahnen sind weltweit in unterschiedlichsten Stahlsorten und Profilformen verfügbar. Obwohl die Rillenschiene nur einen kleinen Teil des Schienenkontingents umfasst, gewinnt diese jedoch immer mehr an Bedeutung. Die verwendeten Profile unterscheiden sich zur Vollbahn vor allem durch die Kontur des Schienenkopfes und durch die Gesamthöhe. Aufgrund der hohen Anforderungen an das Schienenprofil nach Lichtberger (1), wie

- Tragfunktion,
- Führungsfunktion,
- hoher Verschleißwiderstand,
- hohe Ermüdungsfestigkeit,
- hohe Sprödbruchfestigkeit,
- gute Schweißeignung und
- gute Oberflächenbeschaffenheit

wird ständig versucht, in Zusammenarbeit von ÖPNV-Unternehmen mit den Schienenherstellern, Verbesserungen und Optimierungen des metallurgischen Gefüges der Schienen vorzunehmen.

Stahlgüten		Chemische Zusammensetzung [Massen-%]				Mechanische Eigenschaften		
		C	Si	Mn	Cr	Rm [MPa]	A5 [%]	Härte [HBW]
Naturharte Stahlgüten	R200	0,40 – 0,60	0,15 - 0,58	0,70 – 1,20	≤ 0,15	≥ 680	≥ 14	200 - 240
	R220G1	0,50 – 0,65	0,15 - 0,58	1,00 – 1,25	≤ 0,15	≥ 780	≥ 12	220 - 260
	R260	0,62 – 0,80	0,15 - 0,58	0,70 – 1,20	≤ 0,15	≥ 880	≥ 10	260 - 300
Wärmebehandelte Stahlgüten	R290GHT (HSH GM)	0,50 – 0,65	0,15 - 0,58	1,00 – 1,25	≤ 0,15	≥ 960	≥ 10	290 - 330
	R340GHT (HSH G)	0,62 – 0,80	0,15 - 0,58	0,70 – 1,20	≤ 0,15	≥ 1.175	≥ 9	340 - 390

Tab. 1.1: Stahlsorten für Rillenschienen nach EN 14811-1:2010 (2)

Die in Tab. 1.1 genannten Stahlgüten mit den Bezeichnungen der VOEST umfassen alle naturharten und wärmebehandelten Rillenschienen nach EN 14811. Die naturharten Stahlgüten beinhalten R200, R200G1 und R260, die wärmebehandelten höherfesten Stahlgüten gliedern sich in R290GHT und R340GHT.

Im globalen Wettbewerb gibt es zwei Varianten zur Erhöhung der Härte von Rillenschienen, einerseits durch die Zugabe von speziellen Legierungselementen (C, Cr, Si, Mn etc.) und andererseits durch die Verfeinerung des Gefüges mittels Wärmebehandlung. Der Nachteil der Erhöhung von Legierungsanteilen sind die eingeschränkte Schweißbeignung und die verminderte Härtesteigerung in Relation zur Feinperlitisierung durch Wärmebehandlung. Aus diesem Grund verfolgt die VOEST, welche der Hauptlieferant von Rillenschienen der Wiener Straßenbahn ist, die Strategie der Wärmebehandlung mit möglichst niedrig legiertem Stahl. Die VOEST hat hierzu ein spezielles Verfahren entwickelt, bei welchem der Schienenkopf eine hohe Einhärtetiefe und höchste Homogenität erfährt. Ein Vorteil dieser HSH-Technologie (HSH – Head Special Hardened) ist das Gleichbleiben der Schienenhärte im Schienenfuß und –steg, da diese nicht wärmebehandelt werden und dadurch eine hohe Zähigkeit vorweisen können. Seit dem Jahr 2012 weisen die Schienen der Güte R290GHT einen maximalen Kohlenstoffgehalt von 0,55 % auf, wodurch eine gute Schweißbeignung gewährleistet werden kann.

Die Stahlgüte R340GHT, mit einem maximalen C-Gehalt von 0,80 %, erzielt eine Steigerung von 50 HBW gegenüber der Stahlgüte R290GHT. Der Nachteil bei der Stahlgüte R340GHT ist das Vorwärmen beim Auftragschweißen im Gleis, aufgrund des höheren Kohlenstoffäquivalents (CEV). Dieser beeinflusst die Schweißbeignung der unterschiedlichen Stahlgüten, welche in Abb. 1.1 dargestellt sind. (2)

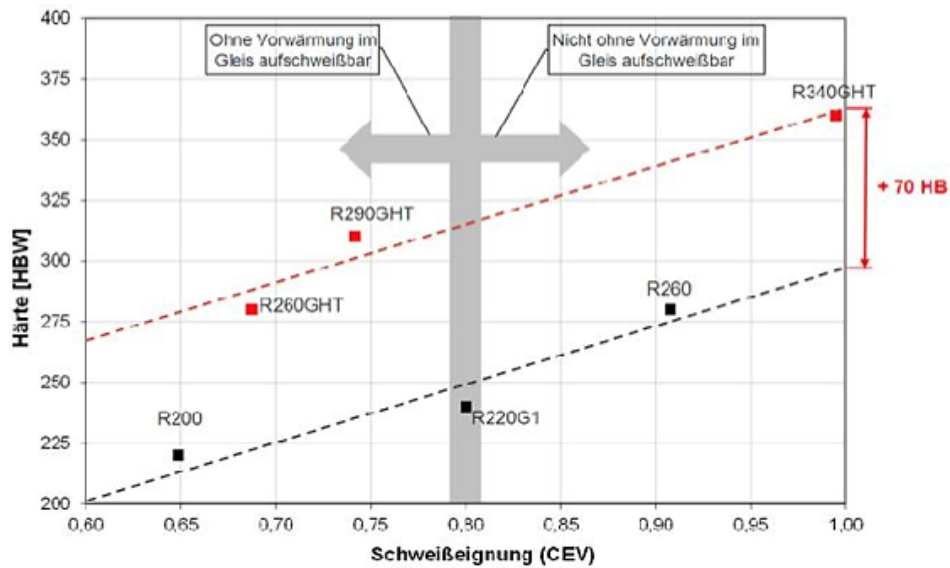


Abb. 1.1: Einteilung der Rillenschienen-Stahlsorten nach Härte und Schweißbeignung (2)

Eine weitere Strategie, welche von internationalen Schienenherstellern vorangetrieben wird, ist die sogenannte „put-in-and-forget“ Strategie, bei welcher die Rillenschiene bis zum Erreichen der Verschleißgrenze ohne jegliches Nachbearbeiten in der Fahrbahn verbleibt. Nach Erreichen dieses Grenzwertes wird die Rillenschiene ausgetauscht und durch eine neue ersetzt. Da auf die gute Schweißbeignung verzichtet werden kann, wird die R340GHT höher legiert und erreicht dadurch eine höhere Verschleißresistenz.

Eine weitere Neuerung, welche seitens der VOEST am Markt angeboten wird, ist die Leitkopfmarkierung von wärmebehandelten Rillenschienen. Die Problematik der Identifikation der in der festen Fahrbahn eingebauten Rillenschiene, wird durch diese zusätzliche Markierung gelöst. Die Sinnhaftigkeit einer Markierung, welche in Abb. 1.2 ersichtlich ist, erscheint zweckdienlich, da oftmals Verwechslungen der Stahlgüten bei Auftragschweißungen aufgetreten sind. Die Stahlgüten R290GHT bzw. R340GHT erhalten zwei bzw. drei Punkte auf dem Leitkopf, welche einen Durchmesser von je 6 mm und eine maximale Höhe von 1 mm besitzen. (2)

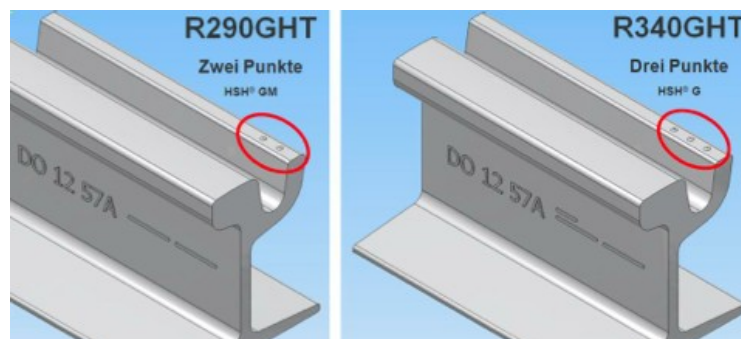


Abb. 1.2: Leitkopfmarkierung wärmebehandelter Schienen (2)

1.1.1.1 Rillenschienenprofile im Wiener Straßenbahnnetz

Im Wiener Straßenbahnnetz werden in den geraden Teilstücken Rillenschienenprofile 210/95+80 verwendet. Die Rillenschienen mit einem verstärkten Leitkopf im Bogen haben die Bezeichnung 210/95+80a. Im Neubau von Straßenbahnstrecken werden vor allem Ri 60 Profile verwendet. Diese weisen eine größere Profilhöhe und eine größere Rillentiefe als das Profil 210/95+80 auf. Anwendungsbedingt werden bei reduzierten Bauhöhen, wie etwa Brücken, Ri 45 Profile eingesetzt. Tab. 1.2 zeigt die Abmessungen und Winkel der unterschiedlichen Rillenschienen im Neuzustand, gemessen 10 mm unter der GFT. Die Querschnitte der Walzprofile sind im Anhang C abgebildet.

Walzprofil	T [mm]	W [mm]	KB [mm]	LB [mm]	Fahrkopfflanke	Leitkopfflanke
210/95+80	40	32,5	53,6	21,1	1:20	1:5
210/95+80a	40	32,5	63,6	31,1	1:20	1:5
Ri 60	47	35,5	57	21,5	1:6	1:6
Ri 45	40	33,5	60	26,5	1:6	1:6

T...Rillentiefe W...Rillenweite KB...Kontrollbreite LB...Leitkopfbreite

Tab. 1.2: Rillenschienenprofile der WL (3)

1.1.2 Maßbezeichnungen und Gleisparameter

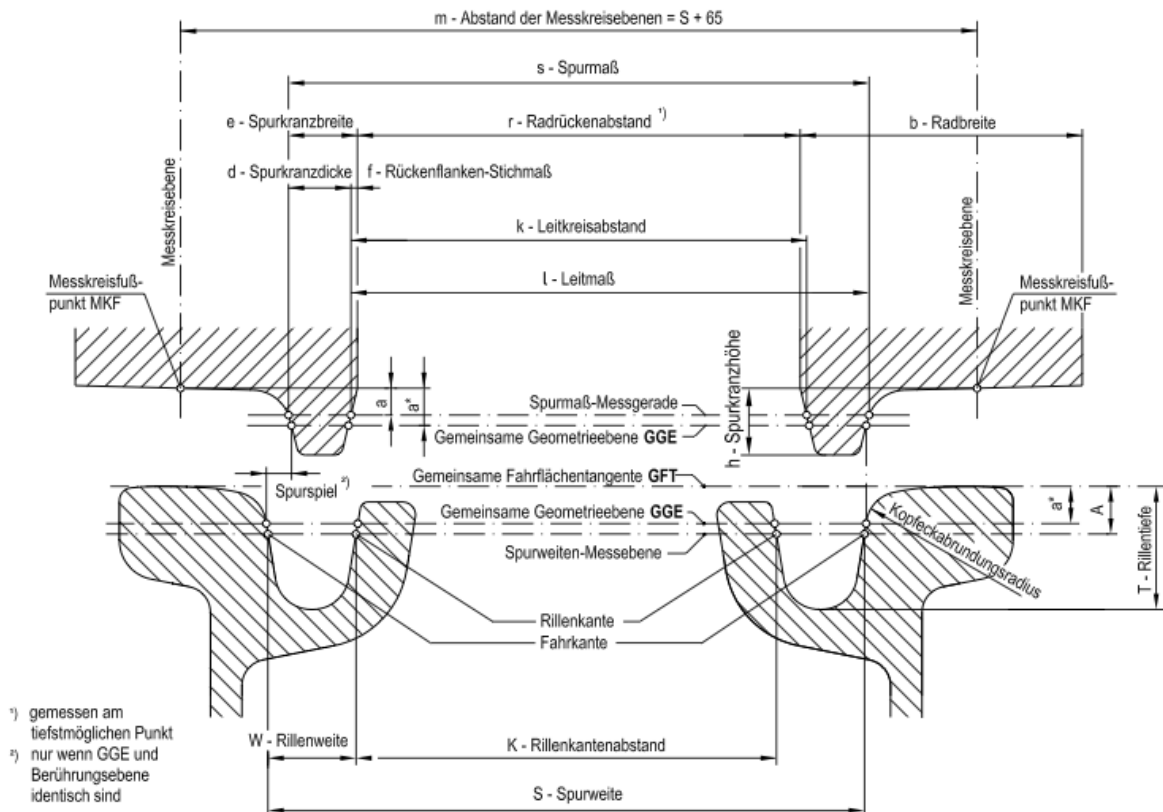


Abb. 1.3: Maßbezeichnungen (4)

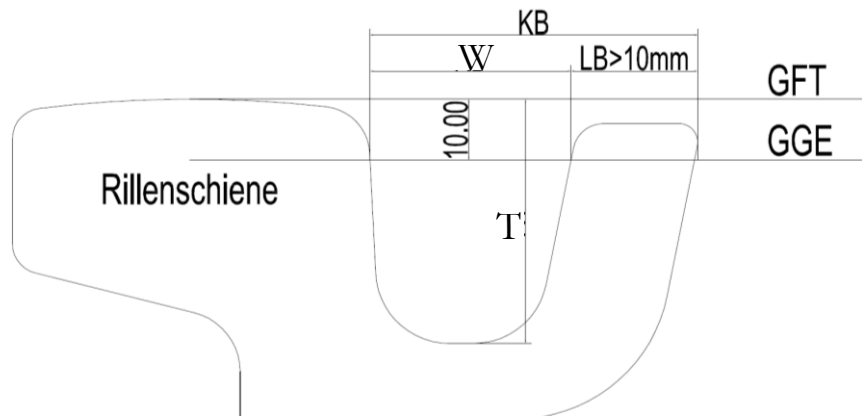


Abb. 1.4: Maßsystem der Rillenschiene (5)

Bei der Vermessung von Rillenschienengleisen und der Beurteilung der Gleisqualität sind die folgenden Maßbezeichnungen und Gleisparameter, betreffend Schienenprofil und Gleislage, maßgebend. Die Bezeichnungen am Profilquerschnitt sind in Abb. 1.12 ersichtlich. Weichen und Kreuzungen bleiben hier unberücksichtigt.

1.1.2.1 Schienenprofilparameter

- Rillenweite W [mm]

Die Rillenweite ist der Abstand der Fahrkopfflanke bis zur Leitkopfflanke 10 mm unter der GFT. Die zulässige Herstellungstoleranz beträgt ± 1 mm. (Profilmaße im Neuzustand und Eingriffsschwellen siehe Tab. 1.11) (4)

- Rillentiefe T [mm]

Die Rillentiefe ist der Abstand von der GFT bis zum tiefsten Punkt des Rillengrundes. Der Rillengrund wird auch als Rillenboden bezeichnet. (Profilmaße im Neuzustand und Eingriffsschwellen siehe Tab. 1.11) (4)

- Kontrollbreite KB [mm]

Die Kontrollbreite ist der Abstand der Fahrkopfflanke 10 mm unter der GFT bis zur Leitkopfaußenkante. (Profilmaße im Neuzustand und Eingriffsschwellen siehe Tab. 1.11) (4)

- Leitkopfbreite LB [mm]

Die Leitkopfbreite ist der Abstand der Leitkopfflanke 10 mm unter der GFT bis zur Leitkopfaußenkante. (Profilmaße im Neuzustand und Eingriffsschwellen siehe Tab. 1.11) (4)

1.1.2.2 Gleislageparameter

▪ Spurweite S [mm]

Die Spurweite ist bei Rillenschienen der kleinste Abstand zwischen den beiden Fahrkopfflanken im Bereich von 0 bis 10 mm unter der GFT. Die Regelspurweite ist der Sollwert im geraden Gleis und beträgt im Netz der Wiener Straßenbahn 1435 mm (Normalspur) mit einer zulässigen Herstellungstoleranz von +2 mm. (4)

„Im Gegensatz zu Oberflächenfehlern und Änderungen des Schienenkopfquerprofils ist die Spurweite ein unmittelbar sicherheitsrelevanter Oberbauparameter, der bei Über- bzw. Unterschreitung des zulässigen Grenzwertes Funktionsfähigkeit und Sicherheit des Rad-Schiene-Systems gefährdet.“ (6)

Aus diesem Grund ist auf die Einhaltung der zulässigen Spurweite besonderes Augenmerk zu legen. Sie stellt neben den oben genannten Gleisparametern einen weiteren wichtigen Parameter dar. Spurweite und Spurmaß müssen aufeinander abgestimmt sein (siehe Kap. 1.3)

▪ Überhöhung D [mm]

Die Überhöhung, oft auch Querhöhenlage oder Querhöhe bezeichnet, ist der vertikale Abstand zwischen den Tangentialebenen an die Gradienten (Längsprofil) beider Gleisstränge und stellt einen Höhenunterschied zwischen der rechten und linken Schiene dar. Die Werte sind in Bögen mit einer überhöhten rechten Schiene < 0 und umgekehrt > 0 angegeben. (7)

Der geneigte Gleiskörper bewirkt, dass die Resultierende aus Zentrifugalkraft und Gewichtskraft möglichst senkrecht zur GFT verläuft, um damit die nicht ausgeglichene Querbeschleunigung a_q und die Querkräfte am Gleis zu minimieren. Da die Trassierung von Straßenbahnstrecken im urbanen Raum an die Neigungen der Fahrbahnoberfläche gebunden ist, kommen hier meist nur Mindestüberhöhungen zur Ausführung. (8)

„Die nicht ausgeglichenen Querbeschleunigungen dürfen in Gleisen, die im Regelfall mit Fahrgästen befahren werden, $1,0 \text{ m/s}^2$ bei straßenabhängigen Bahnen und $0,654 \text{ m/s}^2$ bei straßenunabhängigen Bahnen nicht überschreiten.“ (§17, Abs.5, StrabVO 1991) (9)

„Die Änderung der nicht ausgeglichenen Querbeschleunigungen je Zeiteinheit darf in Gleisen, die im Regelfall mit Fahrgästen befahren werden, $0,7 \text{ m/s}^3$ bei straßenabhängigen Bahnen und $0,5 \text{ m/s}^3$ bei straßenunabhängigen Bahnen nicht überschreiten.“ (§17, Abs.6, StrabVO 1991) (9)

▪ Krümmung K [m^{-1}]

Ein allgemeiner Bogen ist eine Linie, deren Richtung α sich kontinuierlich mit der Länge L ändert. Die wichtigsten Parameter zur Beschreibung eines Bogens sind der Krümmungsradius R bzw. die Krümmung K.

Für ein differentiell kleines Bogenstück dL gilt:

$$K = \frac{d\alpha}{dL} = \frac{1}{R} \quad (1.1)$$

– großer Radius \rightarrow kleine Krümmung

- kleiner Radius \rightarrow große Krümmung
- Sonderfall: $R = \infty \rightarrow K = 0 \rightarrow$ Gerade

Im sogenannten Krümmungsbild lassen sich die geometrischen Eigenschaften eines Bogens bzw. einer Bogenfolge durch den Krümmungsverlauf darstellen. (10)

Für einen Bogen

$$\vec{R}(s) = \begin{pmatrix} x(s) \\ y(s) \end{pmatrix} \quad \text{wobei} \quad \left\| \frac{\partial \vec{R}}{\partial s} \right\| = \sqrt{x'(s)^2 + y'(s)^2} = 1 \quad (1.2)$$

ergibt sich das Krümmungsbild zu

$$K(s) = x'(s) y''(s) - y'(s) x''(s). \quad (1.3)$$

Das Krümmungsbild bildet die Form der Strecke im Grundriss, unabhängig von Lage und Richtung, ab. (11)

Krümmungssprünge und Richtungslagefehler (sprunghafte Änderung der Krümmung) verursachen einen Ruck, der ebenfalls mit einer nicht ausgeglichenen Querbeschleunigung a_q einhergeht und aus Sicht der Fahrdynamik, der Gleisbeanspruchung und des Fahrkomforts vermieden werden soll. (10)

- Verwindung V [mm/m]

Die Verwindung beschreibt das Maß der Abweichung einer Kurve vom ebenen Verlauf, welche durch das Wirken eines Torsionsmoments entsteht. (12)

Um den Ruck Δa , die nicht ausgeglichene Querbeschleunigung a_q und die damit einhergehenden zusätzlichen fahrdynamischen Kräfte auf die maximal zulässigen Werte zu begrenzen, müssen auch Fehler in der Verwindung der Gleisebene vermieden werden.

- Längshöhenlage (Surf) [mm]

„Eine Längshöhe entspricht exakt der Pfeilhöhe in vertikaler Anordnung und wird zur Ermittlung der Gradienten (Längsprofil bzw. vertikaler Verlauf der Trassierungslinie) genutzt.“ (7)

- Seitenlage (Align) [mm]

Die Seitenlage oder auch Richtungslage genannt, entspricht der Pfeilhöhe in horizontaler Anordnung. Der Abgleich mit der Krümmung der Gleisneulage liefert den Seitenlagefehler. (13)

1.1.3 Die Feste Fahrbahn der Wiener Straßenbahn

In diesem Kapitel werden jene Oberbauformen beschrieben, die in den untersuchten Bögen in Kap. 3 ausgeführt sind. Es handelt sich um Ausführungsformen der Festen Fahrbahn der Wiener Straßenbahn. Diese Art der Schienenbettung, bei der die Rillenschienen, Rillenweichen und Rillenkreuzungen direkt in der Fahrbahn eingebettet werden, ist vor allem im ÖPNV anzutreffen. (6; 14)

Als Teil der Festen Fahrbahn wird zuerst die Gleistragplatte, welche der Schienenauflagerung dient, gefertigt. Zwischen Betonoberkante und Schienenunterkante wird zweckdienlich eine Gummiunterlagsplatte eingesetzt. Diese Unterlagsplatte muss sich aufgrund der gewünschten Verformung in allen Richtungen frei ausdehnen können. Die entstehenden Räume zwischen Rillenschiene, Unterlagsplatte und Betonplatte werden mittels Styroporplatten geschlossen, wodurch das Eindringen von Splitt und Bodensand verhindert wird. Die Stahlbetonfertigteile, welche die Oberfläche der festen Fahrbahn bilden, werden an die Krümmungen der Trassierung, den Schienenteilungen und der Geometrie der Kreuzungs- und Weichenanlagen angepasst. Diese im Werk vorgefertigten Elemente werden an die Baustelle transportiert und in weiterer Folge verlegt. Für Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten sind in den Fertigteilen Hebehülsen angebracht, welche mit Mineralwolle verschlossen werden. In Kap. 1.1.3.1 und 1.1.3.2 werden die Oberbauformen, welche bei den untersuchten Bögen ausgeführt sind, näher beschrieben. Diese Ausführungsvarianten werden im Regelfall sowohl bei selbstständigen Gleiskörpern, als auch bei ganzen Gleiszonen realisiert. (6; 14)

1.1.3.1 Schallgedämmter Oberbau mit Rillenschiene 210/95+80

Diese Oberbauform wurde beim untersuchten Bogen Alszeile/Vollbadgasse der Betriebslinie 43 (siehe Kap. 3.2) umgesetzt. Der Bauablauf entspricht der Beschreibung in Kap. 1.1.3, mit dem Zusatz des Einlegens von unbewehrten Betonsteinen an beiden Seiten des Schienensteges. Ein Unterschied zum hochschallgedämmten Oberbau in Kap. 1.1.3.2 ist das Verfüllen der Fugen zwischen Stahlbetonfertigteile und Schiene mittels Splitt. Der Regelplan zu dieser Ausführungsform befindet sich in Anhang D. (14)

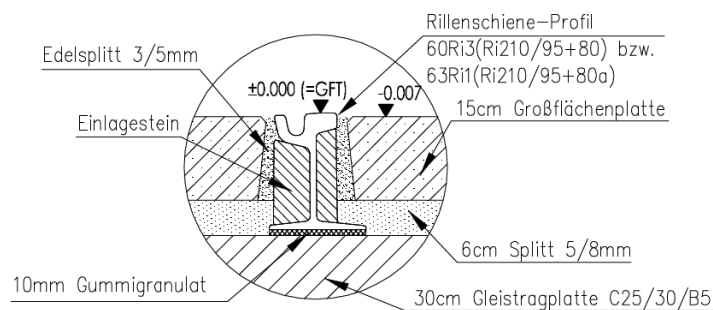


Abb. 1.5: Detail schallgedämmter Oberbau (15)

1.1.3.2 Hochschallgedämmter Oberbau mit Rillenschiene 210/95+80

Diese Oberbauform wurde beim untersuchten Bogen in Grinzing der Betriebslinie 38 realisiert (siehe Kap. 3.1) und vermindert durch eine spezifische Bauweise den Körperschall, welcher bei Überfahrten entsteht. Man versucht insbesondere vermehrten Schallschutz zu generieren und Dämpfungen zu begrenzen. Als Dämmschicht dient hierbei eine zweilagige horizontale Gummigranulatmatte mit einer Gesamtdicke von 5 cm, welche auf den Unterlagsbeton gelegt wird. In weiterer Folge wird diese Dämmschicht mit einer Folie abgedeckt, um ein Eindringen des Zements in die Gummigranulatbrücke zu verhindern. Etwaiges Eindringen von Zementschleppung könnte zu festen Verbindungen und somit zu Schallbrücken führen, welche unbedingt verhindert werden müssen. Um eine gleichmäßige Umhüllung der Gleistragplatte zu gewährleisten, wird die vertikale Dämmung direkt auf die horizontale Gummigranulatmatte gestellt und bis auf die Höhe der Einlagesteine hochgezogen. Diese Ausführungsform wird nur in Kombination mit Stahlbetongroßflächenplatten verwendet. (siehe Anhang D) Nachweislich wird eine Verminderung des Luftschallpegels von 5 bis 10 dB erzielt. (14)

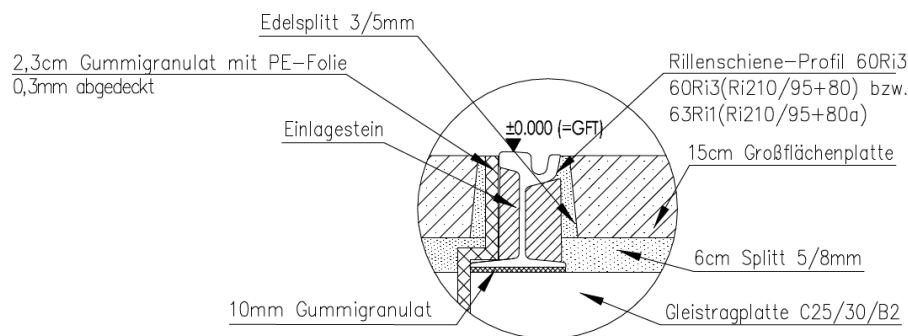


Abb. 1.6: Detail hochschallgedämmter Oberbau (15)

1.1.3.3 Sonderform Oberbau Schmieranlage

Schmieranlagen werden vor allem in engen Bögen eingebaut, um den Verschleiß nachhaltig zu verringern. Die Steuereinrichtung sowie der Fettvorratsspeicher werden entweder im Gleistrog direkt oder neben dem Gleis situiert. (Skizze siehe Anhang G) (14)

1.2 Rad (Fahrzeugtypen der Wiener Straßenbahn)

Derzeit verkehren im Netz der Wiener Straßenbahn unterschiedliche Fahrzeugtypen, welche in Hochflur- und Niederflurfahrzeuge unterteilt werden können. Die Grundidee der Einführung von Niederflurfahrzeugen (ULF – Ultra Low Floor) war der barrierefreie Zugang für körperlich eingeschränkte Personen, welche dadurch ein verbessertes Service vorfinden. Mit der Möglichkeit des barrierefreien Zugangs waren jedoch technologische Erneuerungen im Sinne der Konstruktion der Fahrzeuge von Nöten. Einhergehend mit der neuen Fahrzeugtype ULF wurden auch die Anforderungen an den Fahrweg, insbesondere an die Rillenschiene grundlegend verändert. Dieses Kapitel soll aus diesem Grund die im Einsatz befindlichen Fahrzeuge und deren Besonderheiten aufzeigen.

1.2.1 Niederflurstraßenbahn – ULF

Die Fahrzeugtype ULF, welche von Siemens Rail Systems entwickelt wurde, ist seit dem Jahre 1995 in der langen 7-gliedrigen Version B bzw. B₁ (Länge 35,47 m) und der kurzen 5-gliedrigen Version A bzw. A₁ (Länge 24,21 m) im Einsatz und wird zukünftig die Hochflurstraßenbahnen der Type E ersetzen. Der Abstand der vier bzw. sechs Radpaare beträgt jeweils 5630 mm. Im maximal überbesetzten Betrieb – Annahme von 7 Personen/m² – betragen die Gesamtmassen beim ULF A 44.490 kg und beim ULF B 65.620 kg, wobei sich diese Massen wiederum auf die Portale mit 12.500 kg bzw. 12.245 kg niederschlagen. Die Masse des am stärksten belasteten dritten Portals lässt sich im Normalbetrieb – Annahme von 4 Personen/m² – auf 11.104 kg reduzieren. (16)

Besonderheit dieser Type sind die achsfreien Fahrwerke und die Einstiegshöhe von 197 mm über der GFT. Durch diese weltweit niedrigste Einstiegshöhe war es jedoch bei der Fahrzeugkonstruktion nicht möglich die Räder beider Wagenseiten mittels Achsen zu verbinden, weshalb eine neue konstruktive Lösung entwickelt wurde. Hierbei handelt es sich um einzelne Wagenkastensegmente und Portale, welche gelenkig miteinander verbunden sind. Der Antrieb erfolgt nicht wie bei der Hochflurvariante in Kap. 1.2.2 durch einen im Drehgestell eingebauten Motor, sondern durch vertikal an beiden Außenseiten der Portale angeordnete Motoren. Diese treiben über Winkelgetriebe die einzelnen Losradeinheiten an. Die Langversion B bzw. B₁ besitzt acht Motoren, die Kurzversion A bzw. A₁ wird durch sechs Motoren angetrieben. (16)

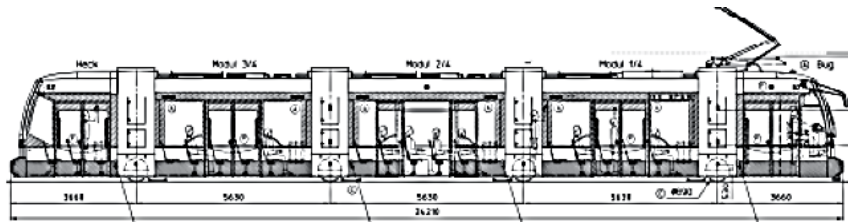


Abb. 1.7: ULF A/A₁ (17)

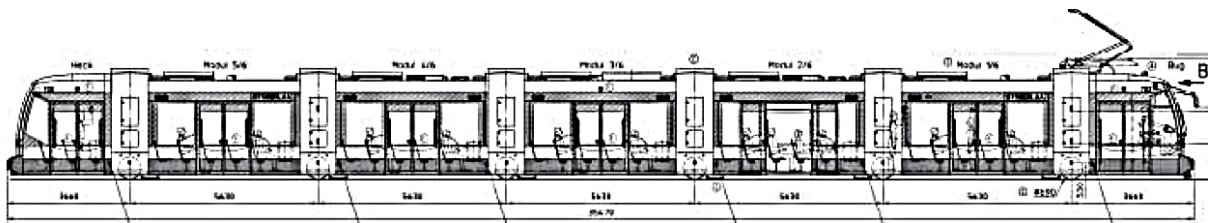


Abb. 1.8: ULF B/B₁ (17)

1.2.1.1 Losradeinheit

Die Konzeption von Losradeinheiten wurde aufgrund der bereits erwähnten Anforderungen der Wiener Straßenbahn notwendig. Diese Losradeinheiten bestehen aus SAB V60 Räder mit einem Durchmesser 680 mm, welche das Herzstück der radial einstellbaren Einzelfahrwerke bilden. Das SAB V60 Rad reduziert die Schallabstrahlung, Vibrationen und ermöglicht einen raschen Radreifenwechsel. (17)

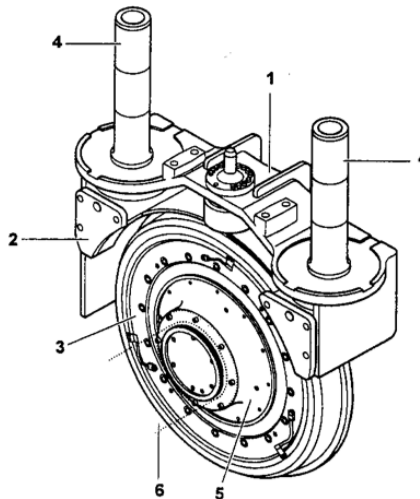


Abb. 1.9: Losradeinheit ULF (17)

1	Radkasten-Außen
2	Radkasten-Innen
3	Losrad
4	Führungsbolzen
5	Anschluss für Bremsscheibe
6	Erdungskontakt-Gehäuse

Tab. 1.3: Losradeinheit ULF (17)

Technische Daten	
Gewicht der Losradeinheit	547 kg
max. statische Radlast	65 kN
max. Fahrgeschwindigkeit	70 km/h
Laufkreisdurchmesser (neu)	680 mm
Laufkreisdurchmesser (voll abgenutzt)	610 mm
Radreifenbreite (Fahrfläche)	100 mm
minimale Bodenfreiheit (bei voll abgenutzten Rädern)	90 mm

Tab. 1.4: Technische Daten Losradeinheit ULF (17)

Die schwenkbaren Losradeinheiten werden in den radial einstellbaren Einzelradfahrwerken des ersten und letzten Portals eingebaut. Diese Losräder verfügen über eine Richtungskorrekturmöglichkeit von bis zu 5 ° zur Reduzierung des Anfahrwinkels. Das Losradpaar am letzten Portal beginnt bereits in der Gerade mit dem Anlaufen in Richtung Außenschiene, wodurch in längeren Bögen ein optimaler Bogenverlauf sichergestellt wird. In den restlichen Gelenkportalen entsteht eine quasiradiale Stellung der gummigefederten Räder, welche aus der Winkelsymmetrale der beiden angrenzenden Fahrgastmodule resultiert. (17)

1.2.2 Hochflurstraßenbahn – E

Derzeit verkehren im Netz der Wiener Straßenbahn zwei unterschiedliche Hochflurtriebswagen mit der Bezeichnung E_1 bzw. E_2 und drei unterschiedliche Beiwagenmodelle mit den Kennzeichen c_3 , c_4 bzw. c_5 . Die Fahrzeugtypen E_1 (Länge 20,3 m) und E_2 (Länge 19,1 m) wurden von den Herstellern SGP (Simmering-Graz-Pauker; heute Siemens) und Lohner (heute Bombardier) gefertigt und sind seit den Jahren 1966 bzw. 1978 im Fahrgastbetrieb im Einsatz. Beide Varianten wurden als Einrichtungs-Gelenktriebwagen konzipiert und besitzen drei Drehgestelle mit je zwei Achsen mit einem Achsabstand von 1800 mm. Der Antrieb erfolgt über zwei Monomotoren, welche im Bug- und Heckdrehgestell situiert sind. Im maximal überbesetzten Betrieb – Annahme von 7 Personen/m² – beträgt die Gesamtmasse 34.820 kg, wobei die maximale Achslast 6.855 kg beträgt. Die Masse der am stärksten belasteten Achse lässt sich im Normalbetrieb – Annahme von 4 Personen/m² – auf 6.262 kg reduzieren. Der Raddurchmesser im Neuzustand dieser Serien beträgt 690 mm. Der E_1 verkehrt im Netz der Wiener Straßenbahn entweder solo oder mit den Beiwagen c_3 und c_4 , der E_2 ist ausschließlich mit dem Beiwagen der Type c_5 im Einsatz. (16; 18)

Technische Daten Beiwagen c_3 , c_4 und c_5		
	Länge	Masse
c_3	14,7 m	11.600 kg
c_4	14,7 m	11.500 kg
c_5	13 m	11.940 kg

Tab. 1.5: Technische Daten der Beiwagen der Wiener Straßenbahn (19)

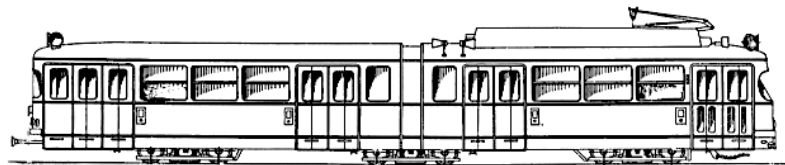


Abb. 1.10: E_1 (19)

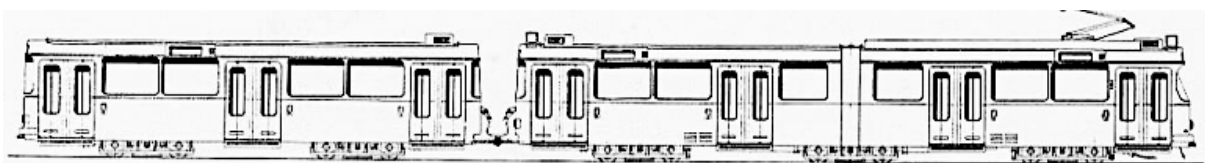


Abb. 1.11: $E_2 - c_5$ (19)

1.2.3 Spurkranzform

Die folgenden Spurkranzformen kommen bei den Fahrzeugen der Wiener Straßenbahn zum Einsatz.

1.2.3.1 Spurkranzprofil ULF A/B

ULF A/B besitzen ein einheitliches Radreifen-Fertigteilprofil mit einer Ausrundung der Spurkranzkehle von 10 mm, womit eine Differenz zur Fahrkopfabrundung der Rillenschienen 210/95+80 bzw. 210/95+80a, welche einen Radius von 8 mm besitzen, besteht. Die

unterschiedlichen Radien der Spurkranzkehle und der Fahrkopfabrundung führen zu einer Überschneidung zwischen Rad und neuem Schienenprofil, wodurch Verschleißerscheinungen, welche in Kap. 1.4.2 beschrieben sind, entstehen. Das ULF Radreifenprofil ist im Anhang E ersichtlich. (16)

1.2.3.2 Spurkranzprofil $E_2 + c_5$

E_2 und c_5 besitzen ein einheitliches Radreifen-Fertigteilprofil mit einer Ausrundung der Spurkranzkehle von 10 mm, womit wiederum eine Differenz zur Fahrkopfabrundung der Rillenschienen 210/95+80 bzw. 210/95+80a besteht. Das Radreifenprofil der Fahrzeugtype $E_2 + c_5$ ist im Anhang E ersichtlich. (16)

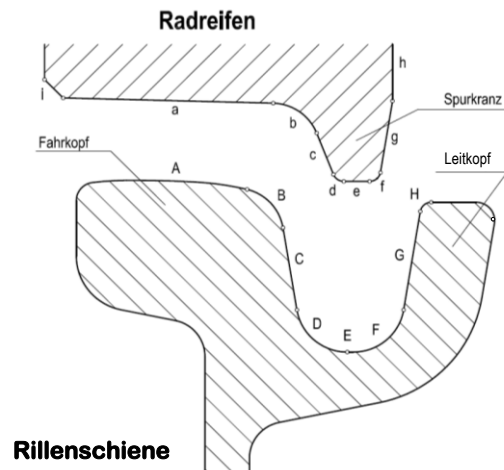
1.3 Rad-Schiene System

Das Laufverhalten und das Verschleißverhalten werden maßgebend vom komplexen Zusammenspiel von Rad und Schiene beeinflusst. Die Interaktion beider Komponenten wird von vielen Faktoren, vor allem aber vom Schienen- und Radprofil, der Gleislage und der Konizität maßgebend beeinflusst.

1.3.1 Maßbezeichnungen und Begriffe

„Gleismaße und Fahrzeugmaße sind so aufeinander abzustimmen, dass bei den jeweils zulässigen Geschwindigkeiten auch im zulässigen Abnutzungszustand der Bauteile eine sichere Spurführung sowie größtmögliche Laufruhe erhalten bleiben.“ (§ 17 Abs 2 StrabVO, 1999) (9)

Die für die Spurführung relevanten Punkte des Rad-Schiene Systems und deren Bezeichnungen sind in Abb. 1.12. dargestellt. In Zusammenhang mit dem Rad-Schiene Kontakt sind folgende Begriffe von Bedeutung.



- | <u>Radreifen</u> | <u>Rillenschiene</u> |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| a - Fahrflächenprofil | A - Fahrflächenprofil |
| b - Spurkranzkehle | B - Fahrkopfabrundung |
| c - Spurkranzstirnflanke | C - Fahrkopfflanke |
| d - äußere Spurkranzkuppenabrundung | D - äußere Rillenausrundung |
| e - Spurkranzkuppe | E - Rillenboden |
| f - innere Spurkranzkuppenabrundung | F - innere Rillenausrundung |
| g - Spurkranzrückenflanke | G - Leitkopfflanke |
| h - Radrücken | H - Leitkopfabrundung |
| i - Stirnfase | I - Leitkopfaußenkante |

Abb. 1.12: Bezeichnungen am Querschnitt von Rad und Rillenschiene (4)

1.3.1.1 Anfahrwinkel α

Der in der horizontalen Schnittebene durch den Berührungspunkt Spurkranz / Schiene liegende Winkel zwischen der Tangente an die Schiene im Berührungspunkt und der Achse, die rechtwinklig zur Radachse steht. (siehe

Abb. 1.13)

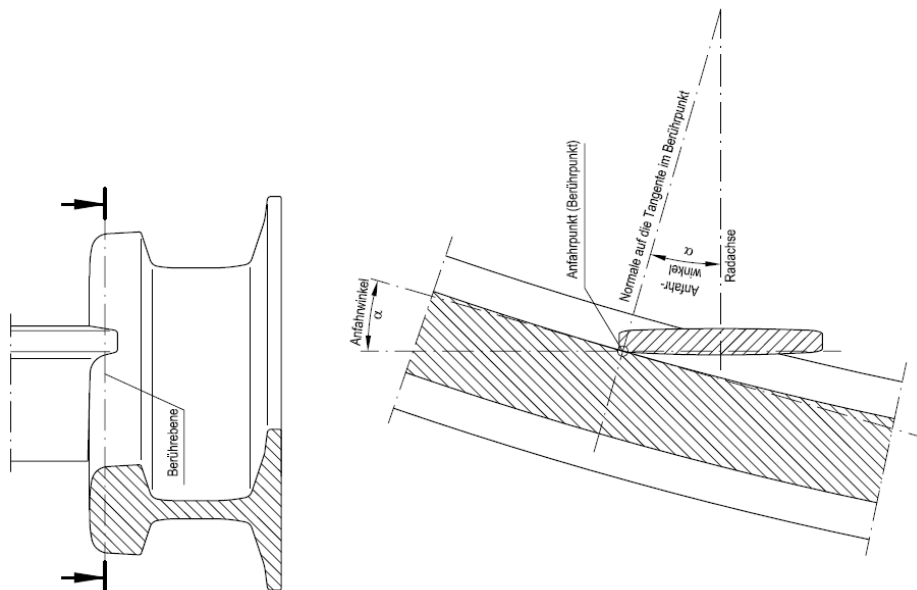


Abb. 1.13: Anfahrwinkel (4)

1.3.1.2 Spurspiel S_s (4)

„Das Spurspiel ist der Abstand, um den ein Radsatz, dessen Eigendrehachse horizontal rechtwinklig zur Gleislängsachse steht (Anfahrwinkel $\alpha = 0^\circ$), von der Berührung des Spurkranzes des einen Rades mit dem Fahrkopf der zugehörigen Schiene bis zur Berührung des Spurkranzes des anderen Rades mit dem Fahrkopf der anderen Schiene quer im Gleis verschoben werden kann.“ (4)

In vielen Fällen gilt als gute Näherung:

$$S_s = S - s \quad (1.4)$$

Spurspiel = Spurweite – Spurmaß

Unter Berücksichtigung der Herstellungstoleranzen, der Verschleißgrenzwerte von Gleis und Radsatz, der Radsatzdurchbiegung sowie des Spurspiels müssen Spurweite S und Spurmaß s aufeinander abgestimmt sein. Es dürfen keine Zwänge zwischen den Fahrkopfflanken auftreten und die kleinste zulässige Radaufstandsweite darf nicht unterschritten werden.

Folgende zwei Nachweise sind im Neuzustand von Rad und Schiene zu erfüllen.

Kein Zwang zwischen den Fahrflanken:

$$S_{min} - s_{max} > 0 \quad (1.5)$$

Kein Zwang zwischen den Rillenflanken:

$$k_{min} - K_{max} > 0 \quad (1.6)$$

1.3.1.3 Gemeinsame Geometrieebene GGE

Die Gemeinsame Geometrieebene von Gleis und Radsatz soll idealerweise mit der Spurweiten-Messebene (10 mm unter der GFT) und der Spurmaß-Messgeraden übereinstimmen. Sie soll in jenem ebenen Bereich liegen, in der sich die Fahrkopfflanken und die Spurkranzstirnflanken, unter Berücksichtigung von Neu- und Verschleißzustand sowie geradem und gebogenen Gleis, tatsächlich berühren können. (Siehe Abb. 1.14) (4)

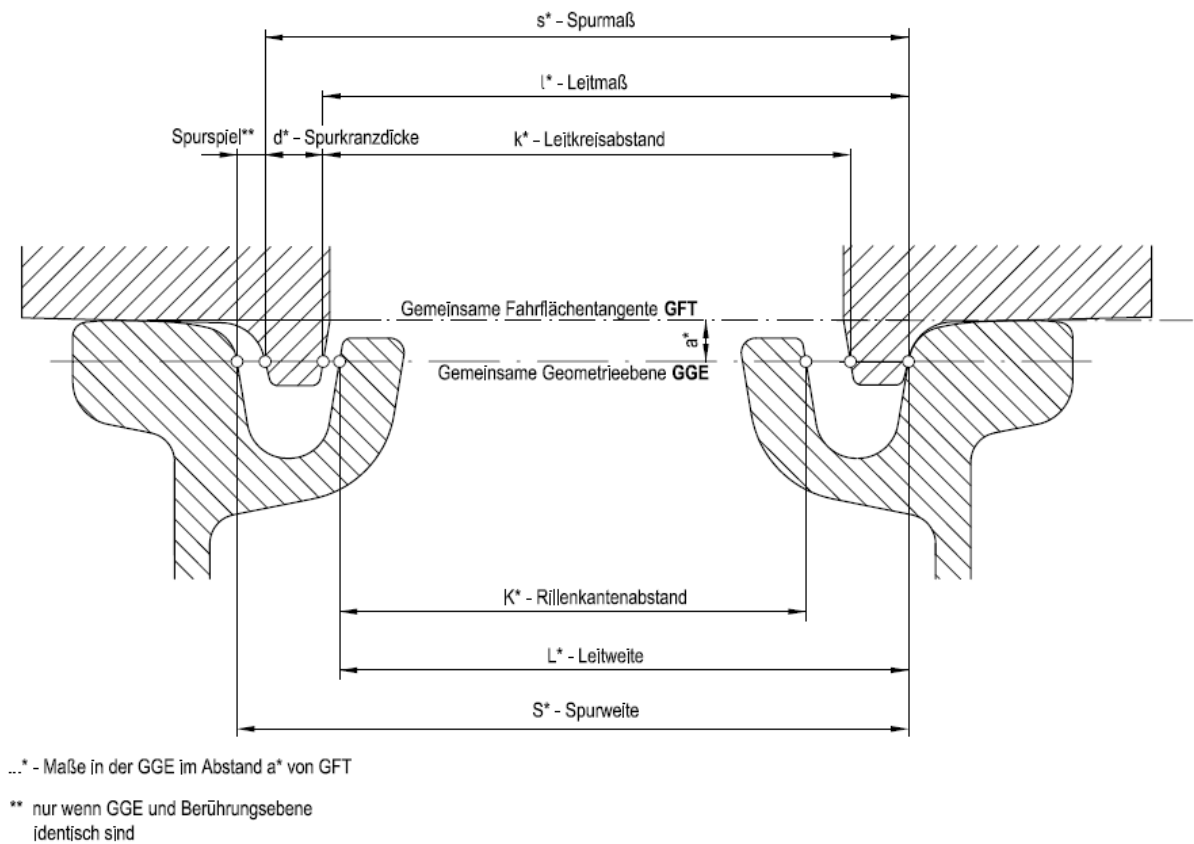


Abb. 1.14: Quermaßbezeichnungen beim Rillenschienenstreckengleis (4)

1.3.1.4 Aufklettern

Aufklettern ist das Hinaufdrücken eines mit der Stirn oder dem Rücken seines Spurkranzes an der Fahr- bzw. Leit- oder Rillenflanke anfahrens Rades auf die Fahrfläche der Schiene bzw. auf den Kopf der Leiteinrichtung unter Kraftschluss durch seitliche Spurführungskräfte. (4)

1.3.1.5 Aufsteigen

Aufsteigen ist das Hinauffahren eines Rades auf ein Hindernis in seinem Fahrweg. (4)

1.3.1.6 Entgleisen (4)

Entgleisen ist das durch Aufklettern oder Aufsteigen hervorgerufene Anheben eines Rades bis zum Auffahren der Spurkranzkuppe auf die Fahrfläche der Schiene mit darauffolgendem Verlassen der Schiene.

Das Entgleisen durch Aufklettern ist ein Zusammenspiel zwischen Fahrzeug und Fahrweg, wodurch eine genaue Abstimmung des Systems Rad-Schiene notwendig ist.

Die Sicherheit gegen Entgleisen wird wesentlich beeinflusst durch:

- Gleislage (Anrampung)
- Fahrzeuggeschwindigkeit
- Spurkranzhöhe
- Spurkranzform
- Fahrkopfabrundung der Schiene
- Kurveneinstellbarkeit und Verwindungsweichheit der Fahrwerke
- Federungsverhalten von Rad und Schiene
- Kraftschlussbeiwert zwischen Rad und Schiene

1.3.2 Der Rad-Schiene Kontakt

Für das Laufverhalten und die Laufstabilität der Schienenfahrzeuge ist die Berührgeometrie zwischen Rad und Schiene von wesentlicher Bedeutung. Es können sehr spezifische Abnützungen und Verschleißverhalten auftreten, die mit einer Verlagerung des Berührungspunktes Rad/Schiene einhergehen.

Es kann generell zwischen einer Einpunktberührung und einer Zweipunktberührung unterschieden werden, wobei erstere anzustreben ist. Bei einer Zweipunktberührung kommt es durch die unterschiedlichen Lauflängen (Radien) an den Berührungspunkten und dem damit verbundenem großen Schlupf zu erhöhtem Verschleiß. (20)

Beim Aufeinandertreffen von neuem Rad und neuer Schiene ist auf Grund der unterschiedlichen Ausrundung der Spurkranzkehle (10 mm) und der Schiene (Form 210/95+80a: 8 mm) ein bestimmtes Verhalten der beiden Reibpartner zu erkennen. Zu Beginn findet stets die gewünschte Einpunktberührung statt, die im Bereich der Ausrundung Kräfte verursacht, die das Fahrzeug in Richtung Gleisachse verschieben. Die hohen Punktpressungen im Ausrundungsbereich führen zu Verformungen und einer Angleichung der beiden Ausrundungen, die zu einem flächigen Kontakt führen. Dieses „Einspielen“ von Rad und Schiene liefert auch den Zusammenhang zur zeitlichen Verschleißentwicklung mit höherem Anfangsverschleiß von neuen Schienen (siehe auch Kap. 1.4.2) (1)

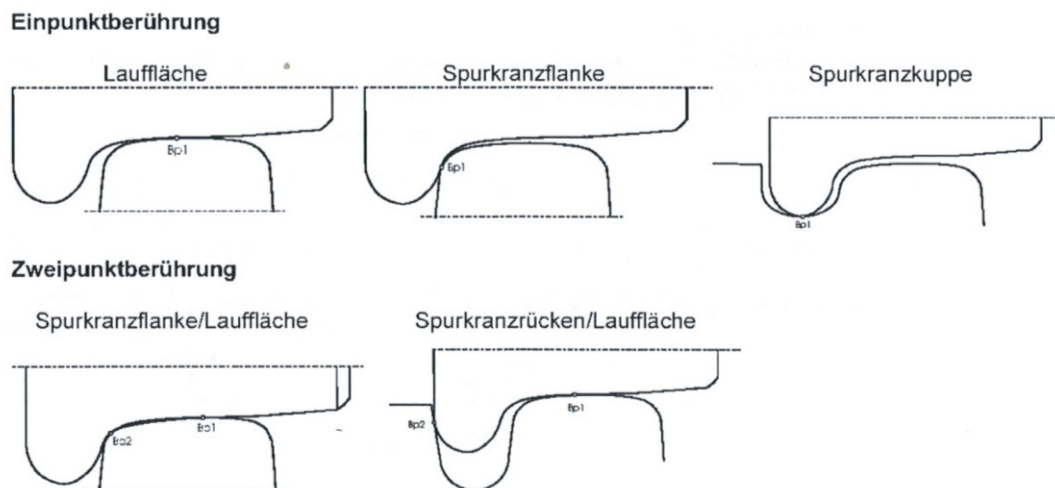


Abb. 1.15: Ein- und Zweipunktberührung (20)

Wie auch die Theorie von *Kalker* zeigt, ist die Kontaktfläche Rad/Schiene durch den möglichen Schlupf des Rades auf der Schiene in einen Haft- und einen Gleitbereich zu unterteilen. Eigentlich ist der Eisenbahnbetrieb nur möglich, da die Materialien durch die extrem hohen Beanspruchungen Fließ- und Gefügeumwandlungen in den Grenzflächen erfahren und sich verfestigen. Erstmals mathematisch beschrieben wurde die Kontaktfläche zwischen Rad und Schiene 1880 von *Hertz*. (1)

1.3.2.1 Die äquivalente Konizität λ_e (1; 24; 40)

Die Laufeigenschaften des Rad-Schiene Kontaktes wird von der sogenannten wirksamen oder äquivalenten Konizität λ_e aus der Laufflächengeometrie der Räder und der Schienenkopfoberfläche bestimmt. Sie gibt jene genäherte Kegelneigung eines realen Radprofils (Verschleißprofils) an, bei der ein auf scharfen Kanten abrollendes kegeliges Radprofil mit dieser Neigung ein sehr ähnliches kinematisches Laufverhalten (Wellenlänge des Sinuslaufes) aufweisen würde. Die Konizität des Urprofils des Eisenbahnrades (Kegelstumpf mit konusförmigem Verlauf des Profils) ist somit der Tangens der Kegelmantelneigung γ .

Die durch Verschleiß abgenutzten kegeligen Urprofile beeinflussen die Laufstabilität nachteilig, wodurch formstabile geometrische Rad-Schiene-Paarungen – sogenannte Verschleißprofile – gesucht wurden. Bei diesen Profilen verläuft die Lauffläche nun nicht mehr linear, sondern als stetige Kurve, angegeben in x-y-Koordinaten.

Ein weiterer Effekt des Rad-Schiene Kontaktes kann mit der sogenannten δ -Funktion beschrieben werden. Da die Rollradien der Räder eines Radsatzes im Allgemeinen nicht gleich sind, kann mit dieser die Rollradiendifferenz als Funktion der Querverschiebung des Radsatzes relativ zum Gleis beschrieben werden. Bei kegeligen Profilen ist die δ -Funktion (1.7) eine lineare Beziehung der Form

$$(r_{R1} - r_{R2}) = 2 \cdot \tan \gamma \cdot y \tag{1.7}$$

- r_R ...Radradius
- $\tan \gamma$...Neigung der Kegelmantellinie
- y ...Amplitude der Querbewegung des Radsatzmittelpunktes

Diese Funktion gibt Auskunft über die Qualität des Fahrzeugverhaltens im geraden Gleis sowie über die Kräfte zwischen Rad und Schiene während der Bogenfahrt. Wenn die Schiene immer an der gleichen Stelle berührt wird, entsteht ein sehr schmaler Fahrspiegel bei gutem Laufverhalten im Vollbogen, aber es kommt auch zu höheren Verschleißerscheinungen in diesem Bereich. Dadurch geht die kegelige Lauffläche des Rades in eine gekrümmte Linie über, wodurch sich bei der Querverschiebung des Radsatzes sowohl der Berührungspunkt am Rad also auch jener an der Schiene verlagert. Diese Veränderung führt zu einer Verschlechterung der Laufgüte des Fahrzeuges. Zu diesem Zeitpunkt verliert die lineare Beziehung in (1.7) seine Gültigkeit und es gilt die allgemeine Funktion.

$$(r_{R1} - r_{R2}) = f(y) \tag{1.8}$$

Die betreffende Radsatz-Schienenpaarung kann durch eine äquivalente Konizität λ_e , entsprechend einem gedachten kegeligen Profil, beschrieben werden. (siehe Formel (1.9)) Grundvoraussetzung ist jedoch ein annähernd linearer Verlauf der Funktion $f(y)$ in Formel (1.8).

$$\lambda_e = \tan \gamma_e = \frac{r_{R1} - r_{R2}}{2 \cdot y} \quad (1.9)$$

In Tab. 1.6 sind Vor- und Nachteile von kegeligen Radprofilen und Verschleißprofilen zusammengefasst.

	Vorteile	Nachteile
Kegelige Radprofile	hohe Laufstabilität	schmaler Fahrspiegel auf der Schiene führt zu höheren Verschleißerscheinungen
Verschleißprofile	geringerer Verschleiß	schlechteres Laufverhalten durch höhere äquivalente Konizität; zusätzliche Verbesserungsmaßnahmen notwendig (z.B. Schlingerdämpfer)

Tab. 1.6: Vergleich kegelige Radprofile und Verschleißprofile (1)

Höhere äquivalente Konizität geht auf Geraden mit einem schlechteren Laufverhalten einher und bewirkt eine hohe Erregerfrequenz des Radsatzes. Sie wird beeinflusst durch:

- Spurweite
Je enger die Spurweite, umso höher die äquivalenten Konizität.
- Schienenneigung
Gleise der Wiener Straßenbahn werden im Gegensatz zur Vollbahn ohne Schienenneigung ausgeführt.
- Schienen- und Radprofil

Für einen stabilen und möglichst schlupf- und schwingungsfreien Lauf in Bögen sind wiederum eine möglichst große Rollradiendifferenz und damit eine hohe äquivalente Konizität von Vorteil.

Auf Grund des Konfliktes zwischen der Geradeausfahrt und der Bogenfahrt muss für das Maß der äquivalenten Konizität ein Kompromiss eingegangen werden. Erfahrungen haben gezeigt, dass λ_e unter 0,4 liegen sollte.

1.3.2.2 Der Sinuslauf (1; 20)

Der wellenförmige und von der Rollradiendifferenz abhängige Lauf des Fahrzeuges im Gleis wird als Sinuslauf bezeichnet. Er entsteht auf Grund unterschiedlicher Laufradien eines Radsatzes - durch die Kegelneigung der Radprofile - wodurch das Fahrzeug nach einer Querbewegung in eine Richtung in die andere zurückgelenkt wird.

Für einen stabilen Lauf in der Gerade sollte die Frequenz des Sinuslaufes der Radsätze bzw. die äquivalente Konizität möglichst klein sein. Die Wellenlänge λ dieses Sinuslaufes ist

$$\lambda = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{r \cdot B}{2 \cdot \tan \gamma}} \quad (1.10)$$

Mit der Formel von *Klingel* ist es möglich die Frequenz des Sinuslaufes mit (1.11) zu berechnen.

$$f = \frac{v}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \tan \gamma}{r_R \cdot B}} \quad (1.11)$$

- f ...Frequenz [Hz]
- v ...Geschwindigkeit [m/s]
- tan γ ...Neigung der Kegelmantellinie [1:20, 1:40]
- r_R ...Radradius [m]
- B ...Radaufstandsweite [1,500 bis 1,505 m]

Wenn Radsätze in einem Drehgestell starr gekoppelt werden, ist die Frequenz des Sinuslaufes über eine weitere Formel abzumindern, da sich dieses wie ein Radsatz mit reduzierter Konizität verhält.

1.3.3 Kräfte an Rad und Schiene

In diesem Kapitel werden die Kräfte und Belastungen, welche auf die Rillenschiene wirken und somit den Verschleiß maßgebend beeinflussen, beschrieben. Weiters werden die Wirkungsweisen der unterschiedlichen Kräfte und deren Zusammenspiel am Beispiel der Wiener Straßenbahn erläutert. Da im Straßenbahnnetz, wie in Kap. 1.2 beschrieben, zwei unterschiedliche Fahrzeugtypen eingesetzt werden, wird auch hinsichtlich der auftretenden Kräfte nach diesen Fahrzeugtypen unterschieden. (21)

1.3.3.1 Antriebskräfte

Eine Kraftübertragung (Beschleunigung, Bremsen) erfolgt durch die Reibung zwischen Rad und Schiene (Adhäsionsbahn). Diese Übertragung erfolgt nur durch den Schlupf, bei reinem Abrollen ist keine Kraftübertragung möglich. (21)

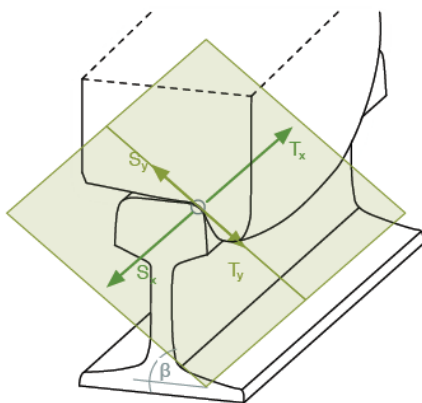


Abb. 1.16: Schlupf und Reibung am Gleis (21)

S _x	Längsschlupf
S _y	Querschlupf
T _x	Längsreibkräfte
T _y	Querreibkräfte
β	Spurkranzwinkel

+ Tab. 1.7: Antriebskräfte und Schlupf (21)

Der Schlupf ist die Differenz ξ zwischen theoretisch zurückgelegtem Weg (Winkelgeschwindigkeit) und wirklich zurückgelegtem Weg (Geschwindigkeit der Achse), relativ zum mittleren zurückgelegtem Weg.
(21)

Ohne Schlupf ist eine Kraftübertragung in Längsrichtung praktisch nicht möglich. Der Längsschlupf S_x beinhaltet eine Bewegung in Längsrichtung x mit der Geschwindigkeit v und einer Drehgeschwindigkeit ω des Rades. (21)

1.3.3.2 Kräftemodell an Rad und Schiene

Abb. 1.17 zeigt das komplexe Modell aller Kräfte, welche auf Schiene und Rad wirken und somit maßgebend das Verschleißverhalten beeinflussen. Einerseits spiegelt die grüne Ebene Schlupf und Reibung aus Kap. 1.3.3.1 wider, andererseits sind die restlichen Kräfte wie etwa die Radaufstandskraft Q_F , die Normalkraft N und die Profilsitenkraft Y ersichtlich. Die Radaufstandskraft wird vor allem durch die Eigengewichte der Fahrzeuge hervorgerufen und wirkt senkrecht auf die Schienenoberfläche. Die Profilsitenkraft resultiert aus der statischen und dynamischen Führungskraft und wirkt horizontal auf die Schiene. (21)

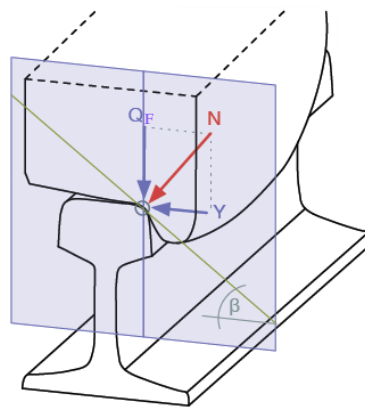


Abb. 1.17: Kräftemodell Rad-Schiene (21)

Die angesprochenen Kräfte lassen sich weiters in zwei Rubriken unterteilen.

1.3.3.3 Statische Kräfte

Die statischen Kräfte resultieren in erster Linie aus der Radaufstandskraft, welche die Eigengewichte, Rad- und Achslasten der Fahrzeuge beinhaltet. Die Lasten der größten auftretenden Achs- oder Radpaar- bzw. Drehgestelllasten müssen aufgrund der unterschiedlichen eingesetzten Fahrzeugtypen unterschieden werden. Die maximale Achslast der Fahrzeugtype ULF liegt bei 12,5 t, die maximale Achslast der Type E₂ entspricht 6,8 t. Statische Kräfte können jedoch auch in Längsrichtung wirken, resultierend aus Beschleunigungs- bzw. Bremsvorgängen, Temperaturveränderungen und Schrumpfspannungen nach dem Schweißen. (16)

1.3.3.4 Dynamische Kräfte

Dynamische Kräfte entstehen vor allem durch Schwingungserscheinungen der Fahrzeugtypen und der Schiene. Diese Kräfte können horizontal, vertikal und in Längsrichtung wirken. Dynamische Kräfte können auch durch etwaige Lagefehler des Oberbaus ausgelöst werden. Für die Wiener Straßenbahn sind vor allem Schwingungserscheinungen, welche aus dem vertikalen Stoß (Laufflächenunebenheiten auf der Schiene, Radabplattungen etc.), dem horizontalen Stoß, dem Seitenwind, der Höhenlagedifferenz und der nicht ausgeglichenen Querschleunigung resultieren, von enormer Bedeutung. Weiters bewirken horizontal angreifende Kräfte über primär und sekundär Federung eine Schwerpunktverlagerung und folglich eine Erhöhung der dynamischen Kräfte. (16)

1.3.4 Fahrzeugstellung im engen Bogen

1.3.4.1 Fahrzeugstellung E_2

Bei der Fahrzeugtype E_2 , welche starrachsrig konzipiert ist, unterscheidet man im Bogen vier unterschiedliche Extremstellungen. (22)

- Freilauf

Bei dieser Variante tangiert der Spurkranz des Bogenaußenrades die Bogenaußenschiene. Die nachlaufenden Spurkränze der übrigen Räder berühren weder die Bogenaußen- noch die Bogeninnenschiene, somit erfolgt ein freier Lauf der Radsätze.

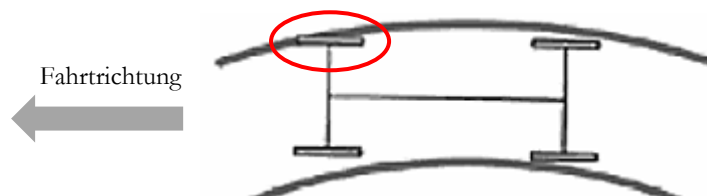


Abb. 1.18: Freilauf (22)

- Spießgang

Beim Spießgang berührt der Spurkranz des nachlaufenden inneren Rades zusätzlich die Bogeninnenschiene. Die Wahrscheinlichkeit der Extremstellung eines Spießganges steigt mit kleiner werdendem Radius und größer werdenden Achsabständen von steifen Fahrwerken.

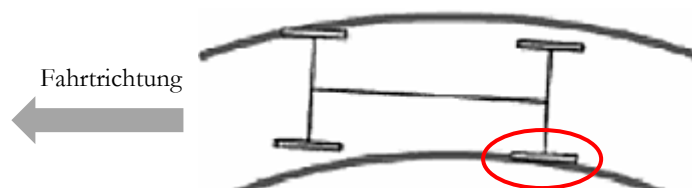


Abb. 1.19: Spießgang (22)

- Außensehnenstellung und Innensehnenstellung

Bei dieser selten anzutreffenden Fahrzeugstellung im Gleis tangieren beide Spurkränze der Räder einer Seite entweder die Bogeninnen- oder Bogenaußenschiene.

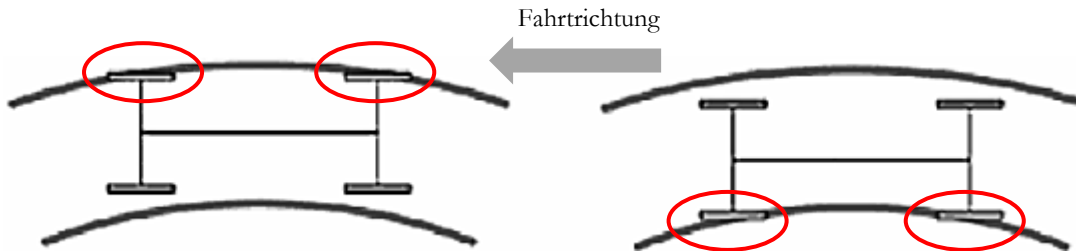


Abb. 1.20: Außensehnen- und Innensehnenstellung (22)

1.3.4.2 Fahrzeugstellung ULF

Die Fahrzeugtype ULF besitzt, wie in Kap. 1.2.1 bereits angesprochen, eine radiale Einstellbarkeit der Räder, womit theoretisch eine optimale Position im Bogen gewährleistet ist. Hierbei steht jedes Einzelrad aufgrund einer Selbsteinstellung radial zum Bogenmittelpunkt. (22)

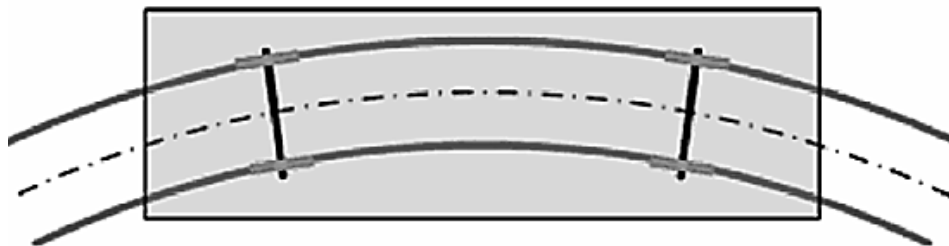


Abb. 1.21: Radialstellung von Radsätzen (22)

1.3.5 Der Raumbedarf des Spurkranzes

Für die Gewährleistung einer sicheren Spurführung ist ein ausreichender Raum für den Spurkranz in der Rille erforderlich, dennoch ist eine großzügige Dimensionierung der Rillenweite nicht zielführend, da in diesem Fall das Gefährdungspotential für Radfahrer und Fußgänger im Verkehrsraum steigt. Der Raumbedarf der Räder in der Rille wird durch den Radrückenabstand, dem Anfahrwinkel bzw. der geometrischen Form des Rades und der Schiene beeinflusst. Aufgrund dieser Anforderungen wird nach Auskunft von B64 in engen Bögen beim Schienenprofil 210/95+80a eine Rillenaufweitung lt. Tab. 1.8 vorgenommen. Die Aufweitung erfolgt über eine Abfräsung des Fahrkopfes von Bogenanfang bis Bogenende. (siehe Anhang F) Die Vermessung des Raumbedarfs des Spurkranzes erfolgt mit Hilfe einer Raumbedarfslehre. (16)

Radius	Rillenaufweitung Innenschiene	Rillenaufweitung Außenschiene
$R \leq 19 \text{ m}$	4 mm	4 mm
$19 \text{ m} < R \leq 20 \text{ m}$	4 mm	-
$R > 20 \text{ m}$	-	-

Tab. 1.8: Rillenaufweitung (B64, WL)

Weiters wird lt. Abt. B64 der WL zusätzlich eine Spurerweiterung nach Tab. 1.11 bei Bögen $R \leq 30 \text{ m}$ auf 1438 mm beim Gleiseinbau vorgenommen.

1.4 Schienenfehler und –verschleiß

Gleisfehler und Schienenschäden haben großen Einfluss auf das laterale Fahrzeugverhalten und in weiterer Folge auf die Lebensdauer einer Rillenschiene. Daher wird in diesem Kapitel näher auf Schienenfehler und auf den Verschleiß von Rillenschienen eingegangen.

Nach (14) und (23) können Fehler an Schienen folgend eingeteilt werden.

- Fehler bei der Schienenstahlerzeugung (metallurgische Fehler, chemische Zusammensetzung)
- Fehler bei der Schienenherstellung (Walzfehler)
- Fehler beim Schienentransport und bei der Schienenverlegung (Verquetschungen, Schlagstellen, Verbiegungen)
- Fehler bei der Schienenbearbeitung (Schweißfehler, Fehler beim Bohren, Fräsen, Schleifen)
- Fehler durch Beschädigungen im Betrieb (Verschleiß, Oberflächenschäden, Gleislagefehler)

Für Vignolschienen werden im UIC-Merkblatt 712 jegliche Schienenschäden nach ihrer Lage, ihrem Aussehen und der Ursache der Fehler katalogisiert. (1) Für Rillenschienen existiert zum jetzigen Zeitpunkt keine allgemein gültige Schienenfehlerklassifizierung.

Für das Instandhaltungs- und Erneuerungsmanagement sowie der Beurteilung der Qualität des Fahrweges von Rillenschienen über die Lebensdauer werden hier nur jene Schienenfehler behandelt, die durch Beschädigungen im Betrieb entstehen. Es wird von einem fehlerlosen Neuzustand ausgegangen. Der Schienenverschleißzustand gilt als maßgebende Größe für die Gleisqualität bei Straßenbahnschienen und wird in Kap. 1.4.2 behandelt. Tab. 1.9 zeigt eine Einteilung der Schienenfehler aus dem Straßenbahnbetrieb.

Schaden	Schadensbild
Äußere (sichtbare) Fehler	
Schienenverschleiß (siehe Kap. 1.4.2)	Höhen- und Seitenverschleiß
Plastische Verformungen (siehe Kap. 1.4.1.1)	Eindrückungen, Überwälzungen, Riffeln, Schlupfwellen, thermische Verformung
Oberflächenschäden (Schienenausbrüche) (siehe Kap. 1.4.1.2)	Risse, Ausbrüche, Durchbrüche, Kerben, Grübchenbildung (pitting), shells, squats, detail fractures, head checks, spalls
Gleislagefehler (siehe Kap. 1.4.1.3)	Spurweitenfehler, Überhöhungsfehler, Seitenlagefehler (Krümmungsfehler), Verwindungsfehler, Längshöhenlagefehler
Innere Fehler	
Zerstörung der Gefügestruktur (siehe Kap. 1.4.1.4)	Querbruch, Kopflängsbruch (horizontal und vertikal), Nierenbrüche, Ermüdungsbrüche

Tab. 1.9: Schienenfehler durch Beschädigungen im Betrieb (23; 24; 25)

1.4.1 Schienenfehler

Es werden nur jene Schienenfehler behandelt, die für Rillenschienen bei Straßenbahnen relevant sind.

1.4.1.1 Schäden durch plastische Verformungen

- Eindrückungen (1; 23)

Eindrückungen sind periodische oder unregelmäßige („braune Flecken“) mechanisch verursachte Vertiefungen an der Lauffläche, an deren Stelle in weiterer Folge ein Korrosionsprozess stattfindet. Bei weiterer Betriebsbelastung kann sich beginnend von der Fahrkante ein in flachem Winkel in den Werkstoff hineinwachsender flächenhafter Riss bilden. Als Beispiel für die Entstehung von Eindrückungen kann ein im Rad eingedrückter Fremdkörper genannt werden.

- Schleuderstellen (1; 23)

Diese entstehen, wenn die Haftwertgrenze des Reibkontakts zwischen Rad und Schiene beim Anfahren (Triebachsen) bzw. Bremsen überschritten wird und die Räder durchdrehen bzw. stillstehen. An diesen Stellen entstehen ovale Flecken und es kommt durch die Materialumwandlung von Perlit zu Martensit zu einer Erhärtung und in weiterer Folge zur Netzrissbildung auf der Fahrfläche.

- Schlupfwellen (1; 23)

Dies sind kurzweilige periodische Unebenheiten mit einer Wellenlänge von 3 bis 30 cm und entstehen meist an der inneren Schiene von Bögen mit einem Radius von < 800 m durch die Relativbewegung zwischen innerem und äußerem Rad. Es kommt zu plastischen Deformationen und flachen Oberflächenrissen.

- Überwälzungen (23)

Auf Grund der Belastung können an beiden Seiten des Fahrkopfes Überwälzungen bzw. Schienengräte entstehen, die ab einem bestimmten Ausmaß zu entfernen sind.

- Riffel (Lichtberger, Fendrich, Grohmann)

Ähnlich wie bei der Schlupfwellenbildung entstehen regelmäßige periodische Unebenheiten auf der Schienenoberfläche, jedoch überwiegend in Geraden und Bögen mit großen Radien. Es bilden sich hier Wellenberge („weiße Schichten“) mit einer bis zu dreifachen Härte im Vergleich zum Grundmaterial. Nach (26) ist es der Forschung bis heute nicht gelungen eine vollkommen schlüssige Erklärung der Riffelbildung zu finden. Einige Ansätze der möglichen Ursachen liegen beim Sinuslauf der Räder, bei den Torsionsschwingungen der Achsen, bei den elastischen Deformationen der Achswellen, bei einer Plastifizierung der Schienen beim Rollkontakt, bei einer Oberflächenkorrosion oder in Oxidationsphänomenen. (1; 23; 25)

Es scheint jedoch sicher, dass Riffel durch Reibung, Schlupf und Schwingungsvorgänge zwischen Rad und Schiene entstehen. (27)

Riffel an der Schienenoberfläche sind jedoch nicht zu vernachlässigen, weil sie die Sicherheit, die Lärmentwicklung, die dynamische Beanspruchung der Gleise und Fahrzeuge und somit den Verschleiß nachteilig beeinflussen. Es können insgesamt sechs verschiedene Riffelarten und deren Schädigungsarten unterschieden werden. Bei Straßenbahnschienen können die generell am weitest verbreiteten *Rutting-Riffel* auftreten, wobei die Riffel hier eine Wellenlänge von etwa 5 cm aufweisen. Die Ursache dürfte beim Verschleiß durch Torsionsschwingungen des Radsatzes, verursacht durch schwankenden Längsschlupf oder durch plötzliche Änderung der Antriebskraft, liegen. (1)

Nach Auskunft der Abteilung B63 (Organigramm siehe Anhang B) sind die mit Abstand häufigsten Oberflächenschäden an den Gleisen des Wiener Straßenbahnnetzes die oben beschriebenen *Rutting-Riffel*. Die Behebung durch Schienenschleifen (siehe Kap. 1.5.2) muss in der Instandhaltungsplanung berücksichtigt werden.

1.4.1.2 Oberflächenschäden (Schienenausbrüche)

- Head Checks (1; 23)

Als Folge von Rollkontaktermüdungsschäden können Head Checks bei Bogenradien < 1200 m an der Fahrkante der bogenäußeren Schiene, bei Radien > 1200 m an den Fahrkanten beider Schienen und bei Geraden auf der Fahrfläche beider Schienen entstehen. Es treten feine Oberflächenrisse in regelmäßigen Abständen zwischen 0,5 mm und 1 cm auf. Diese Risse breiten sich von oben gesehen, in einem Winkel von $35-70^\circ$, bezogen auf die Schienenlängsachse, aus. Sie wachsen, beginnend von der Oberfläche, in einem immer steiler werdenden Winkel ins Schieneninnere. Das kontinuierliche Risswachstum und das Vereinen von Rissen führt in weiterer Folge zu Ausbrüchen von kleineren („flaking“) bzw. größeren Partikeln („spalling“) aus der Fahrkante oder der Fahrfläche. Head Checks werden als gefährliche Schienenfehler eingestuft. Weiters haben Untersuchungen gezeigt, dass die Wahrscheinlichkeit der Entstehung von Head Checks auch mit der Oberbausteifigkeit zusammenhängt. Mit steigender Steifigkeit steigt auch die Entstehungswahrscheinlichkeit.

- Shelling (23; 25)

Herstellungsbedingte nichtmetallische Einschlüsse aus Aluminiumoxid (Al_2O_3) im Inneren des Schienenkopfes führen bei Belastung zunächst zu feinen horizontalen Schwingungsrissen 3-10 mm unter der Oberfläche. Daraufhin entstehen durch eine Fahrflächenabsenkung schwarze Flecken, gefolgt von Ausbrüchen an der Fahrkante. Shelling tritt an Außenschienen von Bögen mit größeren Radien auf und führt im schlimmsten Fall zu einem Querbruch der Schiene.

1.4.1.3 Gleislagefehler

Neben der negativen Beeinflussung der Betriebssicherheit verursachen Gleislagefehler unerwünschte dynamische Fahrzeugreaktionen in Form von Beschleunigungen im Fahrzeugkasten sowie zwischen Rad und Schiene. (1) Diese wirken sich nicht nur negativ auf die Fahrdynamik aus, sondern erhöhen zusätzlich auch die Kräfte auf das Gleis und damit auch den Verschleiß. Weiters können dadurch federnde Schienen, Spuraufweitungen, Knicke, Schienenbrüche und Gleisverschiebungen auftreten. Die richtige Gleislage muss aus diesen Gründen stets sichergestellt werden. Die Fehler können unterschieden werden in:

- Spurweitenfehler
- Überhöhungsfehler
- Krümmungsfehler (Seitenlagefehler)
- Verwindungsfehler
- Längshöhenlagefehler (Längsneigungsfehler)

Die Gleichung (1.12) zeigt für die vertikale Beschleunigung $a(x)$ eines ungefederten Rades bei der Bewegung über einen sinusförmigen Fehler $F(x)$ nach (1) folgendes:

- der Fehler wächst proportional
- die Beschleunigung hängt direkt mit dem Quadrat der Fahrgeschwindigkeit v zusammen
- die Beschleunigung hängt verkehrt proportional mit dem Quadrat der Fehlerwellenlänge λ zusammen
- je geringer die Beschleunigungen, umso geringer auch die das Gleis beanspruchenden Kräfte
- je höher die Fahrgeschwindigkeit, desto niedriger dürfen die Fehler sein
- je höher die Fahrgeschwindigkeit, desto langwelliger sollten die Fehler sein

$$\frac{\partial^2 F(x)}{\partial t^2} = a(x) = -F(x) \cdot \left(\frac{2\pi v}{\lambda}\right)^2 \quad (1.12)$$

$a(x)$...Beschleunigung vertikal [m/s ²]
$F(x)$...Amplitude sinusförmiger Gleisfehler [m]
v	...Fahrgeschwindigkeit [m/s]
λ	...Wellenlänge des Gleisfehlers [m]

Die Gleislage des Wiener Straßenbahnnetzes wird regelmäßig überprüft und vermessen. Nach Auskunft der Abteilung B63 sind Gleislagefehler bei Rillenschienengleisen im System „Feste Fahrbahn“ jedoch sehr selten und nicht maßgebend für das Instandhaltungs- und Anlagenmanagement. (siehe auch Kap. 1.5.3)

1.4.1.4 Zerstörung der Gefügestruktur

Diese Schadensbilder gehen von herstellungsbedingten inneren und von außen nicht sichtbaren Schienenfehlern oder auch von Materialermüdungen aus, die im Laufe des Betriebs zur Zerstörung der Gefügestruktur führen können. Die Folge davon sind Nierenbrüche, horizontale und vertikale Schienenkopflängsbrüche, Leitkopflängsbrüche sowie Querbrüche.

1.4.2 Schienenverschleiß

Unter Verschleiß versteht man einen fortschreitenden Material- und Masseverlust eines Grundkörpers, hervorgerufen durch Kontakt- oder Relativbewegungen eines Gegenkörpers. Im Falle des Rad-Schiene-Systems können folgende zum Verschleiß und Oberflächenabtrag führende Einflussgrößen genannt werden. (12)

- Grundkörper (Werkstoff, Form, Oberfläche etc.)
- Zwischenstoff (Art, Teilchengröße etc.)
- Gegenkörper (Werkstoff, Form, Oberfläche etc.)
- Belastung (Größe, zeitlicher Verlauf etc.)
- Art der Bewegung (gleitend, rollend, stoßend, schleifend etc.)
- Temperatur (Höhe, zeitlicher Verlauf etc.)

Generell kann zwischen abrasivem und adhäsivem Verschleiß unterschieden werden. Abrasiver Verschleiß erfolgt auf Grund von Fremdpartikeln, die einen Abrieb bzw. eine Mikrozerspannung des Materials verursachen. Adhäsiver Verschleiß basiert auf der Haftung zweier Berührpartner zufolge Adhäsion, wenn diese fest aufeinander gepresst werden. Die Überwindung der Haftreibung führt zu einem Materialverlust an den Oberflächen. (12)

Durch den Rad-Schiene-Kontakt kommt es an beiden Komponenten zu Verschleißerscheinungen. Es wird hier vorwiegend auf das Verschleißverhalten der Schienen eingegangen. Durch den Betrieb werden Rillenschienen sowohl an der Fahrfläche und Fahrkopfflanke als auch an der Leitkopfflanke abgefahren, welche die Rillentiefe, Rillenweite, Kontrollbreite und Leitkopfbreite über die Zeit verändern. (siehe Abb. 1.22)

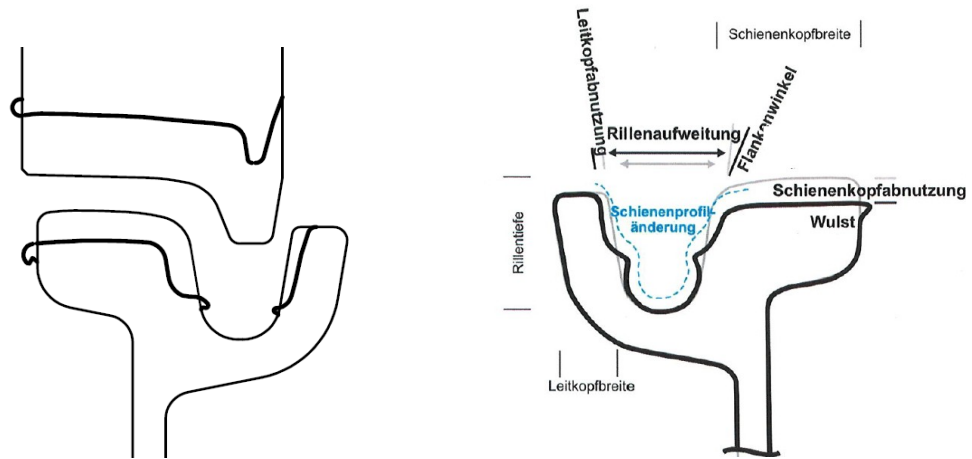


Abb. 1.22: Neu- und Verschleißzustände von Rad und Schiene (4; 28)

In der Regel können durch den Rad-Schiene Kontakt folgende Veränderungen während der betrieblichen Nutzung beobachtet werden: (4; 29)

- An den Fahrflächen von Rad und Schiene kommt es zu vertikalem Verschleiß. Die Fahrfläche des Rades wird leicht ausgerundet, wobei der Ausrundungsradius größer ist als jener der Schienenfahrfläche.
- Spurkranzstirnflanke und Fahrkopfabrundung verschleifen und passen sich einander an.
- Herausbildung einer „Stufe“ an der Fahrkopfflanke in Bogengleisen (Seitenverschleiß)
- Wenn das Rad häufig am Radrücken geführt wird, kommt es zu Materialverlusten zufolge Verschleiß an der Spurkranzrückenflanke und an der Leitkopfflanke. Dies kann zum Teil durch rechtzeitiges Auftragschweißen (siehe Kap. 1.5.1) verhindert werden, ist aber in engen Bögen durch große Anfahrwinkel und spurführungstechnische Effekte kaum zu vermeiden.
- Es können plastische Verformungen und Oberflächenschäden auftreten. Die Ausprägung dieser Veränderungen ist von der Betriebsführung und der Art der Instandhaltung abhängig.
- Eine Zerstörung der Gefügestruktur kann z.B. zu Schienenbrüchen führen.

Erfahrungen haben gezeigt, dass neue Schienen zu Beginn stärker verschleifen, jedoch nach dem „Einspielen“ des Rad-Schiene-Systems unter Angleichung der Ausrundungen und Übergang zur flächigen Berührung der Verschleiß abschwächt. Danach verläuft die Verschleißentwicklung über die Zeit nahezu linear. (16)

Eine optimale Nutzungsdauer der Räder und der Schienen wird erreicht, wenn das Rad-Neuprofil in kleinen Schritten verändert und an das Verschleißprofil angepasst wird. (29)

Diese Profilveränderungen dürfen aber nur unter sorgfältiger Beobachtung der Bremseigenschaften, insbesondere der sich im Betrieb einstellenden Profilveränderungen sowie der „Stufen“-Bildung an der Fahrflanke, vorgenommen werden. (29)

Die typischen Schadensbilder des Schienenverschleißes und deren Herkunft und Ursache sind in Tab. 1.10 beschrieben.

Schadensbild	Herkunft	Ursache
abgefahrener Fahrkopf	- Adhäsion - Schleudern und Blockieren	- Materialabtrag an der Oberfläche - Anfahrwinkel - Fahrweise der Fahrer - Alterungserscheinungen - Fahrzeuggewicht
abgefahrener Leitkopf	- Anlaufen der Radreifen	- kleine Bogenradien - zu steife Radsatzlagerung - unpassendes Radreifenprofil - harte Radreifen - fehlende Spuraufweitung - Anfahrwinkel
flacher Fahrkopfflankenwinkel	- Anlaufen der Radreifen (Gefahr des Auflaufens)	- Verschleißprofil der Räder - harte Radreifen - Fahrzeuggewicht
Wulst am Fahrkopf	- Hohe Schienenkopfbelastung - exzentrischer Berührungspunkt	- Spurweitenfehler - Fahrzeuggewicht - einseitige Fahrzeugbelastung

Tab. 1.10: Problemfelder des Schienenverschleißes (28)

1.4.2.1 Einflussfaktoren

Der Verschleißverlauf und die zeitliche Verschleißentwicklung von Rillenschienen werden von folgenden Faktoren maßgebend beeinflusst. Der Verschleiß ist umso höher, je

- schlechter die Unterbausituation
- kleiner die Bogenradien
- ungünstiger die Abfolge der Trassierungselemente
- höher die Verkehrsbelastung (Menge und Gewicht)
- schlechter die Qualität des rollenden Materials
- schlechter die Qualität des Oberbaus (minderwertige Stahlgüte etc.)
- ungünstiger das Zusammenspiel des Rad-Schiene-Systems

In Relation zur Vollbahn haben Straßenbahnfahrzeuge geringe Achslasten. Auf Grund der dichten Zugfolgen kommt dem Verschleißverhalten von Rillenschienen eine wichtige Bedeutung zu. Der Schienenverschleiß stellt die maßgebende Größe hinsichtlich Instandhaltungsplanung dar und legt die mögliche Gleisliegedauer fest.

1.4.2.2 Parameter des Schienenverschleißes (5)

Für die Beurteilung des Materialverlustes zufolge Verschleiß an der Rillenschiene und der Festlegung von Grenzwerten werden folgende Abmessungen, Parameter und Verschleißarten herangezogen. Es gelten die Grenzwerte nach Tab. 1.11:

- Rillenweite W

Die Rillenweite ist in Kap.1.1.2.1 definiert.

- Kontrollbreite KB

Die Kontrollbreite ist in Kap. 1.1.2.1 definiert.

- Fahrkopfseitenverschleiß $FKV_{hor.}$

Der Fahrkopfseitenverschleiß wird über den Vergleich der ursprünglichen Kontrollbreite aus dem Neuzustand mit jener zum Messzeitpunkt ermittelt.

$$FKV_{hor.} = KB_{aktuell} - KB_{neu}$$

- Leitkopfbreite LB

Die Leitkopfbreite ist in Kap. 1.1.2.1 definiert.

- Leitkopfseitenverschleiß $LKV_{hor.}$

Der Leitkopfseitenverschleiß wird wie folgt ermittelt:

$$LKV_{hor.} = LB_{neu} - LB_{aktuell} \quad (1.14)$$

- Rillentiefe T

Die Rillentiefe ist in Kap. 1.1.2.1 definiert.

- Fahrkopfhöhenverschleiß $FKV_{vert.}$

Der Fahrkopfhöhenverschleiß wird über den Vergleich der ursprünglichen Rillentiefe aus dem Neuzustand mit jener zum Messzeitpunkt ermittelt.

$$FKV_{vert.} = T_{neu} - T_{aktuell} \quad (1.15)$$

1.4.2.3 Grenzwerte des Schienenverschleißes (5)

- Vergleichene Schienenabnutzung VS

Die verglichene Schienenabnutzung bringt den vertikalen- und horizontalen Fahrkopfverschleiß mathematisch in Zusammenhang. Folgende schienenprofilabhängige Bedingungen sind einzuhalten:

$$VS_{210/95+80(a)} = \frac{(1900 - FKV_{hor.} \cdot 33 - FKV_{vert.} \cdot 59 + FKV_{hor.} \cdot FKV_{vert.}) \cdot 117}{87600 + \min\left(S; \frac{193}{R}\right) \cdot 10600} \geq 1 \quad (1.16)$$

$$VS_{R160} = \frac{(2050 - FKV_{hor.} \cdot 33 - FKV_{vert.} \cdot 59 + FKV_{hor.} \cdot FKV_{vert.}) \cdot 117}{87600 + \min\left(S; \frac{193}{R}\right) \cdot 10600} \geq 1 \quad (1.17)$$

VS	...Verglichene Schienenabnutzung [-]
$FKV_{vert.}$...Fahrkopfseitenverschleiß [mm]
$FKV_{hor.}$...Fahrkopfhöhenverschleiß [mm]
R	...Bogenradius in der Gleisachse [m]
S=1	...für äußeren Schienenschiene
S=0	...für inneren Schienenschiene

Näherungsweise darf die konservative Prüfgröße P ermittelt werden. Es müssen folgende Grenzwerte eingehalten werden.

$$P_{210/95+80(a)} = 3 \cdot FKV_{hor.} + FKV_{vert.} \leq 54 \text{ mm} \quad (1.18)$$

$$P_{Ri60} = 3 \cdot FKV_{hor.} + FKV_{vert.} \leq 61,5 \text{ mm} \quad (1.19)$$

Im Instandhaltungsplan der Abteilung B63 der WL (5) sind die Verschleißgrenzwerte von Rillenschienen nach Tab. 1.11 festgelegt.

	Messwerte	Radius [m]	Profil	Neu [mm]	Grenzwert SES [mm]	Diff.zul. [mm]
zul. Verschleiß bis Auftragschweißung	W	> 800	210/95+80	32,5	45	+12,5
			210/95+80a	32,5	45	+12,5
			Ri60	35,5	45	+9,5
		≤ 800	210/95+80	32,5	60	27,5
			210/95+80a	32,5	60	+27,5
			Ri60	35,5	60	+24,5
	T		210/95+80(a)	40	29	-11,0
			Ri60	47	29	-18,0
	KB		210/95+80	53,6	58,5	+4,9
			210/95+80a	63,6	68,5	+4,9
			Ri60	57	62	+5
	LB		210/95+80	21,1	8	-13,1
210/95+80a			31,1	8	-23,1	
Ri60			21,5	8	-13,5	
zul. Verschleiß bis Gleistausch	W	siehe Grenzwerte bis Auftragschweißung				
	T		210/95+80(a)	40	24	-16
			Ri60	47	24	-23
	KB	> 800	210/95+80	53,6	65	+11,4
			210/95+80a	63,6	75	+11,4
			Ri60	57	69	+12
		≤ 800 Außenschiene	210/95+80	53,6	67	+13,4
			210/95+80a	63,6	77	+13,4
			Ri60	57	71	+14
			≤ 800 Innenschiene	210/95+80	53,6	60
	210/95+80a	63,6		70	+6,4	
Ri60	57	64		+7		
LB	siehe Grenzwerte bis Auftragschweißung					
Gleislageveränderung	S _{max,zul}	> 800		1435	1447	+12
		≤ 800		1435	1457	+22
	S _{min,zul}	≥ 30		1435	1434	-1
		< 30		1438	1435	-3
	D _{Fehler,zul}			3	20	17
	K _{Fehler, zul}	Sehne 10 m		5	13,5	8,5
	h _{Fehler, zul}	Sehne 10 m		4	20	16
				mm/m	mm/m	mm/m
	V _{Fehler,zul}	Sehne 2,5 m		5	6,25	1,25
		Sehne 3,5		5	6,66	1,66
Sehne 5 m			5	6,66	1,66	

Tab. 1.11: Verschleißgrenzwerte für Rillenschienen auf freier Strecke (5)

1.5 Instandhaltungsmaßnahmen und Gleistausch

Generell kann zwischen folgenden Instandhaltungsarten unterschieden werden.

- präventive Instandhaltung

„Instandhaltung, ausgeführt in festgelegten Abständen oder nach vorgeschriebenen Kriterien zur Verminderung der Ausfallwahrscheinlichkeit oder der Wahrscheinlichkeit einer eingeschränkten Funktionserfüllung einer Einheit.“ (ÖNORM EN 13306)

- korrektive Instandhaltung

„Instandhaltung, ausgeführt nach der Fehlererkennung, um eine Einheit in einen Zustand zu bringen, in dem sie eine geforderte Funktion erfüllen kann.“ (ÖNORM EN 13306)

- zustandsorientierte Instandhaltung

„Eine präventive Instandhaltung, die eine Kombination aus Zustandsüberwachung und/oder Konformitätsprüfung und/oder Prüfverfahren, Analysen und die daraus resultierenden Instandhaltungsmaßnahmen beinhaltet.“ (ÖNORM EN 13306)

- vorausbestimmte Instandhaltung

„Eine präventive Instandhaltung, durchgeführt in festgelegten Zeitabständen oder nach einer festgelegten Zahl von Nutzungseinheiten, jedoch ohne vorherige Zustandsermittlung.“ (ÖNORM EN 13306)

Abb. 1.23 gibt einen Gesamtüberblick der Instandhaltungsarten aus ÖNORM EN 13306.

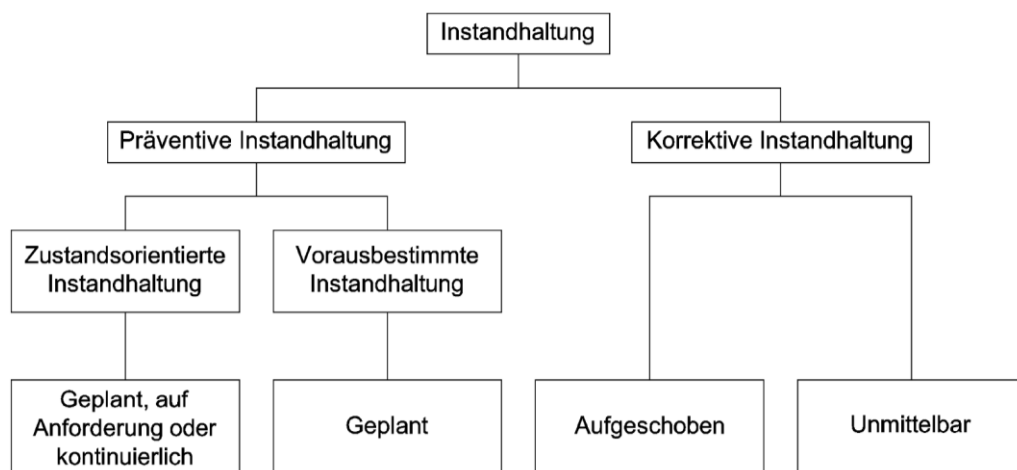


Abb. 1.23: Gesamtübersicht zur Instandhaltung (ÖNORM EN 13306)

Es werden laufend Gleisvermessungen durchgeführt, deren Daten sowohl auf operativer als auch auf strategischer Ebene als Grundlage der Instandhaltungsmaßnahmen dienen (siehe Kap. 1.6). Im Rahmen von Begehungen bei der technischen Überwachung (vier Mal jährlich und zusätzlich bei Verdacht auf sicherheitsrelevante Mängel) erfolgt eine augenscheinliche Kontrolle der Gleisanlage von der Streckenaufsicht. (5) Die Art, der Zeitpunkt und die Qualität der Instandhaltungsmaßnahmen nach Tab. 1.12 haben einen wesentlichen Einfluss auf die mögliche Liegedauer von Rillenschienengleisen.

Schaden, Veränderung		Maßnahmen / Behebung
Schienenverschleiß	horizontal	Auftragschweißen, Gleistausch
	vertikal	Gleistausch
Plastische Verformungen und Oberflächenschäden		Schienenschleifen
Gleislagefehler ^{*)}		Berichtigung
Zerstörung der Gefügestruktur		schweißtechnische Maßnahmen, Gleistausch
Verschmutzung der Rille		Säuberung mit Hochdruckreiniger
<small>*) bei Straßenbahngleisen sehr selten</small>		

Tab. 1.12: Überblick der Instandhaltungsmaßnahmen bei Rillenschienen (Eigendarstellung)

1.5.1 Auftragschweißen

Das Auftragschweißen von Rillenschienen ist mitunter eine der wichtigsten korrektiven Instandhaltungsmaßnahmen der Wiener Straßenbahn. Schweißen ermöglicht eine unlösbare Verbindung von Bauteilen unter Zuführen von Wärme oder Druck, wobei die dafür notwendige Energie von außen eingebracht wird. (30)

Da sich diese Arbeit in erster Linie mit dem Verschleißverhalten von Rillenschienen beschäftigt, wird in weiterer Folge nur auf das Auftragschweißverfahren der WL im Bereich von Bögen, das Unter-Pulver-Schweißen, eingegangen. Der Zeitpunkt der Schweißung wird durch die geltenden Grenzwerte, Eingriffs- und Aufmerksamkeitsschwellen in Kap. 1.5.5 festgelegt.

1.5.1.1 Rechtliche Rahmenbedingung (30)

Die rechtlichen Vorgaben für Schweißarbeiten von Oberbauteilen werden in den Normen

- DIN EN ISO 3834 (Qualitätsanforderungen an schweißtechnische Fertigungsbetriebe)
- ÖNORM M 7812 (Schweißbetriebszulassung)

abgehandelt. Hauptaugenmerk dieser Normen liegt einerseits auf der Güte der Schweißarbeiten und andererseits auf der personellen Festlegung wer welche Schweißarbeiten durchführen darf. DIN EN ISO 3834 gliedert sich in drei Güteklassen, welche sich in der Qualifikation des Schweißpersonals und den qualitätssichernden Maßnahmen unterscheiden. Die Wahl der jeweiligen Güteklasse wird durch die Verwendung des Bauteils und des vorhandenen Gefährdungspotentials bei Versagen der Schweißnaht bestimmt.

Für das Auftragschweißen von Rillenschienen genügt die Güteklasse zwei, welche besagt, dass die Schweißaufsicht spezielle technische Kenntnisse vorweisen bzw. der ausführende Schweißer einschlägig geprüft sein muss. Die Schweißnahtprüfung wird wie in der Güteklasse eins durchgeführt. Diese beinhaltet eine zerstörungsfreie Prüfung der Schweißverbindungen und eine prüfstückzerstörende Prüfung. Die WL wenden, wie bereits erwähnt, Güteklasse zwei im Straßenbahnbereich an, da Rillenschienen der Wiener Straßenbahn einen erhöhten Kohlenstoffgehalt besitzen und dadurch nur bedingt schweißbar sind. (siehe Kap. 1.1.1)

1.5.1.2 Das Auftragschweißverfahren

Per Definition beinhaltet das Auftragschweißen das Beschichten von Werkstücken, wodurch abgenutzte Oberbauteile eine deutliche Verlängerung der Liegedauer erfahren. Bei dem Auftragschweißverfahren unterscheidet man nach (30) zwischen

- Panzern (Auftragswerkstoff verschleißfester als der Grundwerkstoff)
- Plattieren (Auftragswerkstoff chemisch beständiger als Grundwerkstoff)
- Puffern (Auftrag von Pufferschichten, welche eine beanspruchungsgerechte Schweißung zweier artfremder Bestandteile gewährleisten).

Der Aufmischungsgrad A_G ist beim Auftragschweißen von enormer Bedeutung, da sich mit steigender Vermischung des Schweißzusatzstoffes mit dem Grundwerkstoff die gewünschten Eigenschaften der entstehenden Schicht zunehmend verschlechtern. Aus diesem Grund wird mit Hilfe der Formel (1.20) eine Schweißparameteroptimierung durchgeführt, welche den Aufmischungsgrad, ohne die notwendige Schichthaftung außer Acht zu lassen, minimiert. Diese Formel basiert hierbei, wie in Abb. 1.24 ersichtlich, auf der Ermittlung der Auftrags- und Einbrandfläche im Querschnitt. Eine genaue Verifizierung des Aufmischungsgrades, wie in Formel (1.21), ist durch den Massengehalt eines bestimmten Elements in der Auftragschicht – meist Eisen (Fe) – möglich. (30; 31)

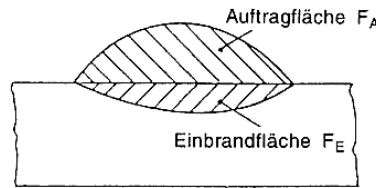


Abb. 1.24: Auftrag- u. Einbrandfläche (31)

$$A_G = \frac{F_E}{F_E + F_A} \quad (1.20)$$

$$A_G = \frac{(\text{Gehalt}_{\text{Auftragschicht}} - \text{Gehalt}_{\text{Zusatzwerkstoff}}) \text{ in } m\%}{(\text{Gehalt}_{\text{Grundwerkstoff}} - \text{Gehalt}_{\text{Zusatzwerkstoff}}) \text{ in } m\%} * 100 \text{ in } \% \quad (1.21)$$

Vor dem Auftragschweißen müssen etwaige Schadstellen bzw. Fehler im Werkstoff mittels Schneidbrenner oder Fugenhobel entfernt werden, um eine optimale Verarbeitung der Schiene sicherstellen zu können. Bei der Ausarbeitung dieser Fehler, wie etwa Haarrissen, Kerben und Lunken, soll eine ebene Oberfläche entstehen bzw. tiefe unregelmäßige Riefen vermieden werden. Weiters muss vor dem Schweißvorgang der Werkstoff auf Rissfreiheit in der vorbearbeiteten Schadstelle mittels „Ableuchten“ überprüft werden. Hierbei werden durch Wärmeeintrag Risskanten und Ablätterungen ersichtlich, da sich diese in Relation zum übrigen Werkstoff schneller erwärmen. Bei Bedarf müssen Schweißstellen vor dem Schweißvorgang mit einem Gasbrenner vorgewärmt werden. (30)

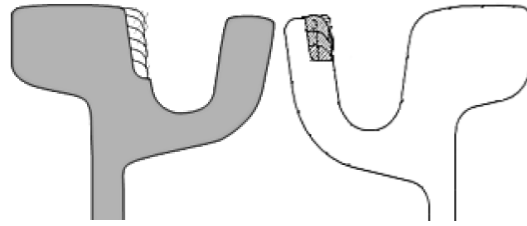


Abb. 1.25: Raupenanordnung der Schweißung (30)

Nach dem Auftragschweißen werden die bearbeiteten Rillenschienen aufgrund einer Nahtüberhöhung durch Abschleifvorgänge reprofiliert, wobei Vorgaben wie Spurweite, Leitweite und Rillenweite eingehalten werden müssen. Weiters sind Übergänge zwischen der bestehenden und der aufgeschweißten Schiene ansatzlos auszuführen. Kerben größer 0,2 mm sind ebenfalls nicht zulässig und müssen gegebenenfalls nachbearbeitet werden. Bei der Abkühlung der Schweißstellen ist tunlichst auf die Außentemperatur zu achten. Gegebenenfalls müssen geeignete Maßnahmen veranlasst werden, um eine gleichmäßige Abkühlung zur Herstellung eines optimalen Schienenzustandes gewährleisten zu können. (30)

1.5.1.3 Unter-Pulver-Schweißen (30)

Zur Instandsetzung von verschlissenen Rillenschienen in Bögen verwenden die WL das UP-Auftragschweißen, wobei ein Schweißlichtbogen in einer mit Gasen und Dämpfen gefüllten Kaverne zwischen Drahtelektrodenwerkstoff und dem Werkstück brennt. Als Schweißzusatz werden vor allem Draht- oder Bandelektroden und ein grobkörniges, mineralisches Schweißpulver verwendet, welches während des Schweißverfahrens den Schutz des Schweißprozesses gewährleistet. Dieses Schweißpulver, welches aufgrund der Schwerkraft oder eines Druckluftfördersystems zur Schweißstelle gelangt, wird durch die Wärme des Lichtbogens geschmolzen. Es bildet sich eine Schlackeschicht, welche auf dem flüssigen Metallbad aufschwimmt und so dem neuen Material Schutz gegen Einflüsse der Atmosphäre bietet. Draht- und Bandelektrode, wie in Abb. 1.26 ersichtlich, werden durch ein Vorschubsystem zur jeweiligen Schweißstelle befördert. Das Stromkontaktrohr, welches direkt über der Schweißstelle situiert ist, übermittelt den notwendigen Schweißstrom an die Elektrode. Dies führt zu einer hohen Strombelastbarkeit bzw. Variationsmöglichkeit der Schweißdaten. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist die hohe Abschmelzleistung, wodurch eine Länge von bis zu 20 m pro Nacht und Bogen reprofiliert werden kann.

Die Bögen der Wiener Straßenbahn werden derzeit bis zum Gleistausch maximal zweimal aufgeschweißt. Pro Jahr werden Längen von ca. 1,76 km am Fahrkopf bzw. 0,85 km am Leitkopf wiederhergestellt. Eine Besonderheit des UP-Schweißens ist eine weitgehende Emissionsfreiheit aufgrund der Schutzwirkung der Pulverschicht.

Unter-Pulver-Schweißungen lassen sich aufgrund der Anzahl der Drahtelektroden in drei unterschiedliche Verfahren unterteilen.

- UP-Eindrahtschweißen

Dieses Verfahren wird am häufigsten verwendet und basiert auf der oben genannten Beschreibung, welche die Standardvariante widerspiegelt.

▪ UP-Doppeldrahtschweißen

Im Unterschied zum Eindrahtschweißen werden beim Doppel- oder Paralleldrahtschweißen zwei Drahtelektroden mit einem Durchmesser von 2 mm verwendet, welche in einem gemeinsamen Schweißlichtbogen abgeschmolzen werden. Die beiden Drahtelektroden sind in einem Abstand von 4 – 8 mm angeordnet und werden durch eine gemeinsame Schweißstromquelle versorgt.

▪ UP-Tandem- und -Mehrdrahtschweißen

Bei diesem Verfahren sind zwei bis sechs Drahtelektroden in einem Abstand von 15 bis 100 mm hintereinander angeordnet. Auf Basis des Abstandes der Elektroden schmelzen die Drähte entweder in einem eigenen Lichtbogen oder in einer gemeinsamen mit Gas gefüllten Kaverne ab. Die Drahtelektroden werden hierbei über eigene Schweißstromquellen und Prozessregelungen versorgt.

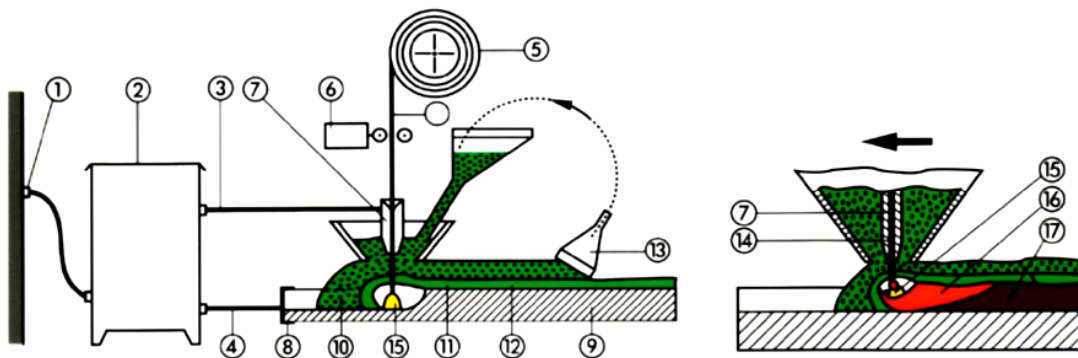


Abb. 1.26: UP-Schweißung (30)

Nr.	Bezeichnung	Nr.	Bezeichnung
1	Netzanschluss	10	Pulveraufschüttung
2	Schweißstromquelle	11	flüssige Schlacke
3	Schweißstromleitung (Elektrode)	12	feste Schlacke
4	Schweißstromleitung (Werkstück)	13	Pulverabsaugung
5	Drahtelektrodenhaspel	14	Drahtelektrode
6	Drahtförderungseinrichtung	15	Lichtbogen
7	Stromkontaktröhre	16	flüssiges Schweißgut
8	Werkstückklemme	17	festes Schweißgut
9	Werkstück		

Tab. 1.13: Zuordnung Bezeichnungen UP-Schweißung (30)

1.5.1.4 Schweißanweisungen der WL

Eine gleichbleibende und hochwertige Qualität der Schweißausführung bei Rillenschienen wird durch sogenannte Schweißanweisungen, welche den Ablauf und Vorgangsweise der Schweißung vorgeben, gewährleistet. Solch eine Schweißanweisung wird seitens der Fachabteilung B64 vorgegeben, welche unzählige Merkmale besitzt. Dazu zählen die Bezeichnung des Verfahrens, das Grundmaterial, die Schweißdaten, die Zusatzwerkstoffe, die Nahtvorbereitung, die Oberflächenbehandlung und die Schweißnahtüberprüfung. Die Dokumentation von Schweißungen ist hinsichtlich der Instandhaltungsplanung von Nöten. Durch diese Aufzeichnungen werden zeitliche Veränderungen erkannt und Maßnahmen gesetzt können. Beispielhaft ist das Formblatt FB-B64-061_02 zur Auftragschweißung des Fahr- und Leitkopfes im Anhang H beigegeben. (30)

1.5.2 Schienenschleifen

Plastische Profilverformungen und Oberflächenschäden bei Schienen können durch Schienenschleifen behoben werden. Die Fehler werden durch Materialabtrag am Fahrkopf und an der Fahrkopfflanke beseitigt, wobei diese häufig unterschliffen werden. Korrekt durchgeführte Schleifarbeiten entfernen das geschädigte Material teilweise oder vollständig und führen durch die Neugestaltung des Querprofils zu einer optimalen Spannungsverteilung ohne ungünstige Konzentrationen an der Oberfläche. Es sollte der bestmögliche Zustand für die nachfolgende Betriebsbelastung geschaffen werden, um damit auch die Entwicklung der Oberflächenschäden zu verzögern. (32)

Auch bei Schleifarbeiten ist die richtige Wahl der Strategie für den technischen und wirtschaftlichen Erfolg von Bedeutung. Für den optimalen Nutzen mit möglichst geringen Gesamtkosten spielen der Zeitpunkt, die Häufigkeit und Intensität der Schleifarbeiten eine große Rolle. (32)

Auffällige Oberflächenschäden oder plastische Schienenprofilverformungen werden lt. Abteilung B63 der WL bei den regelmäßigen augenscheinlichen Kontrollen des Straßenbahnnetzes dokumentiert. Die zuständigen Streckenmanager entscheiden über die Maßnahmen die getroffen werden. Zum Schienenschleifen werden externe Firmen beauftragt.

1.5.3 Berichtigung von Gleislagefehlern

Gleislagefehler treten bei Straßenbahnstrecken lt. Abteilung B63 der WL generell selten auf. Einerseits ist die Gewichtsbelastung im Vergleich zur Vollbahn wesentlich geringer und andererseits ist die Entwässerung der Oberflächenwässer, die den Unterbau schaden könnten, meist sichergestellt. Weiters ist die Schienenseitenlage durch den regelmäßigen Zusammenhalt mit den Spurstangen sehr stabil. Meist führen Gleislagefehler bei Straßenbahnstrecken sinnvoller Weise zum generellen Gleistausch und im Bedarfsfall auch zur Unterbausanierung.

1.5.4 Gleistausch

Wenn die Sicherheitseingriffsschwelle eines Gleisabschnittes erreicht wird und keine weiteren Instandhaltungsmaßnahmen zur Verlängerung der Liegedauer mehr möglich sind, ist ein Gleisaustausch erforderlich. Aus technisch-wirtschaftlichen Überlegungen kann es auch sinnvoll sein, schon vor der technisch möglichen Gleislagedauer eine Erneuerung vorzunehmen. (33) Die Instandhaltungsstrategie hat großen Einfluss auf die Planung und Durchführung eines Gleistausches.

1.5.5 Eingriffsschwellen (5)

Hinsichtlich des Schienenverschleißes haben die WL ein Sicherheitssystem mit vier zustandsabhängigen Bereichen definiert. Diese Bereiche sind im Instandhaltungsplan (5) mit drei Eingriffsschwellen gemäß EN 13848-5 abgegrenzt (siehe Tab. 1.14). und mit befahrungsabhängigen Funktionen festgelegt Die Sicherheitseingriffsschwelle SES ist durch die von der Verkehrsbelastung unabhängigen Grenzwerte nach Tab. 1.11 definiert.

Bereich A Neuzustand	Bereich B	Bereich C	Bereich D
↓ AS	↓ ES	↓ SES	
Bezeichnung		Folgewirkung	
AS ...Aufmerksamkeitsschwelle		Aufnahme in das Präliminar	
ES ...Eingriffsschwelle		Aufnahme in das Bauprogramm	
SES ...Sicherheitseingriffsschwelle		Sperrung, Geschwindigkeitsbeschränkung (Gleistausch)	

Tab. 1.14: Aufmerksamkeits- Eingriffsschwellen bei Schienen (Eigendarstellung)

- AS – Aufmerksamkeitsschwelle

Diese beschreibt jenen Verschleißwert, ab dem ein Gleisabschnitt entweder im fünf Jahres-Plan (Präliminar) oder im drei Jahres-Plan für die schweißtechnische Reprofilierung vorgemerkt wird.

- ES – Eingriffsschwelle

Diese beschreibt jenen Verschleißwert, ab dem ein Gleisabschnitt im zwei Jahres-Plan aufgenommen wird. Die Grenze muss einen ausreichenden Abstand zur SES aufweisen, damit die verbleibende Zeit bis zur Durchführung ausreicht, um die SES nicht zu überschreiten. Die Art der Betriebsform, die Tätigkeitskoordination und Lieferfristen bestimmen die Zeit bis zur möglichen Durchführung und müssen berücksichtigt werden.

- SES – Sicherheitseingriffsschwelle

Diese beschreibt jenen Verschleißwert, ab dem entweder eine Geschwindigkeitsbeschränkung (Langsamfahrstelle) oder sogar eine Gleissperre angeordnet werden muss. Bei Überschreitung der SES kann der ordnungsgemäße und sichere Betrieb nicht mehr gewährleistet werden.

1.6 Gleisvermessung

1.6.1 Warum wird gemessen?

Die Notwendigkeit von Gleisvermessungen bei Straßenbahnen beruht in erster Linie auf der Gewährleistung des sicheren Eisenbahnbetriebes und Eisenbahnverkehrs. Eisenbahnunternehmen haben aufgrund von Gesetzen und Verordnungen die Pflicht wiederkehrende Prüfungen in vorgeschriebenen Intervallen durchzuführen, um die ständige Sicherheit garantieren zu können. Der rechtliche Rahmen hierfür beruht vor allem auf dem Eisenbahngesetz (EisbG) und der Straßenbahnverordnung (StrabVO). (9)

Gemäß EisebG gelten folgende Pflichten für Eisenbahnunternehmen:

Ein zum Bau und zum Betrieb von Eisenbahnen berechtigtes Eisenbahnunternehmen ist verpflichtet, die Eisenbahn einschließlich der zugehörigen Eisenbahnanlagen, Betriebsmittel und des sonstigen Zugehörigen unter Berücksichtigung der Sicherheit, der Ordnung und der Erfordernisse des Betriebes der Eisenbahn und des Verkehrs auf der Eisenbahn zu bauen, zu erhalten, zu ergänzen und nach Maßgabe der Rechtsvorschriften und entsprechend der nach diesem Bundesgesetz erforderlichen Konzessionen, Genehmigungen und Bewilligungen zu betreiben und hat diesbezüglich die notwendigen Vorkehrungen zu treffen. (§ 19 Abs 1 EisebG)

Eisenbahnunternehmen, die über kein zertifiziertes Sicherheitsmanagementsystem im Sinne des § 39c verfügen, haben durch Anstalten des Bundes oder eines Bundeslandes, akkreditierte Stellen oder benannte Stellen im Rahmen des fachlichen Umfangs ihrer Akkreditierung, Ziviltechniker, jeweils im Rahmen ihrer Befugnisse, Technische Büros-Ingenieurbüros im Rahmen ihrer Fachgebiete oder durch im Verzeichnis gemäß § 40 geführte Personen, jeweils im Rahmen ihres eisenbahntechnischen Fachgebietes, in einem Zeitraum von jeweils fünf Jahren regelmäßig wiederkehrend prüfen zu lassen, ob Eisenbahnanlagen, Betriebsmittel einschließlich der Schienenfahrzeuge und sonstiges Zugehörigen den Bestimmungen dieses Bundesgesetzes, den auf Grund dieses Bundesgesetzes erlassenen Verordnungen und den auf Grund dieses Bundesgesetzes eisenbahnrechtlichen Baugenehmigungs-, Bauartgenehmigungs- und Betriebsbewilligungsbescheiden noch entsprechen. Über jede wiederkehrende Prüfung ist eine der Behörde vorzulegende Prüfbescheinigung auszustellen, die insbesondere festgestellte Mängel und Vorschläge zu deren Behebung zu enthalten hat. (§ 19a Abs 1 EisebG)

§ 39. Ein Eisenbahnverkehrsunternehmen mit Sitz in Österreich und ein Eisenbahninfrastrukturunternehmen haben und sonstige Eisenbahnunternehmen können ein Sicherheitsmanagementsystem einzuführen, um vor Betriebsaufnahme sicherzustellen:

- 1. die Erreichung der gemeinsamen Sicherheitsziele;*
- 2. die Erfüllung der in Verordnungen nach § 19 festgelegten grundlegenden Anforderungen und der in den Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität festgelegten Sicherheitsanforderungen;*
- 3. die Anwendung der einschlägigen Teile der gemeinsamen Sicherheitsmethoden. (§ 39 EisebG)*

Die WL besitzen ein zertifiziertes Sicherheitsmanagementsystem (SMS) gemäß § 39 EisebG, womit der sichere Eisenbahnbetrieb und Eisenbahnverkehr jederzeit gewährleistet ist.

1.6.1.1 Operativer und strategischer Rahmen

Jede Gleisanlage unterliegt einer dynamischen Beanspruchung durch Kräfte aus der Verkehrsbelastung. Auf der operativen Seite ist es durch die Gleisvermessung möglich, Schienenschäden und Gleislageveränderungen frühzeitig zu erkennen und entsprechend zu reagieren. Dadurch kann einerseits die Betriebssicherheit stets gewährleistet und andererseits Instandhaltungs-, Instandsetzungs- und Wartungsmaßnahmen wirtschaftlich effizient geplant werden. Einen weiteren technisch-wirtschaftlichen Nutzen für ein Unternehmen bringen strategische Analysen der Gleismessdaten. Die Auswertungen können als Entscheidungsgrundlage für langfristige Investitionen, der Budgetplanung und der Ressourcenplanung dienen sowie zur Verbesserung von bestehenden Prozessen beitragen. Die Methodik des optimierten Anlagenmanagements ist in Kap.2.2 beschrieben.

1.6.2 Schienenmesssysteme allgemein

Neben augenscheinlichen Beobachtungen des Gleiszustandes können die Messsysteme zur Erfassung von Gleisparametern und Schienenfehlern nach Tab. 1.15 unterschieden werden.

	manuell	maschinell	mechanisch	optisch	IS	US	WST	TG
Rillenweite	x	x	x	x	-	-	-	-
Rillentiefe	x	x	x	x	-	-	-	-
Überhöhung	x	x	-	-	x	-	-	-
Krümmung	x	x	-	x	x	-	-	-
Verwindung	x	x	x	x	x	-	-	-
Längshöhenlage	x	x	-	x	x	-	-	-
Seitenlage	x	x	-	x	x	-	-	-
Weglänge	x	x	x	-	-	-	-	-
Stoßlücken	x			-	-	-	-	-
Oberflächen-schäden	x	x	x	x ^{*)}	x	-	-	-
Spannungszustand	-	-	-	-	-	x	-	-
Innere Schienenfehler	-	-	-	-	-	-	x	x
IS... Inertialsystem		WST... Wirbelstromtechnik						
US... Ultraschall		TG... Thermografie						
*) nur bedingt möglich								

Tab. 1.15: Überblick der Schienenmesssysteme (Eigendarstellung)

1.6.2.1 Manuelle Schienenmesssysteme

Darunter fallen Messgeräte, wie etwa Stahllineale, Schablonen, Messlehren („Spione“), Schiebelehren, Messkeile, Raumbedarfslehren, Distanzmesser, Wasserwagen, usw. mit welchen die Gleisparameter eruiert werden können. Diese Messgeräte sind heutzutage zum Großteil mit digitalen Messeinrichtungen ausgestattet. Es stehen zwar automatische maschinelle Messgeräte zur Verfügung, die über ein großes Einsatzgebiet verfügen, dennoch sind die traditionellen Messgeräte zur Verifizierung von Messdaten und für Messungen im Bauzustand nach wie vor im Einsatz. Durch die Möglichkeit der Computer unterstützten Datenausgabe und der digitalen Datenspeicherung entwickelten sich Messgeräte, die im Schritttempo händisch am Gleis entlanggeschoben werden und laufend Gleisparameter digital aufzeichnen.

1.6.2.2 Maschinelle Schienenmesssysteme

Maschinelle Messsysteme, welche aus eigener Kraft angetrieben sind, können automatisch mehrere Gleisparameter gleichzeitig erfassen und die Messdaten digital speichern. Um während der Vermessung reale Gleisbelastungen simulieren zu können, werden oft gewöhnliche Schienenfahrzeuge umgebaut und mit Messeinrichtungen adaptiert.

1.6.2.3 Mechanische Schienenmesssysteme

Bei diesen Messsystemen wird das Schienenprofil meist durch radial geführte oder lineare Abtastsysteme aus Rollen und Stiften erfasst und elektronisch abgespeichert. (1) Eine Weiterführung ist die Verwendung von Sonden auf Schlitten- oder Rollensystemen für

Wirbelstromprüfungen und der Detektion von z.B. Head Checks. Zum Großteil werden mechanische Schienenmesssysteme bei manuellen Messsystemen eingesetzt, können aber auch bei maschinellen Messsystemen verwendet werden. (34)

1.6.2.4 Optische Schienenmesssysteme

Diese Messsysteme zur Feststellung diverser Gleisparameter arbeiten berührungslos mit einer strukturierten Lichtquelle (Laserlichtband) und schnellem Bildauswertesystem mittels Videokameras oder mit Präzisions-Distanzmessern mit lasergestützter optischer Abtastung. (1) Die Detektion von inneren Schienenfehlern und -schäden ist mit diesen Systemen nur bedingt möglich.

1.6.2.5 Inertialsysteme

Ein Inertialsystem beschreibt ein Koordinatensystem eines geradlinig, mit konstanter Geschwindigkeit in Betrag und Richtung bewegten Körpers auf den keine eingepprägten Kräfte ($\vec{F} = 0$) wirken. Es kann als unbeschleunigtes System beschrieben werden, bei dem das Newton'sche Bewegungsgesetz (1.22) und das Galilei'sche Trägheitsgesetz (Newtons Lex prima) gelten. (35)

$$\frac{d}{dt} \left(m \frac{d\vec{r}}{dt} \right) = \vec{F} \quad (1.22)$$

Beschleunigungen einer fahrenden Messeinheit (z.B. Messwagen) erfolgen proportional zur anliegenden Kraft und werden über Akzeleratoren (Beschleunigungsaufnehmer) aufgezeichnet. Weiters erfassen Gyroskope (Laser-Lichtkreisel) minimalste Lageänderungen über den physikalischen Zusammenhang einer äußeren Kraft und der Präzession (Richtungsänderung der Achse eines rotierenden Körpers). Dadurch ist es möglich Krümmungen, Verwindungen, Neigungen und Oberflächenschäden zu erfassen. (35)

1.6.2.6 Ultraschall Messsysteme

Zur Gewährleistung der Sicherheit des Fahrbetriebs stellen auch die Spannungszustände des Gleises durch den Fahrbetrieb und durch Temperaturschwankungen einen wesentlichen Parameter dar. Mit dem Ultraschallverfahren wurde ein zerstörungsfreies Prüfverfahren entwickelt, um schnell einen Überblick über den Spannungszustand von Gleisen zu gewinnen. Unter Ausnutzung des akustoelastischen Effekts des Zusammenhangs zwischen der Spannung und Schallgeschwindigkeit in einem Werkstoff werden einzelne Messpunkte festgelegt und die Spannungen ausgewertet. (34)

1.6.2.7 Moderne Messsysteme

Durch den Einsatz von neueren Methoden, wie der Wirbelstromtechnik und der Thermographie, wurden Möglichkeiten geschaffen auch innere Fehler und Schäden an den Schienen, die sowohl ein Störpotential als auch ein Sicherheitsproblem darstellen, zu erkennen. (34)

Zwischen Messungen der Gleislageparameter (siehe Tab. 1.16) im unbelasteten Zustand des Gleises - mit z.B. Messgeräten mit geringer Masse - und Messungen der Gleislage im belasteten Zustand des Gleises mit einem Messwagen muss unterschieden werden. Die Elastizität des Oberbaus und der Schienen selbst führt zu unterschiedlichen Ergebnissen der Gleislageparameter, die für eine seriöse Auswertung nicht vergleichbar sind. Durch die Entwicklung von Messwagenfahrzeugen ist es somit zu einem Paradigmenwechsel gekommen, mit dem es umzugehen heißt.

1.6.3 Messung von Gleisparametern und Fahrflächenschäden

1.6.3.1 Übersicht

		Messsystem Messwagen siehe 1.6.4	Messsystem Messreg ^{CDM} siehe 1.6.5	Messsystem Calipri siehe 1.6.6	Messlehren siehe 1.6.7	Sonstige
Profil	FKV _{hor.}	x	-	x	x	-
	Rillenweite	-	x	x	x	-
	LKV _{hor.}	-	-	x	x	-
	FKV _{vert.}	x	x	x	x	-
	Rillentiefe	x	x	x	x	-
Gleislage	Spurweite	x	x	-	x	-
	Überhöhung	x	x	-	x	-
	Krümmung	x	-	-	-	siehe 1.6.3.2
	Verwindung	x	x	-	-	-
	Längshöhenlage	x	-	-	-	-
	Seitenlage	x	-	-	-	-
	Weglänge	x	x	-	x	-
Stoßlücken	-	-	-	-	siehe 1.6.3.3	
Oberflächenschäden	-	-	-	-	siehe 1.6.3.4	
FKV... Fahrkopferschleiß		LKV... Leitkopferschleiß				

Tab. 1.16: Überblick der Messungen von Gleisparametern und Fahrflächenschäden (Eigendarstellung)

1.6.3.2 Krümmung

Der Radius R und die Krümmung K des Gleiskörpers können mit sogenannten Pfeilhöhenverfahren bestimmt werden, welche die Basis für sowohl ältere manuelle Messsysteme, als auch für moderne Messsysteme darstellen. (1)

Die Pfeilhöhe h_f (auch Stichhöhe oder Stich bezeichnet) beschreibt den lotrechten Abstand zwischen einer Bogensehne und dem Scheitelpunkt eines Bogens.

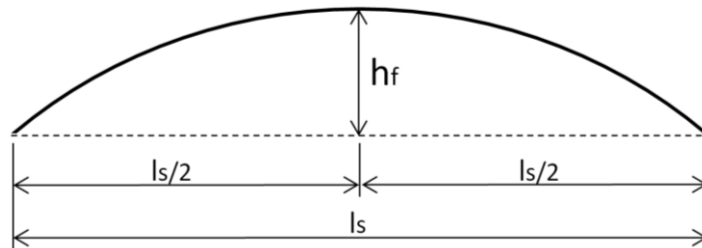


Abb. 1.27: Symmetrische Pfeilhöhe (Eigendarstellung)

1.6.3.2.1 Wandersehnenverfahren

Mit dieser bekannten Methode kann die Pfeilhöhe als ein Maß der Krümmung einer Schiene gemessen werden. Dabei wird eine 10 oder 20 m lange Stahlsehne an die Bogenaußenschiene angelegt und gespannt. Nach der Messung der Pfeilhöhe wird die Sehne um die halbe Sehnenlänge versetzt angelegt und abermals die Pfeilhöhe gemessen. Nach Wiederholung dieser Schritte über die gesamte Bogenlänge kann die IST- Lage des Gleisbogens berechnet und graphisch dargestellt werden. (1)

1.6.3.2.2 Winkelbildverfahren (10)

Dieses auch als Nalenz-Höfer-Verfahren bekannte und 1941 von Prof. Schramm weiterentwickelte graphische Verfahren wird zur Kreisbogenabsteckung, zur Überprüfung der Krümmung eines Gleises oder zur Korrektur eines nicht mehr lagerichtigen Gleises eingesetzt. (1) Das Winkelbildverfahren in seiner ursprünglichen Anwendung ist zwar ein rein graphisches Verfahren, wird aber auch heute noch, zumindest für eine visuelle Kontrolle, angewandt.

Es gilt für den Kreisbogen:

$$K = \frac{1}{R} = \text{const} \quad (1.23)$$

Und für den Übergangsbogen :

$$K = \frac{1}{R} = \frac{l_B}{C_K} \neq \text{const} \quad (1.24)$$

l_B ... Bogenlänge

C_K ... Konstante für den Übergangsbogen

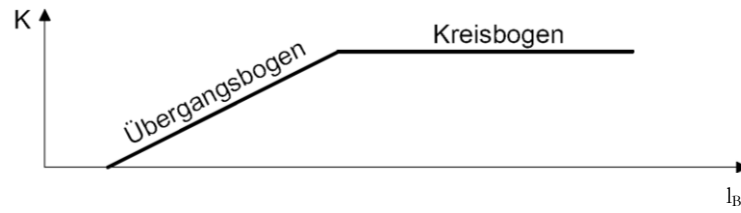


Abb. 1.28: Krümmungsbild (10)

Nun werden einzelne Abschnitte ΔL_i des Bogens hinsichtlich ihrer Krümmung analysiert, wobei sich im fehlerfreien Fall ein Krümmungsbild nach Abb. 1.28 ergibt.

Für die abschnittsweise Darstellung eines Kreisbogens im Lageplan sowie im Krümmungsbild gilt:

$$\frac{\Delta L}{R} = \Delta\alpha = K \cdot \Delta L \quad (1.25)$$

$$\alpha_0 = \sum \Delta\alpha \quad (1.26)$$

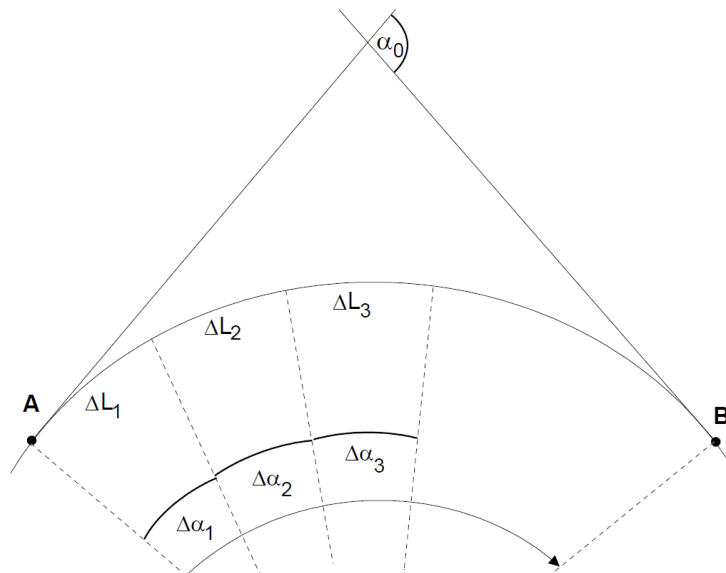


Abb. 1.29: Kreisbogen im Lageplan (10)

Die graphische Darstellung der Bogenabschnitte ΔL_i im Krümmungsbild liefert Abb. 1.30.

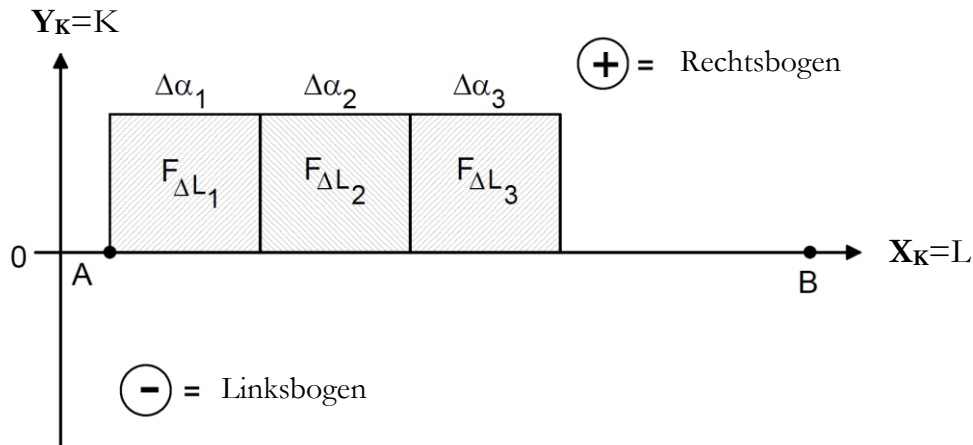


Abb. 1.30: Bogenabschnitte im Krümmungsbild (10)

Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass hier aus Gründen der einfacheren Lesbarkeit auf die Einführung von Maßstabsfaktoren für die graphische Darstellung verzichtet wird.

Die schraffierten Teilflächen $F_{\Delta L_i}$ aus der Krümmung und Länge eines Bogenabschnittes ΔL_i in Abb. 1.30 sind ein Maß für die Winkeländerung $\Delta\alpha_i$ bzw. für die Richtungsänderung der Tangenten zwischen dem Anfang und dem Ende eines Bogenabschnittes ΔL_i . Die Teilflächen $F_{\Delta L_i}$ können nun über den gesamten Bogen (A-B) aufsummiert werden und liefern die Gesamtfläche F_{Bogen} , welche im Krümmungsbild dem Tangentschnittwinkel α_0 eines Kreisbogens entspricht.

$$F_{Bogen} = \sum F_{\Delta L_i} = \sum \Delta\alpha_i = \alpha_0 \quad (1.27)$$

Um das Winkelbild des Kreisbogens zu erhalten, wird die Gesamtfläche F_{Bogen} als Funktion der X_K -Werte (Bogenlänge) aufgetragen bzw. integriert. Für einen Rechtsbogen werden die Y-Werte des Winkelbilds nach unten und für einen Linksbogen nach oben abgetragen.

Es gilt:

$$Y_w = \sum F_{\Delta L_i} \quad \text{bzw.} \quad Y_w = \int Y_K \cdot dX = \int f(K_x) \cdot dX \quad (1.28)$$

Für den kontinuierlichen Fall lässt sich die differentielle Fläche dY_w schreiben als:

$$dY_w = dF_i = d\alpha = Y_K \cdot dX \quad (1.29)$$

Wobei gilt:

$$dX = dL = R \cdot d\alpha \quad (1.30)$$

Für die Steigung der Kurve im Winkelbild und den Endwert Y_e (Bogenende) gilt:

$$\tan \gamma = \frac{dY_w}{dX} = \frac{d\alpha}{dL} = \frac{1}{R} = K \quad (1.31)$$

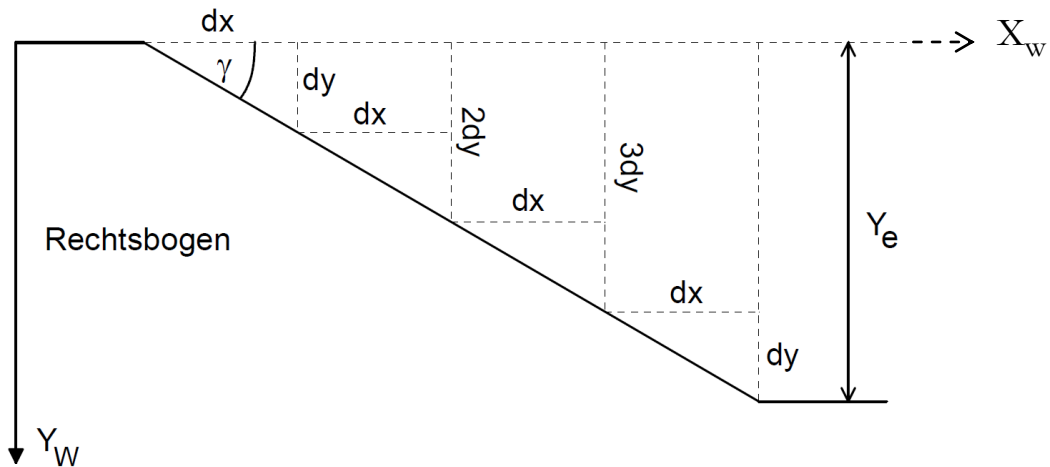


Abb. 1.31: Winkelbild eines Kreisbogens (10)

Im Winkelbild stellt ein kontinuierlicher Kreisbogen eine Gerade dar, deren Steigung ($\tan \gamma$) von der Krümmung K abhängt.

1.6.3.2.3 Maschinelle Messung

Die maschinelle Messung der Krümmung (z.B. Gleismesswagen) erfolgt über die Kombination eines Kreismesssystems und der Fahrgeschwindigkeit. Die Messwerte werden als Pfeilhöhen ausgegeben. (siehe Kap. 1.6.4) (13)

1.6.3.2.4 Die Übertragungsfunktion des Pfeilhöhenmesssystems (1)

Moderne Pfeilhöhenmesssysteme sind zum einen linear und ortsvariant und weisen zum anderen die spezifische Eigenschaft auf, bei periodischen Gleislagefehlern ihrerseits periodische Signale der gleichen Frequenz, aber unterschiedlicher Amplitude und Phasenlänge zu erzeugen. Im Konkreten heißt das, dass bei einer Messung mit einer asymmetrischen 15 m-Sehne mit einem Teilungsverhältnis von 1:2 ein langwelliger Fehler mit 70 m Wellenlänge und einer maximalen Amplitude von 10 mm nur mehr folgend zu sehen ist:

- Amplitude 3,5 m
- Phasenverschiebung $8,5^\circ$ bzw.
- scheinbare Verschiebung des Maximums um 1,6 m

Durch die sogenannte Übertragungsfunktion des Pfeilhöhenmesssystems kann dieses Verhalten mathematisch beschrieben werden.

Für eine symmetrische Sehnenteilung (1:1) vereinfacht sich diese Übertragungsfunktion und weist keine Phasenverschiebung auf. Allerdings hat sie Nullstellen und Bereiche in denen sie die doppelte Verstärkung aufweist, wodurch ein Fehler entweder gar nicht oder doppelt gemessen wird.

Die Nullstellen der Übertragungsfunktion der symmetrischen Sehne mit der Länge l_s sind:

$$\lambda = \frac{l_s}{2n} \quad \text{mit} \quad n \in \mathbb{N} = \{1; 2; 3; \dots\} \quad (1.32)$$

Die Verstärkungen des Systems um den Faktor zwei treten auf bei:

$$\lambda = \frac{l_s}{2n + 1} \quad \text{mit} \quad n \in \mathbb{N} = \{1; 2; 3; \dots\} \quad (1.33)$$

1.6.3.3 Stoßlücken

Die Stoßlücke zwischen zwei Schienenenden wird mittels Stoßlückenkeil, welcher meist aus Stahl oder Aluminium gefertigt ist, ermittelt. Die Messungen befinden sich hierbei im Millimeterbereich und werden mit Hilfe eines Messschiebers abgenommen. Auf Grund der Ausführung von lückenlosen Gleisen (verschweißt) werden Stoßlückenkeile nur mehr selten verwendet.

1.6.3.4 Oberflächenschäden (1)

1.6.3.4.1 Manuelle Riffelmessung

Die manuelle Riffelmessung wird entweder mittels analoger oder digitaler Schienenoberflächenmessgeräten durchgeführt. Hierbei wird ein Aluminiumkasten, welcher in seinem Inneren einen Messwagen besitzt, auf die Schiene aufgesetzt. Dieser analoge Messwagen wird dann mit Hilfe einer Handkurbel über eine Länge von 1200 mm bewegt. Durch diese Bewegung schlittert der Messwagen über die Oberfläche der Schiene und die Unebenheiten werden über ein Hebelsystem wegababhängig auf ein gewachstes Millimeterpapier übertragen. (Längen-Maßstab 1:10 und Höhen-Maßstab 1:30) Ein Messvorgang dauert hierbei ca. 15 Sekunden.

Die digitale Ausführung dieses Riffelmessgerätes besitzt weder einen mechanischen Schreibwagen, noch Papier zum Aufzeichnen. Ein Vorteil dieser Ausführungsvariante ist die Unempfindlichkeit gegenüber Witterungseinflüssen, da sämtliche Messdaten in digitaler Form vorliegen. Beide Systeme können neben der Riffel und Wellenbildung auch Schweißstöße in geeigneter Form darstellen.

1.6.3.4.2 Inertiale Riffelmessung

Inertiale Messsysteme sind im Stande Riffel und Oberflächenschäden von Schienen form- und wellenlängengetreu darzustellen. Die Messgeschwindigkeit bei diesem System beträgt zwischen 15-20 km/h, die Abtastung selbst erfolgt lasergestützt optisch. Dieses Riffelmessgerät enthält eine servogesteuerte Querverstellung, welche den Laser in Position hält, einen digitalen Wegmesser und einen hoch auflösenden Farbmonitor. Der Vorteil gegenüber der manuellen Riffelmessung ist vor allem die elektronische Datenaufnahme und Formtreue der Riffel. Weiters besteht die Möglichkeit einer LAN-Verbindung zu einem Server, womit vorgefilterte Effektivwerte (RMS-Werte) in vier Wellenlängenbereichen übermittelt werden können.

Bezeichnung	RMS-Basis	Grenzwellenlänge Bandpassfilter
Riffel	0,6 m	1-3 cm
Kurze Wellen	0,6 m	3-10 cm
Mittlere Wellen	1 m	10-30 cm
Lange Wellen	5 m	30-100 cm

Tab. 1.17: RMS-Basis und Grenzwellenlängenangaben (1)

Die lasergestützte optische Abtastung befindet sich zwischen den Rädern eines Drehgestells jeweils über Schienenmitte. Das Drehgestell dient als ruhende Bezugsbasis und schwingt mit Frequenzen von 2-3 Hz. Die Frequenzen der zu messenden Riffel und Wellen, befinden sich in Bereichen zwischen 5-200 Hz, wodurch eine klare Abgrenzung zur Frequenz der Schwingungen des Drehgestells möglich ist. Diese Abgrenzung wird durch Bandpassfilter, welche Durchlass- und Sperrfrequenzen besitzen, ermöglicht. So werden nur Messsignale, die von Interesse sind, durchgelassen und Effektivwerte gebildet. Diese werden wiederum quadriert, um auch negative Wellenanteile abbilden zu können. Die Datenaufzeichnung der Messergebnisse erfolgt mittels Festplatte während der Messfahrt. Die Auflösung der Ergebnisse liegt bei 10 µm.

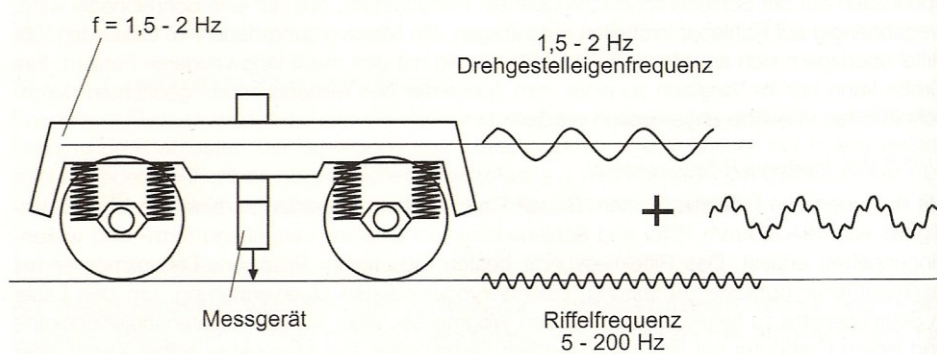


Abb. 1.32: Prinzip einer inertialen Riffelmessung (1)

1.6.3.4.3 Riffelmessung auf Pfeilhöhenbasis

Diese Art der Messung basiert auf einer Drei-Punkt Abtastung, welche weder die Amplitude noch die Phase der Riffel exakt aufnehmen kann. Hierbei sind Messtaster, ausgeführt durch eine Vielzahl an Laufrollen, in direktem Kontakt mit der Schienenoberfläche und messen in Verbindung mit einer Wegesensorik die Schienenoberfläche. Die Wangen auf der rechten und linken Seite des Messtasters simulieren hierbei ein rollendes Lineal. Zwischen diesen beiden Wangen befindet sich der mechanische Messtaster, welcher die Wellenbewegungen der Ebene aufnimmt und diese in einem x-y Koordinatensystem auswirft. Die Datenerfassung mittels Messtaster erfolgt kontinuierlich und wird zur Speicherung in digitaler Form an ein Notebook weitergegeben. Die Datenverwertung bzw. Analyse kann ab Messende durchgeführt und graphisch dargestellt werden.

1.6.3.4.4 Riffelmessung auf Basis von Beschleunigungsmessungen

Bei älteren Messsystemen werden Riffel bzw. Schlupfwellen mittels Beschleunigungsmessungen erfasst, wobei Messtaster über die Schienenoberfläche gezogen werden. Diese Messergebnisse werden zweimal integriert, um die Oberflächenschäden zu erhalten. Nachteil dieses Messsystems ist die unbekannt Verhaltenweise des Schleifers zum jeweiligen Oberflächenschaden, wodurch dieses System nur als Richtwert für etwaige Fehler dient.

1.6.4 Messsystem Gleismesswagen E6117

1.6.4.1 Einführung

Die WL verfügen zurzeit über zwei Gleismesswagen mit verschiedenen Einsatzbereichen. Für die laufenden Gleisvermessungen im Bereich der U-Bahn wurde ab 1985 ein Fahrzeug der Firma Plasser & Theurer auf Basis eines mechanischen Messsystems mit Datenplot auf Papierstreifen eingesetzt. 2003 wurde dieser vom neuen laserbasierten Messwagen „UGM1“, welcher in Kooperation WL mit der ungarischen Firma MAV entwickelt und gebaut wurde, abgelöst.

Im Bereich der Straßenbahn wird erst seit 2003 ein Gleismesswagen (E6117) verwendet, da die Vermessung der Rillenschienen durch andere Rahmenbedingungen eine Besonderheit darstellen, die zu zusätzlichen Herausforderungen führen. Zum einen werden Straßenbahnen überwiegend auf Rillenschienen und nicht wie im U-Bahnbereich auf Vignolschienen geführt. Aber nicht nur das Schienenprofil, sondern auch der niveaulose Einbau der Schiene mit der umliegenden Fahrbahnfläche führte dazu, dass das U-Bahn Messsystem für die Straßenbahn adaptiert werden musste. Weiters ist die Durchführung der Messfahrten bei der U-Bahn im Untergrund und auf eigenem Gleiskörper nicht mit jenem bei der Straßenbahn an der Oberfläche vergleichbar. Die gemeinsame Benützung des Straßenbahngleiskörpers als Fahrfläche für andere Verkehrssysteme und Verkehrsteilnehmer sowie der sichere Umgang mit einem Lasersystem auf öffentlichen Straßen erschweren die Messfahrten zusätzlich.

Da der Schwerpunkt dieser Arbeit beim Rillenschienensystem liegt, wird vorwiegend auf deren Vermessung im Straßenbahnnetz mit dem Gleismesswagen E6117 eingegangen.

Für die periodische Erfassung des Gleislage- und Schienenprofilzustandes am Netz der Straßenbahn wurde, wie oben erwähnt, 2003 ein 38 Jahre altes Regelfahrzeug der Type E₁ (Fa. DUEWAG) in den Werkstätten der WL zum Sonderfahrzeug umgebaut. Die Vermessung erfolgt seither mit einem laserbasierten Messsystem der nordamerikanischen Firma „Mermec Inc.“ (ehem. „ImageMap Inc.“), welches speziell für den Einsatz bei Rillenschienen entwickelt wurde. (siehe Kap. 1.6.4.3.3) (6)

Das Fahrzeug mit einer Achslast von ca. 5500 kg im quasi unbesetzten Zustand liefert Messwerte des belasteten Gleises, das mit der Belastung im Regelbetrieb vergleichbar ist. Der direkte Datenvergleich mit manuellen Messsystemen am unbelasteten Gleis ist jedoch nicht bei allen Gleisparametern sinnvoll.

Die zuständigen Abteilung B63 und F5 der WL sind beauftragt jeden Streckenteil im gesamten ca. 422 km langen Straßenbahnnetz im Jahr mindestens vier Mal zu vermessen. Bei Streckenteilen, die aus logistischen Gründen häufiger befahren werden, gibt es entsprechend mehr Messdatenaufzeichnungen.

Im Rahmen von Projekten mit Partnern aus der Forschung und Industrie werden auch zusätzliche Messungen und Messzyklen durchgeführt.



Abb. 1.33: Gleismesswagen E6117 für den Straßenbahnbereich (Bild. H.H. Heider)

1.6.4.2 Erfassbare Gleisparameter

Sensoren des Messsystems vom Gleismesswagen E6117 zeichnen Weg, Zeit, Beschleunigung, Rotation und die Profilgeometrie auf. Mit unterschiedlichen Messkanälen werden folgende Gleisparametergrößen erfasst. (36)

- Gleislage
 - Spurweite (gauge)
 - Überhöhung (superelevation)
 - Krümmung
 - Verwindung (twist)
 - Höhenlage, ausgegeben als vertikale Pfeilhöhe (surf)
 - Seitenlage, ausgegeben als horizontale Pfeilhöhe (align)
- Schienenprofil
 - Fahrkopfseitenverschleiß (gauge wear)
 - Rillenweite
 - Fahrkopfhöhenverschleiß (vertical wear)
 - Rillentiefe
 - Rillenquerprofil

Werte zur Rillenweite und das graphische Rillenquerprofil stehen zum Zeitpunkt dieser Arbeit nicht zur Verfügung.

1.6.4.3 Funktionsweise

1.6.4.3.1 Geschwindigkeitsmessung

Für die Ableitung der Gleisparametergrößen über die unterschiedlichen Messwerte zur Überprüfung der Messgenauigkeit sowie der Wiederhol- bzw. Reproduzierbarkeit ist die Kenntnis der Momentangeschwindigkeit während des Messvorganges sehr wichtig. Am Gleismesswagen erfolgt dies auf Basis eines Odometers zur Wegaufnahme (Genauigkeit ca. 5 ‰) und der Umdrehungsgeschwindigkeit eines Rades. (6)

1.6.4.3.2 Gleislagemessung (6; 7; 36)

Für eine spätere Verortung und Zuordnung zu Trassierungselementen der Messdaten ist es notwendig den genauen Fahrweg in Lage und Höhe aufzuzeichnen. Dies erfolgt mit einem Inertialsystem (siehe Kap. 1.6.2.5) bestehend aus:

- 2 Akzeleratoren (Beschleunigungsaufnehmer; lateral und vertikal)
- 2 Gyroskope (Laser-Lichtkreisel; Wanken und Gieren)
- Odometer (Wegaufnehmer)

Mit den Aufzeichnungen der oben genannten Messeinheit im Inertialsystem kann über ein Integrationsverfahren die gesamte Fahrt des Messwagens rekonstruiert und graphisch in Form eines Krümmungsbildes (siehe Kap. 1.6.3.2) mit einem relativen Startpunkt ausgegeben werden. (6)

- Spurweite (gauge)

Die Spurweite wird über das optische Laser-Messsystem (siehe Kap. 1.6.4.3.3) als Koordinatendifferenz der 10 mm unter der GFT liegenden Spurpunkte der Rillenschienen mit einer Genauigkeit von 0,2 mm ermittelt.

- Überhöhung (superelevation)

Das Kreiselssystem in Kombination mit dem Wegaufnehmer liefert die Überhöhung des Fahrwegs. Die Genauigkeit beträgt 0,2 mm.

- Krümmung

Mit Hilfe des Kreiselmesssystems und der Fahrgeschwindigkeit des Messwagens wird die Krümmung des Gleises erfasst. (siehe Kap. 1.6.3.2)

- Verwindung

Die Überhöhung bezogen auf eine bestimmte Basis und Weglänge liefert die Verwindung.

- Höhenlage (surf)

Die Höhenlage der beiden Schienen (auch Längshöhe bezeichnet) wird mit Hilfe der Beschleunigungsaufnehmer erfasst und über vertikale Pfeilhöhen mit 5 m und 10 m Sehnen ausgegeben.

- Seitenlage (align)

Mit Hilfe der Beschleunigungsaufnehmer und der Anteile der Spurmessung für die rechte bzw. linke Schiene, wird die horizontale Richtungsabweichung erfasst und als horizontale Pfeilhöhe je Schiene ausgegeben. Es wird keine direkte Pfeilhöhe, sondern die Krümmung der erfassten Raumkurve gemessen, welche in die Anteile Querfehler und Längenfehler zerlegt wird. Danach erfolgt eine Umrechnung in Pfeilhöhen mit einer Sehne von 10 m.

Die gemessenen Pfeilhöhen können über die sogenannten Tiefpassfilter automatisch in Bezug zur geglätteten geometrischen SOLL-Lage gebracht werden. Somit ist es möglich die Messwerte nur als resultierenden Lagefehler mit einer Genauigkeit von 0,5 mm auszugeben.

Für die Messeinheit ist es erforderlich, dass die Trägheitskräfte überwunden werden, um brauchbare Messwerte zu liefern. Aus diesem Grund ist mit dem Messwagen eine Mindestfahrgeschwindigkeit von 8 km/h notwendig, damit Krümmung und Höhenlage (über horizontale und vertikale Pfeilhöhen) sowie die Verwindung gemessen werden können. Die Messungen der Spurweite, Überhöhung und der Schienenprofilparameter sind von der Fahrgeschwindigkeit unabhängig. (6)

1.6.4.3.3 Schienenprofilmessung

Die Profilvermessung der Rillenschienen erfolgt mit einer eigenen Messeinheit am Messwagen über das sogenannte Lichtschnittverfahren.

Das Messprinzip dieser optischen Formerfassung beruht auf der Kombination von einem gefächerten Lichtstrahl – meist mittels Laser – und einer Kamera. Der Lichtstrahl wird unter einem bekannten Winkel auf das Messobjekt projiziert und das reflektierende Licht auf einem positionsempfindlichen Detektor (Kamera) abgebildet. Dieses unter Triangulation bekannte Prinzip ist in Abb. 1.34 schematisch dargestellt. Im einfachsten Fall wird ein Lichtpunkt auf das Messobjekt projiziert, wobei mit zunehmendem Triangulationswinkel γ zwischen Laser und Kamera die Messgenauigkeit steigt. Es bedarf jedoch einer Kompromisslösung, da bei einem zu großen Winkel γ größere Objektbereiche an steilen Kanten abgeschattet werden können. Es herrscht also ein strikter Zusammenhang zwischen Messauflösung bzw. Messunsicherheit und dem Beobachtungswinkel, wobei die üblichen Winkel zwischen $24^\circ \leq \gamma \leq 45^\circ$ liegen. Mit bekannter Basislänge b und den ebenfalls bekannten Winkeln α und β (siehe Abb. 1.34) kann die unbekannte Objektkoordinate innerhalb eines Dreiecks bestimmt werden. Wird nun statt eines Laserpunktes eine linienförmige Hell-Dunkel-Grenze auf das Messobjekt projiziert, können aus einer Bildaufnahme alle auf der Lichtebene liegenden Objektkoordinaten berechnet werden.

Zur Digitalisierung der gesamten Kontur eines Messobjektes wird im Falle der Gleisvermessung die Sensoranordnung entlang der Schiene bewegt, wodurch sehr hohe Anforderungen an die Positioniergenauigkeit der verwendeten Bewegungsachsen gestellt werden, weil alle mechanischen Fehler direkt in die Messergebnisse eingehen. (37)

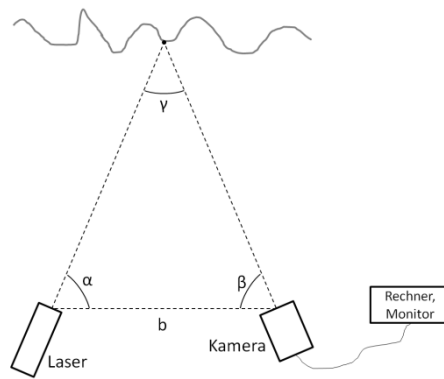


Abb. 1.34: Prinzip der Triangulation (37)

Am Gleismesswagen der WL sind speziell für den Sonderfall Rillenschiene im vorderen Bereich des Jacobs-Drehgestells auf einem Balken je Gleis drei Laser-Kamera-Einheiten eingerichtet. Die Vermessung von Vignolschienen erfolgt auf Grund der einfacheren Schienenkopfgeometrie mit nur zwei Laser-Kamera-Einheiten je Schiene. (6)

Der Einsatz von drei Lasern mit drei Kameras für ein Messobjekt (eine Schiene) ist eine Erweiterung des Lichtschnittmesssystems zur genaueren Erfassung des Rillenprofils. Die Zuordnung der Lichtebenen zur richtigen Kamera erfolgt am Gleismesswagen über unterschiedliche Wellenlängen der Laser und entsprechende Bandpassfilter der Kameras. (37; 36)

Die Laser sind mit einem Winkelversatz von jeweils 50 gon angeordnet und in 350/0/50 gon ausgerichtet. Sie strahlen aus praktischen Überlegungen und sicherheitstechnischen Gründen nicht punktförmig gebündelt auf die Schiene, sondern unter einem Winkel von 40 Grad, sodass eine 2 mm hohe Rechteckfläche auftrifft. Mit den hochempfindlichen Zeilenkameras (80Hz,...) werden die Umrissbilder der Laserstrahlen aufgenommen und die Daten an die Geometrieinheit im Wageninneren weitergeleitet. Dort wandeln Graphikprozessoren das Bild in ein zweidimensionales Koordinatenbild um und transformieren die ca. 800 Bildpunkte mittels algorithmischer Glättung in einen stetigen Graphen. (6)

Da bei Rillenschienen auf Grund des meist ebenerdigen Einbaus in die Verkehrsoberfläche der theoretische Mittelpunkt der Ausrundungskreise beim Übergang vom Fuß auf den Steg der Schiene als stets unverschlossener Bezugspunkt nicht herangezogen werden kann, entwickelten die WL in Kooperation mit der Firma „Mermec Inc.“ (ehem. „ImageMap Inc.“) ein völlig neues Verfahren. Dabei wird auf die unverschlossenen Teile des Leitkopfes der Rillenschiene zurückgegriffen. Unter Annahme, dass die bekannten und zufällig verteilten Fertigungstoleranzen nicht berücksichtigt werden müssen, eignen sich diese ebenfalls als Bezugsobjekte für die Vermessung. (6)

Messunsicherheiten stellen beim Lichtschnittverfahren auf Basis der Triangulation ein zentrales Thema dar und werden vor allem durch die Blendöffnung der Kamera, die Oberflächentextur der Schiene und den Triangulationswinkel beeinflusst. Durch einen großen Triangulationswinkel können Messunsicherheiten zwar verringert werden, aber die Gefahr von Abschattungen an steilen Kanten steigt an. Besonders kritisch sind Schienenkopfoberflächen die spiegeln oder feine Rillen aufweisen. In beiden Fällen kann es zu unterschiedlichen Dynamiken in der Bildhelligkeit und dadurch zu Messfehlern kommen. (37)

1.6.4.4 Die Messdaten

Inertialmessungen und Lichtschnitt werden in der Geometrieinheit kombiniert und der sogenannte Spurpunkt 10 mm unter der GFT der Schienen ermittelt. Neben der Profilerfassung wird zum einen die Spurweite über die Koordinatendifferenz der Spurpunkte ermittelt und zum anderen die Fahrt des Wagens als dreidimensionale Raumkurve verfolgt. Geschwindigkeit und Gleislagewerte werden momentan alle 25 cm erfasst und abgespeichert. Das Schienenprofil wird mit rund 800 Punkten alle 50 cm abgespeichert. (6)

1.6.4.5 Die Rechnereinheit

Im Inneren des Messfahrzeuges sind zwei Rechnergruppen zur Datenanalyse, -umwandlung und -speicherung mit folgenden Systemen installiert:

- Geometrieinheit (VME)
- Bildprozessoren zur Bildumwandlung
- Client-Server Architektur (IBM Server, Intel PC) auf TCP/IP oder MS-Network Basis

Die unbearbeitete Darstellung der Kamerabilder erfolgt auf einem Zeilenmonitor. Auf einem weiteren Monitor werden laufend die Messwerte in Form eines Messschriebs angezeigt. Der Systembediener hat die Möglichkeit einzelne Werte gesondert zu betrachten, Darstellungsmaßstäbe und die Anzahl der Kanäle zu wählen oder einzelne Werte im Detail auszugeben. Optional können die Daten sofort über einen Plotter ausgedruckt oder als Text-File exportiert werden. Eine laufende augenscheinliche Kontrolle des Schienenzustandes ist möglich. (6)

1.6.4.6 Die Verortung

Grundsätzlich könnte das System mit bestehenden GPS-Systemen verbunden und die jeweiligen Koordinaten der Messwerte interpoliert werden. Doch auch unter Verwendung des DGPS (Differential Global Positioning System) sowie ortsfester Ausgleichsstationen zur Korrektur der Laufzeitunterschiede und Erhöhung der Ortungsgenauigkeit ist die Verortung auf GPS-Basis im urbanen Verbauungsgebiet bzw. unter der Oberfläche nicht möglich. (6)

Eine weitere Überlegung war der Einsatz von Signalgebern und Marker wie z.B. Induktionsschleifen zur Verortung der Messdaten, jedoch würde es hier zu hohen Errichtungs- und Wartungskosten kommen. Die Orientierung an der bestehenden Infrastruktur wie z.B. Weichen würde einerseits zu einer aufwändigen Sensorik führen und andererseits zu wenige Referenzpunkte liefern. (11)

Aus diesen Gründen entschlossen sich die WL die Verortung der Messdaten des Gleismesswagens E6117 ausschließlich automatisiert über ein krümmungsbasiertes Verfahren, das den Anforderungen der Gleisverortung gerecht wird, vorzunehmen.

Gemeinsam mit den damaligen ARC (AIT) wurde ein Verfahren unter dem Akronym „CUBAL“ entwickelt, das

- eine hinreichende Genauigkeit für diverse Auswertungen bietet,
- multimodal einsetzbar ist (für Straßenbahn und U-Bahn),
- keine zusätzliche Messwagensensorik benötigt,
- keine Investitionen in der Streckeninfrastruktur erfordert,
- wartungsfrei ist,
- skriptfähig vollautomatisch arbeitet,
- Messprotokolle nachträglich auswerten kann und
- auch für die Vermessung von Fremdnetzen verwendet werden könnte.

Das eingesetzte Verortungsverfahren beruht auf dem vom Messwagen aufgezeichneten Krümmungsbild, das als eine Art „Fingerabdruck“ einer Strecke bezeichnet werden kann. Die gefahrene Route wird vorerst als unbekannt vorausgesetzt und CUBAL sucht charakteristische Teilstrecken des Netzwerkplanes in den Messdaten. Die Teilstreckenidentifikation (*LUMP = longest unique matching path*) erfolgt in folgenden Schritten: (11)

- Auswahl geeigneter Startpunkte mit starker Krümmungscharakteristik
- Erzeugung möglicher Streckenverläufe durch bidirektionale rekursive Suche
- Teilstreckenauswahl (path selection), wobei bei mehreren Möglichkeiten der jeweils längste Teilpfad weiterverfolgt wird

Danach folgt eine Aggregation der Teilstrecken mit einer Plausibilitätsprüfung. Für die Zuordnung und dem Fitting der Messdaten zu den Streckenteilen wurde vom AIT ein Korrelationsverfahren auf den Prinzipien der Quanteninformationslogarithmik entwickelt, das speziell auf die Anforderungen der krümmungsbasierten Verortung zugeschnitten ist. (11)

Die hohe Präzision beim Fitting wird dadurch erreicht, dass kumulierte Ungenauigkeiten aus der Wegaufnahme bei jedem Krümmungswechsel wieder ausgeglichen werden. (6)

Die GPS-unabhängigen Referenzdaten für CUBAL sind die Abfolge der einzelnen Trassierungselemente und deren Parameter Länge, Radius und Öffnungswinkel. Im sogenannten Net-Format (NetFiles, siehe Kap. 1.6.4.7.5) werden die Trassierungselemente des Schienennetzes für Mensch und Maschine zeilenorientiert lesbar beschrieben. Die Abbildung des Netzes als gerichteter Doppelknotengraph, bei dem jeder Knoten orientiert und eine „Vorder“- und „Rückseite“ aufweist (Doppelknotenmodell), erlaubt die korrekte Abbildung von Weichen. (11)

Die Annäherung der Trassierung durch Geraden, Übergangsbögen und Kreisbögen zur Netzaufnahme kann zu Diskretisierungsfehlern führen. Weiters werden zur Visualisierung Ortskoordinaten benötigt und geometrische Randbedingungen wie z.B. geschlossene Schleifen, müssen erfüllt werden. Jedoch sind im Krümmungsbild des Messwagens Lage und Richtung undefiniert und es besteht die Gefahr, dass sich Messfehler im Ortsraum quadratisch aufschaukeln. (11)

Mit Hilfe einer Integration des Krümmungsbildes mit den Substituten

$$dx = \cos \varphi(s) ds \quad \text{und} \quad dy = \sin \varphi(s) ds \quad (1.34)$$

errechnen sich die Fresnel-Integrale

$$x(s) = x_0 + \int_0^s \cos \varphi(t) dt \quad (1.35)$$

$$y(s) = y_0 + \int_0^s \sin \varphi(t) dt \quad (1.36)$$

mit

$$\varphi(s) = \varphi_0 + \int_0^s K(t) dt \quad (1.37)$$

woraus der Anfangspunkt mit den Integrationskonstanten x_0 und y_0 sowie die Anfangsorientierung mit φ_0 festgelegt ist. (11)

Für die Netzaufnahme wird zu Beginn das Netz in mehreren überlappenden Routen befahren. Die Weichenerkennung erfolgt anhand partieller Überlappungen, wonach unter Konsistenzprüfungen und Auflösung von Mehrdeutigkeiten eine Mittelung der Segmente zwischen zwei Weichen vorgenommen wird. Diese Schritte werden für jede weitere Route wiederholt. Die ermittelten Segmente werden in einzelne Trassierungselemente zerlegt und zur Spannungsminimierung unter Einbeziehung externer Stützpunkte parametrisiert. Danach kann das gesamte Netz über eine Extrapolation der Ortskoordinaten aus den Stützpunkten rekonstruiert und in Form von NetScan-Files ausgegeben werden. (11)

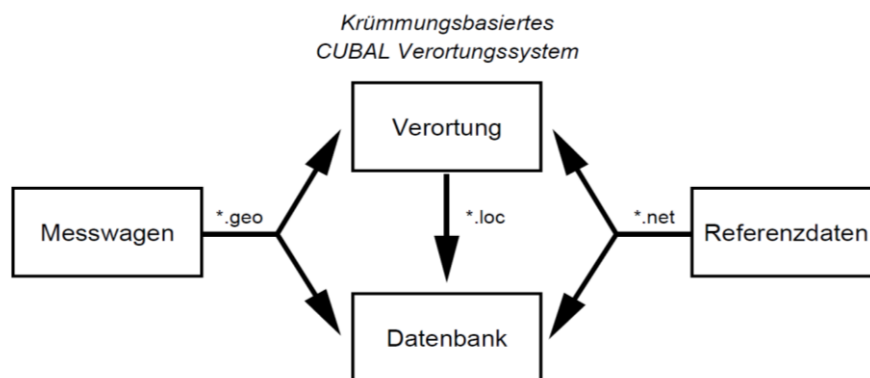


Abb. 1.35: Systemaufbau CUBAL (11)

1.6.4.7 Die Auswertung

Bei der Auswertung der Messdaten des Gleismesswagens muss hinsichtlich des Hintergrunds der Analyse zwischen der operativen und der strategischen Ebene unterschieden werden. Generell ist eine Sofort-Analyse der Daten mit Hilfe eines Sets an verschiedenen Tools nach der CUBAL-Verortung möglich.

Aus der Messdatenbank, dem sogenannten Trackoptimizer, (siehe Kap. 1.6.4.7.1) kann auf die verorteten Messwerte zugegriffen und mit einem Reporting-Tool auf operativer Ebene ein umfangreicher statistischer Bericht unter dem Akronym R-Check Report (siehe Kap. 1.6.4.7.2) erstellt werden. (6)

1.6.4.7.1 Trackoptimizer

Der Trackoptimizer ist die Datenbank des Gleismesswagens, von dem die verorteten Messergebnisse abgerufen, als CSV-Datei heruntergeladen oder graphisch dargestellt werden können. Weiters können sogenannte R-Check Reports (siehe Kap. 1.6.4.7.2) abgerufen werden. Die Aufmerksamkeits- und Eingriffsschwellen nach Kap. 1.5.5 werden im Trackoptimizer farblich dargestellt, diese beruhen jedoch auf nicht mehr aktuellen Grenzwerten.

1.6.4.7.2 R-Check-Report

Auf operativer Ebene ist es möglich, Fahrtaufzeichnungen, Mängellisten usw. in Form eines R-Check-Reports aus den *.loc-Files aus CUBAL auszuwerten. Es werden alle Messergebnisse (Messparameter) einer Messfahrt zusammengefasst und nach Aufmerksamkeitsschwellen aufgelistet und in pdf-Format im Trackoptimizer zur Verfügung gestellt.

1.6.4.7.3 TimeLines

Über Algorithmen und diverse Einflussparameter wird eine grobe netzweite Restliegedauerabschätzung der Rillenschienen vorgenommen.

1.6.4.7.4 Spezialauswertungen

Sowohl auf operativer als auch auf strategischer Ebene sind Spezialauswertungen entweder direkt aus den *.geo-Files des Messwagens oder aus den *.loc-Files von CUBAL möglich. Dies können Auswertungen zum Profilverschleißverhalten, zur Spurweitenentwicklung, zum Gleiszustand im Netz oder Sonderfragestellungen sein. Diese werden von den WL meist extern vergeben.

1.6.4.7.5 Net-Files

Die Abfolge der einzelnen Trassierungselemente des Schienennetzes und deren Parameter Länge, Radius und Öffnungswinkel sind in den sogenannten Net-Files für Mensch und Maschine zeilenorientiert lesbar beschrieben.

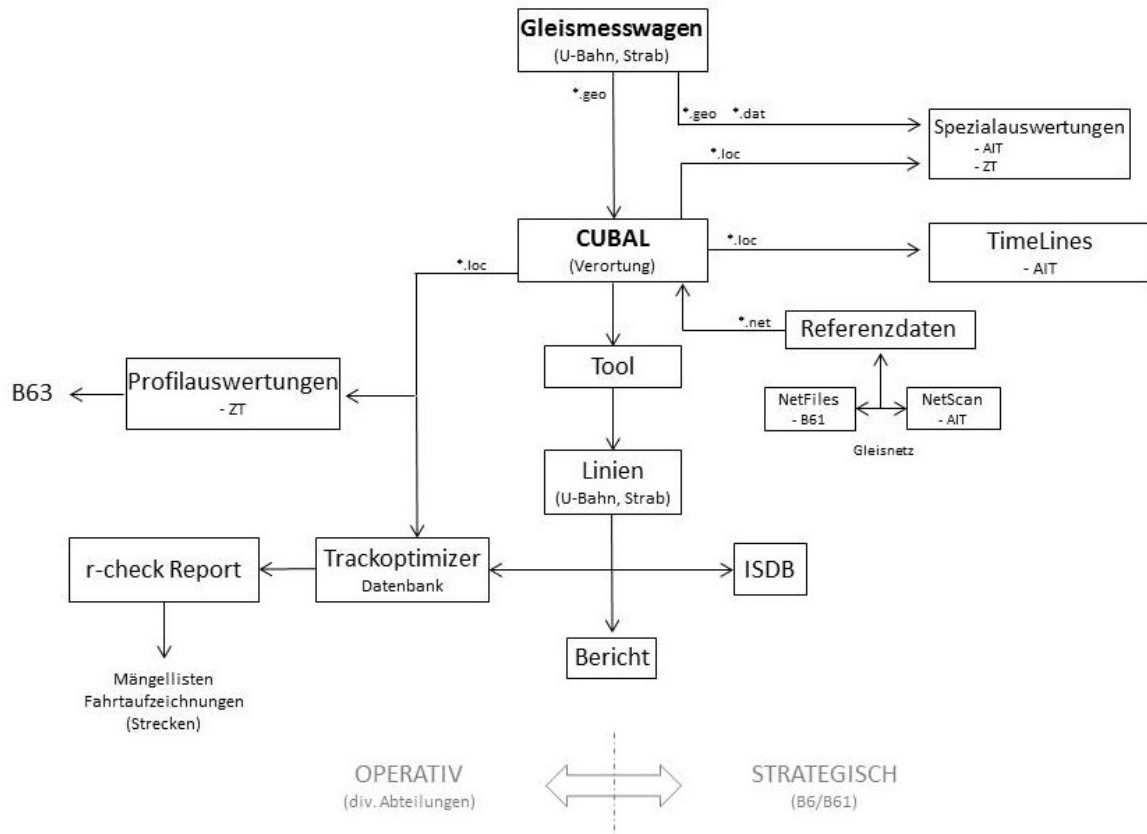


Abb. 1.36: Systemaufbau der Datenverwertung des Gleismesswagens (Eigendarstellung)

1.6.5 Messsystem Messreg^{CDM} (18)

1.6.5.1 Einführung

Der Hintergrund der Einführung eines neuen Messsystems bei den WL beruhte auf mehreren Gründen. So wurde etwa vor der Einführung dieses Messsystems jeder einzelne Bogen bzw. die Geraden händisch vermessen. In engen Bögen wurde meist der Bogenanfang, die Bogenmitte und das Bogenende vermessen, niedergeschrieben und in weiterer Folge mit den jeweiligen Grenzwerten verglichen und bei Überschreitungen Maßnahmen gesetzt. Die händische Messung weist dabei im Vergleich zu kontinuierlichen Messungen zwei Nachteile auf. Einerseits hohe Personalkosten und andererseits eine geringe Anzahl an Messungen pro Nacht, wodurch kein flächendeckender Überblick der Schienenzustände möglich ist.

Um die oben genannten Nachteile kompensieren zu können wurde im Sommer 2012 das Messsystem Messreg^{CDM} der Firma Vogel & Plötscher angeschafft. Die Vermessung der Schienen im Netz nimmt die zuständige Fachabteilung B63 vor.

Das Messreg^{CDM} ist ein elektronisches Gleis- und Weichenmesssystem und wird sowohl im Vignol-, als auch im Rillenschienenbereich eingesetzt. Da das Hauptaugenmerk dieser Arbeit auf Rillenschienen liegt, wird in weiterer Folge nur die Messtechnik für Rillenschienen näher erläutert. Die Vermessung von Weichen und Kreuzungen werden nicht beschrieben.

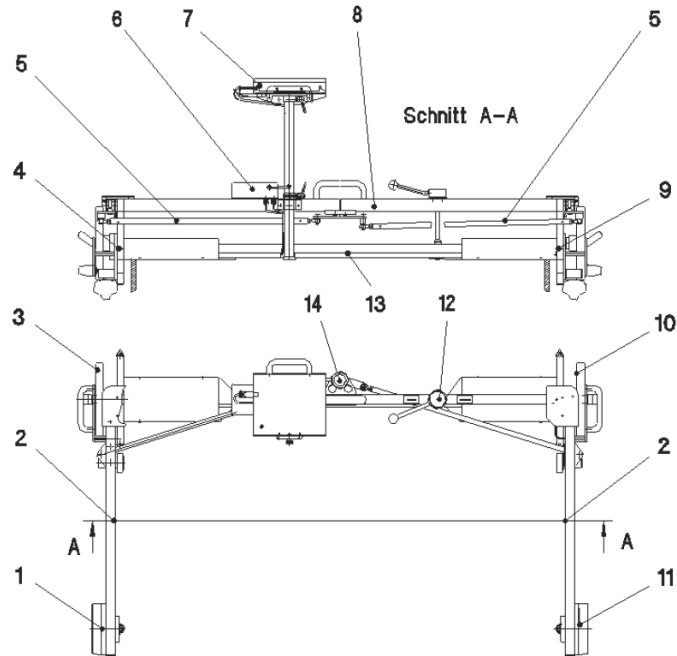


Abb. 1.37: Aufbau Messreg^{CDM} (18)

Nr.	Bezeichnung	Nr.	Bezeichnung
1	Vorderes Laufrad rechts	8	Oberes Tragrohr
2	Stützarm	9	Linke Seitenplatte
3	Hinteres Laufrad rechts	10	Hinteres Laufrad links
4	Rechte Seitenplatte	11	Vorderes Laufrad links
5	Ausfahrtstrebe	12	Funktions-Hebel Messbolzen
6	E-Box	13	Unteres Tragrohr
7	Aufnahmekonsole MPC	14	Funktions-Hebel Stützarm

Tab. 1.18 Bestandteile Messreg^{CDM} (18)

Das Messgerät ist aufgrund des geringen Gewichts von 24 kg von einer Person zu bedienen. Die WL setzen jedoch bei der Messung von Rillenschienen zwei Personen ein, wobei eine Person die Schienenmessung vornimmt und die andere die Messstelle mit einem Fahrzeug, welches hinter der Messeinheit herfährt, sichert.

Das geringe Gewicht des Systems simuliert eine Messung im unbelasteten Schienenzustand. Die zuständige Fachabteilung B63 vermisst die Rillenschienen des Wiener Straßenbahnnetzes derzeit einmal jährlich. Die Messungen finden in den Nachtstunden nach Betriebsschluss statt.

1.6.5.2 Erfassbare Gleisparameter

Digitale Messtaster und -sensoren zeichnen den Weg, Neigungen und die Profilgeometrie auf. Es werden folgende Gleisparametergrößen erfasst:

- Gleislage
 - Spurweite
 - Überhöhung
 - Verwindung
- Schienenprofil
 - Rillenweite
 - Rillentiefe
 - Fahrkopfhöhenverschleiß

1.6.5.3 Funktionsweise

1.6.5.3.1 Gleislagemessung

Das Messreg^{CDM} gehört zu den in Kap. 1.6.2.3 beschriebenen mechanischen Messsystemen, wobei die einzelnen Gleislageparameter mit Hilfe von Messbolzen gemessen werden. Aufgrund der Vorgabe 10 mm unter der GFT zu messen, werden bei Rillenschienen spezielle Messbolzen verwendet.

Der Weg wird mittels zwei Wegesensoren erfasst, womit eine kontinuierliche Messung in einem vorbestimmten Messraster möglich ist. Die Spurweite wird mit Hilfe von insgesamt vier Messbolzen bestimmt. Überhöhung und Verwindung werden mit einem digitalen Überhöhungssenor, welcher am oberen Tragrohr angebracht ist, gemessen.

1.6.5.3.2 Schienenprofilmessung

Die Rillenweite wird mit Hilfe von vier Messbolzen eruiert, wobei die Messung wiederum 10 mm unter der GFT erfolgt. Die Rillentiefe wird durch eine optionale Rillentiefemesseinheit kontinuierlich erfasst und aufgezeichnet.

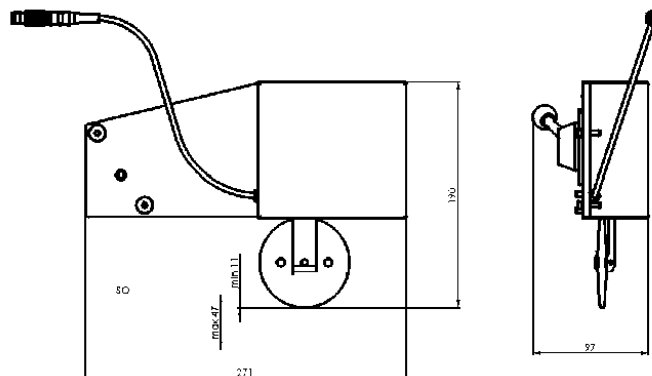


Abb. 1.38: optionale Rillentiefemesseinheit (18)

1.6.5.4 Die Messdaten

Die gemessenen Ergebnisse werden in Echtzeit auf einem interaktiven Messbildschirm angezeigt und abgespeichert. Etwaige Toleranzverletzungen bzw. Grenzwert-Überschreitungen werden markiert und farblich hervorgehoben. Während der Messfahrt können Anmerkungen vom Anwender an Messwerte geknüpft werden. Der Messraster kann beliebig auf bis zu 5 mm verringert werden, wobei die WL derzeit eine Unterteilung in Meterschritten vornehmen.

1.6.5.5 Die Rechnereinheit

Eine auf dem oberen Tragrohr befestigte E-Box bereitet die Messdaten auf und gibt diese an das MPC Notebook weiter. Das MPC, welches stoß-, schmutz- und nässeresistent konzipiert ist, ist auf dem Funktions-Hebel Stützarm angebracht und wertet die gemessenen Daten in Echtzeit aus.

1.6.5.6 Die Verortung

Das Messreg^{CDM} verfügt über keine GPS-Verortung, wodurch Anwender des Messgeräts eigens Verortungspunkte definieren müssen. Bei Messfahrten muss der Startpunkt, welcher derzeit beim Haltestellenanfang liegt, manuell eingegeben werden. Der Haltestellenanfang ist als Schnittpunkt der Abschrägung des Gehsteiges mit einer horizontalen Linie definiert. Weiters sind die Anwender angewiesen Quergassen, Hausnummern und Schmieranlagen in der Rubrik Anmerkungen manuell einzugeben, um eine Verortung der Messdaten zu gewährleisten.

1.6.5.7 Die Auswertung

Die Auswertung erfolgt mit der Betriebssoftware CDMcatcher, welche der systematischen Erfassung und Speicherung von Messwerten dient. Im Gesamtsoftwarepaket sind zusätzlich die Programme MessProfi (Messdatenverwaltung) und CDMviewer (graphische Messdatenauswertung) enthalten, welche die Auswertung des Messsystems vereinfacht. Diese kann optional auch als Excel, MS Access und SAP exportiert werden. Die WL benützen für die Analyse der Messdaten ein Excel-Sheet, welches die Rubriken Spurweite, Verwindung, Rillenweite links, Rillenweite rechts, Rillentiefe links, Rillentiefe rechts und Anmerkungen enthält. In weiterer Folge werden die Messwerte dieser Rubriken in einer aufbereiteten .xlsx-Datei nach Grenzwerten des IH-Plans der Fachabteilung B63 (5) gefiltert und auf Basis der daraus folgenden Ergebnisse Instandhaltungsmaßnahmen gesetzt.

1.6.6 Messsystem Calipri (38)

Das Messsystem Calipri der Firma nextSense ist ein kontaktfreies, optisches, laserbasiertes Verschleißmessgerät für Radsätze und Rillen- bzw. Vignolschienen. Bei der Vermessung führt der Anwender den Sensor händisch über das Schienenprofil, wobei ein intelligentes Bildverarbeitungssystem kontinuierlich Teilbereiche des Profils erkennt und diese hintergründig zusammenfügt. Der Abstand und Winkel zwischen der Messeinheit und dem Schienenprofil muss vom Anwender auf Grund einer automatischen Kippkorrektur nicht exakt eingehalten werden. Beim Erkennen des vollständigen Rillenschienenprofils wird die Vermessung beendet und die Verschleißwerte am Calipri Display angezeigt.

Vergleiche mit dem Schienenneuprofil werden durch spezielle Softwarelösungen durchgeführt, wodurch der Fahrkopf- und Leitkopfverschleiß ermittelt wird. Der Export der gemessenen Gleisparameter erfolgt mittels xml-, csv-, dxf- und pdf- Dokumenten.

Es werden folgende Gleisparametergrößen mit einer Genauigkeit von $\pm 0,08$ mm erfasst:

- Fahrkopfseitenverschleiß
- Leitkopfseitenverschleiß
- Fahrkopfhöhenverschleiß
- Rillenweite
- Rillentiefe

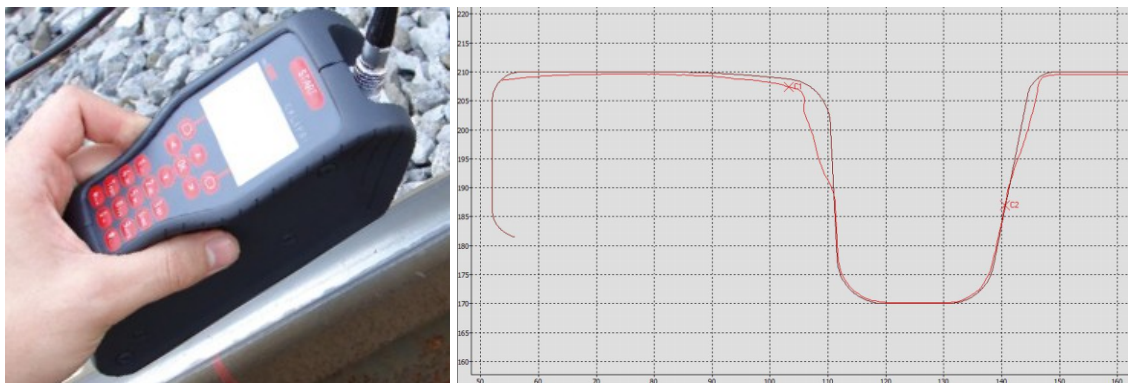


Abb. 1.39: Messsystem Calipri und graphische Auswertung ((38)VOEST)

1.6.7 Messsystem Schiebelehren

Mit Schiebelehren werden folgende Gleisparametergrößen mit einer Genauigkeit von 0,25 mm erfasst:

- Fahrkopfseitenverschleiß
- Leitkopfseitenverschleiß
- Fahrkopfhöhenverschleiß
- Rillenweite
- Rillentiefe

1.6.7.1 Schiebelehre für Rillentiefenmessung

Die Rillentiefe kann auch händisch mit Hilfe von Messlehren bestimmt werden. Hierbei wird ein Zapfen (siehe Abb. 1.40) im Rillenboden eingesetzt, mit einer Gewindestange fixiert und die absolute Rillentiefe am Messband, welches in mm Schritten angegeben ist, abgelesen.



Abb. 1.40: Schiebelehre für die Rillentiefe (links) und für die Rillenweite (rechts)

1.6.7.2 Schiebelehre für Weitenmessungen

Diese Messlehre besteht aus einem Stahlwinkel auf dem sich ein mm-Schrieb befindet und einer horizontal verschiebbaren Messeinheit (siehe Abb. 1.40). Damit kann die Rillenweite, Kontrollbreite und Leitkopfbreite händisch gemessen werden. Die Rillenweite ergibt sich beispielsweise aus dem abgelesenen Wert 10 mm unter der GFT und der Breite der beiden vertikalen Stahlwinkel (Breite 29 mm). Die verschiebbare Messeinheit bzw. der Messwert kann bei Bedarf mittels Schraube fixiert werden.

1.6.8 Riffelmesssystem CAT (39)

Am Wiener Straßenbahnnetz sind vor allem sogenannte Rutting-Riffel aber auch andere plastische Verformungen (siehe Kap. 1.4.1.1), die am häufigsten auftretenden Oberflächenschäden. Zur Detektion und Messung der Riffel sowie anderer Unebenheiten am Fahrkopf verwenden die WL den sogenannten CAT (Corrugation Analysis Trolley) der Fa. Rail Measurement Ltd. Diese digitale Riffelmessung basiert auf einer Kombination aus Messeinheit, welche die Schienenoberfläche abtastet und Beschleunigungsmessern. (siehe Kap. 1.6.3.4.4). Der CAT ist ein Referenzmessgerät nach EN 15610:2009.



Abb. 1.41: Riffelmessung mit Messsystem CAT (39)

Riffelmesssystem	CAT
Datenspeicherintervall	- bei Messgeschwindigkeit 0,5 m/s (1,8 km/h) → 1 mm - bei Messgeschwindigkeit 1 m/s (3,6 km/h) → 2 mm
Messgenauigkeit	bis zu 0,01 μm (Wellenlängenabhängig)
Output	- rohe und gefilterte Messamplituden - Wegaufzeichnung - durchschnittliche Überschreitungen - 1/3 Oktave-Spektrum - Überschreitungsreport - ASCII Daten
Wählbare Filter	- Bandpass, Highpass, Lowpass - Wellenlängen von 5-5000 mm
Datenspeichergröße	< 2 MB pro Schienenkilometer
Gewicht	- 20 kg (mit Tragekoffer) - 8 kg (Messgerät mit Laptop auf Schiene)

Tab. 1.19 Technische Daten zum Riffelmesssystem CAT (39)

2 Instandhaltung und Anlagenmanagement (33)

2.1 Einleitung

Die Optimierung des gesamten Lebenszyklus einer Anlage, von der Planung und Beschaffung, der Errichtung, dem Betrieb, der begleitenden Instandhaltung bis zum Ende der Nutzungsdauer und der darauf folgenden Entsorgung ist ein zentrales Thema des Anlagenmanagements. Wesentliche Bestandteile sind:

- Instandhaltungskonzepte („Total Productive Maintenance“)
- Qualitätsmanagement („Total Quality Management“)
- Wahl der Anlagenausprägung und des Anlagentyps
- auf Lebenszykluskosten (LCC) basierende Investitionsentscheidungen
- auf LCC basierende Instandhaltungsstrategien

Lebenszykluskostenbetrachtungen bauen auf RAMS-Analysen auf. Erst die Beantwortung der Fragen nach

- **R**eliability (Häufigkeit und Art der Fehler)
- **A**vailability (Verfügbarkeit unter Berücksichtigung der auftretenden Fehler und der Instandhaltbarkeit)
- **M**aintainability (Optionen zur Instandhaltung)
- **S**afety (Konsequenzen der Fehler)

ermöglicht eine Abschätzung und Bewertung des Verhaltens einer Anlage sowie der erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen.

Extrem hohe Nutzungsdauern von bis zu 100 Jahren sind im Eisenbahnwesen keine Seltenheit und geben damit der Instandhaltung eine sehr hohe Bedeutung. Zielsetzung einer Anlage ist die Optimierung der technisch-wirtschaftlichen Nutzungsdauer, die sich über das Qualitätsmanagement ergibt.

Generelle Überlegungen sind:

Aktueller Zugang	Älterer Zugang
Proaktive Instandhaltung	Reaktive Instandhaltung
Langfristoptimierung	Kurzzeitoptimierung
Zustandsabhängige Instandhaltung	Zeitlich definierter Instandhaltung
Wissensbasierte Konzepte	Erfahrungsbasierte Strategien
Nutzungsbedingungen angepasste Investitionsstrategien	Suche nach „der optimalen Infrastruktur“.

Tab. 2.1: Zugänge zum Anlagenmanagement (33)

Um Optimierungen des Fahrwegsystems zu ermöglichen, muss trotz Änderungen von Organisationsstrukturen, Finanzierungsströmen oder Zuständigkeiten und Kompetenzen, ein fundiertes Anlagenmanagement aufgebaut werden, dass mit der Fragestellung des optimalen Ausmaßes an Outsourcing oder der Sicherstellung technisch-betrieblichen Know-hows einhergeht. Den wirtschaftlichen Nachweisen der technisch erforderlichen Maßnahmen zur Instandhaltung von Eisenbahnanlagen mit langen Nutzungsdauern, deren Ausrichtung tendenziell auf kurzfristige Optimierungen abzielt (Shareholder Value), kommt eine große Bedeutung zu. Die Erfassung der technisch und damit wirtschaftlich relevanten Rahmenbedingungen der jeweiligen Eisenbahninfrastruktur ist eine Grundvoraussetzung für ein erfolgreiches Anlagenmanagement. Derartige Rahmenbedingungen können sein:

- Eisenbahnsystem (Vollbahn, U-Bahn, Straßenbahn)
- Verkehrsbelastung
- Geschwindigkeit
- Unterbausituation
- Klimaverhältnisse
- Grundsatzstrategie (Reinvest versus permanenter Teilewechsel)
- geplante Einsatzzeit
- der Instandhaltung zu Verfügung stehende Zeiten
- Qualität der Arbeiten
- uvm.

Das Anlagenmanagement einer Eisenbahninfrastruktur fordert das Vorhandensein des geschlossen funktionalen Wissens in technischer und wirtschaftlicher Hinsicht der jeweils betrachteten Komponenten und ihrer Belastungen über die gesamte Nutzungsdauer („Total Quality Management“). Dazu zählt auch das sich ständig ändernde Qualitätsniveau, dass durch die Nutzung oder zufolge der Ausführungsqualität und der Instandhaltungskonzeption beeinflusst wird. Das „Total Quality Management“ beruht somit auf Wissen, dass heute in der erforderlichen Form noch nicht verfügbar ist. Das Projekt „Strategie Fahrweg“ in Kooperation der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) und des Institutes für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft der Technischen Universität Graz, sollte erste Schritte in diese Richtung einleiten und wesentliche Trends sowie ihre wirtschaftlichen Konsequenzen frühzeitig erkennen.

Straßenbahnanlagen im urbanen Raum weisen zwar andere Rahmenbedingungen als die Vollbahn auf, die Methodik zur Optimierung des Anlagenmanagements bleibt jedoch die Selbe, wodurch ein Vergleich dieser Eisenbahnsysteme durchaus gerechtfertigt ist. Bewertungsverfahren von Investitions- und Instandhaltungsstrategien über die gesamte Nutzungsdauer sind Grundlage der Annäherung von Weg und Ziel, welche folgend beschrieben werden können.

- Ziel: Optimales Anlagenmanagement
- Weg: Optimierte Investitions- und Instandhaltungsstrategien

2.1.1 Anlagenmanagement für den Fahrweg

Für das Anlagenmanagement des Fahrwegs müssen alle technischen und wirtschaftlichen Auswirkungen einer Anlage von der Investition bis zum Ende der Nutzungsdauer unter realen Betriebsbedingungen berücksichtigt werden, wobei die Wirtschaftlichkeit neuer Investitions- und Instandhaltungsstrategien nachzuweisen ist. Dies wiederum erfordert die Implementierung der Lebenszykluskosten einer Anlage, da bei langer Nutzungsdauer die Instandhaltungskosten keine maßgebende Größe darstellen.

Eine generelle Erfahrung für Fahrwege besagt, dass sich ein qualitativ guter Fahrweg besser verhält, d.h. geringeren Verschleißerscheinungen unterliegt, als ein qualitativ geringwertiger. (33)

2.1.1.1 Die Entwicklung der Gleisqualität

In Zusammenhang mit dem Thema Fahrwegstrategien haben die ÖBB die Gleislagequalität als relevanten Qualitätsbegriff gewählt. Von der aktuellen Qualität Q eines Fahrwegs lässt sich die aktuelle Verschlechterungsrate b bestimmen und über eine Differentialgleichung in Zusammenhang bringen.

$$\frac{dQ}{dt} = -b \cdot Q \quad (2.1)$$

Diese liefert den allgemeinen Qualitätsverlauf

$$Q = Q_0 \cdot e^{-b \cdot t} \quad (2.2)$$

mit:

$Q...$	aktuelle Qualität
$Q_0...$	Qualität zum Zeitpunkt $t=0$ (Ausgangsqualität nach Abklingen der Anfangssetzungen)
$b...$	Verschlechterungsrate
$t...$	Zeit

Wie bereits erläutert wird in dieser Arbeit auf Grund anderer Rahmenbedingungen bei Straßenbahnen von einer annähernd gleichbleibenden Gleislage ausgegangen und der Qualitätsbegriff über den Verschleißzustand der Schienenprofile definiert. Dieser Qualitätsverlauf wird aus Erfahrungswerten als linear mit $Q = Q_0 - b \cdot t$ (siehe Kap.1.4.2) angenommen.

Der Term Q_0 beschreibt die technische Auswirkung der Investition und $e^{-b \cdot t}$ bzw. $-b \cdot t$ die technischen Auswirkungen der Instandhaltungsmaßnahmen, wodurch ebenfalls gezeigt wird, dass die Betrachtung der Lebenszykluskosten notwendig ist. Dieser Zusammenhang bildet die Basis für das Fahrwegverhalten über seine gesamte Nutzungsdauer. Investitions- und Instandhaltungsstrategien können generell als Fahrwegstrategien bezeichnet werden und bilden einen fixen Zusammenhang, dem jedoch viele Organisationsstrukturen von Eisenbahnunternehmen nicht gerecht werden oder gar widersprechen.

2.1.2 Wirtschaftliche Bewertung von Fahrwegstrategien

Das Grundprinzip jeder wirtschaftlichen Bewertung ist das Erfassen und Bewerten sämtlicher durch ein Projekt verursachten kostenrelevanten Auswirkungen, unabhängig von Ort und Zeitpunkt ihrer Kostenwirksamkeit. Lange Nutzungsdauern, wie sie im Falle von Gleisanlagen auf freier Strecke vorliegen können, erfordern dynamische Wirtschaftlichkeitsrechnungen. Durch Auf- und Abzinsen der Zahlungen auf einen Bezugszeitpunkt wird der Zahlungszeitpunkt berücksichtigt. Es stehen grundsätzlich folgende Methoden zur Verfügung:

- Kapitalwertmethode
- Methode des Internen Zinssatzes
- Annuitätenmethode

2.1.2.1 Die Kapitalwertmethode

Die Berücksichtigung der Kapitalbindung ist die Basis von dynamischen Investitionsrechnungen. Die Zahlungszeitpunkte werden berücksichtigt, indem die Zeitwerte der Zahlungen ZW in der Regel auf das Jahr der Investition abgezinst werden. Die Barwerte BW und der Kapitalwert C errechnen sich aus der Zinseszinsformel (2.3) nach Festlegung eines kalkulatorischen Zinssatzes von 1-3 % (siehe Abb. 2.1).

$$BW = ZW(1 + i)^{-t} \quad \text{und} \quad C = \sum BW \quad (2.3)$$

mit

- BW... Barwert
- C... Kapitalwert
- ZW... Zeitwert der Zahlung
- i... kalkulatorischer Zinssatz
- t... Zeit in Jahren

Der Kapitalwert stellt einen dynamisch bewerteten Gewinn dar.

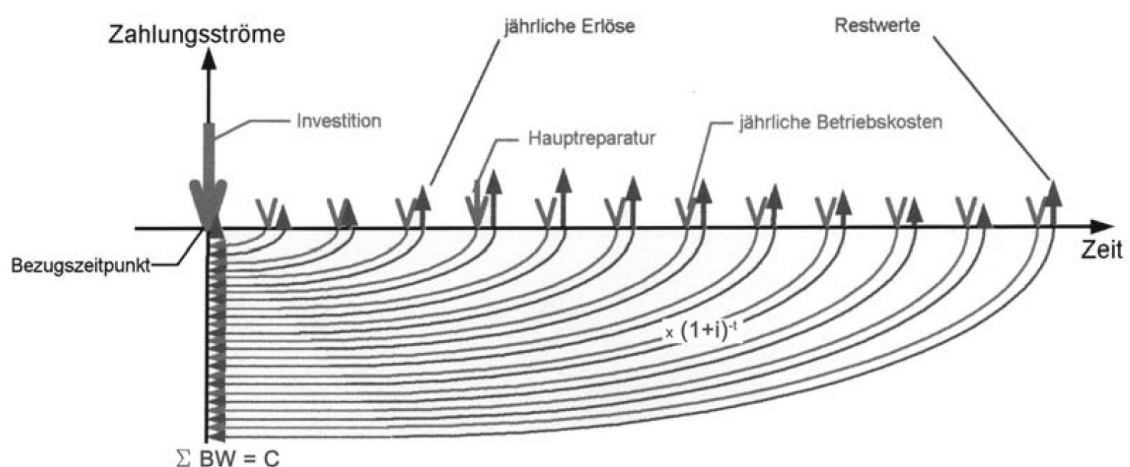


Abb. 2.1: Kapitalwertmethode

Die Kapitalwertmethode ist nur zulässig, wenn Investition und Nutzungsdauer der zu vergleichenden Investitionsvorhaben gleich sind, da ein Gewinn nur dann als Entscheidungsgrundlage zum Vergleich von zwei Handlungsalternativen herangezogen werden kann, wenn die dazu erforderliche Investition und der Zeitraum der Refinanzierung vergleichbar sind. (33)

2.1.2.2 Methode des Internen Zinssatzes

Mit dieser Methode wird zusätzlich eine dynamische Rentabilität einer Investition, durch die Bestimmung des Nulldurchgangs der Kapitalwertfunktion mit Kapitalwerten aus beliebigen kalkulatorischen Zinssätzen, bestimmt (siehe Abb. 2.2).

$$C = 0 \rightarrow i = IRR \quad (2.4)$$

mit

- C... Kapitalwert
- i... kalkulatorischer Zinssatz
- IRR... Interner Zinssatz (internal rate of return)

Dieser Nulldurchgang bestimmt also mit welcher Verzinsung sich die untersuchte Investition verzinst. Man spricht in diesem Zusammenhang vom Internen Zinssatz IRR, der in der Regel 3 bis 7 % über dem kalkulatorischen Zinssatz liegen muss, um ein Projekt wirtschaftlich rechtfertigen zu können. (reale Zinssätze, d.h. exklusive Inflation).

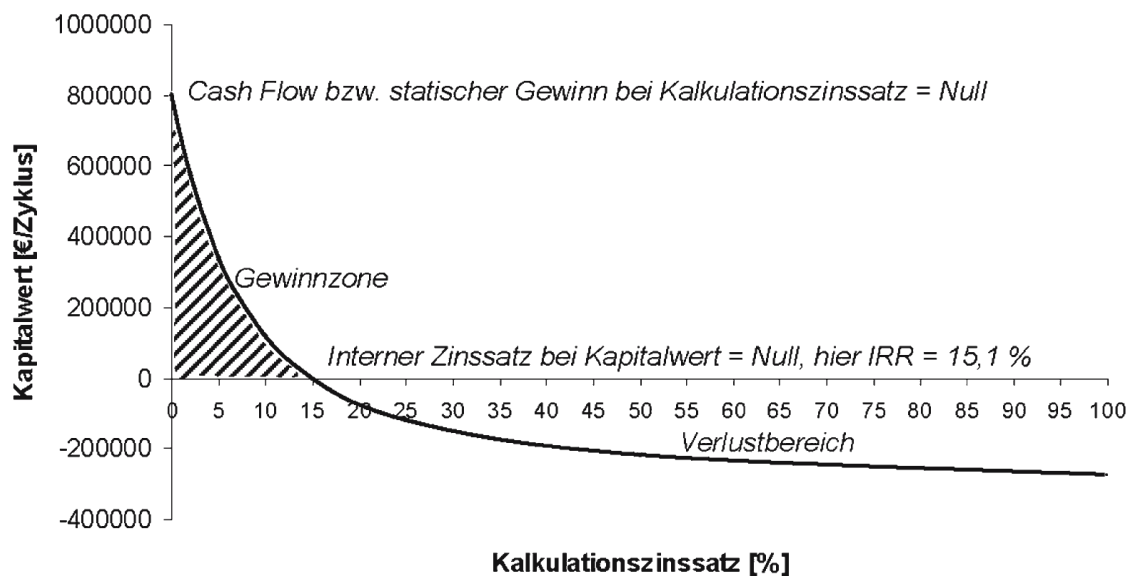


Abb. 2.2: Methode des Internen Zinssatzes

Es ist zu bemerken, dass die Methode des Internen Zinssatzes gleiche Nutzungsdauern, also vergleichbare Zeiträume, der Investitionsvorhaben fordert. Eine Möglichkeit der Anwendung für unterschiedliche Nutzungsdauern besteht jedoch durch wiederholtes Ansetzen von Reinvestitionen bei jener Strategie mit der kürzeren Nutzungsdauer und Beachtung der Restwerte bei der anderen Strategie.

2.1.2.3 Die Annuitätenmethode

Bei dieser Methode wird der Kapitalwert in den durchschnittlichen dynamischen Jahresgewinn (Annuität A nach Formel (2.6)) umgerechnet. Dies erfolgt über den Kapitalwiedergewinnungsfaktor KWF nach Formel (2.5).

$$KWF = (1 + i)^t \cdot \frac{i}{(1 + i)^t - 1} \quad (2.5)$$

Es gilt

$$A = KWF \cdot C \quad (2.6)$$

KWF... Kapitalwiedergewinnungsfaktor	t... Zeit in Jahren
A... Annuität	C... Kapitalwert
i... kalkulatorischer Zinssatz	

Wie erläutert gelten für die Anwendung der anderen beiden Methoden bestimmte Voraussetzungen. Nicht so bei der Annuitätenmethode, da diese den dynamisch bestimmten durchschnittlichen Jahresgewinn darstellt. Daher sind Zeitraum und Investitionshöhe stets berücksichtigt. Bei Investitionen in einen Fahrweg handelt es sich um interne Rationalisierungsinvestitionen und es können keine direkten Erlöse zugeordnet werden. Die Annuitätenmethode ist in diesem Zusammenhang die einzig sinnvolle Methode.

Die Inflation im Zeitwert kann grundsätzlich auch bei allen dynamischen Methoden durch Aufzinsung der heutigen Kosten auf den Zeitpunkt der Ausgabewirksamkeit berücksichtigt werden. Es wird keine Inflationsrate angesetzt und Realverzinsungen bzw. Annuitäten auf Basis des aktuellen Geldwertes bestimmt. Die großen Unsicherheiten der Inflationsrate würde die Deutung von Gewinngrößen erschweren. Zur Bestimmung der realen Verzinsung müsste die Inflation wieder abgezogen werden.

Grundsätzlich besteht für die Bewertung von unterschiedlichen Strategien die Möglichkeit einer Einzelbewertung und darauffolgendem Vergleich untereinander. Zielführender ist jedoch hingegen der Vergleich zweier Strategien bereits innerhalb der Investitionsrechnung mit einer Bewertung auf Basis eines Differenzzahlungsstromes. Damit können unter Heranziehung der Kapitalwertfunktion zur richtigen Beurteilung eines bestimmten Internen Zinssatzes Rationalisierungspotentiale, die durch einen Strategiewechsel generiert werden, festgestellt werden.

Angesichts langer Nutzungsdauern ist anzumerken, dass bei der wirtschaftlichen Bewertung von Lebenszykluskosten die Unsicherheit künftiger Daten ein grundlegendes Problem darstellt und aus diesem Grund die Methode der Differenzial-Lebenszykluskosten entwickelt wurde. Bei dieser Methode werden zwei Ansätze mit ihren finanziellen Auswirkungen verglichen, um primär festzustellen, welchem der beiden Ansätze Vorrang zu geben ist. Diese Ergebnisse und Entscheidungen bleiben auch bei unerwarteten Änderungen z.B. der Lohnkosten oder anderer Parameter sehr stabil.

2.2 Methodik des optimierten Anlagenmanagements

Die Grundlagen für ein laufend optimierbares Anlagenmanagement des Oberbaues bzw. der Schienen liefern Gleisvermessungen, die Auswertung der Messdaten und die darauf basierende Aktualisierung der Qualitäts-, Instandhaltungs- und Nutzungsdauerprognosen. (siehe Abb. 2.3). Aus den neuen Daten der laufenden Messungen werden wieder neue Prognosen, neue Lebenszyklen und daraus wieder neue Fahrwegstrategien abgeleitet. Der ständige Vergleich mit vorangegangenen Prognosen und Strategien legt dabei die weitere Vorgangsweise und die weiteren Handlungen fest.



Abb. 2.3: Kreislauf der Fahrweginstandhaltung

Im Kreislauf der Fahrweginstandhaltung stellt die Reinvestition lediglich einen Spezialfall der erforderlichen Maßnahmen dar.

Längere Zeitreihen von Messdaten bzw. Statusdaten sind unverzichtbar und müssen für Prognoseaussagen vorhanden sein. Dies stellt einige Anforderungen an Messdaten und Auswertungssysteme:

- Hohe Verortungs- und Positionierungsgenauigkeit der Messdaten, um die entsprechenden Daten sinnvoll in eine Zeitreihe stellen zu können
- Erfassung vergleichbarer Daten über längere Zeiträume von ein und demselben Messsystem
- Umrechnung der Daten bei Änderungen im Messsystem
- Konstanz der Datenerhebung und Datenauswertungsmethoden und/oder die Möglichkeit von Parallelauswertungen

Das Projekt „Strategie Fahrweg“ der ÖBB, das 1996 gestartet wurde, stützt sich auf ein zweistufiges Verfahren, welches durchaus auch für die WL in dieser Art umsetzbar ist. Tab. 2.2 beschreibt die Vorgangsweise und die inneren Zusammenhänge zur Optimierung des Anlagenmanagements. Die Forschung zur Optimierung von Fahrwegstrategien als zentrales Bindeglied zwischen Stufe I und Stufe II, ist Kernthema dieser Arbeit.

	Stufe I	Forschung	Stufe II
Zeitachse	Projektstart	mit Projektstart	Nach Abschluss der Stufe 1
Basis	Erfahrung	-	Funktionales Wissen
Voraussetzung	Fachwissen der Arbeitsgruppen	Messwagendaten, Betriebsdaten, Statusdaten	Vorliegen erster Ergebnisse aus der Forschung
Optimierungsziel	Wirtschaftliche Reihung der bekannten Fahrwegstrategien	-	Formulierung der wirtschaftlich optimalen Fahrwegstrategie
Anwendung	Standartsituation	-	Reale Situation
Bereich	Fahrwegkomponente	Adaption der Analyse der Messwagendaten auf die Erfordernisse der Stufe II. Entwicklung von Prognosemodellen zur Beschreibung des Qualitätsverhaltens der Fahrwegkomponenten.	Fahrwegkomponente

Tab. 2.2: Zwei-Stufenplan zur Optimierung des Anlagenmanagements (33)

2.2.1 Strategie Fahrweg – Stufe 1

In der ersten Stufe werden Basisstrategien, welche auf Erfahrungen aus dem Betrieb oder Versuchen basieren, formuliert. Folgende Schritte sind hierfür erforderlich:

- Definition und Festlegung von Standardsituationen in Form von Normelementen
- Kostenerfassung von Fahrwegstrategien
- Ermittlung und Verifizierung der Arbeitszyklen für die Standartsituationen
- Erhebung der wesentlichen Kostentreiber
- Erarbeitung von Fahrwegstrategien und wirtschaftliche Überprüfung (Lebenszykluskosten)

2.2.1.1 Festlegung von Normelementen

Durch die Festlegung von Normelementen ist es einerseits möglich einen Großteil des Netzes abzubilden und Standartsituationen vergleichbar zu machen. Die Normkilometer der ÖBB wurden in folgende Normelemente unterteilt.

- Unterbausituation

Es hat sich herausgestellt, dass der Unterbauzustand bei der Vollbahn eine sehr große Bedeutung für das Qualitätsniveau des Gleisoberbaus hat und dieser daher in vier Unterbauklassen eingeteilt wird. Bei Straßenbahnstrecken im Stadtgebiet ist auf Grund der Oberflächenversiegelung im Gleisbereich und der damit einhergehenden guten Oberflächenentwässerung sowie der geringeren Achslasten der Fahrzeuge der Unterbauzustand hinsichtlich Verschleißerscheinungen nicht dominierend. Es wird von einer guten Unterbauqualität ausgegangen.

- Trassierungselemente

Die ÖBB nehmen eine Einteilung nach sogenannten Radienklassen vor, die nach der Instandhaltungsintensität getroffen wurde. Es wird zwischen Geraden, $R < 250$ m, $250 \text{ m} \leq R \leq 600$ m, $R > 600$ m und unterschiedlichen Weichen unterschieden. Für Straßenbahnnetze müssen eigene Radienklassen gefunden werden. Mit Hilfe der „Net-Files“ (siehe Kap. 1.6.4.6) ist es möglich die Anzahl und Längen der unterschiedlichen Trassierungselemente des gesamten Netzes in Wien zu ermitteln.

- Verkehrsbelastung

Für die Verkehrsbelastung werden typische Belastungen aus dem betrachteten Netz herangezogen. Die Abteilung V45 der WL kann auf genaue Daten der Befahrung des Straßenbahnnetzes mit Hilfe von HASTUS (Fahr- und Dienstplansystem der WL) zurückgreifen. Der Einsatz der Fahrzeugtypen (E, ULF) kann prozentuell angegeben werden.

- Oberbauform

Oberbauform, Schienenprofil, Schienenstahlgüte, usw. spielen hinsichtlich Instandhaltungsmanagement und Qualitätsentwicklung eine große Rolle. Diese Daten sind bei den WL derzeit noch nicht netzweit erfasst und verortet. Daher kann noch nicht gezielt auf Fahrwegdaten zurückgegriffen werden (Stichwort „gläserner Fahrweg“). Die Daten müssen derzeit für jeden Einzelfall spezifisch eruiert werden.

- Gleisanzahl

Die ÖBB nehmen eine zusätzliche Unterteilung der Gleisanzahl vor. Straßenbahnstrecken können generell als zweigleisig betrachtet werden.

2.2.1.2 Kostenerfassung von Fahrwegstrategien

Weiters werden die relevanten Kosten für Fahrwegstrategieüberlegungen definiert und erörtert. Die Inspektionskosten sind bei unterschiedlichen Strategien gleich und daher nicht relevant. Kosten für Winterdienst und Katastrophen werden nicht angesetzt.

- Kalkulatorische Abschreibung

Die kalkulatorische Abschreibung verhält sich mit 50-60 % der Gesamtkosten sehr dominant und beeinflusst alle folgenden Strategieüberlegungen. Kapitalbindungskosten werden nicht angesetzt.

- Instandhaltungskosten (planbar)

Aus Erfahrungen sind die wiederkehrend anfallenden Instandhaltungskosten annähernd planbar und betragen bei den WL nach Auskunft der Abteilung B63 bei Rillenschienen ca. 20 %.

- Mängelbehebungskosten (nicht planbar)

Diese Kosten beschreiben nicht planbare „kleine“ Instandhaltungskosten, die unwillkürlich anfallen und mittels eines jährlichen Kostensatzes berücksichtigt werden. Dieser Kostensatz steigt mit dem Alter einer Anlage an und wird bei den ÖBB auf Basis von Statistiken nach Abb. 2.4 angesetzt. Es wird vom Durchschnittswert der Mängelbehebungskosten (DWM) ausgegangen.

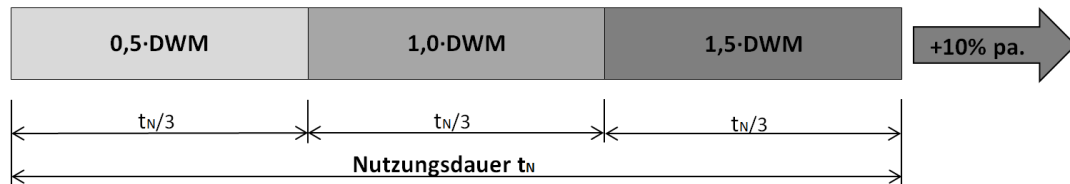


Abb. 2.4: Ansatz der Mängelbehebungskosten (Eigendarstellung)

- Betriebserscherniskosten

Diese Kosten entstehen durch betriebliche Folgekosten von (Re-) Investitionen und Instandhaltungen und stellen durch ihre große Bedeutung eine entscheidungsrelevante Größe dar. Sie können bei Strecken mit hoher Verkehrsbelastung bis zu einem Drittel der Gesamtkosten erreichen und unterschreiten 15 % der Gesamtkosten nur in seltenen Fällen. Für die Budgetplanung werden bei den WL je nach Verkehrsbelastung ca. 20 % der Gesamtkosten angesetzt. Damit haben Betriebserscherniskosten einen ähnlichen Anteil wie Instandhaltungskosten und sind relevante Kostentreiber, die zur Systemoptimierung keineswegs außer Acht gelassen werden dürfen. Außerdem werden sonst Infrastrukturoptimierungen auf Kosten des Betriebs verhindert.

In diesem Zusammenhang sei die auf Auswertungen basierende kritische Hinterfragung von Langsamfahrstellen erwähnt. Da die entstehenden Betriebserscherniskosten die erzielbaren Einsparungen, durch Verschieben von Instandhaltungsmaßnahmen, bei weitem übertreffen, sind Langsamfahrstellen äußerst unwirtschaftlich. Es hat sich gezeigt, dass sich die Beseitigung von Dauerlangsamfahrstellen in Einzelfällen nach weniger als zwei Jahren amortisiert.

- (Re-)Investitionskosten

Eine Investition oder auch Kapitalanlage genannt, beschreibt die Verwendung finanzieller Mittel, um damit das Vermögen durch Erträge zu vermehren bzw. Gewinne zu steigern. Finanziert werden Investitionen aus Abschreibungsgegenwerten. Wenn eine Bruttoinvestition herangezogen wird, um eine Anlage instand und deren Kapazität aufrecht zu halten, spricht man von einer Reinvestition oder auch Ersatzinvestition. Diese sollte den Abschreibungen entsprechen bzw. diese ersetzen, wobei der Wert des Anlagenbestandes gleich bleibt, wenn Abschreibungen und Reinvestitionen kongruent sind. (12)

2.2.1.3 Ermittlung und Verifizierung der Arbeitszyklen

Die Basis für eine wirtschaftliche Auswertung und für die Richtigkeit sämtlicher Schlussfolgerungen bilden die Arbeitszyklen der verschiedenen Normelemente. Die Arbeitszyklen müssen erarbeitet und auf Grund ihrer großen Bedeutung auch verifiziert werden. Im Fall der WL ist zwar das Fachwissen der Arbeitsgruppen vorhanden, jedoch fehlen derzeit noch Betriebsstatistiken sowie netzweite Fahrwegdaten im „gläsernen Fahrweg“, die für die Verifizierung der Arbeitszyklen für die verschiedenen Normelemente nötig wären. Die Vorgangsweise würde in drei Schritten erfolgen:

- Schritt 1:

Erarbeitung und Überprüfung auf die technische Logik aller Arbeitszyklen im Quervergleich

- Schritt 2:

Zuordnung des Netzes zu Normkilometern und Hochrechnung der erforderlichen Arbeitszyklen für einzelne Bereiche und schlussendlich für das gesamte Netz. Dies erfordert das Vorhandensein von Fahrwegdaten im „gläsernen Fahrweg“ sowie Betriebsstatistiken. Daraus ergeben sich Arbeitsmengen je Instandhaltungsintensität, die dann als Abgleich den tatsächlich durchgeführten Arbeiten gegenübergestellt werden.

- Schritt 3:

Wiederholung der Hochrechnungen, diesmal jedoch auf Basis des dazu erforderlichen Budgets und darauffolgender Vergleich mit dem realen Budget. Dadurch werden die Kostendaten für die weiteren Berechnungen verifiziert.

2.2.1.4 Erhebung der wesentlichen Kostentreiber

Um die wesentlichen Kostentreiber im Zuge der Erarbeitung von Fahrwegstrategien zu identifizieren, ist eine Auswertung von IST-Daten unumgänglich. Eine Möglichkeit der Auswertung ist die Verteilung der Lebenszykluskosten in Form ihrer normalisierten Jahreskosten für Gleise auf gutem Unterbau. Dabei werden die durchschnittlichen Jahreskosten aus den Kostenpositionen „kalkulatorische Abschreibung, durchschnittliche jährliche Instandhaltung und Betriebserschwerungskosten“ ermittelt und für verschiedene Verkehrsbelastungen dargestellt. Eine weitere Möglichkeit ist eine Auswertung der einzelnen Kostenpositionen.

Es kann folgende zentrale Aussage getroffen werden:

„Die Gesamtkosten des Oberbaus lassen sich durch eine Verlängerung der Liegedauer signifikant senken“ (33)

Es können nun mittels Gegenüberstellung verschiedener Arbeitszyklen die wesentlichen Kostentreiber identifiziert und in die Reihenfolge ihrer Bedeutung gebracht werden:

- Kosten in Abhängigkeit der Unterbauqualität
- Kosten in Abhängigkeit der Ausgangsqualität
- Kosten in Abhängigkeit der Trassierungsradien
- Betriebserschwerungskosten
- Kosten in Abhängigkeit der Verkehrsbelastung
- Kosten in Abhängigkeit der Qualität des Rollenden Materials (Fahrzeugtypen)

2.2.1.4.1 Kosten in Abhängigkeit der Unterbauqualität

Auswertungen und detaillierte Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen der ÖBB zeigten, dass die Unterbauqualität bei der Vollbahn eine große Bedeutung zu schenken ist. Es zeigte sich bei Fällen mit sehr hoher Verkehrsbelastung, dass bei einem sehr schlechten Unterbau die 8-fachen Lebenszykluskosten im Vergleich zu einem guten Unterbau entstehen können.

Auf Grund der Einbausituation mit befestigter Fahrbahn (Entwässerung) und der wesentlich geringeren Achslasten bei Straßenbahnstrecken, ist bei Rillenschienengleisen eine hohe Unterbauqualität wichtig, jedoch wird hier von einer guten Qualität ausgegangen (siehe auch Kap. 2.2.1.1).

2.2.1.4.2 Kosten in Abhängigkeit der Ausgangsqualität

Durch strikte Zusammenhänge ist der wesentliche Schlüssel zur Verlängerung der Gleisliegedauer einerseits eine hohe Ausgangsqualität in der Neulage und andererseits eine hohe Qualität der Instandhaltung selbst. Dadurch kann eine hohe Ausgangsqualität auch in eine hohe Liegedauer übersetzt werden. Im Umkehrschluss gilt, dass durch eine Reduktion der Instandhaltung wenig bis keine Einsparungspotentiale zu erwarten sind. Dies geht auch aus der Datenauswertung zu den Gesamtkosten von den ÖBB hervor.

Die Verlängerung der Liegedauer führt zur wesentlichen Senkung der Gesamtkosten, wonach höhere Investitionskosten für qualitativere Oberbauformen gerechtfertigt sind, wenn dadurch die Liegedauer verlängert wird.

2.2.1.4.3 Kosten in Abhängigkeit der Trassierungsradien

Die Normkilometer werden wie bereits erläutert in Radienklassen unterteilt. Datenauswertungen der ÖBB und Erfahrungen der WL zeigen einen engen Zusammenhang zwischen dem Trassierungsparameter Radius und

- der Schienenverschleißentwicklung
- der Gleislagequalitätsentwicklung (Vollbahn und U-Bahn)
- der erforderlichen Instandhaltungsintensität (Auftragschweißen, Rillenaufweitungen) und
- der möglichen Gleisliegedauer des Oberbaus.

2.2.1.4.4 Betriebserschwerungskosten

Diese sind mit 15-30 % der Gesamtkosten ein relevanter Kostentreiber und müssen daher vor allem bei hoher Verkehrsbelastung unbedingt berücksichtigt werden (siehe auch Kap. 2.2.1.2).

Für die Auswertungen wird ein Bewertungsmodell herangezogen, das auf folgenden Faktoren basiert:

- Nichteinhaltung der Intervalle und Verspätungen
- Umwegfahrten (falls vorhanden)
- Erhöhter Energiebedarf durch Geschwindigkeitsreduktion und Wiederbeschleunigung
- Kosten für Schienenersatzverkehr (falls vorhanden)

2.2.1.4.5 Kosten in Abhängigkeit der Schienenverkehrsbelastung

Es zeigt sich ein moderater Anstieg der Oberbaukosten mit zunehmender Schienenverkehrsbelastung. Bei kleineren Radien bekommt die Belastung einen wesentlich höheren Einfluss. Die Nachfrage fordert zunehmend Verdichtungen der Fahrzeugintervalle im Netz, wodurch es auch zu einem Anstieg der Oberbaukosten kommt. Die Kenntnis der Schienenverkehrsbelastung ist für eine Optimierung des Anlagenmanagements wesentlich.

2.2.1.4.6 Kosten in Abhängigkeit der Qualität des rollenden Materials

Weiters haben Untersuchungen der ÖBB gezeigt, dass die Qualität des rollenden Materials einen Einfluss auf die Oberbaukosten hat. Geringe Achslasten, geringe ungefederte Massen (geringe dynamische Belastungen) und gute Bogenlauffähigkeit führen zu geringeren Belastungen des Oberbaues und zu geringeren Oberbaukosten. Die Eigenschaften der Fahrzeugtypen E und ULF der WL werden in Kap. 1.2 behandelt.

2.2.1.5 Erarbeitung von Fahrwegstrategien und wirtschaftliche Überprüfung (Lebenszykluskosten)

Zusammenfassend können auf Grund der Ergebnisse der Analysen für Gleise der ÖBB folgende Aussagen getroffen werden:

- Eine hohe Ausgangsqualität des Ober- und Unterbaus ist der Schlüssel zum Erfolg
- Fahrwegstrategien sollten auf eine Verlängerung der Liegedauer abzielen.

Auf Basis dieser Aussagen kann nach Spezifizierung für das Straßenbahnnetz der WL eine Erarbeitung der Investitions- und Instandhaltungsstrategie im Sinne einer Optimierung vorgenommen werden.

Dazu müssen auch wiederum die Arbeitszyklen der Normkilometer für verschiedene Oberbauvarianten (Schienenprofile, Stahlgüten, usw.) erarbeitet und wirtschaftlich gegenübergestellt werden, um dann auf Basis der Zahlungsströme der Zyklen die Annuitäten zu bestimmen. Die Berechnung des Internen Zinssatzes der Zusatzinvestition fordert eine Ausdehnung des kürzeren Zyklus durch Ansetzen eines weiteren „Neuzustands“ und die Berücksichtigung des Restwerts auf die größere Liegedauer. Es können nach Gegenüberstellung der unterschiedlichen Optionen für verschiedene Normkilometer und Rahmenbedingungen die besten Optionen bestimmt und eine netzweite Investitionsstrategie formuliert werden.

2.2.2 Strategie Fahrweg – Stufe 2

Das Projekt „Strategie Fahrweg“ der ÖBB wurde nach Abschluss der Stufe 1 auf Basis der Ergebnisse der Forschungsarbeiten in Stufe 2 überführt. Die Erkenntnisse aus Stufe 1, das erarbeitete Verständnis des Gleisverhaltens über seine Lebensdauer und daraus formulierbare Prognosen erlauben die Umsetzung von Optimierungsmaßnahmen. Dazu spielt die Gleisvermessung eine zentrale Rolle. Die technisch-wirtschaftliche Weiterentwicklung erfolgt über die Gegenüberstellung spezifischer Strategien, welche aus Gleismessdaten und deren zeitliche Entwicklung erarbeitet werden, mit bisherigen Strategien. Ziel der Stufe II ist die Formulierung der wirtschaftlich optimalen Fahrwegstrategie an der realen Situation auf Basis des funktionalen Wissens aus der Forschung und der Gleisvermessung.

3 Anwendung der Messsysteme

In diesem Kapitel werden zwei enge Bögen aus dem Wiener Straßenbahnnetz mit den vier unterschiedlichen Messsystemen nach Kap. 1.6 (Gleismesswagen, Messreg^{CDM}, Calipri und Schiebelehren) untersucht. Es werden die Parameter des Schienenverschleißes nach Kap. 1.4.2.2 getrennt ausgewertet und miteinander verglichen.

Untersucht werden ein Bogen ($R = 20$ m) in der Wendeschleife in Grinzing im 19. Bezirk (siehe Kap. 3.1) und ein weiterer in der Alszeile/Vollbadgasse im 17. Bezirk mit $R = 25$ m (siehe Kap. 3.2)

3.1 Schienenprofilmessung Bogen Grinzing

Die geographische Lage des untersuchten Bogens in der Wendeschleife vor der Endstation Grinzing ist in der Open-Street-Map von Wien (siehe Abb. 3.1) dargestellt. Weitere Informationen zum Bogen, zum Oberbau und zur Verkehrsbelastung sind der Tab. 3.1 zu entnehmen. Eine Besonderheit stellt eine Rillenaufweitung (siehe Kap. 1.3.5) im Kreisbogen der Innenschiene dar. Es ist ein hochschallgedämmter Oberbau gemäß Kap. 1.1.3.2 ausgeführt. Eine Schmieranlage (siehe Kap. 1.1.3.3) ist nicht vorhanden.

Der Bogen (siehe Abb. 3.2) besteht aus einem Übergangsbogen (Ü2), einem Kreisbogen (B) mit $R = 20$ m und einem weiteren Übergangsbogen (Ü3). Um auch den Verschleiß vor Bogenanfang (ÜA2) und nach Bogenende (ÜE3) zu erfassen, wurden jeweils ca. 10 m davor und danach in den Messschrieben mit aufgenommen. Der Bereich vor Bogenanfang (ÜA2) ist ein Übergangsbogen (Ü1) und eine kurze Gerade (G1). Jener Bereich nach dem Bogen ist eine Gerade (G2), die in weiterer Folge zur Station Grinzing führt.

Für die punktuellen Schienenprofiluntersuchungen wurden fünf Messpunkte, definiert. Im Ü2 liegt MP5, im Kreisbogen B liegen MP4-MP2 und im Ü3 liegt MP1. Die Schienenstränge, Trassierungselemente und Messpunkte sind in Abb. 3.2 ersichtlich. Die Stationierungen dieser Elemente sind auf Basis der Net-Files (siehe Kap. 1.6.4.7.5) in Tab. 3.2 aufgelistet. Die Schnittstelle von Gleis 1 (stadtauswärts) und Gleis 2 (stadteinwärts) befindet sich genau im Kreisbogen.

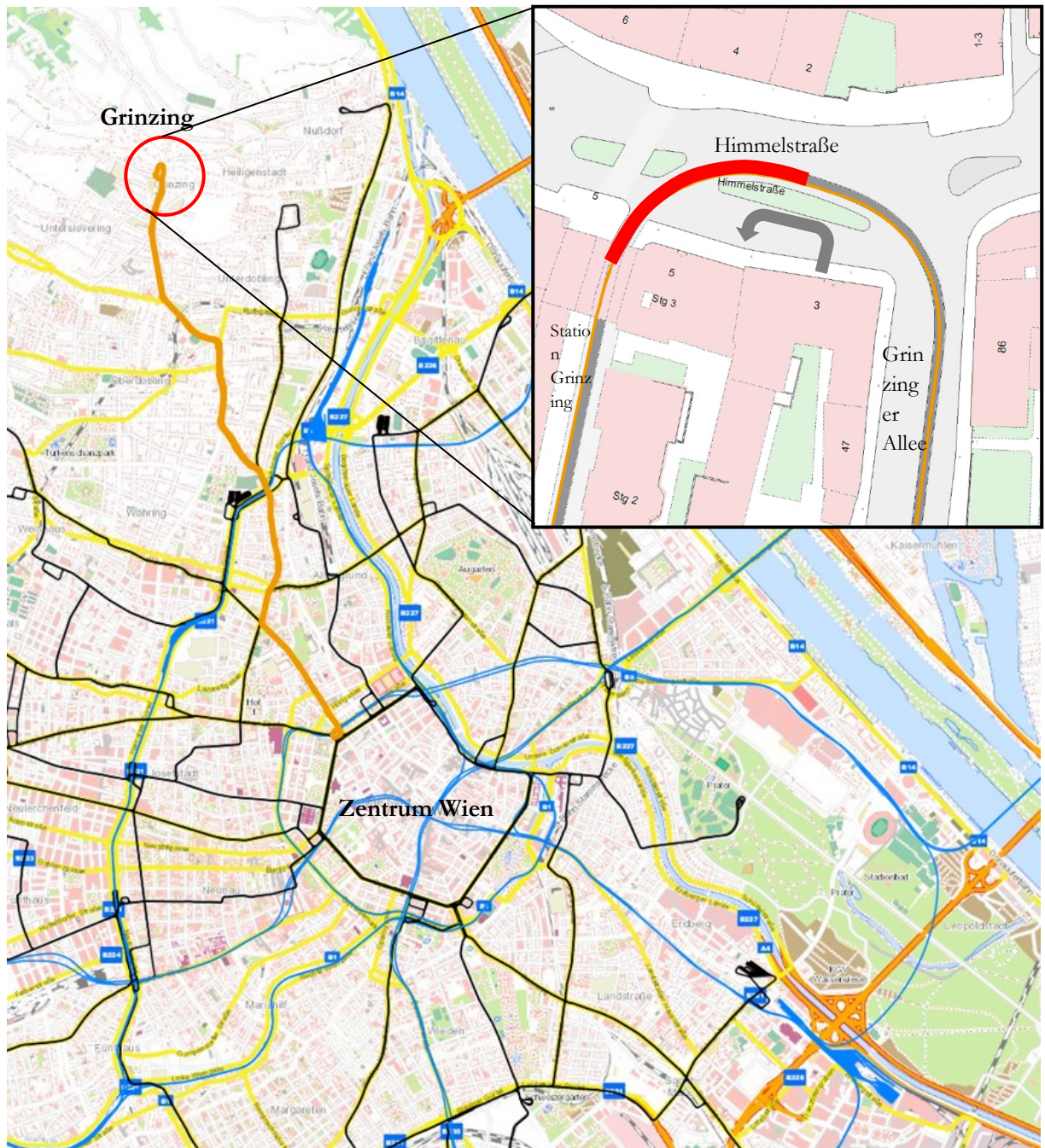


Abb. 3.1: Open-Street-Map Wien mit geographischer Lage des Bogens in Grinzing (ISDB WL, Eigendarstellung)

Allgemein	
Bezeichnung	Bogen Grinzing
Adresse	Himmelstraße 5, 1190 Wien
Zugeteilte Strecke	Nord
Betriebslinie	38
Archivlinie	35
Fahrtrichtung	Schottentor U - Grinzing
Oberbau	
Gleis	1+2
Bogenrichtung	links
Bogenradius	20 m
Länge untersuchter Gleisabschnitt	61,0 m
Schienenprofil	210/95+80a
Stahlgüte	R290GHT (HSH® GM)
C-Gehalt	0,58 %
Gleistausch	Dezember 2010
Liegedauer vor Gleistausch	17 Jahre
Oberbauform	hochschallgedämmter Oberbau
Anzahl Auftragschweißungen seit Einbau	0
Rillenaufweitung Kreisbogen Innenschiene	4 mm (siehe Anhang F)
Schmieranlage	nein
Verkehrsbelastung	
Überfahrten ULFB	23.308 /a
Überfahrten E ₂ +c ₅	26.283 /a
Verhältnis ULFB/E ₂ +c ₅	47/53 %
max. Achslast ULFB	12,2 t
max. Achslast E ₂	6,8 t
Gewicht ULFB (Besetzungsgrad 40%)	48,8 t
Gewicht E ₂ +c ₅ (Besetzungsgrad 40%)	41,2 t
Ø Belastung ULFB /a	1,1 Mio.t/a
Ø Belastung E ₂ +c ₅ /a	1,1 Mio.t/a
Ø Belastung/a	2,2 Mio.t/a

Tab. 3.1: Informationen zum Bogen Grinzing

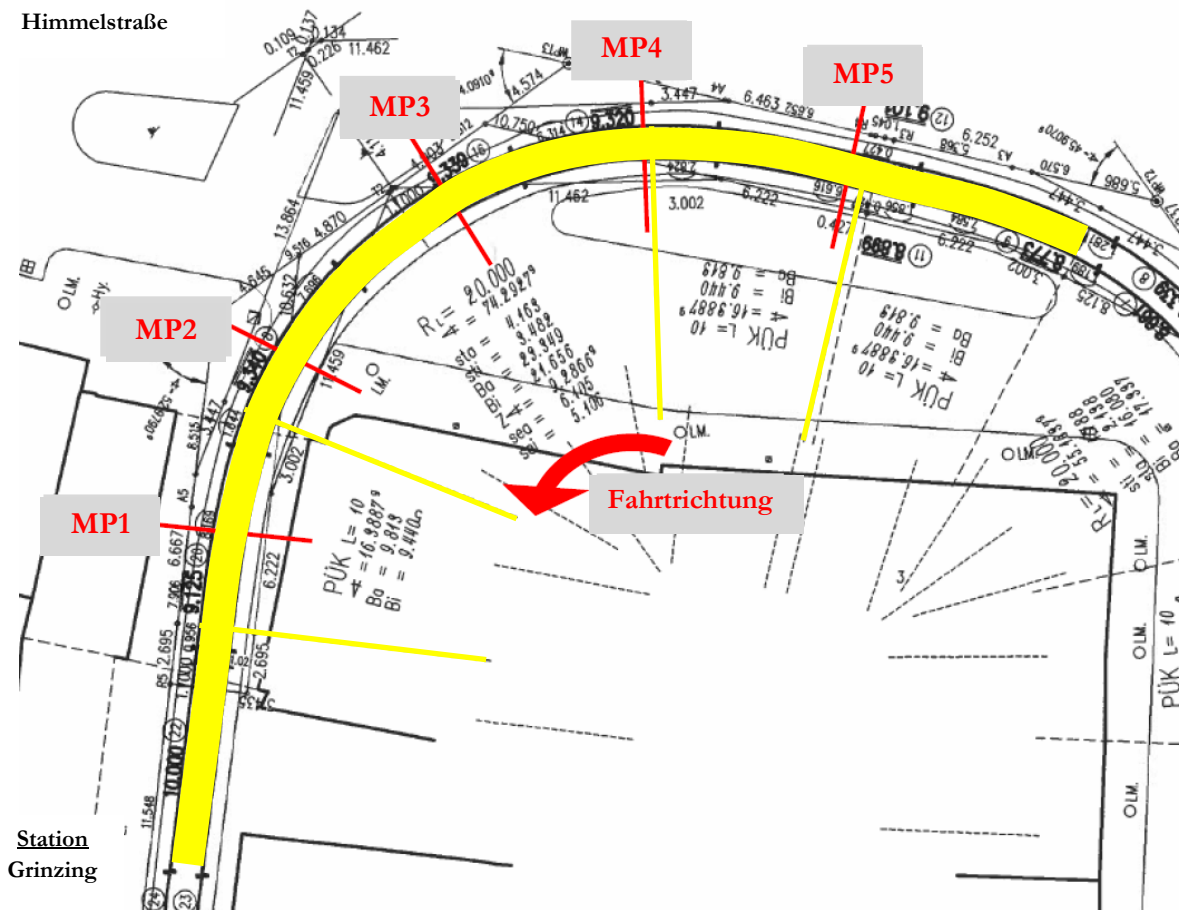


Abb. 3.2: Übersicht Bogen Grinzing (Eigendarstellung)

Trassierungselement	Teillängen lt. Plan [m]	Lfd. m	Stationierung lt. Net-Files	Gleis	
Übergangsbogen (Ü1)	ÜA1	9,63	0,00	2.872,746	1
	ÜE1		9,63	2.882,477	
Gerade (G1)	GA1	0,43	9,63	2.882,477	
	GE1		10,05	2.883,079	
Übergangsbogen (Ü2)	ÜA2	1,20	10,05	2.883,079	
	MP5	8,43	11,25	2.884,279	
	ÜE2		19,68	2.892,609	
Kreisbogen (B)	BA	0,60	19,68	2.892,609	
	MP4	8,69	20,28	2.893,209	
	MP3	2,60	28,97	2.901,894	
	Ende		31,57	2.904,500	
	Anfang	7,50	31,57	2.904,500	
Übergangsbogen (Ü3)	MP2	3,22	38,97	2.896,9915	2
	BE		42,18	2.893,774	
	ÜA3	5,38	42,18	2.893,774	
	MP1	4,20	47,57	2.888,427	
Gerade (G2)	ÜE3		51,77	2.884,227	
	GA2	9,23	51,77	2.884,227	
	GE2		61,00	2.874,997	

Tab. 3.2: Stationierung Gleisabschnitt Bogen Grinzing

3.1.1 Messergebnisse Gleismesswagen (Grinzing)

Die folgenden Messschriebe zeigen den Fahrkopfverschleiß, getrennt nach Innen- und Außenschiene, von sechs Messungen mit dem Gleismesswagen (siehe Kap. 1.6.4) aus dem Jahr 2013. Die Daten wurden als Datensatz aus dem Trackoptimizer (siehe Kap. 1.6.4.7.1) entnommen.

Die laufende Stationierung des Bogens beruht auf den Net-Files (siehe Kap. 1.6.4.7.5), wobei anzumerken ist, dass bei Punkt 2.904,50 ein Wechsel von Gleis 1 zu Gleis 2 erfolgt.

Auf Grund der Streuung der Messergebnisse wird eine Näherung (Näherungskurve) aller sechs Messschriebe vorgenommen. Die Näherungskurve wurde nach dem Verlauf der Messschriebe unter Ausschluss eindeutiger Fehlmessungen bestimmt. Die Fehlmessungen sind durch die Größe der Abweichung zu den anderen Messwerten sowie durch horizontale Linien über mehr als 5 m Länge ersichtlich.

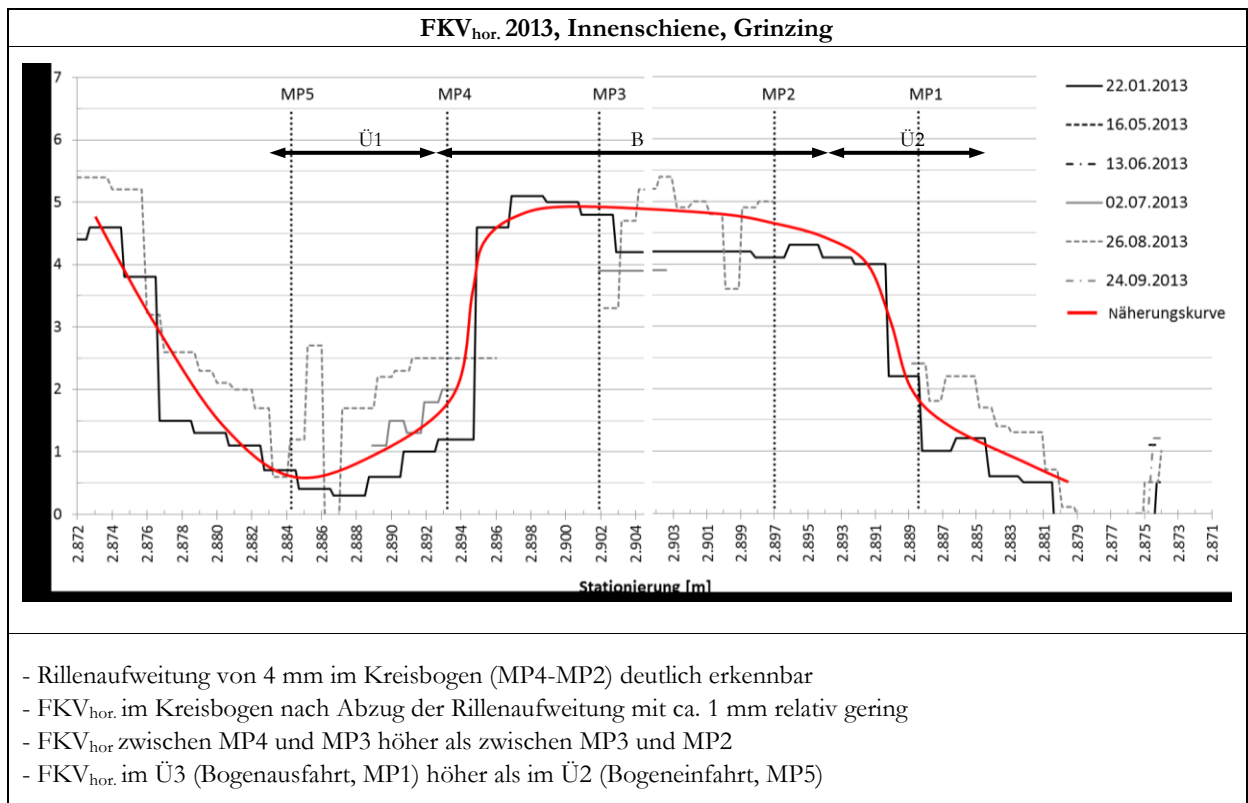


Abb. 3.3: Fahrkopfseitenverschleiß Innenschiene 2013, Gleismesswagen (Grinzing)

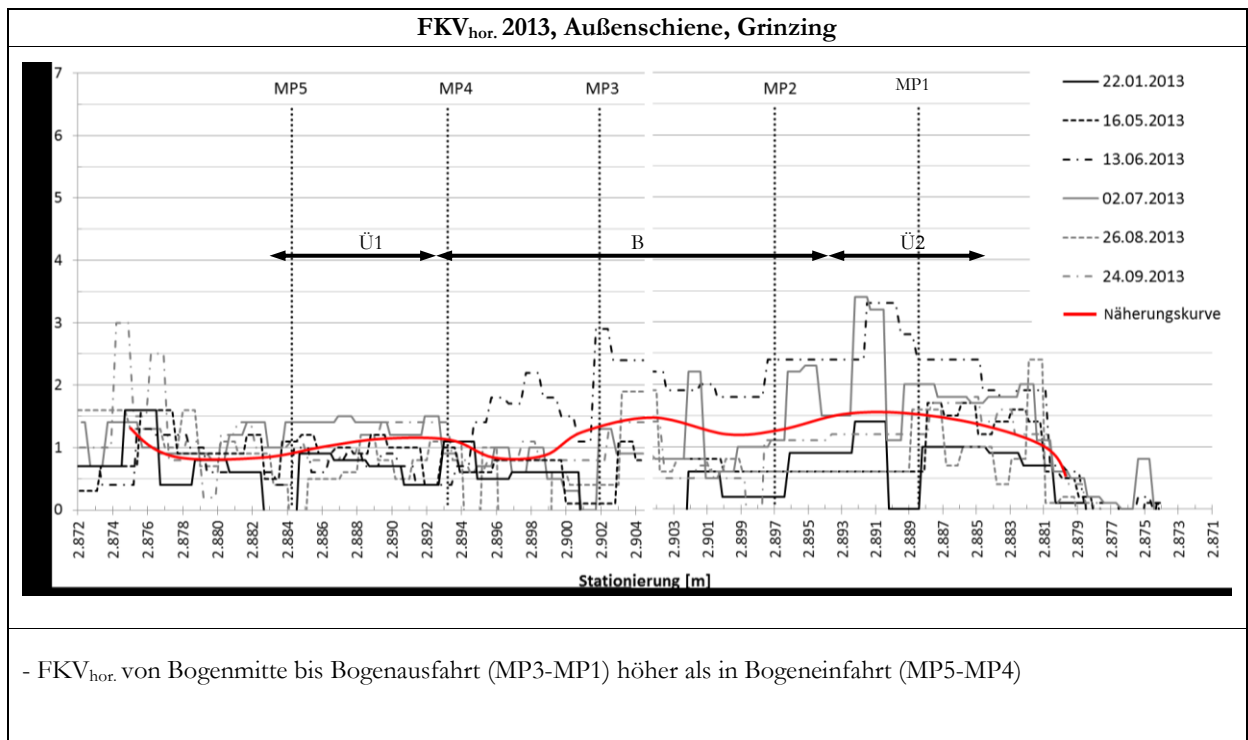


Abb. 3.4: Fahrkopfsseitenverschleiß Außenschiene 2013, Gleismesswagen (Grinzing)

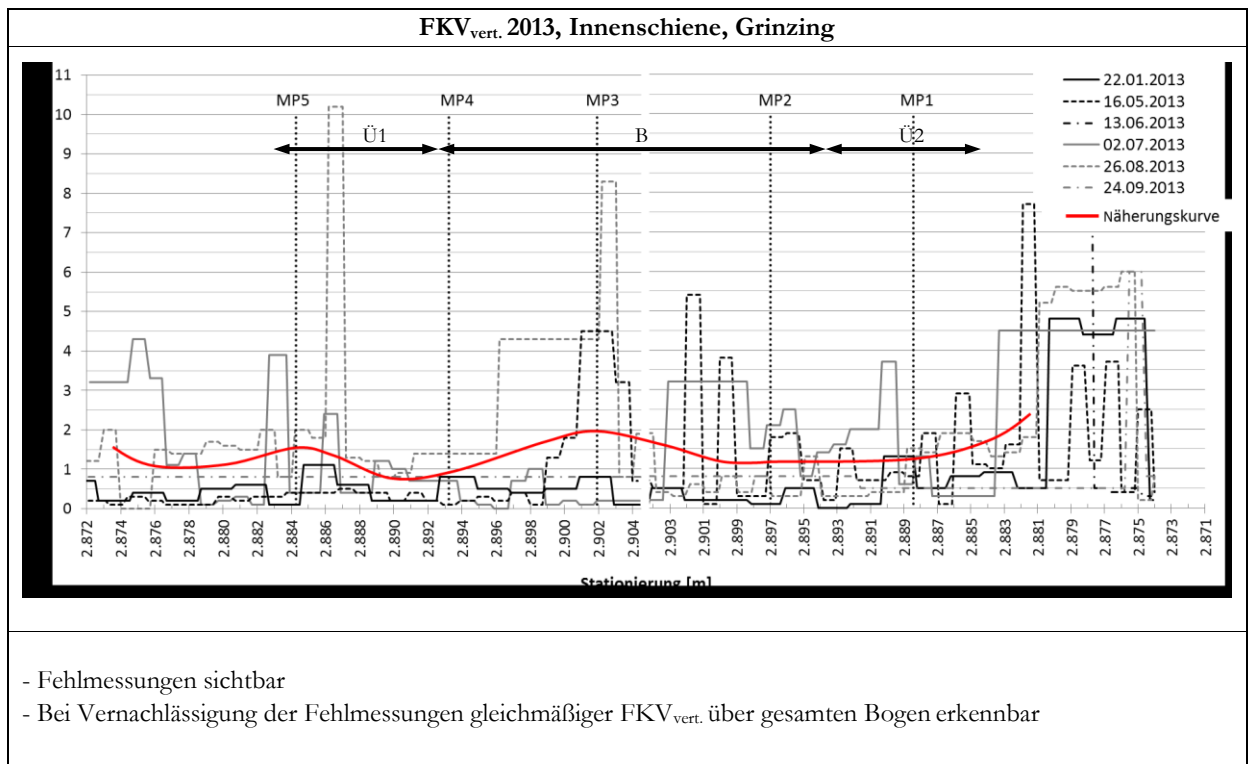


Abb. 3.5: Fahrkopfhöhenverschleiß Innenschiene 2013, Gleismesswagen (Grinzing)

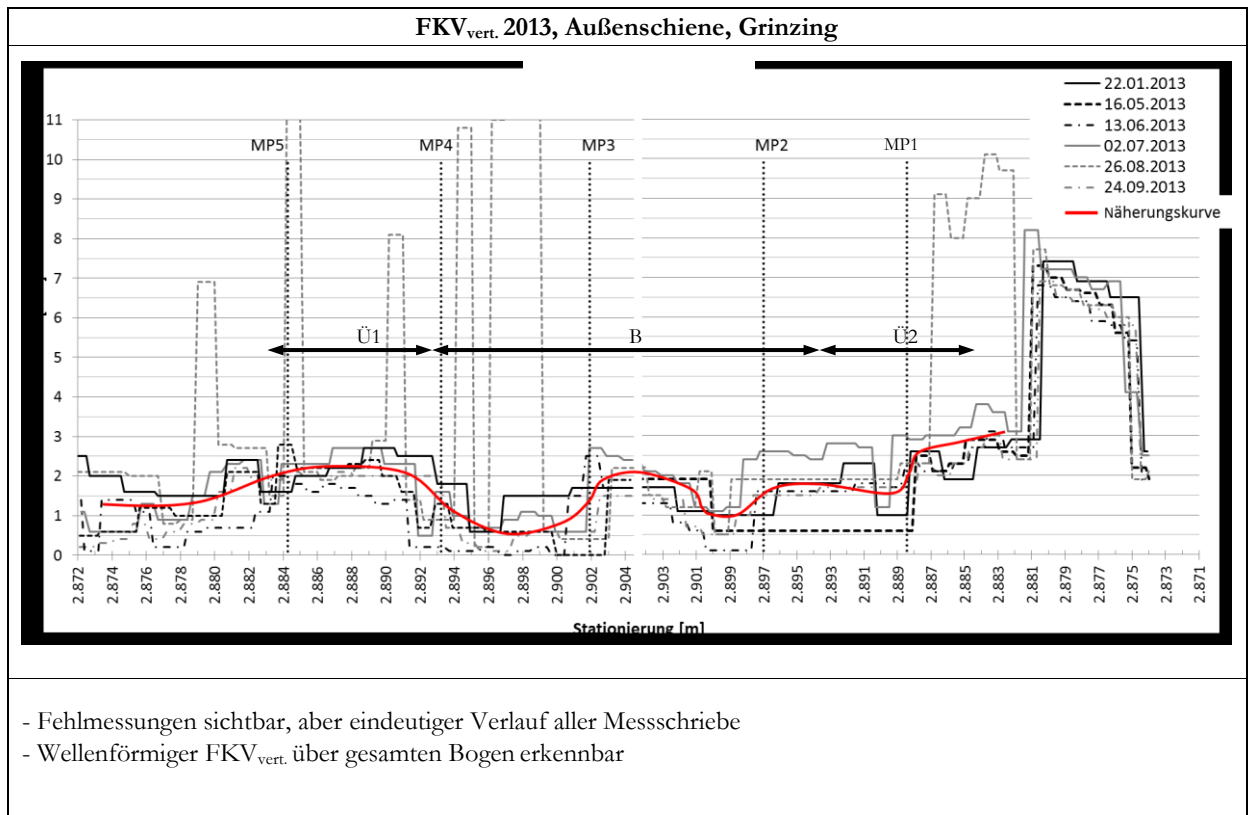


Abb. 3.6: Fahrkopfhöhenverschleiß Außenschiene 2013, Gleismesswagen (Grinzing)

3.1.2 Messergebnisse Messreg^{CDM} (Grinzing)

Die folgenden Messschriebe zeigen die Rillenweite und Rillentiefe der Messung mit dem Messsystems Messreg^{CDM} (siehe Kap. 1.6.5) vom 31.5.2013. Für das Jahr 2013 stehen keine weiteren Messungen zur Verfügung. Die laufenden Meterschritte des Bogens wurden zur Vereinfachung mit dem Startpunkt bei ÜA1 neu definiert.

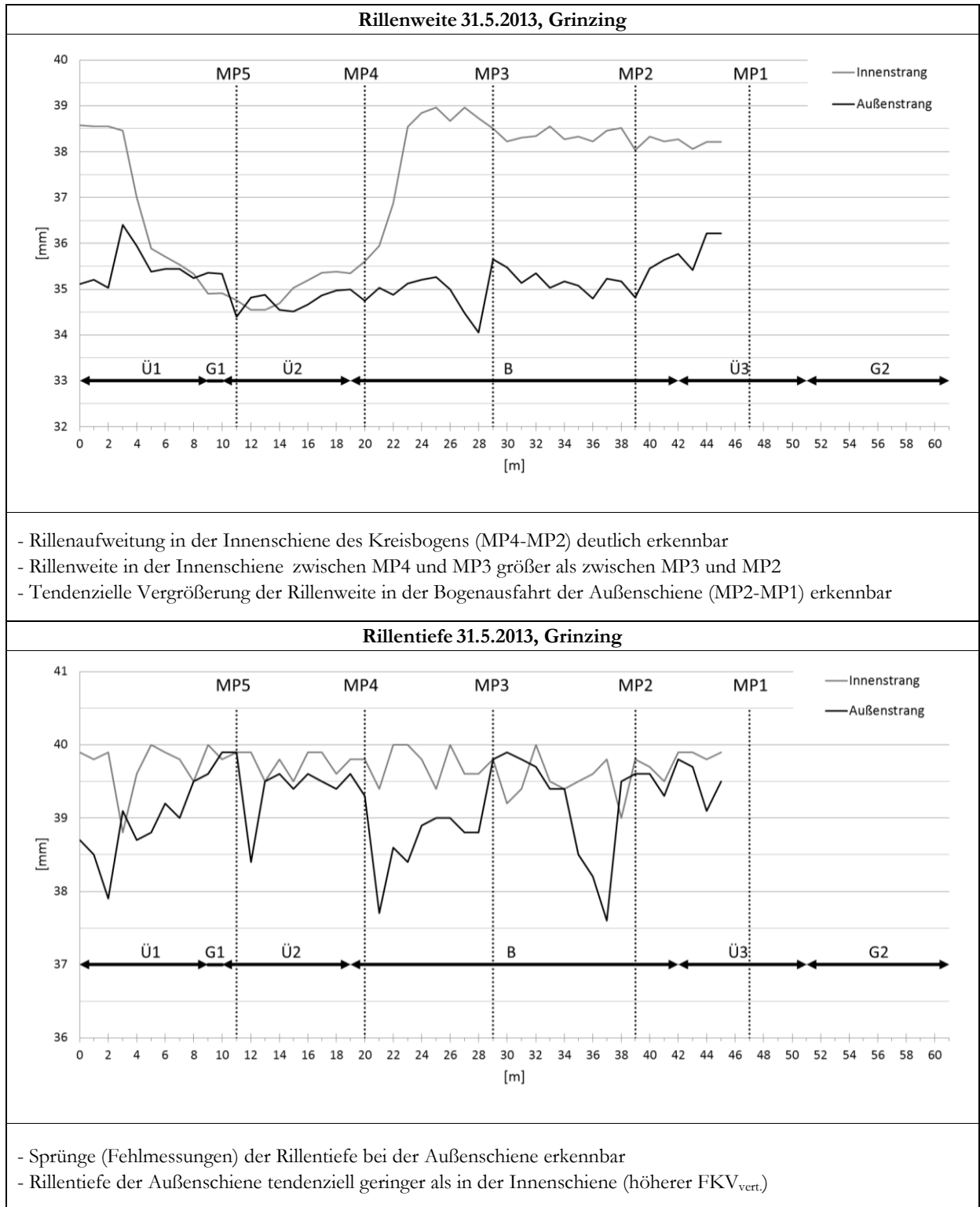


Abb. 3.7: Rillenweite und Rillentiefe Innen- und Außenschiene 31.5.2013, Messreg^{CDM} (Grinzing)

3.1.3 Messergebnisse Calipri (Grinzing)

Die folgenden Balkendiagramme zeigen die Messergebnisse des Seitenverschleißes ($FKV_{hor.}$ und $LKV_{hor.}$) und des Fahrkopfhöhenverschleißes der punktuellen Messungen mit dem Messsystem Calipri (siehe Kap. 1.6.6) vom 23.4.2013 (durchgeführt von VOEST).

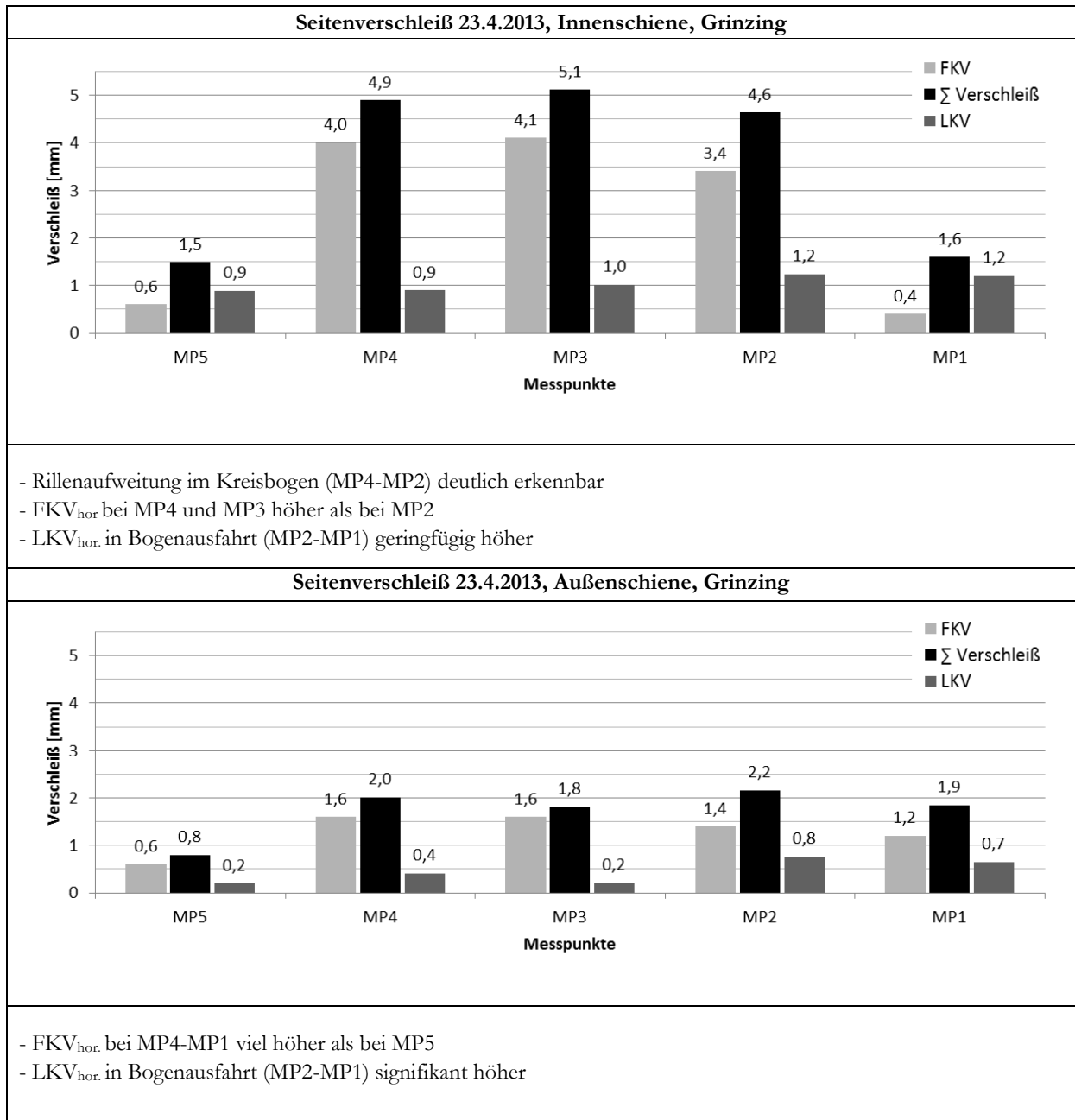


Abb. 3.8: Seitenverschleiß Innen- und Außenschiene 23.4.2013, Calipri (Grinzing)

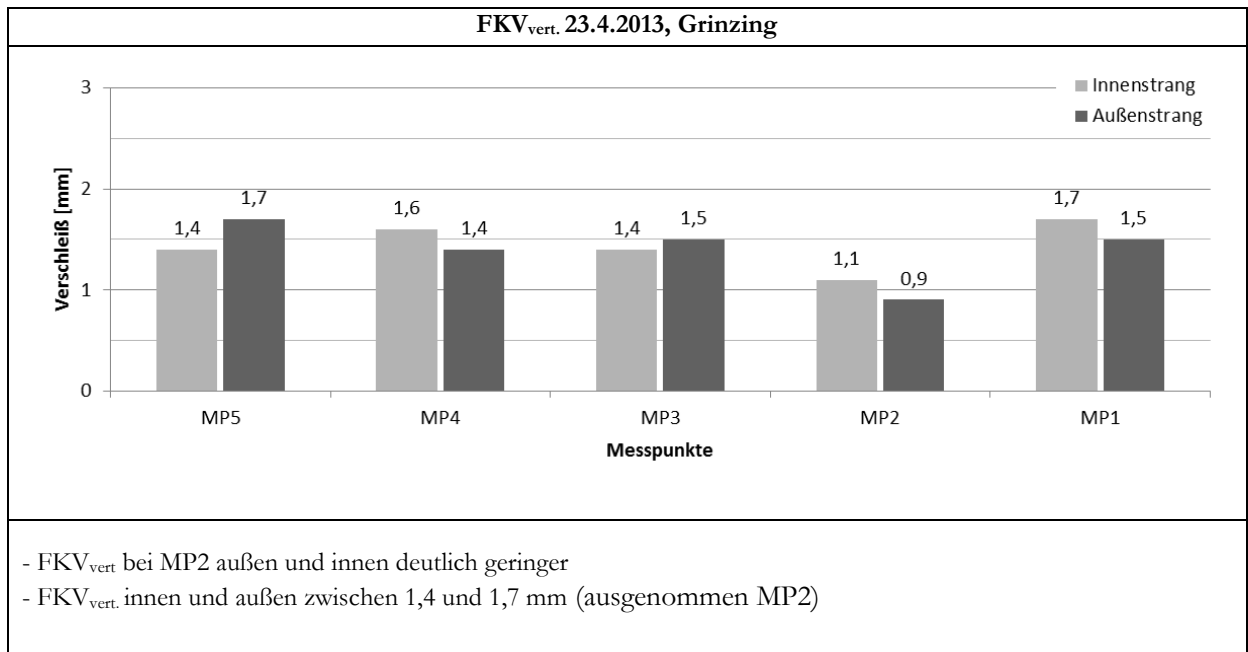
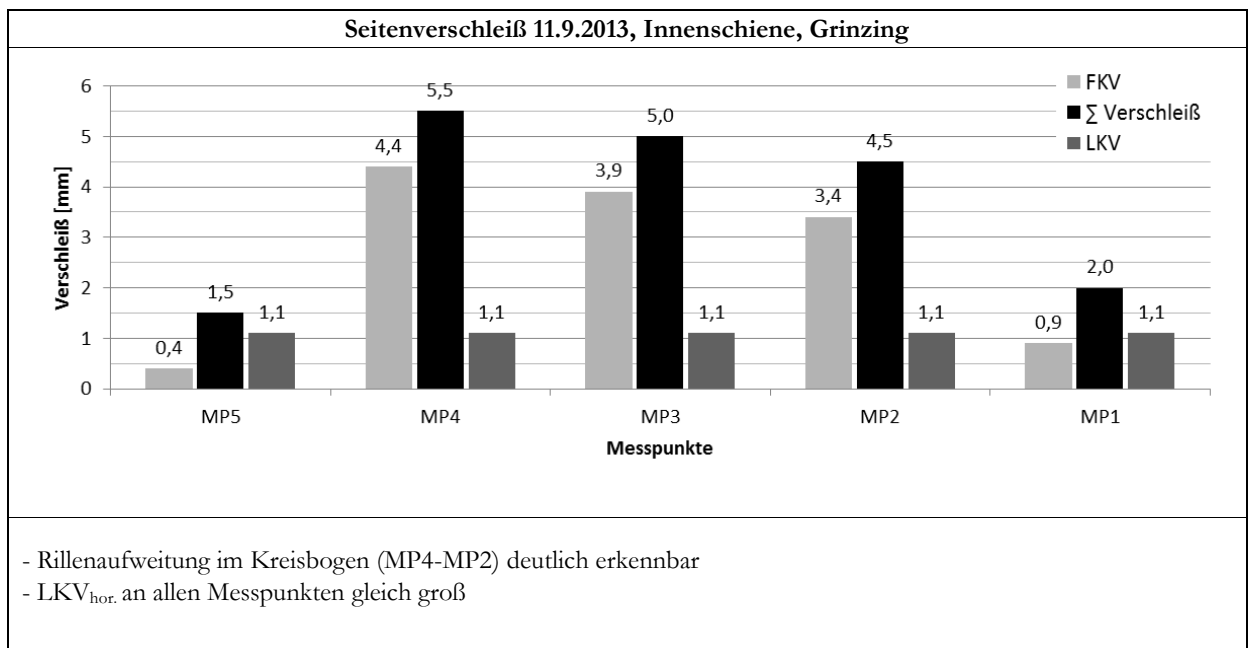


Abb. 3.9: Fahrkopfhöhenverschleiß Innen- und Außenschiene 23.4.2013, Calipri (Grinning)

3.1.4 Messergebnisse Schiebelehren (Grinning)

Die folgenden Balkendiagramme zeigen die Messergebnisse des Seitenverschleißes (FKV_{hor.} und LKV_{hor.}) und des Fahrkopfhöhenverschleißes der punktuellen Messungen mit Schiebelehren (siehe Kap. 1.6.7) vom 11.9.2013.



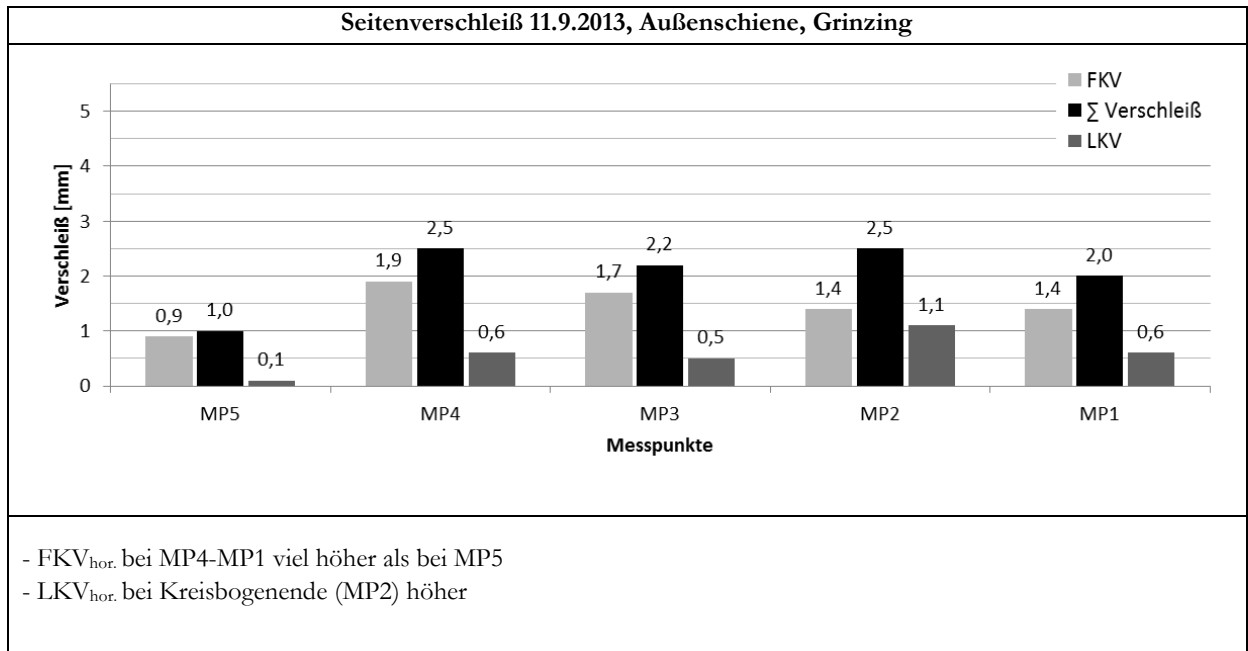


Abb. 3.10: Seitenverschleiß Innen- und Außenschiene 11.9.2013, Schiebelehren (Grinning)

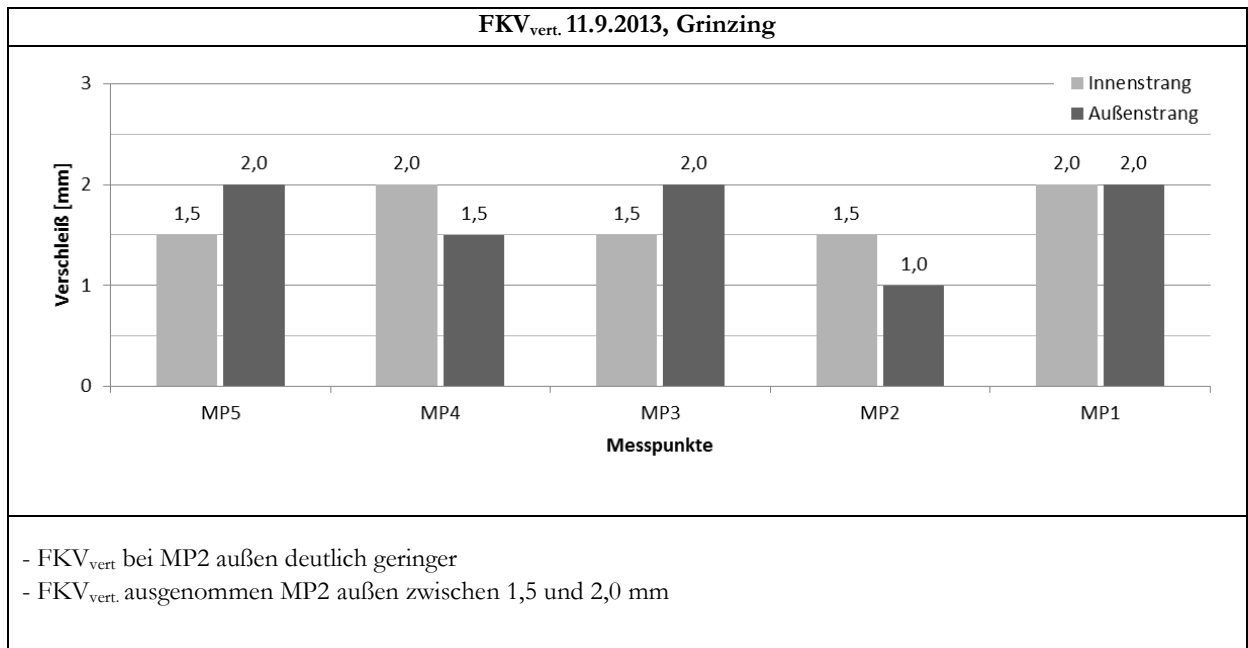


Abb. 3.11: Fahrkopfhöhenverschleiß Innen- und Außenschiene 11.9.2013, Schiebelehre (Grinning)

3.2 Schienenprofilmessung Bogen Alszeile/Vollbadgasse

Die geographische Lage des untersuchten Bogens Alszeile/Vollbadgasse ist in der Open-Street-Map von Wien (siehe Abb. 3.12) dargestellt. Weitere Informationen zum Bogen, zum Oberbau und zur Verkehrsbelastung sind der Tab. 3.3 zu entnehmen.

Der Bogen besteht aus einem Übergangsbogen ($\ddot{U}1$), einem Kreisbogen (B) mit $R = 25$ m und einem weiteren Übergangsbogen ($\ddot{U}2$). Um auch den Verschleiß vor Bogenanfang ($\ddot{U}A1$) und nach Bogenende ($\ddot{U}E2$) zu erfassen, wurden jeweils ca. 10 m davor und danach in den Messschrieben mit aufgenommen. Der Bereich vor Bogenanfang ($\ddot{U}A1$) ist eine Gerade (G1), jener Bereich nach dem Bogen ist eine Gerade (G2).

Vor dem Bogen ist eine Schmieranlage (siehe Kap. 1.1.3.3) 3,0 m vor $\ddot{U}A1$ angeordnet. Die Größe der Verminderung des Schienenverschleißes als Auswirkung der Schmieranlage kann nur über den Vergleich mit anderen Bögen mit gleichen Parametern jedoch ohne Schmieranlage festgestellt werden und ist nicht Gegenstand dieser Arbeit. Durch das Schmiermittel ist mit einer erhöhten Rillenverschmutzung zu rechnen.

Der Oberbau ist gemäß Kap. 1.1.3.2 schallgedämmt ausgeführt. Es ist keine Rillenaufweitung im Kreisbogen (siehe Kap. Kap. 1.3.5) vorgenommen worden.

Für die punktuellen Schienenprofiluntersuchungen wurden fünf Messpunkte definiert. Im $\ddot{U}1$ liegen MP1 und MP2, im Kreisbogen B liegt MP3 und in $\ddot{U}2$ liegen MP4 und MP5. Die Schienenstränge, Trassierungselemente, Messpunkte und Schmieranlage sind in Abb. 3.2 ersichtlich. Die Stationierungen der einzelnen Trassierungselemente und der Messpunkte sind auf Basis der Net-Files (siehe Kap. 1.6.4.7.5) in Tab. 3.4 aufgelistet.

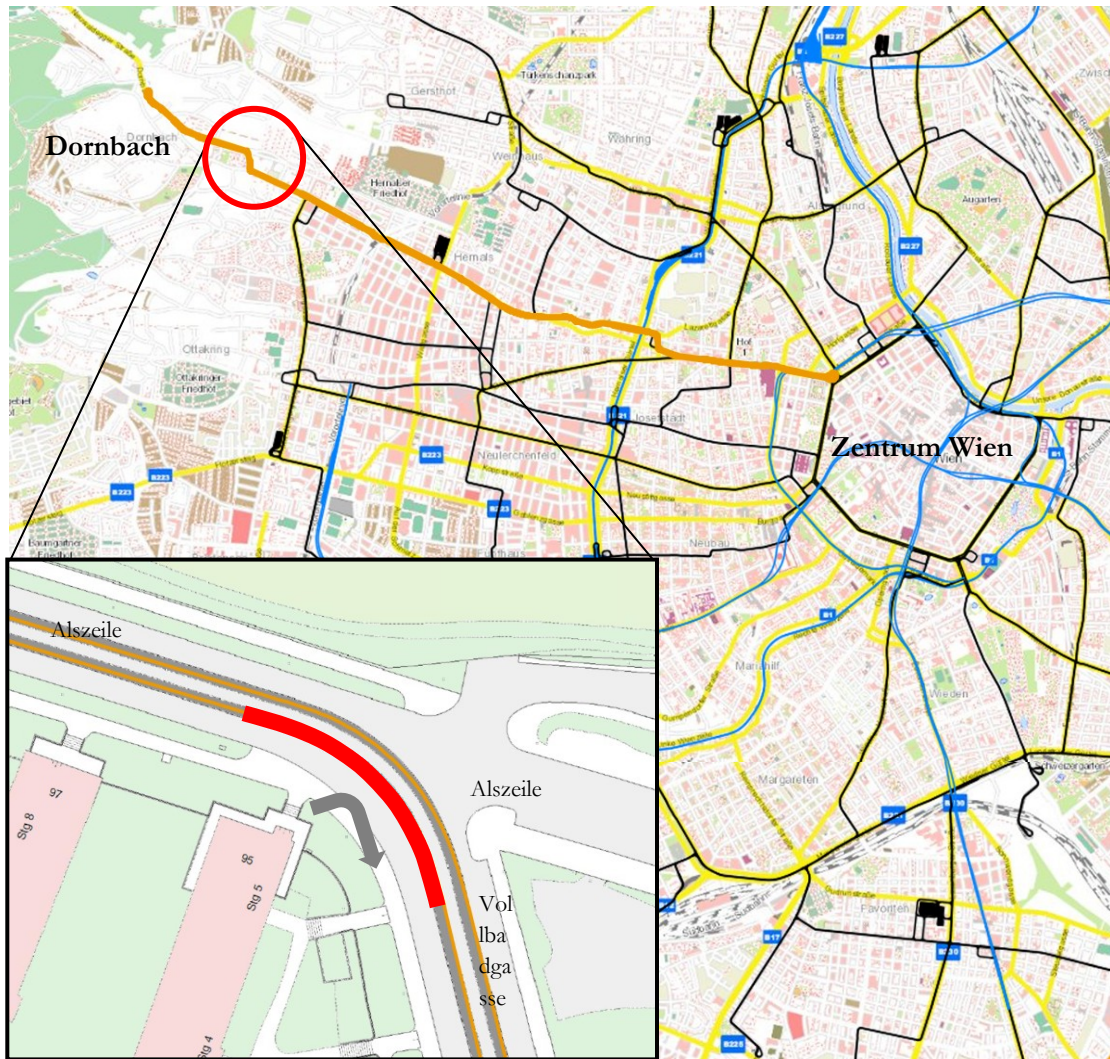


Abb. 3.12: Open-Street-Map Wien mit geographischer Lage des Bogens Alszeile/Vollbadgasse (ISDB WL, Eigendarstellung)

Allgemein	
Bezeichnung	Bogen Alszeile/Vollbadgasse
Adresse	Alszeile 97, 1170 Wien
Zugeteilte Strecke	Nord
Betriebslinie	43
Archivlinie	41
Fahrtrichtung	Neuwaldegg – Schottentor U
Oberbau	
Gleis	2
Bogenrichtung	rechts
Bogenradius	25 m
Länge untersuchter Gleisabschnitt	56,9 m
Schienenprofil	210/95+80a
Stahlgüte	R290GHT (HSH® GM)
C-Gehalt	0,58%
Gleistausch	September 2011
Liegedauer vor Gleistausch	12 Jahre
Oberbauform	schalldämmter Oberbau
Anzahl Auftragschweißungen	0
Rillenaufweitung	keine
Schmieranlage	ja
Verkehrsbelastung	
Überfahrten ULFB	68.408 /a
Überfahrten E ₂ +c ₅	12.072 /a
Verhältnis ULFB/E ₂ +c ₅	85/15
max. Achslast ULFB	12,2 t
max. Achslast E ₂	6,8 t
Gewicht ULFB (Besetzungsgrad 60%)	51,7 t
Gewicht E ₂ +c ₅ (Besetzungsgrad 60%)	43,7 t
Ø Belastung ULFB /a	3,5 Mio.t/a
Ø Belastung E ₂ +c ₅ /a	0,6 Mio.t/a
Ø Belastung/a	4,1 Mio.t/a

Tab. 3.3: Informationen zum Bogen Alszeile/Vollbadgasse

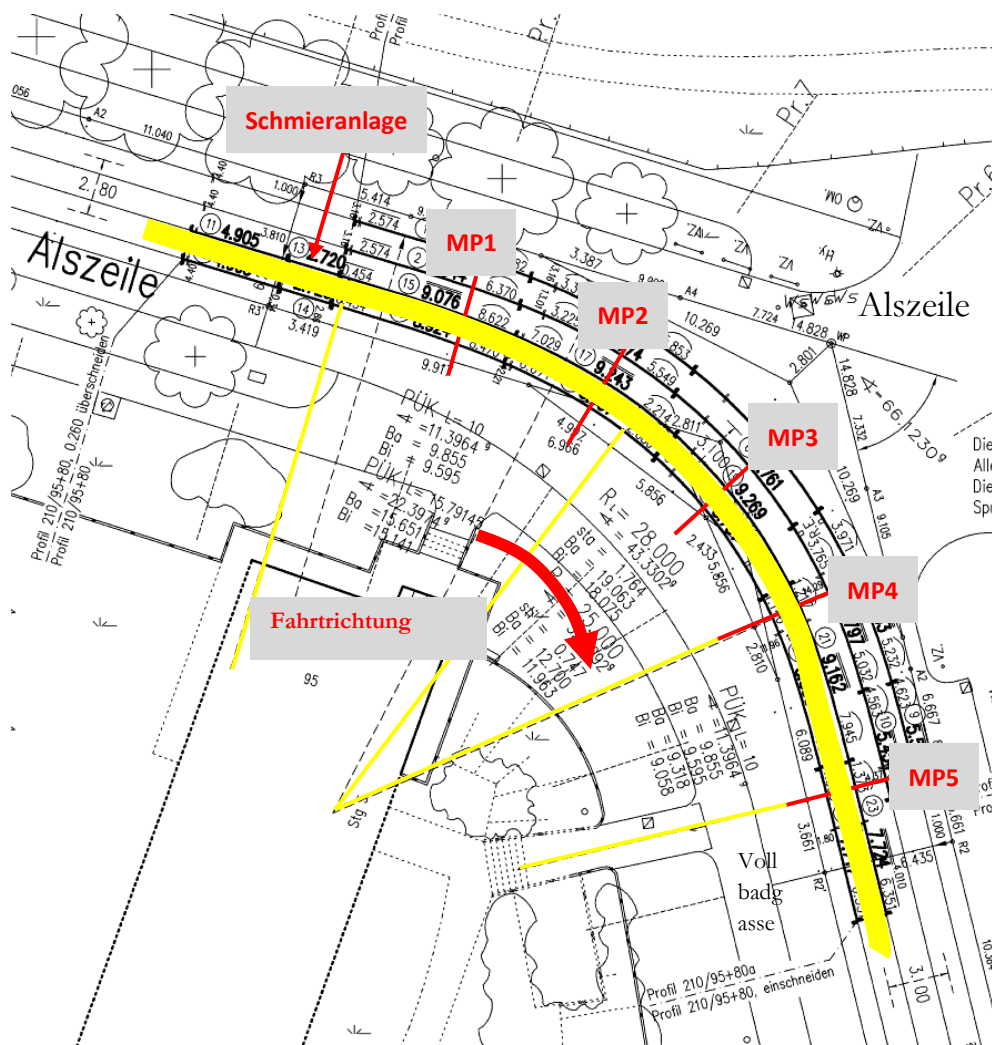


Abb. 3.13: Auszug Ausführungsplan Bogen Alszeile/Vollbadgasse (Eigendarstellung)

Trassierungselement		Teillängen lt. Plan [m]	Lfd. m	Stationierung lt. Net-Files	Gleis
Gerade (G1)	GA1	7,00	0,00	5.084,660	2
	Schmieranlage	3,00	7,00	5.077,660	
	GE1		10,00	5.074,660	
Übergangsbogen (Ü1)	ÜA1	6,00	10,00	5.074,660	
	MP1	7,20	16,00	5.068,660	
	MP2	2,20	23,20	5.061,460	
Kreisbogen (B)	ÜE1		25,40	5.059,260	
	BA	5,35	25,40	5.059,260	
	MP3	6,98	30,75	5.053,910	
Übergangsbogen (Ü2)	BE=MP4		37,73	5.046,929	
	ÜA2=MP4	9,19	37,73	5.046,929	
	ÜE2=MP5		46,92	5.037,741	
Gerade (G2)	GA2=MP5	10,00	46,92	5.037,741	
	GE2		56,92	5.027,741	

Tab. 3.4: Stationierung Gleisabschnitt Bogen Alszeile/Vollbadgasse

3.2.1 Messergebnisse Gleismesswagen (Alszeile)

Die folgenden Messschriebe zeigen den Fahrkopfverschleiß, getrennt nach Innen- und Außenschiene, von fünf bzw. vier Messungen mit dem Gleismesswagen (siehe Kap. 1.6.4) aus dem Jahr 2013. Die Daten wurden als Datensatz aus dem Trackoptimizer (siehe Kap. 1.6.4.7.1) entnommen.

Die laufende Stationierung des Bogens beruht auf den Net-Files (siehe Kap. 1.6.4.7.5).

Auf Grund der Streuung der Messergebnisse wird eine Näherung (Näherungskurve) aller Messschriebe vorgenommen. Die Näherungskurve wurde nach dem Verlauf der Messschriebe unter Ausschluss eindeutiger Fehlmessungen bestimmt. Die Fehlmessungen durch die Größe der Abweichung zu den anderen Messwerten sowie durch horizontale Linien über mehr als 5 m Länge ersichtlich.

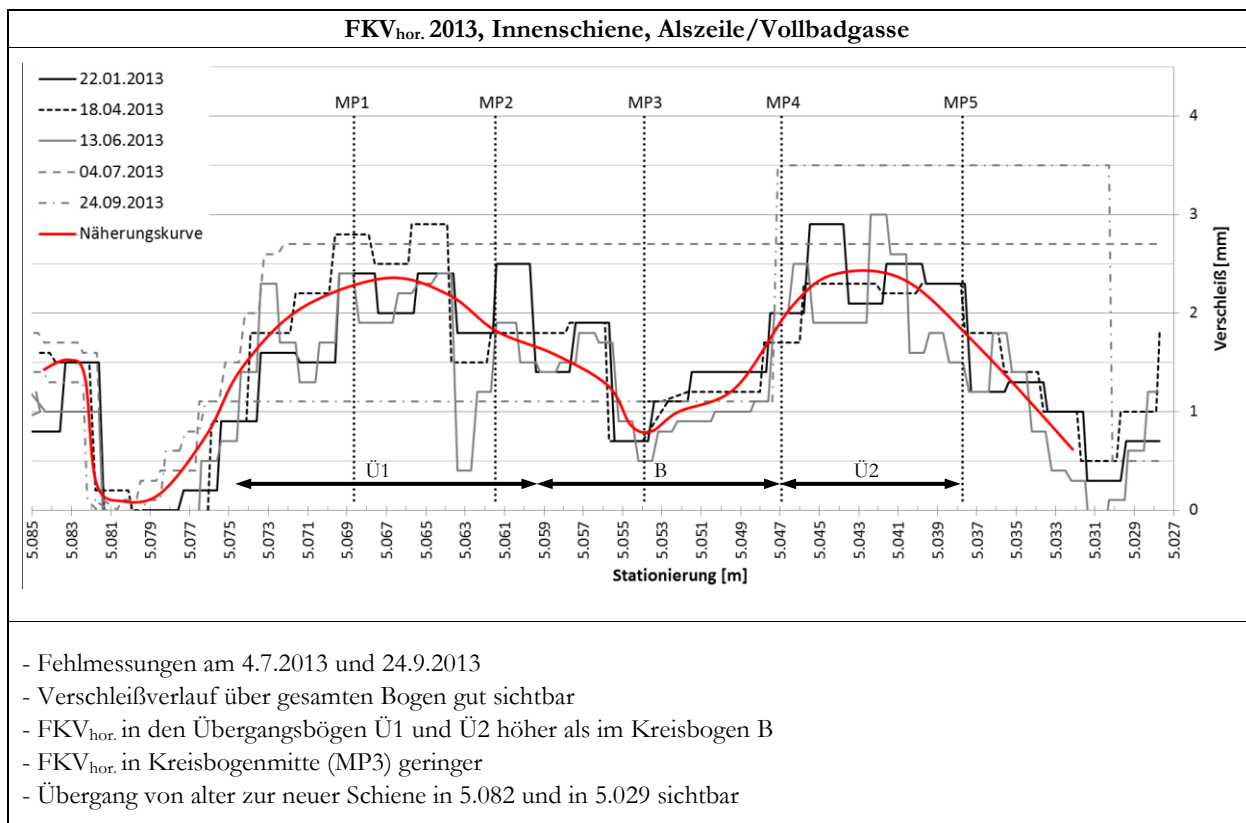


Abb. 3.14: Fahrkopfseitenverschleiß Innenschiene 2013, Gleismesswagen (Alszeile/Vollbadgasse)

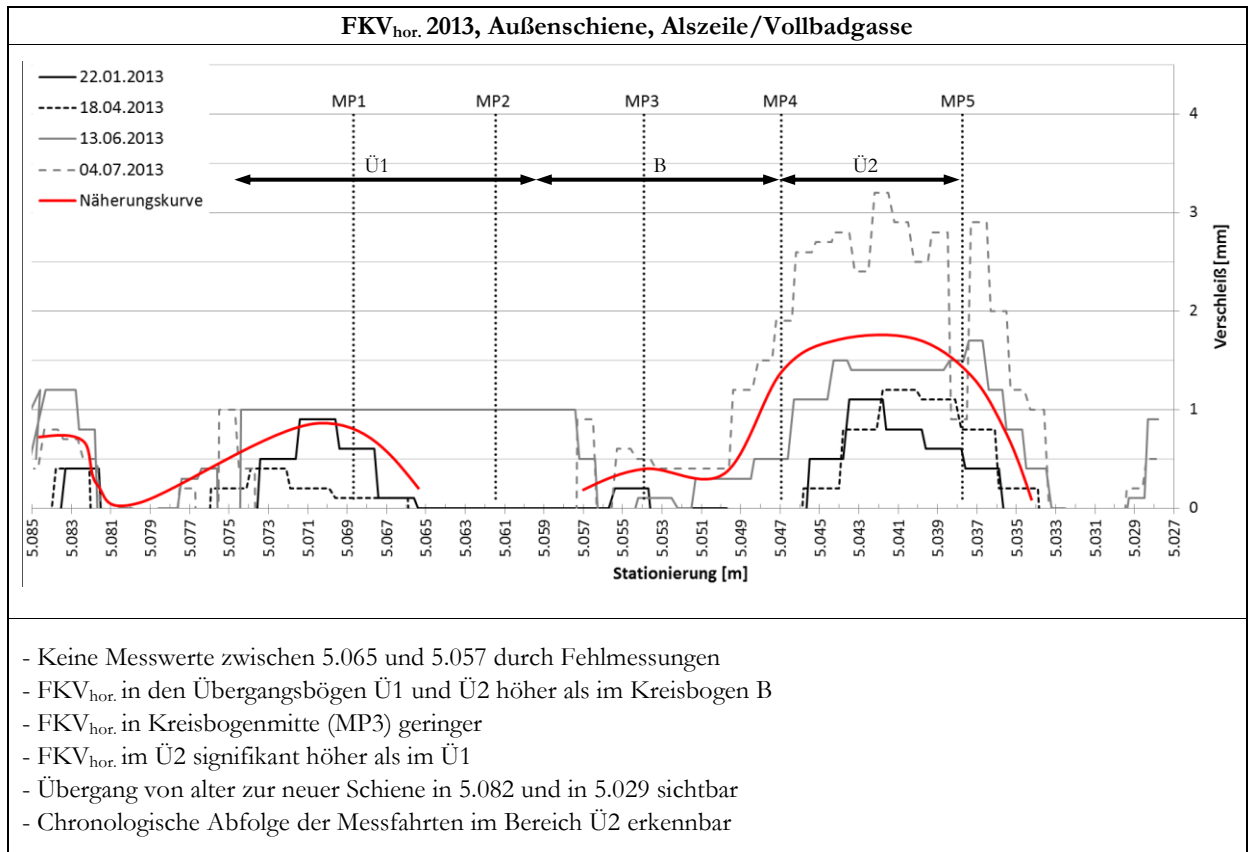


Abb. 3.15: Fahrkopfsseitenverschleiß 2013 Außenschiene mit Gleismesswagen (Alszeile/Vollbadgasse)

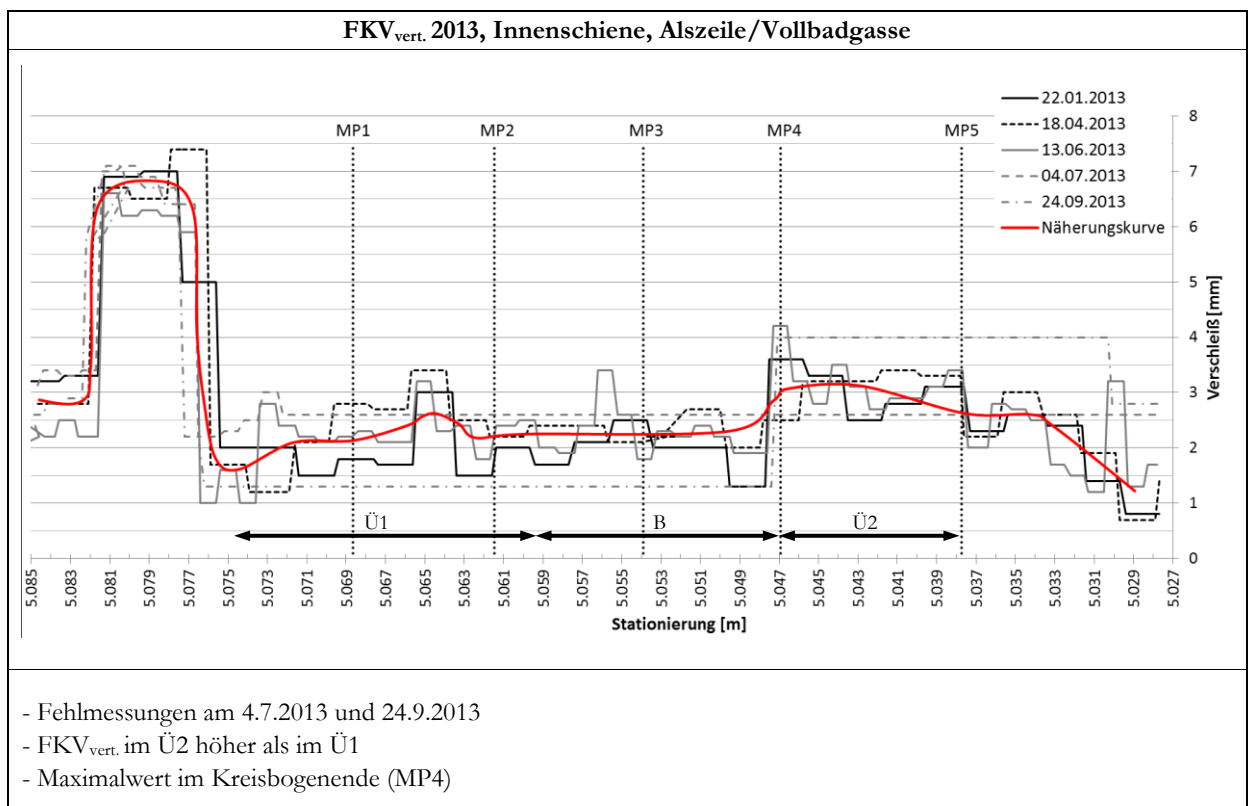


Abb. 3.16: Fahrkopfhöhenverschleiß Innenschiene 2013, Gleismesswagen (Alszeile/Vollbadgasse)

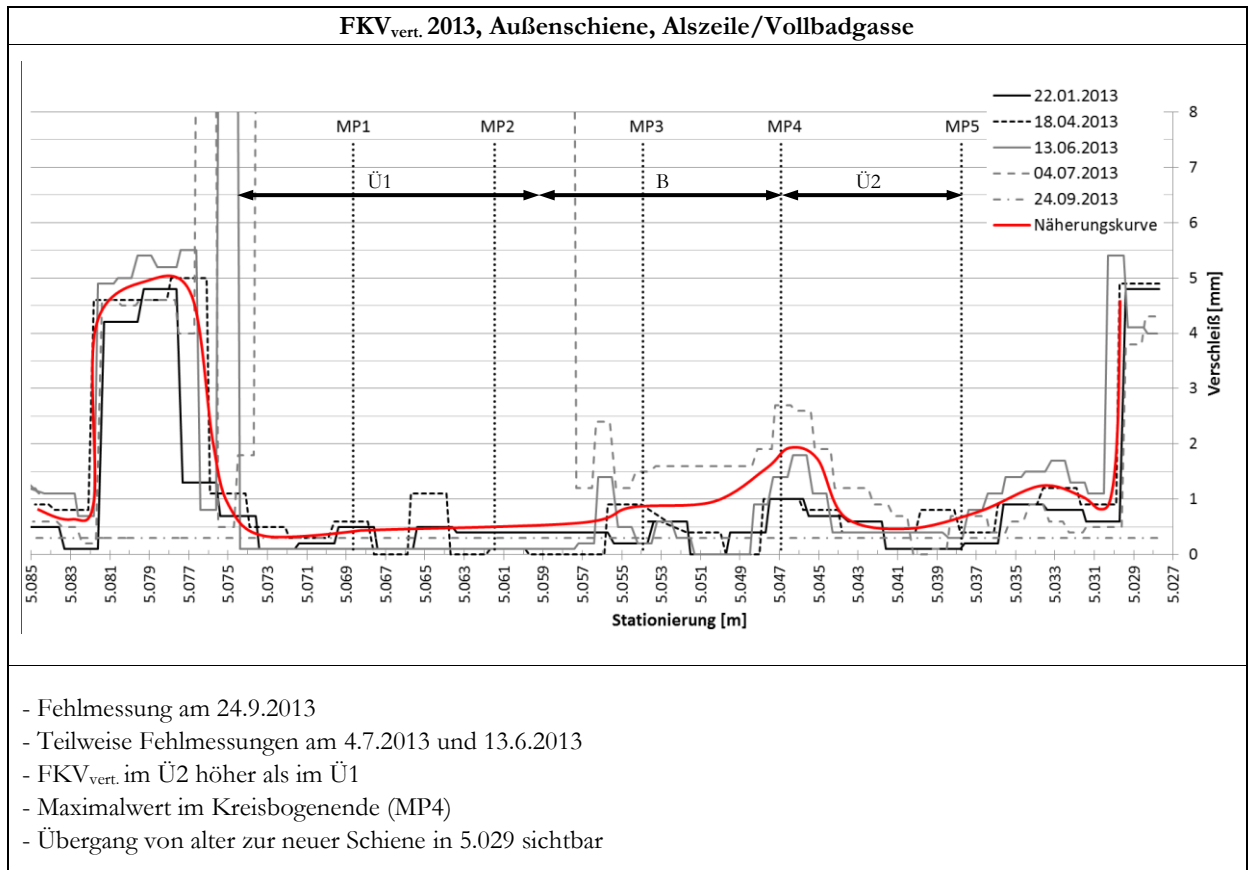


Abb. 3.17: Fahrkopfhöhenverschleiß Außenschiene 2013, Gleismesswagen (Alszeile/Vollbadgasse)

3.2.2 Messergebnisse Messreg^{CDM} (Alszeile)

Die folgenden Messschriebe zeigen die Rillenweite und Rillentiefe der Messung mit dem Messsystem Messreg^{CDM} (siehe 1.6.5) vom 18.6.2013. Für das Jahr 2013 stehen keine weiteren Messungen zur Verfügung. Die laufenden Meterschritte des Bogens wurden zur Vereinfachung mit dem Startpunkt bei GA1 neu definiert.

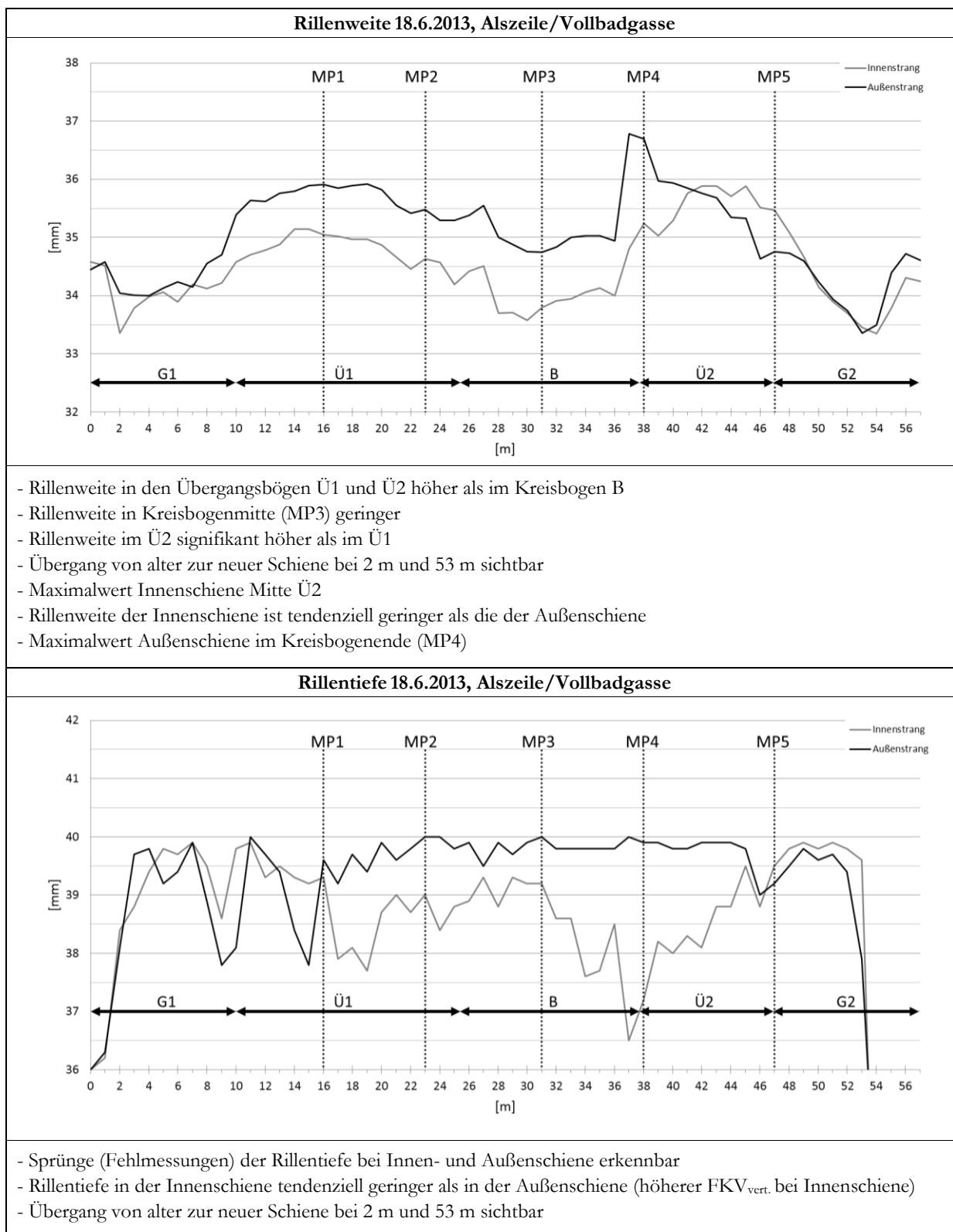


Abb. 3.18: Rillenweite und Rillentiefe Innen- und Außenschiene 18.6.2013, Messreg^{CDM} (Alszeile/Vollbadgasse)

3.2.3 Messergebnisse Calipri (Alszeile)

Die folgenden Balkendiagramme zeigen die Messergebnisse des Seitenverschleißes ($FKV_{hor.}$ und $LKV_{hor.}$) und des Fahrkopfhöhenverschleißes der punktuellen Messungen mit dem Messsystem Calipri (siehe 1.6.6) vom 23.4.2013 (durchgeführt von VOEST).

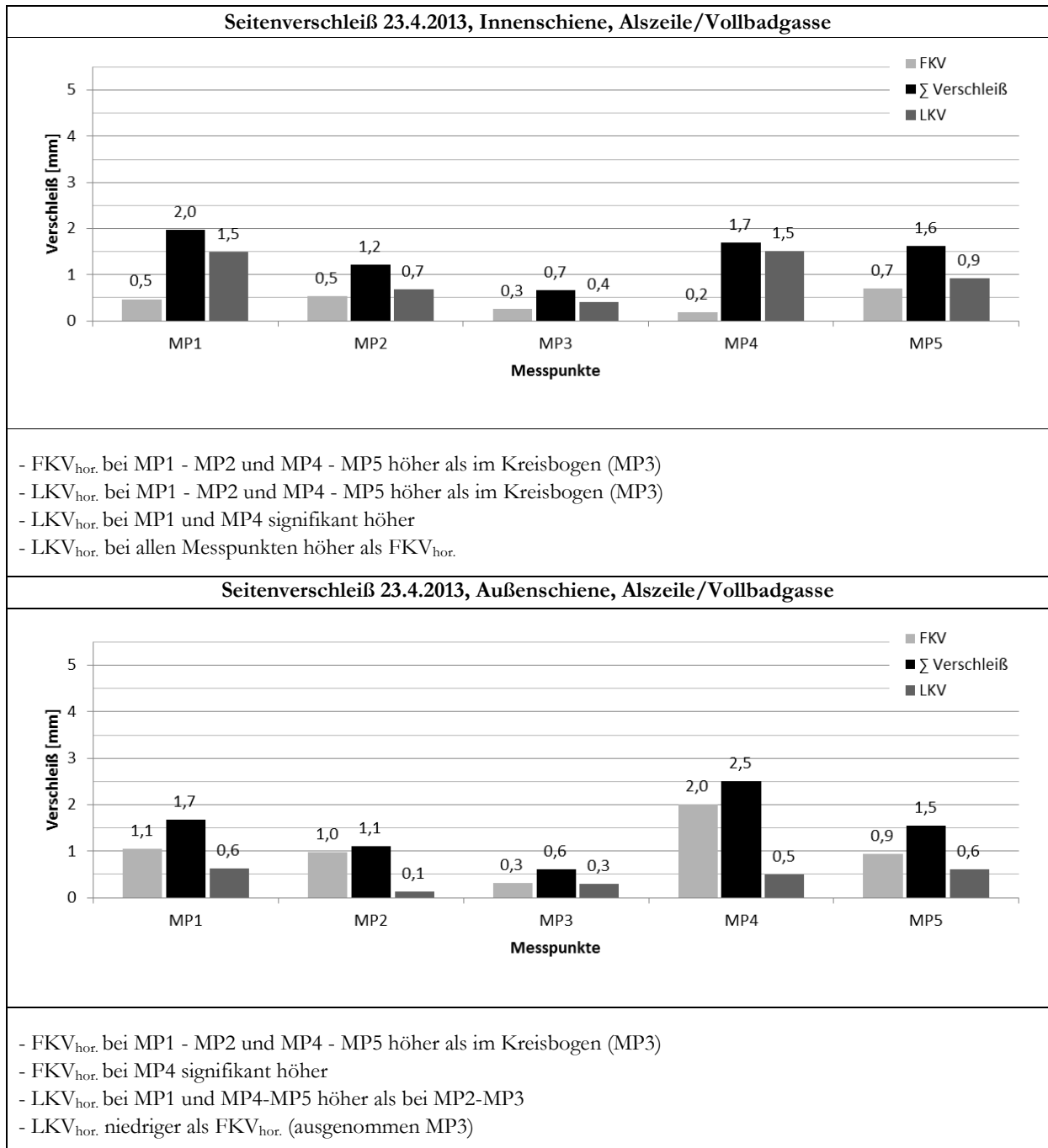


Abb. 3.19: Seitenverschleiß Innen- und Außenschiene 23.4.2013, Calipri (Alszeile/Vollbadgasse)

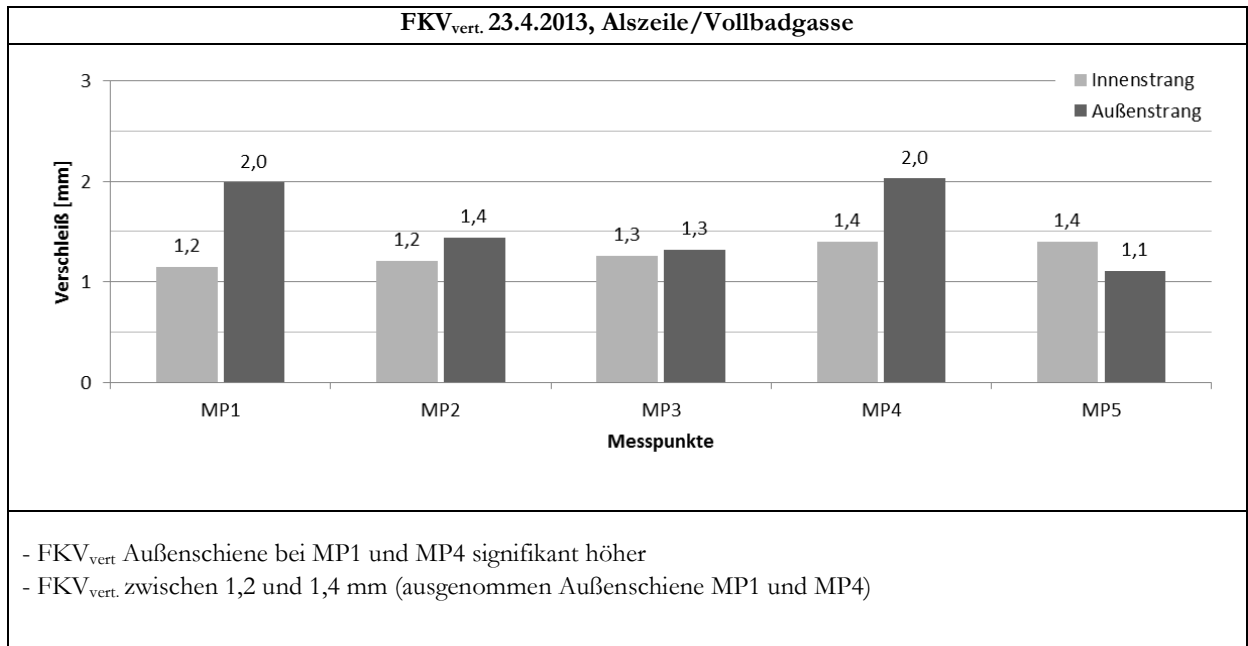


Abb. 3.20: Fahrkopfhöhenverschleiß Innen- und Außenschiene 23.4.2013, Calipri (Alszeile/Vollbadgasse)

3.2.4 Messergebnisse Schiebelehren (Alszeile)

Die folgenden Balkendiagramme zeigen die Messergebnisse des Seitenverschleißes (FKV_{hor.} und LKV_{hor.}) und des Fahrkopfhöhenverschleißes der punktuellen Messungen mit Schiebelehren (siehe Kap. 1.6.7) vom 11.9.2013.

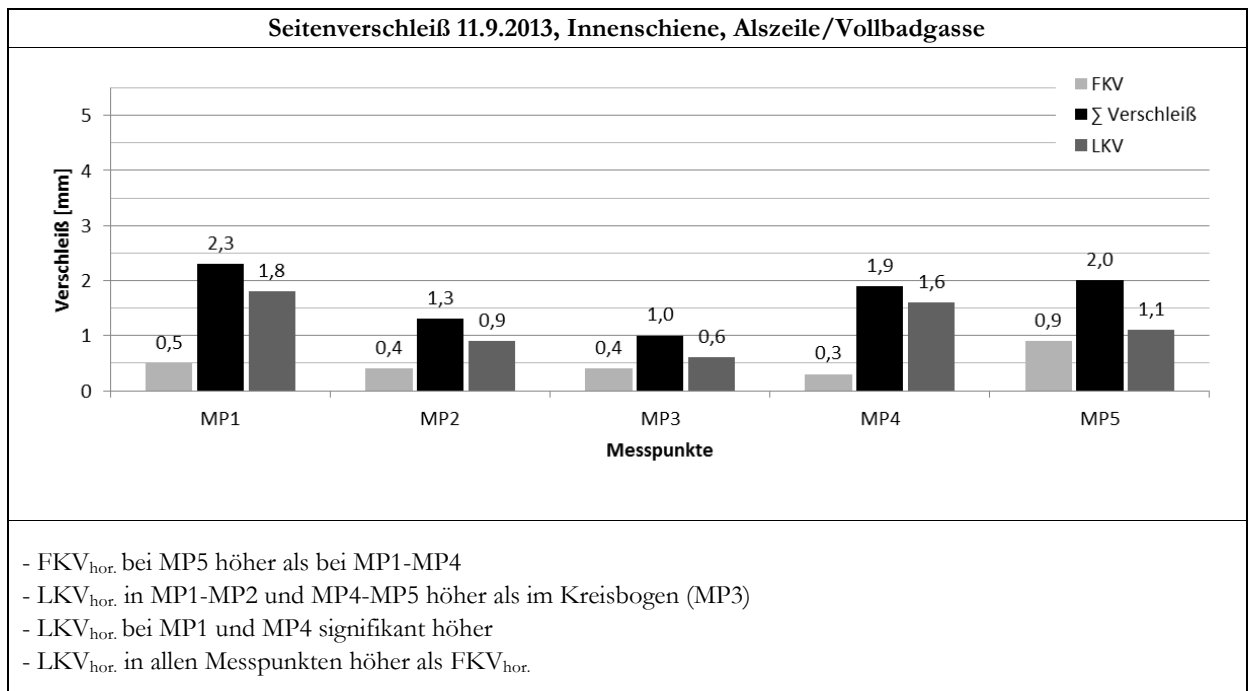


Abb. 3.21: Seitenverschleiß Innenschiene 11.9.2013, Schiebelehren (Alszeile/Vollbadgasse)

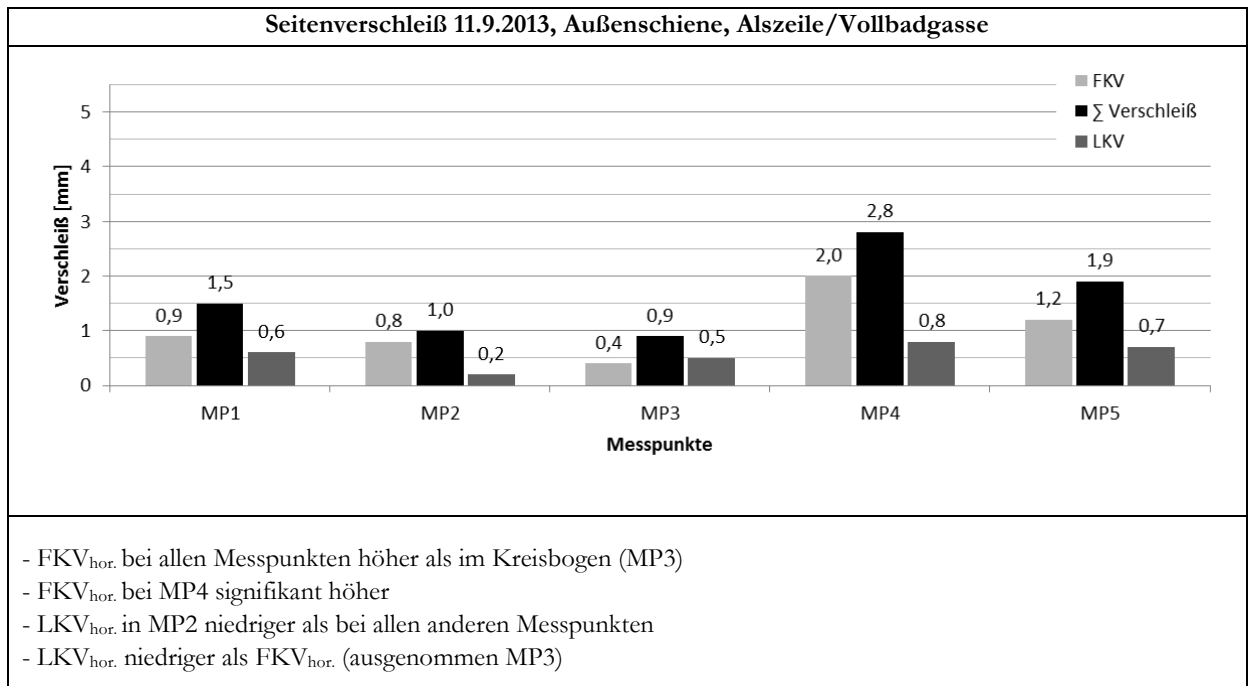


Abb. 3.22: Seitenverschleiß Außenschiene 11.9.2013, Schiebelehren (Alszeile/Vollbadgasse)

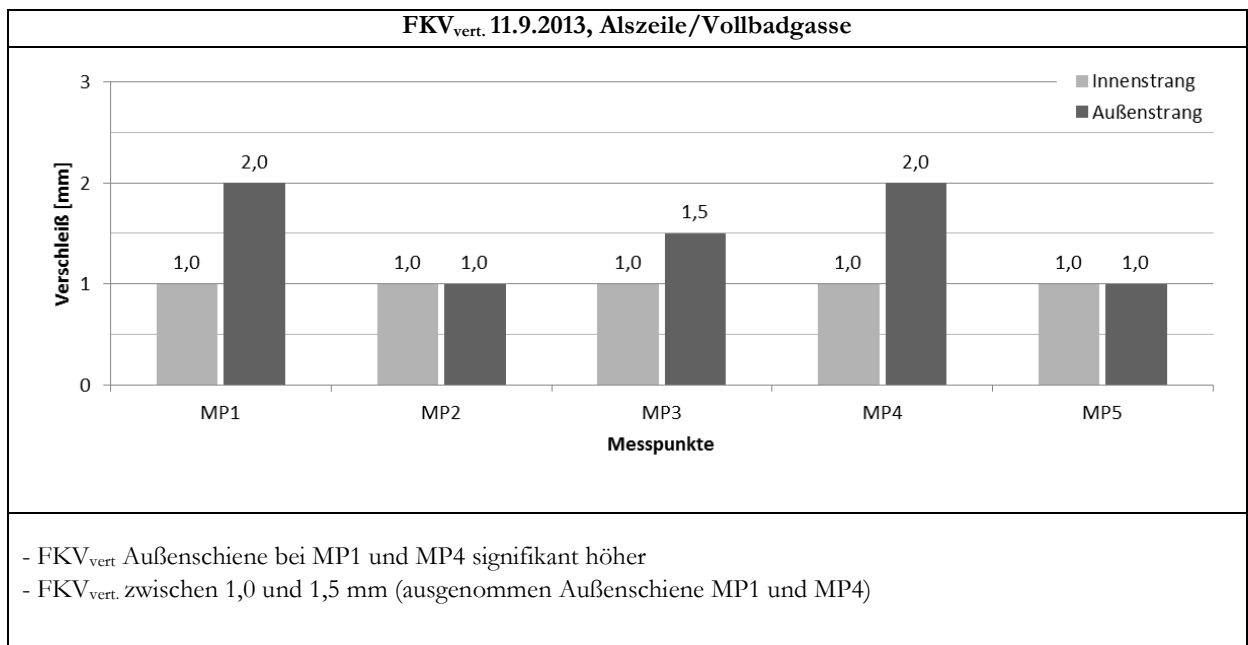


Abb. 3.23: Fahrkopfhöhenverschleiß Innen- und Außenschiene 11.9.2013, Schiebelehre (Alszeile/Vollbadgasse)

3.3 Gegenüberstellung der Messergebnisse

Die Messergebnisse der unterschiedlichen Messsysteme aus Kap. 3.1 und 3.2 werden getrennt nach den untersuchten Bögen verglichen und auf Kongruenz beurteilt. Es werden jeweils nur jene Messsysteme miteinander verglichen, welche dieselben Messparameter liefern.

Für die Messwerte der Messung mit dem Gleismesswagen werden die Werte der Näherungskurve bei den fünf Messpunkten aus den Messungen 2013 herangezogen. Für die Messwerte des Messregs wird der Höhenverschleiß des Fahrkopfes aus dem zu einem Messpunkt nächst liegenden Wert der Rillentiefe berechnet.

3.3.1 Bogen Grinzing

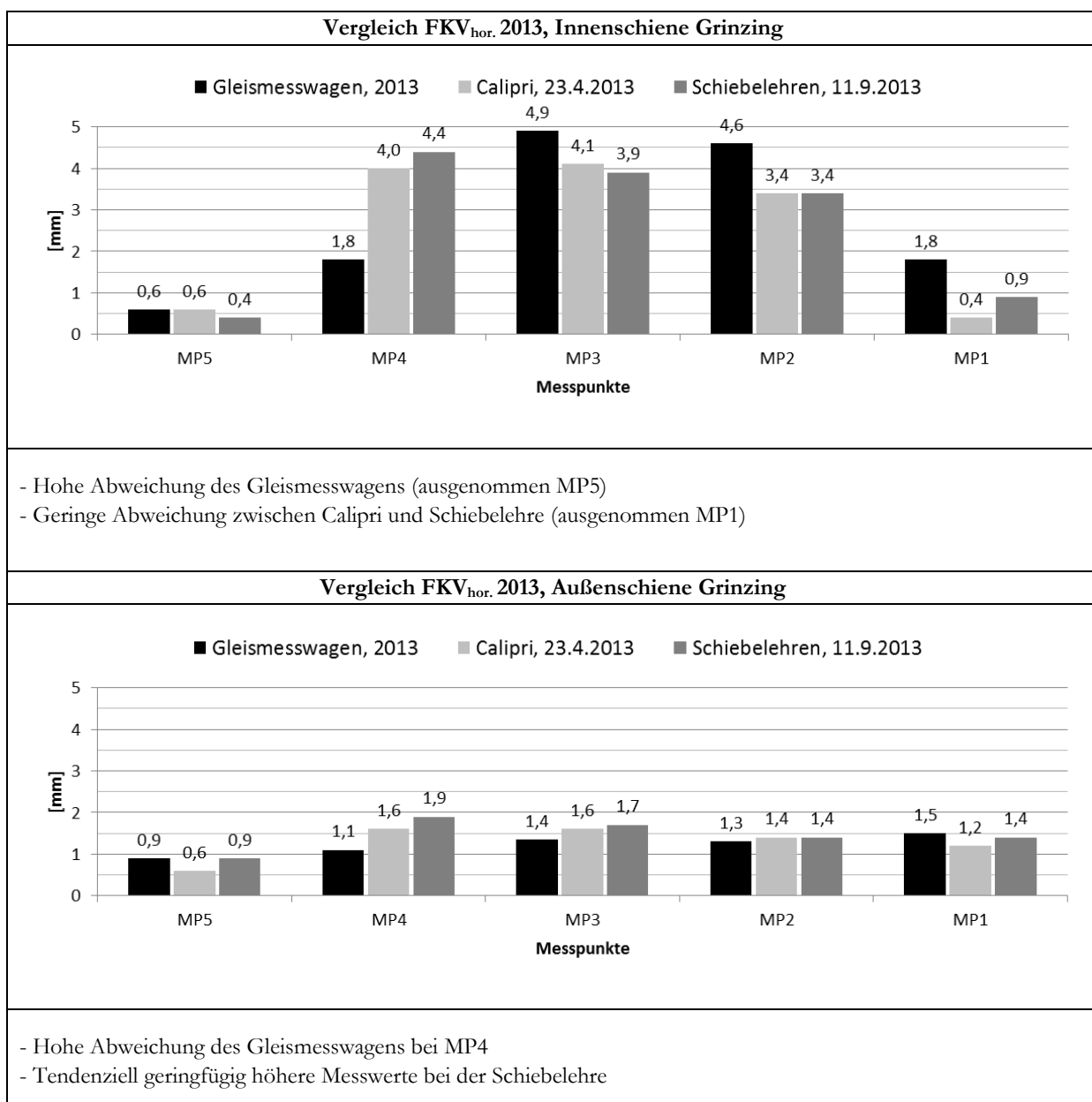


Abb. 3.24: Vergleich Fahrkopfseitenverschleiß 2013 (Grinzing)

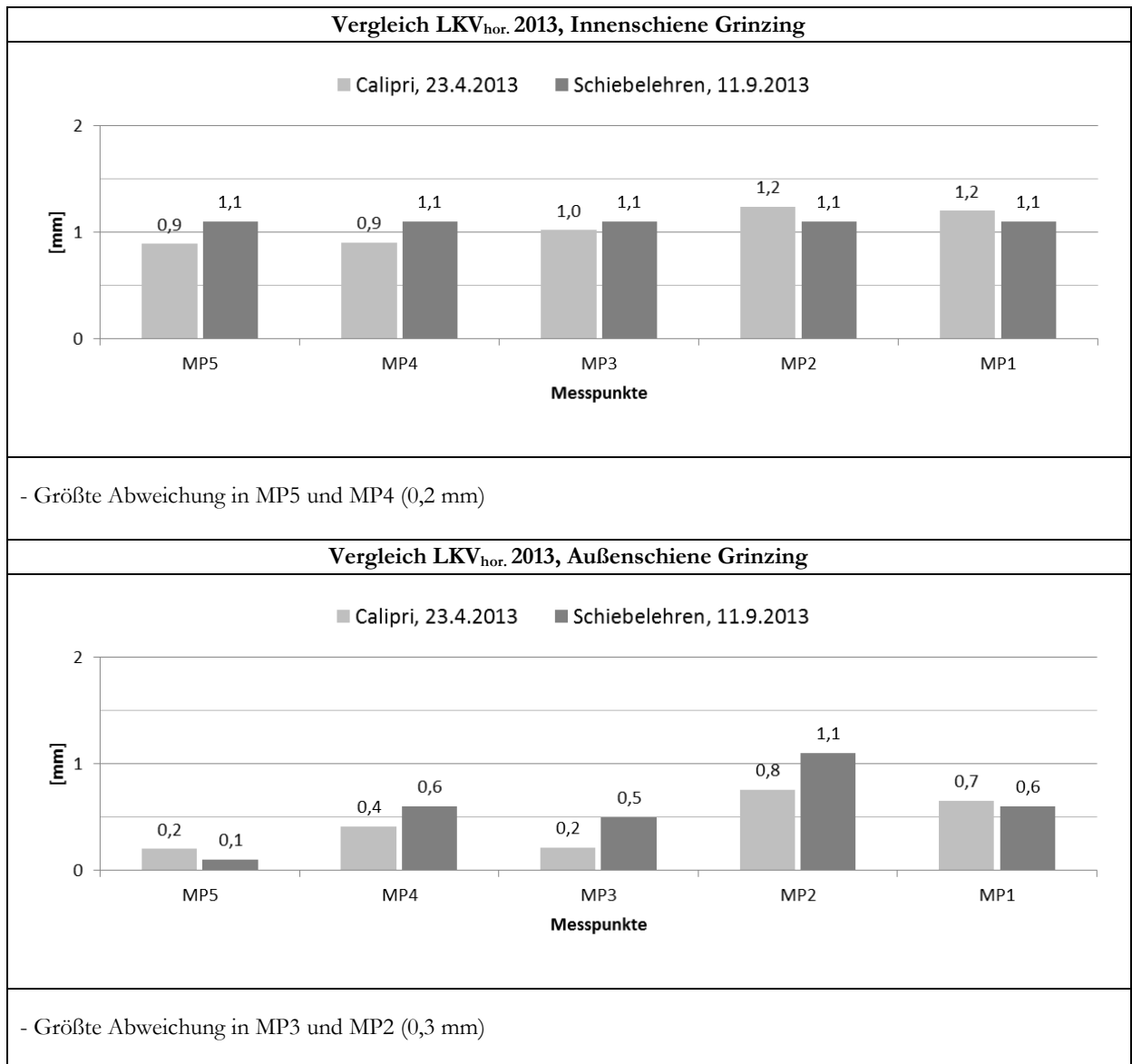


Abb. 3.25: Vergleich Leitkopfsseitenverschleiß 2013 (Grinzing)

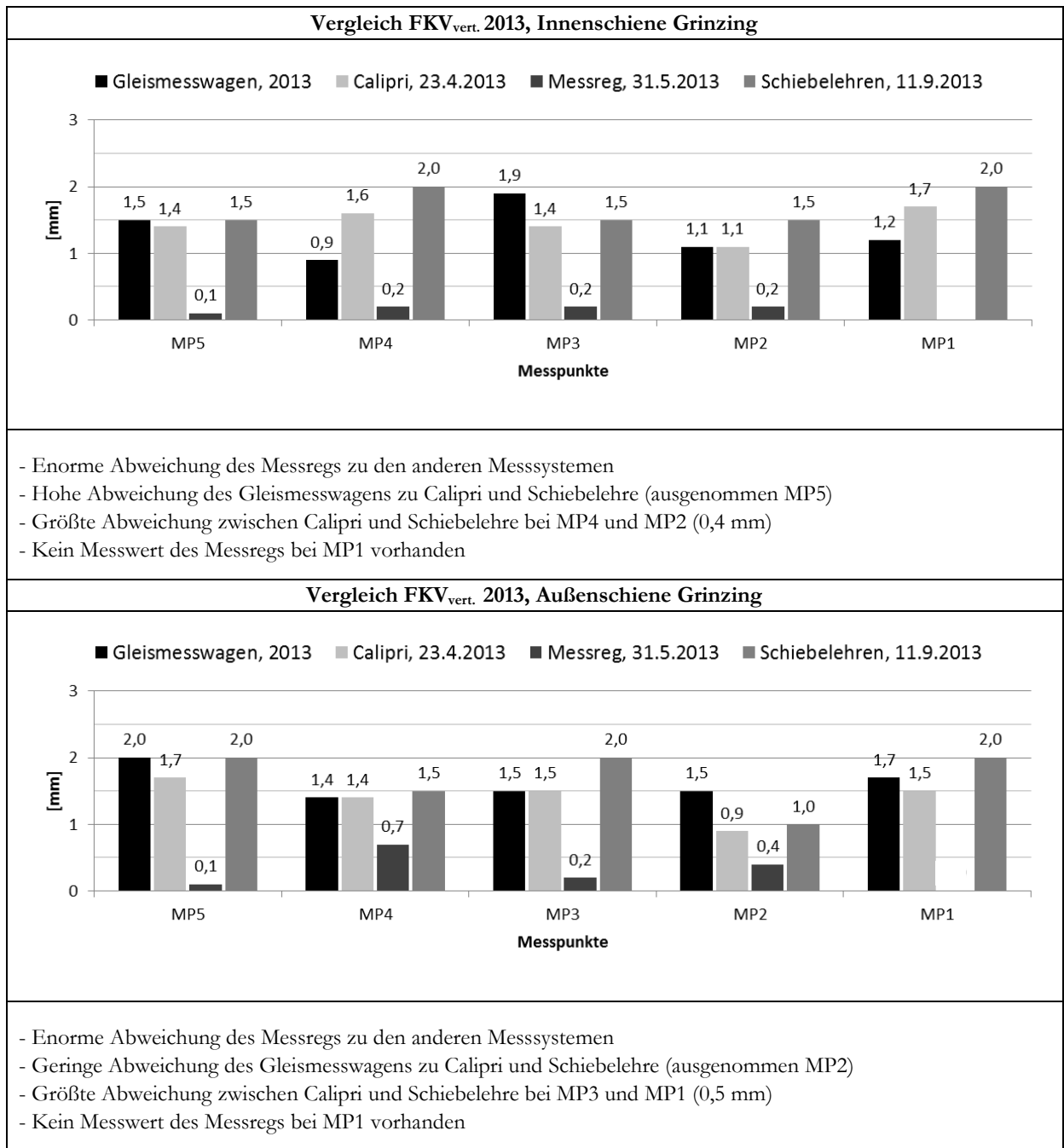


Abb. 3.26: Vergleich Fahrkopfhöhenverschleiß 2013 (Grinzing)

3.3.2 Bogen Alszeile/Vollbadgasse

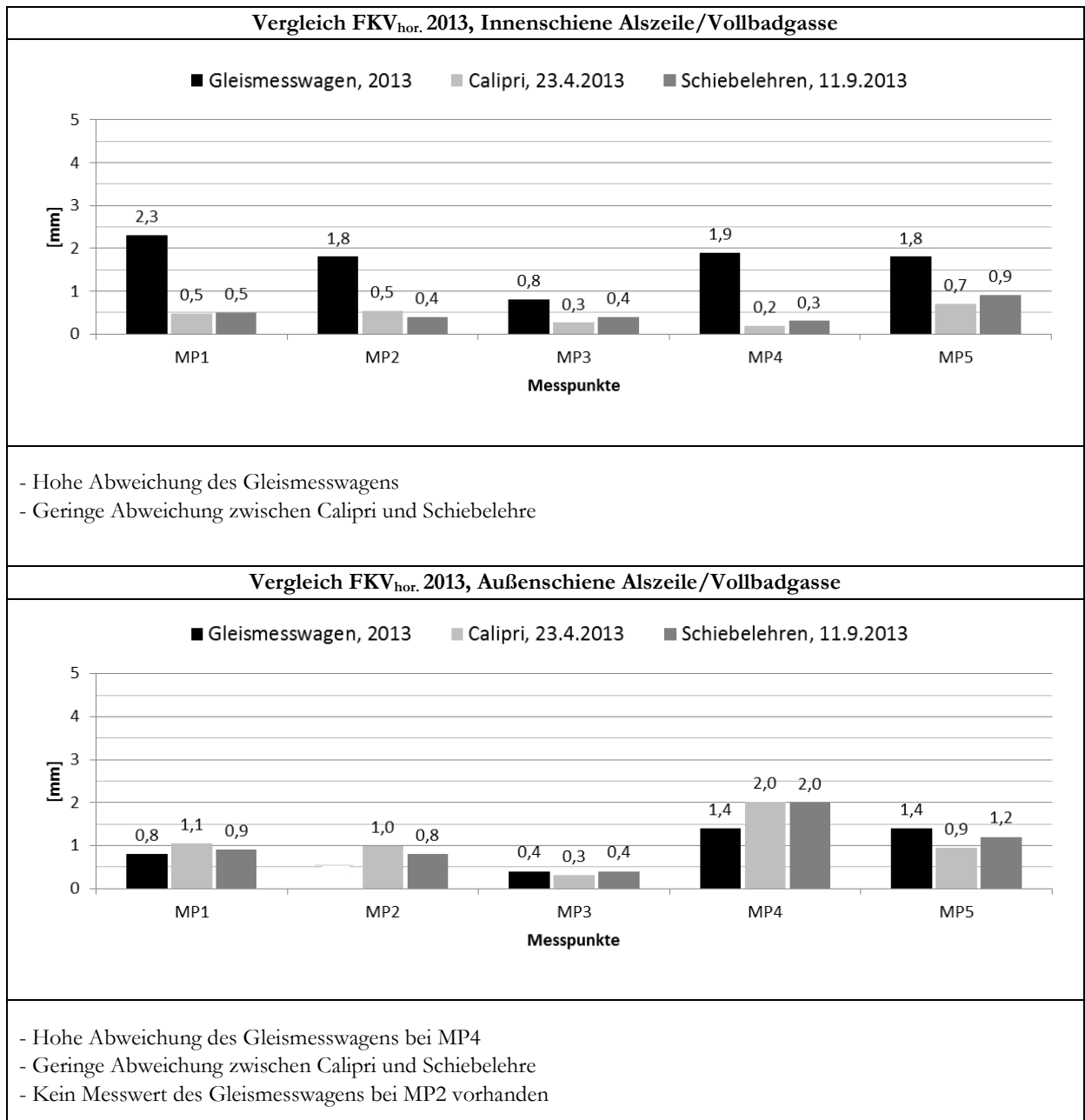


Abb. 3.27: Vergleich Fahrkopfseitenverschleiß 2013 (Alszeile/Vollbadgasse)

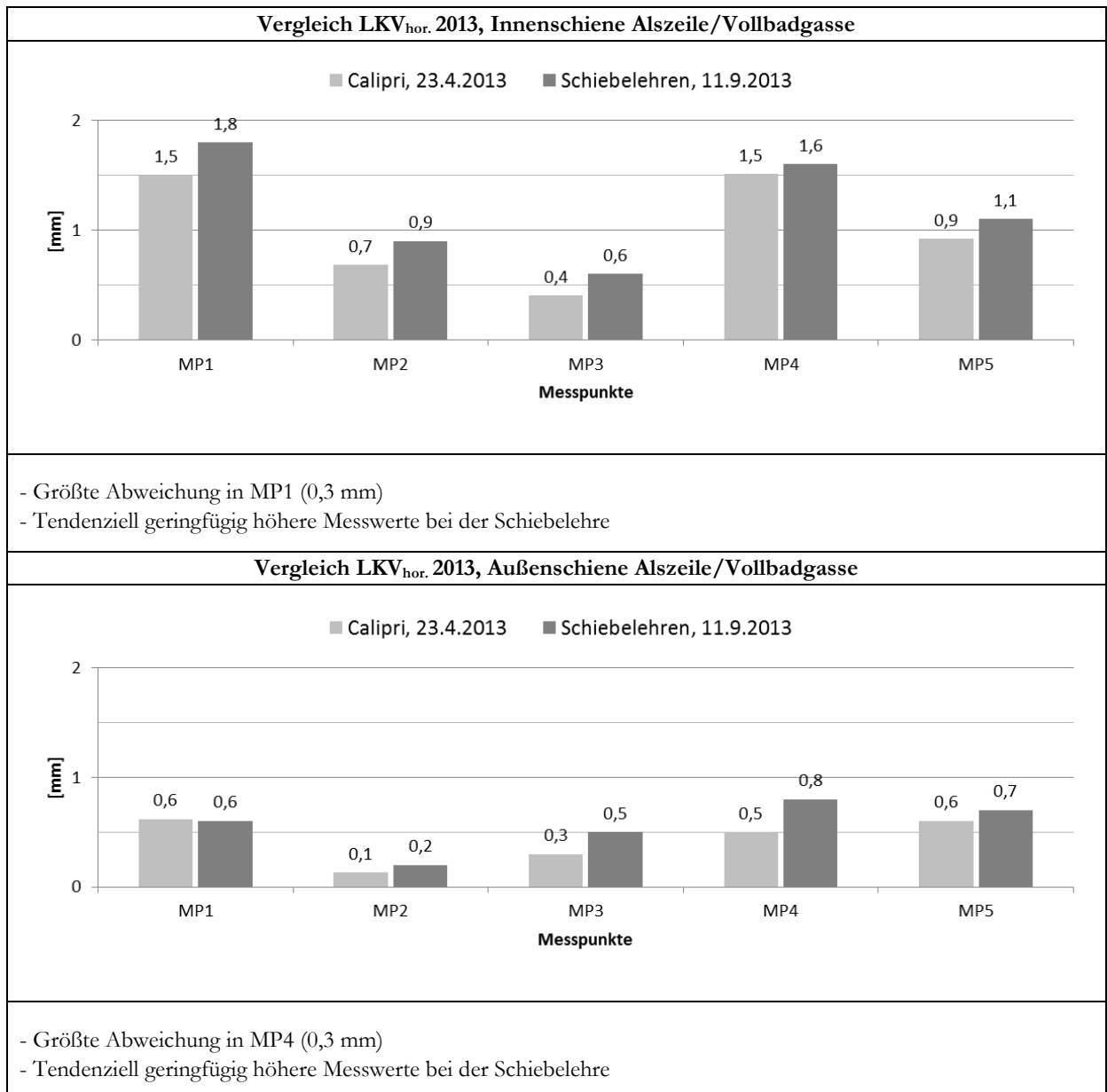


Abb. 3.28: Vergleich Leitkopfsseitenverschleiß 2013 (Alszeile/Vollbadgasse)

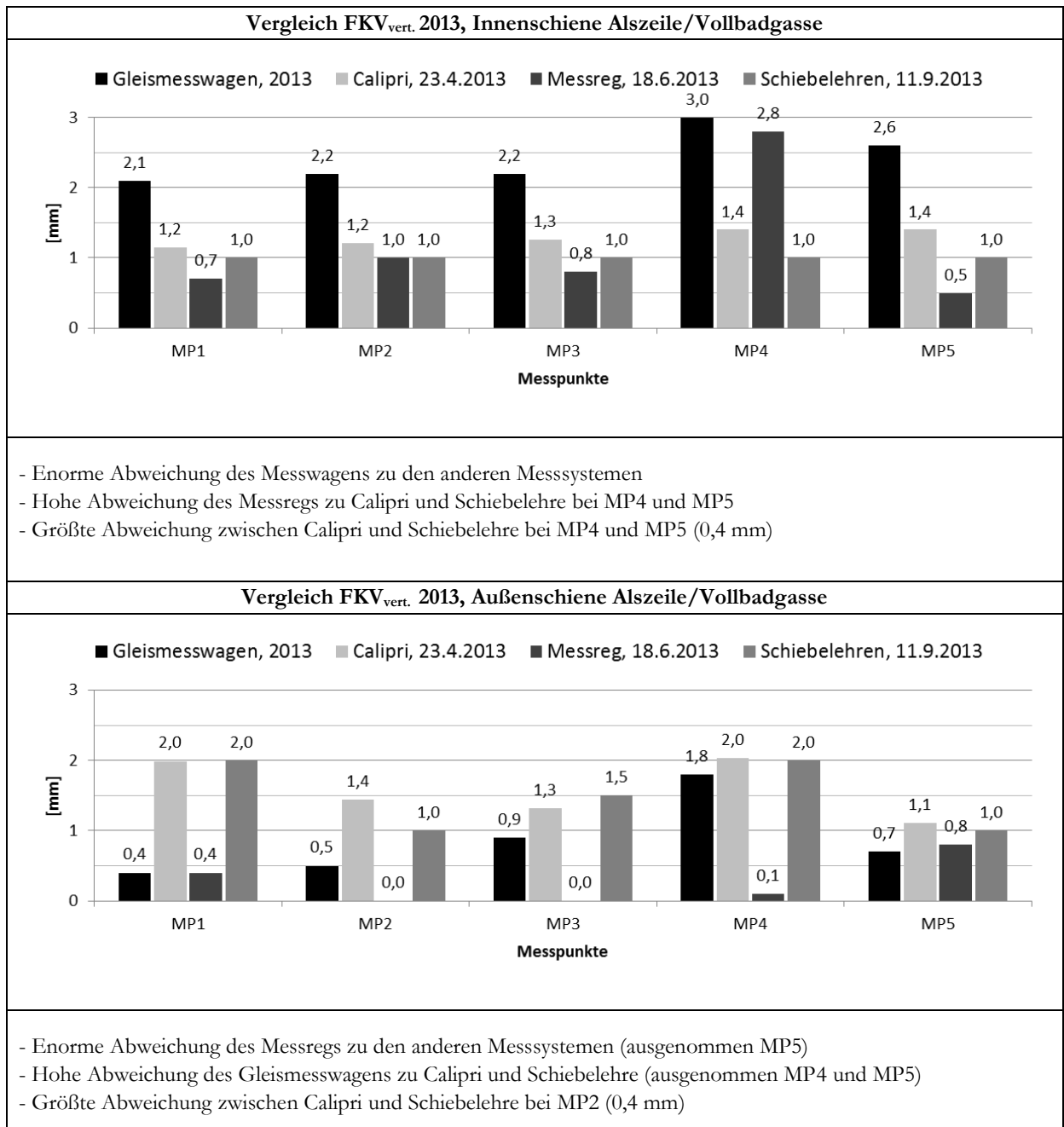


Abb. 3.29: Vergleich Fahrkopfhöhenverschleiß 2013 (Alszeile/Vollbadgasse)

4 Analyse der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Messsysteme und Messergebnisse der untersuchten Bögen aus Kap. 3 werden analysiert, beurteilt und verglichen, um Aussagen zu folgenden Punkten zu treffen:

- Beurteilung der verwendeten Messsysteme (Kap. 4.1)
- Verschleißverlauf entlang der untersuchten Bögen (Kap. 4.2)
- Zeitliche Verschleißentwicklung der untersuchten Bögen (Kap. 4.3)
- Liegedauer und Anlagenmanagement des Bogens Alszeile/Vollbadgasse (Kap. 4.4)

4.1 Beurteilung der Messsysteme

Es werden die vier Messsysteme, mit welchen die beiden Bögen aus Kap. 3 vermessen wurden, hinsichtlich erfassbarer Gleisparameter, Messdatenaufbereitung, Messdatengenauigkeit und Verortung beurteilt und daraus Schlussfolgerungen gezogen.

4.1.1 Messsystem Gleismesswagen (siehe Kap. 1.6.4)

- Erfassbare Schienenprofilparameter

Mit dem Gleismesswagen werden folgende Schienenprofilparameter erfasst:

- Fahrkopfseitenverschleiß (gauge wear)
- Fahrkopfhöhenverschleiß (vertical wear)
- Rillentiefe
- Rillenquerprofil

Für die Rillenweite und den Leitkopfseitenverschleiß stehen keine Werte sowie zum Rillenquerprofil keine graphischen Darstellungen zur Verfügung. Es können keine vollständigen Aussagen zum Verschleißprofil getroffen werden.

- Messdatenaufbereitung

Die Messdaten wurden aus dem Trackoptimizer (siehe Kap. 1.6.4.7.1) in Form von CSV-Daten bezogen, in eine .xlsx-Datei umgewandelt und aufbereitet. Eine graphische Darstellung der Schienenquerschnitte entlang des Messschriebs war aus EDV-technischen Gründen nicht möglich. Dadurch kann der IST-Zustand des Schienenprofils nur schwer beurteilt werden.

- Messdatengenauigkeit

Die Daten des Messwagens lassen über den Messschrieb Aussagen zum Verschleißverlauf entlang der Trassierungselemente zu, wobei die Größenordnungen der Messergebnisse häufig in Frage zu stellen sind. Die Messschriebe zeigen keinen Zusammenhang zur chronologischen Abfolge der Messungen (siehe z.B. Abb. 3.14). Gemäß Kap. 1.6.4.4 sollten die Schienenprofilparameter alle 50 cm erfasst und abgespeichert werden.

Die Messergebnisse aus Kap. 3 zeigen jedoch einen Messraster von nur rund 2 m, welcher sich in den horizontalen Linien des stufenförmigen Verlaufs der Messschriebe widerspiegelt. Fehlmessungen sind durch die Größe der Abweichung zu den anderen Messwerten sowie durch horizontale Linien über mehr als 5 m Länge ersichtlich.

- Verortung

Das Verfahren mit CUBAL nach Kap. 1.6.4.6 ermöglicht eine sehr genaue Verortung der Messdaten. Dies ist auch bei der Überlagerung der Messschriebe unterschiedlicher Messfahrten ersichtlich. Anzumerken ist, dass die Net-Files (siehe Kap. 1.6.4.7.5) als Referenzdaten für die krümmungsbasierte Verortung herangezogen werden, diese jedoch in den untersuchten Bögen nicht mit dem Ausführungsplan des letzten Gleisneubaus übereinstimmen. Die Gründe liegen hierbei an der fehlenden Aktualisierung der Net-Files nach einem Gleistausch.

4.1.2 Messsystem Messreg^{CDM} (siehe Kap.1.6.5)

- Erfassbare Schienenprofilparameter

Mit dem Messsystem Messreg^{CDM} werden folgende Schienenprofilparameter erfasst:

- Rillenweite
- Rillentiefe
- Fahrkopfhöhenverschleiß

Für den Fahrkopfseitenverschleiß und den Leitkopfseitenverschleiß stehen keine Werte zur Verfügung. Es können keine vollständigen Aussagen zum Verschleißprofil getroffen werden.

- Messdatenaufbereitung

Die Messdaten stehen als .xlsx-Datei zur Verfügung und können in Form von Messschrieben graphisch dargestellt werden.

- Messdatengenauigkeit

Die Daten des Messsystems lassen über den Messschrieb Aussagen zur Rillenweite und zum Höhenverschleiß entlang der Trassierungselemente zu, wobei die Größenordnungen der Messergebnisse plausibel sind. Die Messung der Rillentiefe zeigt häufig sprunghafte Messwerte, die wiederum auf verschmutzte Rillen schließen lassen.

- Verortung

Die Verortung der Messdaten nach Kap. 1.6.5.6 des Messsystems ist ungenau (± 3 m). Durch den Abgleich mit den Messschrieben des Gleismesswagens war die Verortung dennoch möglich.

4.1.3 Messsystem Calipri (siehe Kap. 1.6.6)

- Erfassbare Schienenprofilparameter

Mit dem Messsystem Calipri werden folgende Schienenprofilparameter erfasst:

- Fahrkopfseitenverschleiß
- Leitkopfseitenverschleiß
- Fahrkopfhöhenverschleiß
- Rillenweite
- Rillentiefe

Das Messsystem Calipri liefert alle Schienenprofilparameter, um vollständige Aussagen zum Verschleißprofil treffen zu können.

- Messdatengenauigkeit

Mit einer Genauigkeit von $\pm 0,08$ mm liefert dieses Messgerät sehr genaue Schienenprofilparameter.

- Messdatenaufbereitung

Bei Rillenschienen ist nach dem Messvorgang eine manuelle Ausrichtung der graphischen Darstellungen des verschlissenen Profils und des Neuprofils notwendig, um genaue Messwerte zu erreichen.

- Verortung

Die Messpunkte wurden auf den Randplatten farblich gekennzeichnet, wodurch die Verortung der Messdaten sehr genau (± 2 cm) möglich ist.

4.1.4 Messsystem Schiebelehren (siehe Kap. 1.6.7)

- Erfassbare Schienenprofilparameter

Mit den Schiebelehren werden folgende Schienenprofilparameter erfasst.

- Fahrkopfseitenverschleiß
- Leitkopfseitenverschleiß
- Fahrkopfhöhenverschleiß
- Rillenweite
- Rillentiefe

Schiebelehren liefern alle Schienenprofilparameter, um vollständige Aussagen zum Verschleißprofil treffen zu können.

- Messdatengenauigkeit

Die Messgenauigkeit beträgt 0,25 mm.

- Messdatenaufbereitung

Die Messdatenaufbereitung erfolgt in Form einer .xlsx-Datei.

- Verortung

Die Messpunkte wurden auf den Randplatten farblich gekennzeichnet, wodurch die Verortung der Messdaten sehr genau (± 2 cm) möglich ist.

4.1.5 Schlussfolgerungen zu den Messsystemen

Der Vergleich der Messergebnisse der angewandten Messsysteme hat gezeigt, dass beim Fahrkopfseitenverschleiß $FKV_{hor.}$ eine Schwankungsbreite von 0 – 3,6 mm (siehe MP4 in Abb. 3.24) vorliegt. Bei den Ergebnissen des Fahrkopfhöhenverschleißes $FKV_{ver.}$ liegt die Schwankungsbreite bei 0 – 2 mm (siehe Abb. 3.29). Der Vergleich der Ergebnisse des Leitkopfseitenverschleißes $LKV_{hor.}$ zwischen dem Messsystem Calipri und den Schiebelehren zeigt eine Schwankungsbreite von 0 – 0,3 mm (siehe Abb. 3.25 und Abb. 3.28)

Messschriebe vom Gleismesswagen und des Messsystems Messreg^{CDM} lassen zwar Aussagen zum Verschleißverlauf zu, jedoch sind die Messdaten und die Verortung für die Methodik des optimierten Anlagenmanagements (siehe Kap. 2.2) auf strategischer Ebene zu ungenau. Die Calipri Messungen wurden mit den Messergebnissen der Schiebelehren verifiziert. Die Ergebnisse unterliegen einer Schwankungsbreite von 0 – 0,5 mm. Durch die Messgenauigkeit des laserbasierten Messsystems Calipri wird diesem mehr Vertrauen geschenkt.

Aus diesen Gründen werden für die weiteren Analysen der zeitlichen Verschleißentwicklung die punktuellen Messdaten des Messsystems Calipri verwendet. Für den Verschleißverlauf entlang der Bögen werden zusätzlich die Verläufe der Messschriebe des Gleismesswagens und des Messsystems Messreg^{CDM} herangezogen.

4.2 Verschleißverlauf im Bogen

Um den Verschleißverlauf in den untersuchten Bögen darstellen und vergleichen zu können, werden diese in Trassierungselemente (Übergangsbogen – Kreisbogen – Übergangsbogen) unterteilt. Für jedes Trassierungselement wird der Verlauf des Fahrkopfverschleißes graphisch dargestellt. Es wurde dabei wie folgt vorgegangen.

- Auftragung der punktuellen Calipri Messwerte (in tatsächlicher Größenordnung) an jenen Stellen des Trassierungselementes wo Messpunkte vorhanden sind.
- Graphische Darstellung des Verschleißverlaufes auf Basis der Messwagen und Messreg^{CDM} Messschriebe, da diese den Verlauf plausibel darstellen.

Beim Leitkopfverschleiß stehen nur punktuelle Messwerte und keine Messschriebe zur Verfügung. Es wurden nur die Calipri-Messwerte aufgetragen.

Das Ergebnis der Verschleißverläufe der beiden Bögen ist in Tab. 4.2 ersichtlich. In Tab. 4.3 ist der Verschleißverlauf jedes Trassierungselement separat dargestellt.

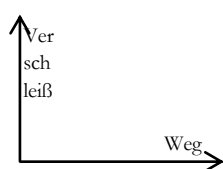
Anzumerken ist, dass die Verläufe der Bögen den IST-Zustand 2013 beschreiben und beim Vergleich des Verschleißverlaufes unterschiedliche Randbedingungen nach Tab. 4.1 vorherrschen.

Randbedingung	Grinzing	Alszeile
Einbaujahr	2010	2011
Verkehrsbelastung	2,2 Mio t	4,1 Mio t
Verhältnis ULF_B/E_2+c_5	47/53	85/15
Bogenradius	20 m	25 m
Oberbau	hochschallgedämmt	schallgedämmt
Schmieranlage	nein	ja

Tab. 4.1: Randbedingungen der untersuchten Bögen zum Verschleißverlauf

	R = 20 m	R = 25 m
	Außenschiene	
	Grinzing	Alszeile
FKV _{hor.}		
FKV _{vert.}		
	Innenschiene	
	Grinzing	Alszeile
FKV _{hor.}		
FKV _{vert.}		

Tab. 4.2: Verschleißverlauf entlang der untersuchten Bögen nach Verschleißparametern

	Außenschiene		Innenschiene	
	Grinzing (R = 20 m)	Alszeile (R = 25 m)	Grinzing (R = 20 m)	Alszeile (R = 25 m)
Übergangsbogen Ü1 (≙ Ü2 in Grinzing)	FKV _{hor.}			
	0,6	1,6	1,1	1,0
	LKV _{hor.}			
0,2	0,4	0,6	0,1	
FKV _{vert.}				
1,7	1,4	2,0	1,4	
Kreisbogen B	FKV _{hor.}			
			Rillenaufweitung	
	1,6	1,6	1,4	1,0
	LKV _{hor.}			
0,4	0,2	0,8	0,1	
FKV _{vert.}				
1,4	1,5	1,0	1,4	
Übergangsbogen Ü2 (≙ Ü3 in Grinzing)	FKV _{hor.}			
	1,4	1,2	2,0	0,9
	LKV _{hor.}			
0,8	0,7	0,5	0,6	
FKV _{vert.}				
1,0	1,5	2,0	1,1	

Tab. 4.3: Verschleißverlauf (Werte in mm) der untersuchten Bögen getrennt nach Trassierungselementen

4.2.1 Schlussfolgerungen zum Verschleißverlauf

Auf Grund der Ergebnisse aus Tab. 4.3 und Tab. 4.2 können unter Berücksichtigung der Randbedingungen in Tab. 4.1 folgende Schlussfolgerungen zum Verschleißverlauf der beiden Bögen gezogen werden.

- Der Fahrkopfseitenverschleiß der Außenschiene des Bogens in der Alszeile ist in Kreisbogenmitte um 1,7 mm geringer als in der Kreisbogenausfahrt. Dies lässt auf ein gutes Laufverhalten des Losrades (ULF) in Kreisbogenmitte und ein schlechteres in Kreisbogenausfahrt bzw. Übergangsbogenanfang schließen. (Anteil ULF 85 %)
- Der Fahrkopfseitenverschleiß der Außenschiene des Bogens Grinzing ist in Kreisbogenmitte um ca. 1,0 mm höher als in den Übergangsbögen. Dies lässt auf ein gutes Laufverhalten des Drehgestells (Fahrzeugtype E) in den Übergangsbögen und ein schlechteres im Kreisbogen schließen. (Anteil Type E 53 %)
- Aus dem Verlauf des Fahrkopfhöhenverschleißes können keine Schlussfolgerungen gezogen werden.
- Für den Leitkopfseitenverschleiß stehen nur punktuelle Messwerte zur Verfügung. Es können keine Aussagen über den Verschleißverlauf getroffen werden.

4.3 Zeitliche Verschleißentwicklung

Für die Methodik des optimierten Anlagenmanagements (siehe Kap. 2.2) ist das Wissen über das Verschleißverhalten der Schienen über die Zeit ein wichtiger Bestandteil. Als maßgebende Größe wird der jeweils höchste Verschleißwert je Bogen herangezogen. Wie in der Einleitung dieses Kapitels beschrieben, werden dafür nur Werte der punktuellen Calipri-Messung vom 23.4.2013 verwendet (siehe Kap. 3.1.3 und 3.2.3). In Tab. 4.4 sind die Maximalwerte der Verschleißparameter des IST-Zustandes 2013 je Bogen ersichtlich.

	Außenschiene		Innenschiene	
	Grinzing	Alszeile	Grinzing	Alszeile
FKV _{hor.max}	1,6 (MP3+4)	2,0 (MP4)	0,6 (MP5)	0,7 (MP5)
LKV _{hor.max}	0,8 (MP2)	0,6 (MP1+5)	1,2 (MP1+2)	1,5 (MP1+4)
FKV _{vert.max}	1,7 (MP5)	2,0 (MP1+4)	1,7 (MP1)	1,4 (MP4+5)

Tab. 4.4: Maximalverschleißwerte IST-Zustand 2013 je Bogen in mm

Um die beiden untersuchten Bögen unabhängig der Verkehrsbelastung vergleichen zu können, wird die zeitliche Verschleißentwicklung der Rillenschienen in Abhängigkeit der Überfahrten (Massen in Mio t) mit Formel (4.1) ermittelt. Wie bereits in Kap. 1.4.2 behandelt, wird von einer linearen Verschleißentwicklung über die Zeit ausgegangen. Die Ergebnisse sind in Tab. 4.5 bzw. Abb. 4.1 dargestellt.

$$\text{Verschleißentwicklung} = \frac{\text{Maximalverschleiß}_{\text{aktuell}}}{\text{Liegedauer} \cdot \text{Verkehrsbelastung}} \left[\frac{\text{mm}}{a \cdot \text{Mio t}} \right] \quad (4.1)$$

	Außenschiene		Innenschiene	
	Grinzing	Alszeile	Grinzing	Alszeile
FKV _{hor.max}	0,242	0,244	0,091	0,085
LKV _{hor.max}	0,121	0,073	0,182	0,183
FKV _{vert.max}	0,258	0,244	0,258	0,171

Tab. 4.5: Verschleißentwicklung je Bogen in mm/(a·Mio t)

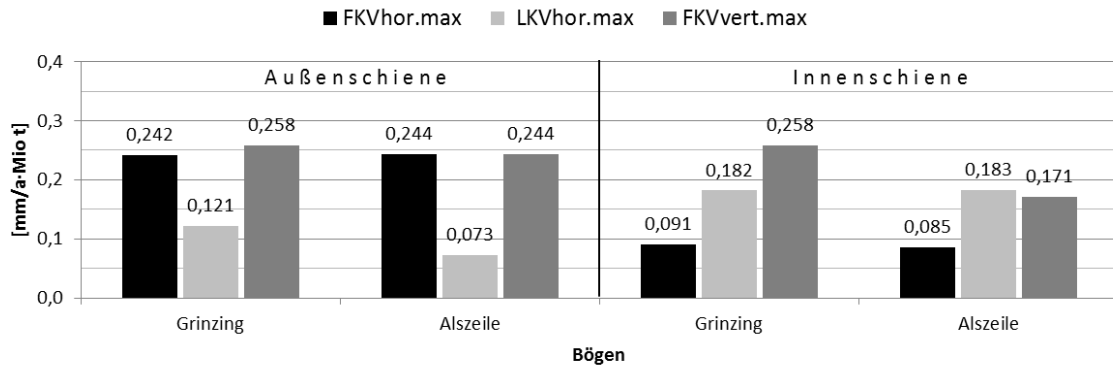


Abb. 4.1: Verschleißentwicklung je Bogen

4.3.1 Schlussfolgerungen zur Verschleißentwicklung

Auf Basis der Ergebnisse in Tab. 4.5 und Abb. 4.1 können unter Berücksichtigung der Randbedingungen in Tab. 4.6 folgende Schlussfolgerungen zur Verschleißentwicklung der beiden Bögen gezogen werden.

Randbedingung	Grinzing	Alszeile
Bogenradius	20 m	25 m
Verhältnis ULF_B/E_2+c_5	47/53	85/15
Oberbau	hochschallgedämmt	schallgedämmt
Schmieranlage	nein	ja

Tab. 4.6: Randbedingungen der untersuchten Bögen zur Verschleißentwicklung

4.3.1.1 Vergleich Grinzing / Alszeile (Außenschiene)

- Gleiche Fahrkopfseitenverschleißentwicklung in Grinzing und in der Alszeile
 - Auf Grund des größeren Bogenradius und der Schmieranlage in der Alszeile wäre ein geringerer Verschleiß zu erwarten gewesen. Es ist anzunehmen, dass der Bogen Alszeile – durch die lange Gerade vor dem Bogen – mit einer höheren Fahrgeschwindigkeit als der Bogen Grinzing durchfahren und daher die Verschleißentwicklung nachteilig beeinflusst wird.

- Signifikant höhere Leitkopfseitenverschleißentwicklung in Grinzing
 - Gründe dafür liegen beim kleineren Bogenradius und dem nicht Vorhandensein einer Schmieranlage in Grinzing
- Gleiche Fahrkopfhöhenverschleißentwicklung in Grinzing und der Alszeile
 - War zu erwarten und verifiziert die Messergebnisse. Die Verkehrsbelastung stellt damit die maßgebende Größe für die Fahrkopfhöhenverschleißentwicklung dar.

4.3.1.2 Vergleich Grinzing / Alszeile (Innenschiene)

- Gleiche Fahrkopfseitenverschleißentwicklung und Leitkopfseitenverschleißentwicklung in Grinzing und der Alszeile
 - Auf Grund des größeren Bogenradius und der Schmieranlage wäre ein geringerer Verschleiß in der Alszeile zu erwarten gewesen. Es ist anzunehmen, dass der Bogen Alszeile – durch die lange Gerade vor dem Bogen – mit einer höheren Fahrgeschwindigkeit als der Bogen Grinzing durchfahren und daher die Verschleißentwicklung nachteilig beeinflusst wird.
- Gleiche Fahrkopfhöhenverschleißentwicklung in Grinzing und der Alszeile
 - Dies war zu erwarten und verifiziert die Messergebnisse. Die Verkehrsbelastung stellt damit die maßgebende Größe für die Fahrkopfhöhenverschleißentwicklung dar.
- Signifikant geringerer Fahrkopfhöhenverschleißentwicklung in der Alszeile
 - Dieses Ergebnis war nicht zu erwarten und muss hier in Frage gestellt werden. Die anderen Werte der Fahrkopfhöhenverschleißentwicklungen sind annähernd gleich.

4.3.1.3 Vergleich Innen- und Außenschiene

- Größere Fahrkopfseitenverschleißentwicklung in der Außenschiene als in der Innenschiene
 - Dies war auf Grund der Spurführung von Schienenfahrzeugen in engen Bögen (siehe Kap. 1.3.4) zu erwarten und verifiziert die Messergebnisse.
- Größere Leitkopfseitenverschleißentwicklung in der Innenschiene als in der Außenschiene
 - Dies war auf Grund der Spurführung von Schienenfahrzeugen in engen Bögen zu erwarten und verifiziert die Messergebnisse.
- Fahrkopfhöhenverschleißentwicklung Innenschiene und Außenschiene
 - Die Messwerte der Fahrkopfhöhenverschleißentwicklung sind zwischen Innen- und Außenschiene annähernd gleich. Ausgenommen ist der signifikant geringere Verschleiß der Innenschiene im Bogen Alszeile (siehe Kap. 4.3.1.2 sowie Abb. 4.1).

4.3.1.4 Fazit

Auf Basis der Messergebnisse dieses Kapitels wird die zeitliche Verschleißentwicklung der beiden Bögen aus den Maximalwerten aus Tab. 4.5 und Abb. 4.1 ermittelt. Gemäß der Methodik des optimierten Anlagenmanagements stellen die Bögen zwei unterschiedliche Normelemente mit unterschiedlichen Randbedingungen (siehe Kap. 2.2.1.1) dar.

		Normelement 1 (Bogen Grinning)	Normelement 2 (Bogen Alszeile)
Randbedingungen	Bogenradius	20 m	25 m
	Verhältnis ULF_B/E_2+c_5	47/53	85/15
	Oberbau	hochschallgedämmt	schallgedämmt
	Schmieranlage	nein	ja
Verschleißparameter	$FKV_{hor.}$ [mm/(a·Mio t)]	0,242	0,244
	$LKV_{hor.}$ [mm/(a·Mio t)]	0,182	0,183
	$FKV_{vert.}$ [mm/(a·Mio t)]	0,258	0,244

Tab. 4.7: Zeitliche Verschleißentwicklung von Normelementen

Aus den Messergebnissen des Messsystems Calipri ist es möglich, eine zeitliche Verschleißentwicklung in Abhängigkeit der Befahrung (Mio t) für Normelemente für die Methodik des optimierten Anlagenmanagement (siehe Kap. 2.2) abzuleiten. Dieses punktuelle Messsystem ist somit für die Anwendung der Methodik geeignet.

4.4 Liegedauerprognose

In Kap. 4.3 wurde die zeitliche Verschleißentwicklung für zwei Normelemente errechnet. Mit diesen Kenntnissen wird auf Basis des Kreislaufs der Fahrwegstandhaltung (Methodik des optimierten Anlagenmanagement siehe Kap. 2.2) eine Prognose zur möglichen Gleisliegedauer eines Normelements erstellt.

Beispielhaft wird für den Bogen in der Alszeile mit einer Verkehrsbelastung von 4,1 Mio t/a eine Liegedauerprognose mit den Werten zur Verschleißentwicklung des Normelements 2 aus Tab. 4.7 durchgeführt. Maßgebend sind dabei der Fahrkopfseiten- und -höhenverschleiß (Verschleißgrenzwerte siehe Tab. 1.11). Die zeitliche Verschleißentwicklung errechnet sich wie folgt.

- Fahrkopfseitenverschleiß $FKV_{hor.} = 4,1 \times 0,244 = \mathbf{1,0 \text{ mm/a}}$
- Fahrkopfhöhenverschleiß $FKV_{vert.} = 4,1 \times 0,244 = \mathbf{1,0 \text{ mm/a}}$

Die Arbeitszyklen der Auftragschweißungen werden durch die Verschleißgrenzwerte in Tab. 4.8 festgelegt und zum spätest möglichen Zeitpunkt angesetzt.

Messwerte	Neu [mm]	Grenzwert SES [mm]	Diff. _{zul.} [mm]
Verschleißgrenzwerte Aufschweißbarkeit			
T	40	29	-11,0
KB	63,6	68,5	+4,9
Verschleißgrenzwerte Gleistausch			
T	40	24	-16
KB	63,6	70	+6,4

Tab. 4.8: Verschleißgrenzwerte für Profil 210/95+80a mit $R \leq 800$ m

In Abb. 4.2 sind die Schienenverschleißentwicklung, die Arbeitszyklen der Auftragschweißungen und die daraus resultierende Liegedauer der Rillenschienen im Bogen Alszeile auf Basis der zeitlichen Verschleißentwicklung und der Grenzwerte dargestellt.

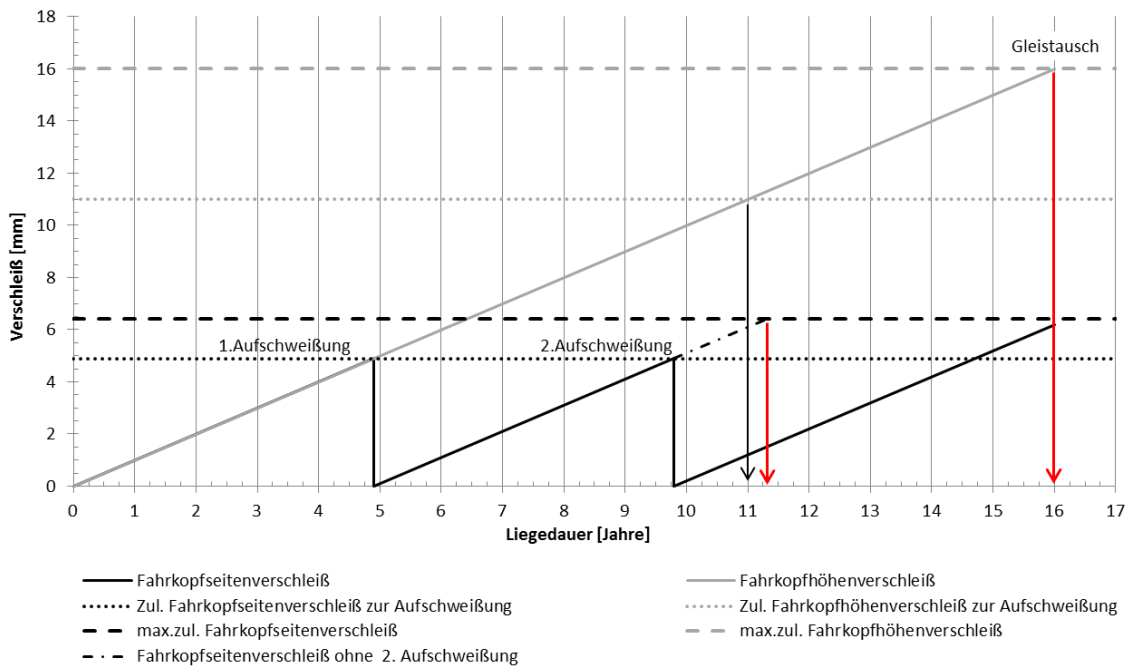


Abb. 4.2: Liegedauerprognose Bogen Alszeile

4.4.1 Schlussfolgerungen zur Liegedauerprognose

Auf Basis der Abb. 4.2 können folgende Schlussfolgerungen Liegedauerprognose des Bogens Alszeile gezogen werden.

4.4.1.1 Instandhaltungszyklen

Für die Instandhaltungszyklen werden keine Riffelschleifarbeiten angesetzt.

- Arbeitszyklen der Auftragschweißungen
 - Die Zyklen der 1. und 2. Auftragschweißung liegen bei 4,9 Jahre und werden durch den zulässigen Fahrkopfseitenverschleiß bis zur Auftragschweißung (-4,9 mm) festgelegt.
 - Eine weitere 3. Auftragschweißung ist durch Überschreitung des zulässigen Fahrkopfhöhenverschleißes bis zur Auftragschweißung (-11 mm) nach 11 Jahren nicht mehr möglich.
- Restliegedauer bis zum Gleistausch nach letzter Auftragschweißung
 - Die Restliegedauer nach der letzten Auftragschweißung liegt durch den zulässigen Fahrkopfhöhenverschleiß bis zum Gleistausch (-16 mm) bei 6,2 Jahre.

4.4.1.2 Liegedauerprognose

Unter Betrachtung der Arbeitszyklen der Auftragschweißungen und Berücksichtigung der zulässigen Verschleißgrenzwerte beträgt die prognostizierte Liegedauer des Bogens Alszeile 16,0 Jahre.

4.4.1.3 Fazit

- Die Entwicklung des Fahrkopfhöhenverschleißes beeinflusst die mögliche Gleisliegedauer maßgebend. Diese gibt den Zeitpunkt der letztmöglichen Fahrkopfauftragschweißung bei einer Rillentiefe von 29 mm (= $FKV_{vert.} 11$ mm) und des Gleistausches bei einer Rillentiefe von 24 mm (= $FKV_{vert.} 16$ mm) vor.
- Aufgeschobene Fahrkopfauftragschweißungen können dazu führen, dass die Grenzwerte zur Schweißbeignung überschritten werden, dadurch ein gesamter Arbeitszyklus verloren geht und die Gesamtliegedauer wesentlich verkürzt wird. Die mögliche Liegedauer würde im vorliegenden Fall von 16,0 Jahren auf 11,3 Jahre sinken.

5 Zusammenfassung

Die Basis dieser Diplomarbeit bildet eine Methodik des optimierten Anlagenmanagements, mit der Investitions- und Instandhaltungsstrategien formuliert werden können, um eine Verlängerung der Gleisliegedauer und eine Reduktion der Lebenszykluskosten zu erreichen. Aus technischer Sicht sind zur Umsetzung dieser Methodik Kenntnisse des Schienenverschleißverhaltens und dessen Einflussfaktoren notwendig. An zwei engen Gleisbögen (Radius ≤ 25 m) im Netz der Wiener Straßenbahn wurde die Eignung von vier unterschiedlichen Gleismesssystemen für diese Methodik geprüft. Das Verschleißverhalten als maßgebendes Qualitätsmerkmal sowie eine Prognose der möglichen Gleisliegedauer wurde aus den Ergebnissen der Messsysteme erarbeitet.

Die Notwendigkeit von Gleisvermessungen in Straßenbahnnetzen beruht in erster Linie auf der Gewährleistung eines regelkonformen Straßenbahnbetriebes und einer sicheren Betriebsführung, weshalb in wiederkehrenden Intervallen Gleisvermessungen durchgeführt werden müssen.

Die Gleisvermessung der Wiener Linien GmbH & Co KG erfolgt mit einem Gleismesswagen, welcher auf einem laserbasierten Messsystem beruht und Messungen automatisiert durchführt. Zusätzlich wird das Messsystem Messreg^{CDM} für manuelle Messungen eingesetzt, um die Vermessung der Gleise flexibler vornehmen zu können. Beide Messsysteme liefern kontinuierliche Messdaten entlang der Gleisachse, wobei die Messdatengenauigkeit und Messraster für die Anwendung auf operativer Ebene ausreichend sind, um rechtzeitig Gleislage- und Schienenprofilveränderungen zu erkennen und entsprechende Maßnahmen zu setzen.

Zur Ermittlung des Verschleißverhaltens wurde der IST-Zustand der Schienenprofile der gewählten Bögen mit vier unterschiedlichen Messsystemen erhoben. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Messergebnisse des Gleismesswagens und des Messsystems Messreg^{CDM} zwar Aussagen zum Verschleißverlauf zulassen, für die Anforderungen der Ermittlung der zeitlichen Verschleißentwicklung auf strategischer Ebene jedoch unzureichend genau sind. Punktuelle Messungen des optischen laserbasierten Messsystems Calipri hingegen liefern für die Umsetzung der Methodik des optimierten Anlagenmanagements ausreichend genaue Messergebnisse zu den Schienenverschleißparametern. Es ist anzumerken, dass punktuelle manuelle Gleisvermessungen mit einem hohen zeitlichen Aufwand verbunden sind.

Die wesentlichen Parameter zur Beschreibung des Verschleißverhaltens sind der Fahr- und Leitkopfseitenverschleiß sowie der Fahrkopfhöhenverschleiß. Diese werden durch den Bogenradius, die Verkehrsbelastung, die Oberbauqualität und das Zusammenspiel des Rad-Schiene-Systems maßgebend beeinflusst.

Die Auswertungen und Analysen der Messdaten führten hinsichtlich des örtlichen Verschleißverlaufes entlang der untersuchten Bögen zu folgenden Ergebnissen.

- Das Losradsystem (ULF) weist im Vergleich zum Drehgestell der Fahrzeugtype E ein gutes Laufverhalten mit geringem Schienenseitenverschleiß in Kreisbogenmitte auf. In der Kreisbogenausfahrt verursacht das Losradsystem jedoch einen höheren Seitenverschleiß als in Kreisbogenmitte.
- Das Drehgestell (Fahrzeugtype E) weist im Vergleich zum Losradsystem der Fahrzeugtype ULF ein gutes Laufverhalten mit geringem Schienenseitenverschleiß in den Übergangsbögen auf. Im Kreisbogen verursacht das Drehgestell jedoch einen höheren Seitenverschleiß als in den Übergangsbögen.
- Beim Verlauf des Fahrkopfhöhenverschleißes entlang der Bögen konnte kein spezifisches Verschleißmuster erkannt werden.

In Abhängigkeit der Befahrung wurde der zeitliche Verschleiß des Fahr- und Leitkopfes aus den Messergebnissen des Messsystems Calipri errechnet. Es wurde dabei von einer linearen Verschleißentwicklung ausgegangen.

	Bogen Grinzing	Bogen Alszeile
▪ Fahrkopfseitenverschleiß $FKV_{hor.} \rightarrow$	0,242 mm/Mio t	0,244 mm/ Mio t
▪ Leitkopfseitenverschleiß $LKV_{hor.} \rightarrow$	0,182 mm/ Mio t	0,183 mm/ Mio t
▪ Fahrkopfhöhenverschleiß $FKV_{vert.} \rightarrow$	0,258 mm/ Mio t	0,244 mm/ Mio t

Durch die Kenntnis der zeitlichen Entwicklung des Verschleißes ist es gelungen, die mögliche Liegedauer des Schienenprofils 210/95+80a des Bogens in der Alszeile/Vollbadgasse zu bestimmen. Unter Berücksichtigung der Verschleißgrenzwerte und von zwei zulässigen Schienenprofilauftragschweißungen als Arbeitszyklen der Instandhaltung, beträgt die prognostizierte Gesamtliegedauer des Bogens 16 Jahre. Die spätest möglichen Zeitpunkte der Auftragschweißungen liegen bei 4,9 und 9,8 Jahren. Die Untersuchung hat gezeigt, dass die Entwicklung des Fahrkopfhöhenverschleißes die letztmögliche Fahrkopfauftragschweißung vor dem notwendigen Gleistausch vorgibt und damit die Gleisliegedauer maßgebend beeinflusst.

Weiters wurde ermittelt, dass aufgeschobene Fahrkopfauftragschweißungen zu einer Überschreitung der Grenzwerte der Schweißneigung führen können. Dadurch würde ein gesamter Arbeitszyklus verloren gehen und die Gesamtliegedauer wesentlich verkürzt werden. Die Einhaltung des errechneten letztmöglichen Zeitpunkts dieser Instandhaltungsmaßnahme ist zur Erreichung der maximalen Liegedauer wesentlich.

6 Ausblick

Die Erhöhung des Anteils des Öffentlichen Verkehrs bis 2020 (Modal Split 40 %), wie er auch als Ziel im „Masterplan Verkehr Wien 2003“ festgelegt wurde, führt zu einer Vergrößerung des Verkehrsangebots der Straßenbahn und somit zu einer steigenden Belastung des Fahrwegs. Das größte Potential, um trotz steigender Belastung der Schienen möglichst lange Gleisliegedauern mit dem derzeitigen Rad-Schiene System erreichen zu können, liegt bei der Reduktion der Fahrzeuggewichte bzw. der Achslasten.

Die punktuelle Gleisvermessung zur Ermittlung der zeitlichen Verschleißentwicklung für die Methodik des optimierten Anlagenmanagements ist möglich, jedoch mit einem großen Aufwand verbunden. Zur automatisierten Gleisvermessung, bei der die Messgenauigkeit auch für Schienenzustandsprognosen auf strategischer Ebene ausreicht, wurde im Aug. 2011 das Projekt „PlasmaTram“ (Profile Laseracquisition System meets Austrian Tramways) gestartet. Dieses Projekt basiert auf der technischen Weiterentwicklung des Gleismesswagens in Kooperation der plasmotechnik GmbH, der WL und des AIT. Ziel ist die Entwicklung eines experimentellen Messsystems, welches eine Überprüfung und Dokumentation des gesamten Fahrweges, inklusive Verschleißerscheinungen des Rillenschienenprofils und zusätzlicher Parameter gewährleistet. Das hochauflösende Lasermesssystem liefert 4000 Bilder/Sekunde, bei einem Messabstand von 3-4 mm bei 60 km/h Fahrgeschwindigkeit. Die Messgenauigkeit liegt bei 0,1 mm. Dieses Messsystem wird eine wesentliche Verbesserung der Messgenauigkeit und des Messrasters im Vergleich zum Gleismesswagen E6117 bewirken.

Ein weiteres Projekt läuft unter dem Namen „fractINSPECT“, mit dem eine Früherkennung von Schienenanomalien, Fehlern an der Schienenoberfläche und Schienenbrüchen durch komplexe Mustererkennung möglich werden sollte.

Zur Festlegung von Normelementen ist die Kenntnis aller Oberbaudaten (Schienenprofil, Stahlgüte, Einbaujahr, getätigte Instandhaltungsmaßnahmen, etc.) und der Verkehrsbelastung (Mengenverhältnis der Fahrzeugtypen, Überfahren, etc.) notwendig. Die Abbildung und Speicherung dieses „gläsernen Fahrwegs“ in einer Infrastrukturdatenbank ist ein wichtiger Schritt zur Optimierung des Anlagenmanagements. Die Übertragung der Verschleißkenntnisse der Normelemente ins gesamte Straßenbahnnetz erlaubt die Formulierung von wirtschaftlich optimalen Fahrwegstrategien der realen Situation (Stufe II der Methodik des optimierten Anlagenmanagements). Es können sinnvolle Gleistauschlängen gefunden, netzweite strategische Prognosen erstellt und strategische Entscheidungen getroffen werden.

7 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Einteilung der Rillenschienen-Stahlsorten nach Härte und Schweißbeignung (2)	3
Abb. 1.2: Leitkopfmarkierung wärmebehandelter Schienen (2)	3
Abb. 1.3: Maßbezeichnungen (4).....	4
Abb. 1.4: Maßsystem der Rillenschiene (5).....	5
Abb. 1.5: Detail schallgedämmter Oberbau (15)	8
Abb. 1.6: Detail hochschallgedämmter Oberbau (15)	9
Abb. 1.7: ULF A/A ₁ (17).....	10
Abb. 1.8: ULF B/B ₁ (17)	10
Abb. 1.9: Losradeinheit ULF (17)	11
Abb. 1.10: E ₁ (19).....	12
Abb. 1.11: E ₂ – c ₅ (19).....	12
Abb. 1.12: Bezeichnungen am Querschnitt von Rad und Rillenschiene (4).....	14
Abb. 1.13: Anfahrwinkel (4).....	14
Abb. 1.14: Quermaßbezeichnungen beim Rillenschienenstreckengleis (4)	16
Abb. 1.15: Ein- und Zweipunktberührung (20).....	18
Abb. 1.16: Schlupf und Reibung am Gleis (21)	21
Abb. 1.17: Kräftemodell Rad-Schiene (21).....	22
Abb. 1.18: Freilauf (22)	23
Abb. 1.19: Spießgang (22).....	23
Abb. 1.20: Außensehnen- und Innensehnenstellung (22).....	24
Abb. 1.21: Radialstellung von Radsätzen (22).....	24
Abb. 1.22: Neu- und Verschleißzustände von Rad und Schiene (4; 28)	30
Abb. 1.23: Gesamtübersicht zur Instandhaltung (ÖNORM EN 13306).....	34
Abb. 1.24: Auftrag- u. Einbrandfläche (31).....	36
Abb. 1.25: Raupenanordnung der Schweißung (30)	37
Abb. 1.26: UP-Schweißung (30)	38
Abb. 1.27: Symmetrische Pfeilhöhe (Eigendarstellung)	45
Abb. 1.28: Krümmungsbild (10).....	46
Abb. 1.29: Kreisbogen im Lageplan (10)	46
Abb. 1.30: Bogenabschnitte im Krümmungsbild (10).....	47
Abb. 1.31: Winkelbild eines Kreisbogens (10)	48
Abb. 1.32: Prinzip einer inertialen Riffelmessung (1)	50
Abb. 1.33: Gleismesswagen E6117 für den Straßenbahnbereich (Bild. H.H. Heider)	52
Abb. 1.34: Prinzip der Triangulation (37)	55
Abb. 1.35: Systemaufbau CUBAL (11)	58
Abb. 1.36: Systemaufbau der Datenverwertung des Gleismesswagens (Eigendarstellung).....	60
Abb. 1.37: Aufbau Messreg ^{CDM} (18).....	61
Abb. 1.38: optionale Rillentiefmesseinheit (18).....	62
Abb. 1.39: Messsystem Calipri und graphische Auswertung ((38)VOEST).....	64
Abb. 1.40: Schiebelehre für die Rillentiefe (links) und für die Rillenweite (rechts).....	65
Abb. 1.41: Riffelmessung mit Messsystem CAT (39).....	66
Abb. 2.1: Kapitalwertmethode.....	70
Abb. 2.2: Methode des Internen Zinssatzes	71
Abb. 2.3: Kreislauf der Fahrweginstandhaltung	73
Abb. 2.4: Ansatz der Mängelbehebungskosten (Eigendarstellung).....	76
Abb. 3.1: Open-Street-Map Wien mit geographischer Lage des Bogens in Grinzing (ISDB WL, Eigendarstellung) ..	82
Abb. 3.2: Übersicht Bogen Grinzing (Eigendarstellung)	84
Abb. 3.3: Fahrkopfseitenverschleiß Innenschiene 2013, Gleismesswagen (Grinzing)	85
Abb. 3.4: Fahrkopfseitenverschleiß Außenschiene 2013, Gleismesswagen (Grinzing).....	86
Abb. 3.5: Fahrkopfhöhenverschleiß Innenschiene 2013, Gleismesswagen (Grinzing).....	86

Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.6: Fahrkopfhöhenverschleiß Außenschiene 2013, Gleismesswagen (Grinzing).....	87
Abb. 3.7: Rillenweite und Rillentiefe Innen- und Außenschiene 31.5.2013, Messreg ^{CDM} (Grinzing).....	88
Abb. 3.8: Seitenverschleiß Innen- und Außenschiene 23.4.2013, Calipri (Grinzing).....	89
Abb. 3.9: Fahrkopfhöhenverschleiß Innen- und Außenschiene 23.4.2013, Calipri (Grinzing)	90
Abb. 3.10: Seitenverschleiß Innen- und Außenschiene 11.9.2013, Schiebelehren (Grinzing)	91
Abb. 3.11: Fahrkopfhöhenverschleiß Innen- und Außenschiene 11.9.2013, Schiebelehre (Grinzing)	91
Abb. 3.12: Open-Street-Map Wien mit geographischer Lage des Bogens Alszeile/Vollbadgasse (ISDB WL, Eigendarstellung).....	93
Abb. 3.13: Auszug Ausführungsplan Bogen Alszeile/Vollbadgasse (Eigendarstellung).....	95
Abb. 3.14: Fahrkopfsseitenverschleiß Innenschiene 2013, Gleismesswagen (Alszeile/Vollbadgasse)	96
Abb. 3.15: Fahrkopfsseitenverschleiß 2013 Außenschiene mit Gleismesswagen (Alszeile/Vollbadgasse)	97
Abb. 3.16: Fahrkopfhöhenverschleiß Innenschiene 2013, Gleismesswagen (Alszeile/Vollbadgasse)	97
Abb. 3.17: Fahrkopfhöhenverschleiß Außenschiene 2013, Gleismesswagen (Alszeile/Vollbadgasse).....	98
Abb. 3.18: Rillenweite und Rillentiefe Innen- und Außenschiene 18.6.2013, Messreg ^{CDM} (Alszeile/Vollbadgasse)	99
Abb. 3.19: Seitenverschleiß Innen- und Außenschiene 23.4.2013, Calipri (Alszeile/Vollbadgasse).....	100
Abb. 3.20: Fahrkopfhöhenverschleiß Innen- und Außenschiene 23.4.2013, Calipri (Alszeile/Vollbadgasse).....	101
Abb. 3.21: Seitenverschleiß Innenschiene 11.9.2013, Schiebelehren (Alszeile/Vollbadgasse).....	101
Abb. 3.22: Seitenverschleiß Außenschiene 11.9.2013, Schiebelehren (Alszeile/Vollbadgasse)	102
Abb. 3.23: Fahrkopfhöhenverschleiß Innen- und Außenschiene 11.9.2013, Schiebelehre (Alszeile/Vollbadgasse) ..	102
Abb. 3.24: Vergleich Fahrkopfsseitenverschleiß 2013 (Grinzing)	103
Abb. 3.25: Vergleich Leitkopfsseitenverschleiß 2013 (Grinzing).....	104
Abb. 3.26: Vergleich Fahrkopfhöhenverschleiß 2013 (Grinzing)	105
Abb. 3.27: Vergleich Fahrkopfsseitenverschleiß 2013 (Alszeile/Vollbadgasse)	106
Abb. 3.28: Vergleich Leitkopfsseitenverschleiß 2013 (Alszeile/Vollbadgasse)	107
Abb. 3.29: Vergleich Fahrkopfhöhenverschleiß 2013 (Alszeile/Vollbadgasse).....	108
Abb. 4.1: Verschleißentwicklung je Bogen	116
Abb. 4.2: Liegedauerprognose Bogen Alszeile.....	119

Anhang

Abb. A-1: Straßenbahn Linie 43 Richtung Neuwaldegg.....	A-1
Abb. B-1: Organigramm der Wiener Linien.....	B-1
Abb. C-1: Rillenschienenprofil 210/95-80.....	C-1
Abb. C-2: Rillenschienenprofil 210/95-80a.....	C-2
Abb. C-3: Rillenschienenprofil Ri60	C-3
Abb. C-4: Rillenschienenprofil Ri45.....	C-4
Abb. D-1: Regelplan schallgedämmter Oberbau	D-1
Abb. D-2: Regelplan hochschallgedämmter Oberbau.....	D-2
Abb. E-1: Radreifenprofil Fahrzeugtype ULF.....	E-1
Abb. E-2: Radreifenprofil Fahrzeugtype E-c.....	E-2
Abb. F-1: Rillenaufweitung beim Rillenschienenprofil 210/95+80a.....	F-1
Abb. G-1: Skizze Schmieranlage.....	G-1
Abb. H-1: Schweißanweisung B64	H-1
Abb. H-1: Schweißanweisung B64	H-1
Abb. J-1: Bogen Grinzing, Messpunkte 4-5, Innen- und Außenschiene.....	J-1
Abb. J-2: Bogen Grinzing, Messpunkte 1-3, Innen- und Außenschiene.....	J-2
Abb. J-3: Bogen Alszeile/Vollbadgasse, Messpunkte 1-2, Innen- und Außenschiene	J-3
Abb. J-4: Bogen Alszeile/Vollbadgasse, Messpunkte 3-5, Innen- und Außenschiene.....	J-4

8 Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1: Stahlsorten für Rillenschienen nach EN 14811-1:2010 (2).....	2
Tab. 1.2: Rillenschienenprofile der WL (3).....	4
Tab. 1.3: Losradeinheit ULF (17).....	11
Tab. 1.4: Technische Daten Losradeinheit ULF (17).....	11
Tab. 1.5: Technische Daten der Beiwagen der Wiener Straßenbahn (19).....	12
Tab. 1.6: Vergleich kegelige Radprofile und Verschleißprofile (1).....	20
Tab. 1.7: Antriebskräfte und Schlupf (21).....	21
Tab. 1.8: Rillenaufweitung (B64, WL).....	25
Tab. 1.9: Schienenfehler durch Beschädigungen im Betrieb (23; 24; 25).....	26
Tab. 1.10: Problemfelder des Schienenverschleißes (28).....	31
Tab. 1.11: Verschleißgrenzwerte für Rillenschienen auf freier Strecke (5).....	33
Tab. 1.12: Überblick der Instandhaltungsmaßnahmen bei Rillenschienen (Eigendarstellung).....	35
Tab. 1.13: Zuordnung Bezeichnungen UP-Schweißung (30).....	38
Tab. 1.14: Aufmerksamkeits- Eingriffsschwellen bei Schienen (Eigendarstellung).....	40
Tab. 1.15: Überblick der Schienenmesssysteme (Eigendarstellung).....	42
Tab. 1.16: Überblick der Messungen von Gleisparametern und Fahrflächenschäden (Eigendarstellung).....	44
Tab. 1.17: RMS-Basis und Grenzwellenlängenangaben (1).....	50
Tab. 1.18 Bestandteile Messreg ^{CDM} (18).....	61
Tab. 1.19 Technische Daten zum Riffelmesssystem CAT (39).....	66
Tab. 2.1: Zugänge zum Anlagenmanagement (33).....	67
Tab. 2.2: Zwei-Stufenplan zur Optimierung des Anlagenmanagements (33).....	74
Tab. 3.1: Informationen zum Bogen Grinzing.....	83
Tab. 3.2: Stationierung Gleisabschnitt Bogen Grinzing.....	84
Tab. 3.3: Informationen zum Bogen Alszeile/Vollbadgasse.....	94
Tab. 3.4: Stationierung Gleisabschnitt Bogen Alszeile/Vollbadgasse.....	95
Tab. 4.1: Randbedingungen der untersuchten Bögen zum Verschleißverlauf.....	113
Tab. 4.2: Verschleißverlauf entlang der untersuchten Bögen nach Verschleißparametern.....	113
Tab. 4.3: Verschleißverlauf (Werte in mm) der untersuchten Bögen getrennt nach Trassierungselementen.....	114
Tab. 4.4: Maximalverschleißwerte IST-Zustand 2013 je Bogen in mm.....	115
Tab. 4.5: Verschleißentwicklung je Bogen in mm/(a·Mio t).....	116
Tab. 4.6: Randbedingungen der untersuchten Bögen zur Verschleißentwicklung.....	116
Tab. 4.7: Zeitliche Verschleißentwicklung von Normelementen.....	118
Tab. 4.8: Verschleißgrenzwerte für Profil 210/95+80a mit $R \leq 800$ m.....	119

Anhang

Tab. A-1: Fahrgastzahlen.....	A-1
-------------------------------	-----

9 Literaturverzeichnis

1. **Lichtberger, Bernhard.** *Handbuch Gleis.* Hamburg : DVV Media Group GmbH | Eurailpress, 2010.
2. **voestalpine Schienen GmbH.** Wärmebehandelte Rillenschienen für den Straßenbahnverkehr. Leoben : voestalpine Schienen GmbH, 2013.
3. **Rollinger, Wolfgang und Lichtenberg, Michael.** *Rillenschienenprofile.* Wien : Wiener Linien GmbH & Co KG, 2005.
4. **Rollinger, Wolfgang.** *Spurführung.* Wien : Wiener Linien GmbH & Co KG, 2009.
5. **Wehr, Werner.** Instandhaltungsplan für Anlagender Abteilung B63 - Bahnbau. Wien : Wiener Linien GmbH & Co KG, 2013.
6. **Rollinger, Wolfgang.** *Bahnbau Bahnerhaltung.* Wien : Technische Universität Wien - Institut für Verkehrswissenschaften,, 2011.
7. **Heuwold, Niels.** *Parametrisierung der Gleisgeometrie aus Befahrungsdaten von Gleismesswagen.* Berlin : s.n., 2001.
8. **Ossberger, Markus.** Trassierung Straßenbahn. Wien : Technische Universität Wien, 2009.
9. **Kuntner, Reinhart und Waglechner, Hannes.** *Eisenbahnrecht.* Wien : Verlag des Österreichischen Gewerkschaftsbundes, 2009.
10. **Bäumker, Manfred.** *Ingenieurvermessung Trassierung.* Bochum : Fachbereich Vermessung und Geoinformatik - Hochschule Bochum, 2010.
11. **Ömer, Bernhard.** CUBAL/NetScan - Krümmungsbasierte Verortung und Aufnahme von Urbanen Schienennetzen. Wien : s.n., 2006.
12. Enzyklo - Online Enzyklopädie. [Online] Slot Webcommerce bv. <http://www.enzyklo.de>.
13. **Matthias Müller.** Gleisbau-Welt. [Online] <http://gleisbau-welt.de/>.
14. **Fischmeister, Edgar und Rollinger, Wolfgang.** *134 Jahre Oberbau in Wien.* Wien : N.J. Schmid Verlag, 1999.
15. **Fidler, Christian.** Regelpläne der Wiener Straßenbahn. Wien : Wiener Linien GmbH & Co KG, 2012.
16. **Zaussinger, Josef.** *Der Raumbedarf des Spurkranzes.* Wien : Wiener Linien GmbH & Co KG, 2006.
17. **Gutehoffnungshütte Radsatz GmbH.** GHH-Losradeinheit (schwenkbar/gebremst). Oberhausen : s.n., 1998.
18. **Vogel & Plötscher GmbH & Co KG.** *Bedienungsanleitung MessReg CDM.* Breisach : s.n.
19. **Gonzalez, Gerardo Valido.** Fanpage-der-Wiener-Linien. [Online] <http://www.fpdwl.at>.
20. **Petz, Michael.** *Spurführungstechnik.* Wien : Institut für Verkehrswissenschaften - Technische Universität Wien, 2012.

21. **Ostermann, Norbert.** *Skriptum Eisenbahnwesen.* Wien : Institut für Verkehrswissenschaften - Technische Universität Wien, 2013.
22. **Janicki, Jürgen, Reinhard, Horst und Ruffer, Michael.** *Schienenfahrzeugtechnik.* Berlin : Bahn Fachverlag GmbH, 2012.
23. **Köstermann, Heinrich und Meißner, Klaus.** Schienen und Schienenschweißen. [Buchverf.] Lothar Fendrich. *Handbuch Eisenbahninfrastruktur.* Berlin : Springer, 2007.
24. **Mahr, Alexander.** *Abstimmung der Rad-Schiene Geometrie mit dem lateralen Fahrzeugverhalten - Methoden und Empfehlungen.* Aachen : Shaker Verlag, 2002.
25. **Grohmann, Hans-Dieter.** Internationales Symposium Schienenfehler - Tagungsbericht. *Beschädigungsarten an der Schiene- verursacht durch den Betrieb.* Brandenburg : Fachhochschule Brandenburg, 2000.
26. —. *Schädigung der Laufflächen von Schiene durch den Rad / Schienekontakt - Schlussfolgerungen für die Herstellung und Instandhaltung der Schienen.* Berlin : s.n., 1998.
27. **Fastenrath, Fritz.** *Die Eisenbahnschiene.* Berlin : Verlag Wilhelm Ernst & Sohn, 1977.
28. **Naue, Markus.** *Messmethoden zur Bestimmung von Verschleiß und Lagegenauigkeit von Straßenbahnschienen.* Karlsruhe : s.n., 2003.
29. **Verband öffentlicher Verkehrsbetriebe (VÖV).** Technische Regeln für die Spurführung von Schienenbahnen nach der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab). 2006.
30. **Diehs, Karl.** *Schweißgrundlagen.* Wien : Wiener Linien GmbH & Co KG, 2009.
31. **Dilthey, Ulrich.** *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1.* Aachen : Springer Verlag, 2006.
32. **Schöch, Wolfgang.** Internationales Symposium Schienenfehler - Tagungsbericht. *Schienenschleifen zur Verminderung von Oberflächenschäden.* Brandenburg : Fachhochschule Brandenburg, 2000.
33. **Veit, Peter.** Instandhaltung und Anlagenmanagement. [Buchverf.] Lothar Fendrich. *Handbuch Eisenbahninfrastruktur.* Berlin : Springer, 2007.
34. **Krull, Roland, Hintze, Hartmut und Thomas, Hans-Martin.** Internationales Symposium Schienenfehler-Tagungsbericht. *Moderne Methoden der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung im Oberbau.* Brandenburg : Fachhochschule Brandenburg, 2000.
35. **Schröder, Ulrich E.** *Gravitation - Einführung in die Allgemeine Relativitätstheorie.* Frankfurt am Main : Harri Deutsch Verlag, 2007.
36. **Wehr, Werner.** Gleismesswagen der Wiener Linien. Wien : s.n., 2012.
37. **Trostman, Erik.** *Lichtschnittverfahren.* Erlangen : s.n., 2003.
38. **nextSENSE.** Calipri. Graz : s.n.
39. **RailMeasurement Ltd.** Manual Corrugation Measurement - Fact Sheet. Cambridge : s.n., 2013.
40. **Rollinger, Wolfgang und Fischmeister, Edgar.** *134 Jahre Oberbau in Wien.* Wien : N.J. Schmid Verlag, 1999.

41. **Zaussinger, Josef.** *Zur Beanspruchung und Tragfähigkeit von (Rillen-)schienen.* Wien : Wiener Linien GmbH & Co KG, 2006.
42. **Zlatnik, Alexander und Wundersamer, Johannes.** *Optimierte Rillenschienen für die Straßenbahn. Regio Trans.* 2013.
43. **Fischmeister, Edgar.** *Strukturelles Sicherheits-Management für die Instandhaltung von urbanen Gleisen.* Wien : s.n., 2012.
44. **Austrian Standards.** *Instandhaltung - Begriffe der Instandhaltung ÖNORM EN 13306.* 2010.
45. **Polach, Oldrich.** *Kontakt zwischen Rad und Schiene - das Kernelement der Dynamik der Schienenfahrzeuge.* Winterthur : s.n., 1999.

Autoren

Kapitel	Autor
1.1.1	Florian Pototschnig
1.1.2	Thomas Hammer
1.1.3	Florian Pototschnig
1.2	Florian Pototschnig
1.3.1	Thomas Hammer
1.3.3	Florian Pototschnig
1.3.4	Florian Pototschnig
1.3.5	Florian Pototschnig
1.4	Thomas Hammer
1.5.1	Florian Pototschnig
1.5.2	Thomas Hammer
1.5.3	Thomas Hammer
1.5.4	Thomas Hammer
1.5.5	Thomas Hammer
1.6.1	Florian Pototschnig
1.6.2	Florian Pototschnig
1.6.3	Thomas Hammer
1.6.4	Thomas Hammer
1.6.5	Florian Pototschnig
1.6.6	Florian Pototschnig
1.6.7	Florian Pototschnig
1.6.8	Thomas Hammer
2	Thomas Hammer

Nicht angeführte Kapitel wurden von beiden Autoren gemeinsam verfasst.