



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Masterarbeit

Hendrik Gülzow

Untersuchungen zur Sicherheitsreserve bei der Lichtraum-Berechnung von U-Bahn-Fahrzeugen

*Fakultät Technik und Informatik
Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Automotive and
Aeronautical Engineering*

Hendrik Gülzow
Untersuchungen zur Sicherheitsreserve
bei der Lichtraum-Berechnung von
U-Bahn-Fahrzeugen

Masterarbeit eingereicht im Rahmen der Masterprüfung

im Studiengang Fahrzeugtechnik
am Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

in Zusammenarbeit mit:
Hamburger Hochbahn AG
Steinstraße 20
20095 Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Ralf Ahrens
Zweitprüfer: Dr.-Ing. Klaus Liedgens

Abgabedatum: 22.11.2019

Zusammenfassung

Hendrik Gülzow

Thema der Masterthesis

Untersuchungen zur Sicherheitsreserve bei der Lichtraum-Berechnung von U-Bahn-Fahrzeugen

Stichworte

Lichtraum, Lichtraumbedarf, U-Bahn, Hochbahn, BOStrab, Spalt, Bahnsteig, Personennahverkehr, Barrierefreiheit

Kurzzusammenfassung

Der Lichtraumbedarf stellt eine wesentliche Größe in der Neuauslegung von U-Bahn-Fahrzeugen dar. In einem Nachweis wird bestätigt, dass in jeder betrieblich denkbaren Situation der Lichtraumbedarf niemals den verfügbaren Lichtraum um das Gleis überschreitet und so die Kollisionsfreiheit sichergestellt ist. Durch die Berücksichtigung vieler Einflussgrößen ergeben sich auf diesem Weg sehr hohe Sicherheitsreserven. In einer vergleichenden Betrachtung des rechnerisch ermittelten und des im Fahrbetrieb gemessenen Lichtraumbedarfs wird die Höhe dieser Sicherheitsreserve quantifiziert. Im realen Fahrbetrieb prägt sich der Lichtraumbedarf äußerst reproduzierbar aus und wird von nur wenigen signifikanten Einflussgrößen bestimmt.

Hendrik Gülzow

Title of the paper

Investigation of the safety reserve in the structure gauge calculation of metro cars

Keywords

clearance gauge, structure gauge, subway, underground, metro, BOStrab, gap, platform, public transport, accessibility

Abstract

The clearance gauge is an essential variable in the design of new metro cars. An evidence proves that in any operational situation the required structure gauge never exceeds the available structure gauge and thereby ensures the collision safety. Due to the consideration of many influencing variables very high safety reserves result. A comparative observation between the calculated structure gauge and the measured structure gauge shows the value of the safety reserve. During the regular service the structure gauge is very reproducible and depends on few influencing variables.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
1 Einleitung.....	1
2 Theoretische Grundlagen und Hintergrund	2
2.1 Lichtraum als Auslegungskriterium	2
2.2 Grundlegende Schienenfahrzeugtechnik	5
2.2.1 Aufbau eines Schienenfahrzeugs	5
2.2.2 Aufbaubewegungen eines Schienenfahrzeugs	6
2.2.3 Der Rad-Schiene-Kontakt und die Spurführung	7
2.2.4 Fahrzeugstellungen im Gleis	9
2.3 Rechtliche Vorgaben	11
3 Lichtraumberechnung nach der BOStrab	12
3.1 Vorgehensweise	12
3.2 Berücksichtigte Einflussgrößen.....	14
3.2.1 Bogengeometrische Ausragung.....	15
3.2.2 Querverschiebung durch Spurspiel.....	16
3.2.3 Querverschiebung durch fahrzeugtechnische Faktoren	16
3.2.4 Querverschiebung durch gleistechnische Faktoren	17
3.2.5 Verlagerung durch statische und dynamische Kräfte	17
3.2.6 Verlagerung durch fahrzeugtechnische Faktoren.....	19
3.2.7 Verlagerung durch gleistechnische Faktoren	19
3.3 Berechnung des gesamten Lichtraumbedarfs.....	19
3.4 Anwendung in dieser Arbeit	19
3.5 Vergleich des Lichtraumbedarfs und der Profilerweiterung	22
4 Lichtraumbedarfsrechnung bei der HOCHBAHN	24
4.1 Die Baureihe DT4	24
4.1.1 Radsatz	26
4.1.2 Triebdrehgestell.....	28
4.1.3 Laufdrehgestell	29
4.1.4 Wagenkasten.....	31
4.2 Die Haltestelle Klosterstern.....	32
4.2.1 Bogeninneres Gleis 1	33
4.2.2 Bogenäußeres Gleis 2	35
4.3 Berechnung der Spaltbreite	36
4.3.1 Fahrzeugstellungen in der Haltestelle	37

4.3.2	Fahrzeugbetriebszustände	42
4.4	Variationen der durchschnittlichen minimalen Spaltbreite	44
4.4.1	Variation 1: Fahrzeugwanken	45
4.4.2	Variation 2: Fahrzeugbewegung durch freie Wege	47
4.4.3	Variation 3: Fahrzeugverschiebungen durch Querkräfte	48
4.5	Variationen der geringsten minimalen Spaltbreite	50
4.5.1	Variation 4: Geringste betrieblich auftretende minimale Spaltbreite	50
4.5.2	Variation 5: Minimale Spaltbreite bei Fahrzeugparametern nach BOStrab.....	52
4.5.3	Variation 6: Minimale Spaltbreite bei maximal veränderter Infrastruktur.....	53
5	Messungen der Spaltbreite im Fahrbetrieb	56
5.1	Ultraschall Messungen	56
5.1.1	Messaufbau und Datenauswertung	56
5.1.2	Ergebnisse	60
5.2	Berührungsmessungen mit Biegesensoren.....	60
6	Vergleich von Berechnung und Messung.....	61
6.1	Vergleich von Einzelmessungen	61
6.2	Mittlere Spaltbreite am bogeninneren Gleis 1	67
6.3	Mittlere Spaltbreite am bogenäußeren Gleis 2	70
6.4	Streuung der Spaltbreite	72
6.5	Ergebniszusammenfassung.....	75
7	Vorschläge zur Modifikation der Berechnung.....	77
8	Fazit.....	79
9	Literaturverzeichnis.....	81
Anhang	83

Abkürzungsverzeichnis

a	Drehzapfenabstand [mm]
a_q	Querbesehleunigung [m/s ²]
b	Halbe Fahrzeugbreite [mm]
b_a	Bogengeometrische Ausragung außen [mm]
b_i	Bogengeometrische Ausragung innen [mm]
d_{G1}	Mittlerer minimaler Abstand Gleis 1 [mm]
d_{G2}	Mittlerer minimaler Abstand Gleis 2 [mm]
e_1	Exzentrizität an Laufwerk 1 [mm]
e_2	Exzentrizität an Laufwerk 2 [mm]
f_{bi}	Lichtraumproflerweiterung innen [mm]
f_{ba}	Lichtraumproflerweiterung außen [mm]
f_F	Vergrößerungsfaktor des Wankwinkels aus Schwerpunktverlagerung
F_q	Querkraft [N]
F_{qTG}	Querkraft am Triebdrehgestell [N]
F_{qLG}	Querkraft am Laufdrehgestell [N]
f_u	Fahrzeugausragung in Querrichtung infolge von Überhöhung [mm]
f_1	Vergrößerungsfaktor für Laufwerk 1
f_2	Vergrößerungsfaktor für Laufwerk 2
g	Erdbesehleunigung [m/s ²]
GFT	Gemeinsame Flächentangente; Verbindungslinie zwischen den Laufflächen beider Schienen eines Gleises
LG	Hilfsparameter zur Definition der Gierstellung des Laufdrehgestells
m	Stützweite des Radsatzes [mm]
m_w	Wagenkastenmasse [kg]
$max \sigma$	Maximales Spurspiel [mm]
p_1	Achsabstand an Laufwerk 1 [mm]
p_2	Achsabstand an Laufwerk 2 [mm]
r	Bogenradius [m]
RUT	<i>Richtlinien für Planung, Entwurf und Bau von U-Bahn-Anlagen in Hamburg Teil 2: Trassierung (RUT)</i>
RUO	<i>Richtlinien für Planung, Entwurf und Bau von U-Bahn-Anlagen in Hamburg Teil 3: Oberbau (RUO)</i>
s	Spurmaß [mm]

S	Spurweite [mm]
$st1$	Hilfsparameter zur Definition der Stellung im Gleis des ersten Fahrwerks
$st2$	Hilfsparameter zur Definition der Stellung im Gleis des zweiten Fahrwerks
TG	Hilfsparameter zur Definition der Gierstellung des Triebdrehgestells
u	Gleisüberhöhung [mm]
u_x	Translatorische Längsbewegung des Wagenkastens
u_y	Translatorische Querbewegung des Wagenkastens
u_z	Translatorische Tauchbewegung des Wagenkastens
v	Fahrgeschwindigkeit [km/h]
x	Untersuchte Fahrzeuglängskoordinate [mm]
y_1	Querverschiebung des Anlenkpunktes an Fahrwerk 1 [mm]
y_2	Querverschiebung des Anlenkpunktes an Fahrwerk 2 [mm]
$y_{\sigma 0}$	Abweichung der Spurmitte durch unsymmetrischen Schienenverschleiß [mm]
ΔS_a	Verschleiß der Schienenfahrkante der bogenäußeren Schiene [mm]
ΔS_i	Verschleiß der Schienenfahrkante der bogeninneren Schiene [mm]
η_p	Wankwinkel in der Primärfederstufe [rad]
η_s	Wankwinkel in der Sekundärfederstufe [rad]
σ	Spurspiel [mm]
σ_{G1}	Standardabweichung des gemessenen Abstandes Gleis 1 [mm]
σ_{G2}	Standardabweichung des gemessenen Abstandes an Gleis 2 [mm]
φ_x	Rollen des Wagenkastens
φ_y	Nicken des Wagenkastens
φ_z	Wenden des Wagenkastens

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1 Prinzipieller Unterschied zwischen Einschränkungsberechnung und Berechnung des Lichtraumbedarfs im U-Bahn- und Straßenbahnbereich (Brandhorst et al. 2014, S. 217)	3
Abbildung 2-2 Lichtraumumgrenzung bei der HOCHBAHN (HOCHBAHN 2010, S. 7)	4
Abbildung 2-3 Koordinatensystem; Bezeichnung der Fahrzeugbewegungen (Knothe et al. 2003, S. 18)	5
Abbildung 2-4 Allgemeiner Aufbau eines Drehgestells (Hanneforth et al. 1986, S. 40)	6
Abbildung 2-5 Platzbedarf im Gleisbogen (Janicki et al. 2008, S. 59)	7
Abbildung 2-6 Geometrie zwischen Radsatz und Gleis (Brandhorst et al. 2014, S. 25)	8
Abbildung 2-7 Bogenstellung eines zweiachsigen Fahrzeugs mit längsstarrer Radsatzführung (Ihme 2016, S. 158)	9
Abbildung 2-8 Mögliche Stellungen eines Schienenfahrzeugs im Gleisbogen (Ihme 2016, S. 159)	10
Abbildung 2-9 Reststufe und Restspalt nach DIN 18040-3 (ADAC 2018, S. 24)	12
Abbildung 3-1 Faktor 1 für die Wagenkastenverschiebung infolge Querverschiebung der Anlenkpunkte (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 33)	14
Abbildung 3-2 Faktor 2 für die Wagenkastenverschiebung infolge Querverschiebung der Anlenkpunkte (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 33)	14
Abbildung 3-3 Bogengeometrische Ausragung einschließlich halber Fahrzeugbreite (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 34)	15
Abbildung 3-4 Querverschiebung infolge maximalen Spurspiels (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 37)	16
Abbildung 3-5 Schema der Fahrzeugfeder-Verlagerungen (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 46)	18
Abbildung 3-6 Maximale Fahrzeugbreite durch bogenäußere Lichtraumumgrenzung	21
Abbildung 3-7 Maximale Fahrzeugbreite durch bogeninnere Lichtraumumgrenzung	21
Abbildung 3-8 Maximale Fahrzeugbreite durch Lichtraumumgrenzung	22
Abbildung 3-9 Maximale Fahrzeugbreite mit Profilerweiterung in Abhängigkeit des Gleisbogenradius	22
Abbildung 3-10 Maximale Fahrzeugbreite ohne Profilerweiterung in Abhängigkeit des Gleisbogenradius	23
Abbildung 4-1 Übersicht eines Gesamtfahrzeugs DT4 (HOCHBAHN)	25
Abbildung 4-2 Übersicht eines Halbzugs DT4 (HOCHBAHN)	25
Abbildung 4-3 Wirkweise des Jakobs-Drehgestells "Hamburger Bauart" (HOCHBAHN)	25
Abbildung 4-4 Grenzmaße des Radprofils (HOCHBAHN)	26
Abbildung 4-5 Äquivalente Konizität der Profilverpaarung der HOCHBAHN (HOCHBAHN)	27
Abbildung 4-6 Seitenansicht Triebdrehgestell (HOCHBAHN)	28
Abbildung 4-7 Draufsicht auf das Mitnehmerkreuz des Triebdrehgestells (HOCHBAHN)	29
Abbildung 4-8 Seitenansicht des Laufdrehgestells (HOCHBAHN)	29
Abbildung 4-9 Draufsicht auf das Laufdrehgestell (HOCHBAHN)	30
Abbildung 4-10 Wagenkastenbreite des DT4	31
Abbildung 4-11 Halbe Fahrzeugbreite des DT4 Wagen 1/4	32
Abbildung 4-12 Halbe Fahrzeugbreiten des DT4 Wagen 2/3	32
Abbildung 4-13 Übersicht der Haltestelle Klosterstern (HOCHBAHN)	33
Abbildung 4-14 Messung der Spurerweiterung an Gleis 1 (HOCHBAHN)	33
Abbildung 4-15 Ermittlung der tatsächlichen Spurmitte an Gleis 1 (HOCHBAHN)	34
Abbildung 4-16 Korrektur der Gleisüberhöhung Gleis 1 (HOCHBAHN)	34
Abbildung 4-17 Messung der Spurerweiterung an Gleis 2 (HOCHBAHN)	35
Abbildung 4-18 Ermittlung der tatsächlichen Spurmitte an Gleis 2 (HOCHBAHN)	35
Abbildung 4-19 Berechnung des Restspaltes an Gleis 1	36

Abbildung 4-20 Berechnung des Restspaltes an Gleis 2.....	37
Abbildung 4-21 Auswirkung der Spießgangstellung des Laufdrehgestells auf den Anlenkpunkt.....	38
Abbildung 4-22 Neutrale Fahrzeugstellung DT4-Halbzug	39
Abbildung 4-23 Innere Sehnenstellung DT4-Halbzug	40
Abbildung 4-24 Spießgangstellung DT4-Halbzug.....	40
Abbildung 4-25 Spießgangstellung des nachlaufenden DT4-Halbzugs	40
Abbildung 4-26 Spaltbreitenveränderung durch Fahrzeugstellung von Wagen 1 eines DT4.1 an Gleis 1	41
Abbildung 4-27 Spaltbreitenveränderung durch Fahrzeugstellung von Wagen 1 eines DT4.1 an Gleis 2	42
Abbildung 4-28 Variation 1: DT4.1 Wagen 1 an Gleis 1 Einfluss des Fahrzeugwankens	45
Abbildung 4-29 Variation 1: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 1 des fahrenden Fahrzeugs unter Wankbewegung.....	46
Abbildung 4-30 Variation 1: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 2 des stehenden Fahrzeugs unter Wankbewegung.....	47
Abbildung 4-31 Variation 2: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 1 des fahrenden Fahrzeugs unter zusätzlichem Einfluss der freien Wege	48
Abbildung 4-32 Variation 2: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 2 des stehenden Fahrzeugs unter zusätzlichem Einfluss der freien Wege	48
Abbildung 4-33 Variation 3: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 1 des fahrenden Fahrzeugs unter zusätzlichem Einfluss quasistatischer Querverschiebung	49
Abbildung 4-34 Variation 3: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 2 des stehenden Fahrzeugs unter zusätzlichem Einfluss quasistatischer Querverschiebung	49
Abbildung 4-35 Variation 3: Spaltbreite DT4.6 Wagen 1 an Gleis 2 des stehenden Fahrzeugs unter zusätzlichem Einfluss quasistatischer Querverschiebung	50
Abbildung 4-36 Variation 4: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 1 des fahrenden Fahrzeugs unter zusätzlichem Einfluss von betrieblichem Verschleiß und Toleranzen.....	51
Abbildung 4-37 Variation 4: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 2 des stehenden Fahrzeugs unter zusätzlichem Einfluss von betrieblichem Verschleiß und Toleranzen.....	52
Abbildung 4-38 Variation 5: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 1 des fahrenden Fahrzeugs unter maximalen fahrzeugtechnischen Einflüssen	53
Abbildung 4-39 Variation 5: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 2 des stehenden Fahrzeugs unter maximalen fahrzeugtechnischen Einflüssen	53
Abbildung 4-40 Variation 6: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 1 des fahrenden Fahrzeugs unter maximalen fahrzeugtechnischen und gleistechnischen Einflüssen.....	54
Abbildung 4-41 Variation 6: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 2 des stehenden Fahrzeugs unter maximalen fahrzeugtechnischen und gleistechnischen Einflüssen.....	55
Abbildung 4-42 Minimale berechnete Spaltbreite der Spießgangstellungen der Variationen 1-6	55
Abbildung 5-1 Messkegel der Ultraschallsensoren.....	57
Abbildung 5-2 Abstandsmessung bei konstanter Fahrt an Gleis 1 (Willemsen et al. 2016, S. 8)	57
Abbildung 5-3 Abstandsmessung einer einzelnen Zugdurchfahrt eines DT4.6 an Gleis 1 (HOCHBAHN).....	58
Abbildung 5-4 Minimale Distanzen aller Züge an einem Sensor (Willemsen et al. 2016, S. 13)	59
Abbildung 6-1 Einzelmessungen eines DT4.1 an den Sensoren an Gleis 1	62
Abbildung 6-2 Vergleich der ersten beiden Wagen eines DT4.1 an Gleis 1 mit der Berechnung	62

Abbildung 6-3 Vergleich der letzten beiden Wagen eines DT4.1 an Gleis 1 mit der Berechnung	63
Abbildung 6-4 Vergleich mehrerer Messungen und der Berechnung eines DT4.6 an Gleis 1	64
Abbildung 6-5 Detailansicht der mittleren beiden Trittleisten aus Abbildung 6-4.....	65
Abbildung 6-6 Vergleich des dritten und vierten Wagens eines DT4.6 an Gleis 2 mit der Berechnung	65
Abbildung 6-7 Vergleich mehrerer Messungen und der Berechnung eines DT4.6 an Gleis 2	66
Abbildung 6-8 Detailansicht der mittleren beiden Trittleisten aus Abbildung 6-7.....	66
Abbildung 6-9 Verschiebung der Anlenkpunkte im Spießgang.....	67
Abbildung 6-10 Verschiebung der Anlenkpunkte im hinteren Freilauf	67
Abbildung 6-11 Spaltbreite der Neutralstellungen der Variationen 1-3 DT4.1 Wagen 1 an Gleis 1 (st1=0;st2=0;LG=0;TG=0)	68
Abbildung 6-12 Spaltbreite des Spießgangs (+) der Variationen 1-3 DT4.1 Wagen 1 an Gleis 1 (st1=1;st2=1;LG=1;TG=1)	69
Abbildung 6-13 Lichtraumkritischer Bereich aus Abbildung 6-12.....	69
Abbildung 6-14 Spaltbreite des Spießgangs (+) der Variationen 1-3 DT4.6 Wagen 1 an Gleis 1 (st1=1;st2=1;LG=-1;TG=1)	70
Abbildung 6-15 Lichtraumkritischer Bereich aus Abbildung 6-14.....	70
Abbildung 6-16 Spaltbreite der Neutralstellungen der Variationen 1-3 DT4.1 Wagen 1 an Gleis 2 (st1=0;st2=0;LG=0;TG=0)	71
Abbildung 6-17 Spaltbreite des Spießgang (-) der Variationen 1-3 DT4.1 Wagen 1 an Gleis 2 (st1=-1;st2=-1;LG=-1;TG=-1)	71
Abbildung 6-18 Spaltbreite des Spießgang (-) der Variationen 1-3 DT4.6 Wagen 1 an Gleis 2 (st1=-1;st2=-1;LG=-1;TG=-1)	72
Abbildung 6-19 Spießgangstellungen von DT4.1(st1=1;st2=1;LG=1;TG=1) und DT4.6 (st1=1;st2=1;LG=-1;TG=1) der Variation 4 an Gleis 1	73
Abbildung 6-20 Spießgangstellungen von DT4.1(st1=-1;st2=-1;LG=-1;TG=-1) und DT4.6 (st1=-1;st2=-1;LG=-1;TG=-1) der Variation 4 an Gleis 2	74
Abbildung 6-21 Spießgangstellungen eines DT4.1(st1=1;st2=1;LG=1;TG=1) der Variation 5 und Variation 6 an Gleis 1.....	75
Abbildung 6-22 Spießgangstellungen eines DT4.1(st1=-1;st2=-1;LG=-1;TG=-1) der Variation 5 und Variation 6 an Gleis 2.....	75

1 Einleitung

Die 1911 gegründete Hamburger Hochbahn AG (HOCHBAHN) begann im Jahr 1912 mit dem Betrieb einer Hoch- und Untergrundbahn. Hamburg war damit nach Berlin die zweite deutsche Stadt mit einer U-Bahn. Mit 113 Buslinien und vier U-Bahn-Linien – eine fünfte steht kurz vor Baubeginn - ist das Unternehmen heute der größte Anbieter im öffentlichen Personennahverkehr im Großraum Hamburg. Von den 1,2 Mio. Fahrgästen des Unternehmens pro Tag nutzen fast 700.000 die U-Bahn. Auf dem teilweise mehr als 100 Jahre alten Gleisnetz fahren U-Bahn-Fahrzeuge aus fünf Jahrzehnten im Regelbetrieb. (HOCHBAHN 2019) Der Zuzug in das Hamburger Stadtgebiet und die Abkehr vom motorisierten Individualverkehr geben den Entwicklungskurs dieser Zahlen vor und bilden damit große Herausforderungen für die Zukunft.

Um das höhere Fahrgastaufkommen zu bewältigen und einen zuverlässigen Betriebsablauf zu gewähren, ist eine Leistungssteigerung des U-Bahn-Systems unerlässlich. Diese ist allerdings nur noch in sehr engen Grenzen möglich. Der Takt kann kaum noch verdichtet werden und die Zuglänge ist aufgrund der Bahnsteiglänge ebenfalls begrenzt. Der barrierefreie Einstieg für alle Fahrgäste stellt neben der Fahrgastkapazität zusätzliche Anforderungen an das System.

Neuentwickelte U-Bahnen können durch breitere Wagen den Einstieg in das Fahrzeug mit einer geringeren verbleibenden Spaltbreite zwischen Bahn und Bahnsteig erleichtern, die Kapazität erhöhen und die Umsteigezeiten durch einen besseren Fahrgastfluss verringern. Gleichzeitig müssen neue Bahnen an die über 100 Jahre alte Infrastruktur angepasst sein. Das gewährleistet unter anderem der Lichtraumnachweis, der sicherstellt, dass die U-Bahn-Fahrzeuge kollisionsfrei in jeder denkbaren Situation im gesamten Gleisnetz fahren können.

In ersten Betrachtungen zeigt sich dieser Nachweis äußerst konservativ und schränkt die Baubreite von neuen U-Bahn-Fahrzeugen durch ungenutzte Sicherheitsreserven ein. Diese Arbeit untersucht diesen Sachverhalt anhand einer vergleichenden Gegenüberstellung der theoretischen Berechnung und der praktischen Messung des Lichtraumbedarfs eines ausgewählten Gleisabschnittes. Ziel ist es, die Höhe und den Ursprung der vorhandenen Sicherheitsreserve sowie Ansätze für eine Überarbeitung dieses Nachweises zu identifizieren.

Nach der Einleitung in die notwendigen theoretischen Grundlagen erfolgt ein Einstieg in die Methodik der für die HOCHBAHN gültigen Lichtraum-Richtlinien nach der *Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab)*. Neben der allgemeinen Vorgehensweise werden die einzelnen zu berücksichtigenden fahrzeugtechnischen und gleistechnischen Einflussgrößen vorgestellt. Durch eine Anpassung des Verfahrens der Lichtraum-Richtlinien wird die Berechnung der verbleibenden Spaltbreite zwischen Fahrzeug und Bahnsteig für die Fahrzeugbaureihe DT4 an der Haltestelle Klosterstern ermöglicht. Mit einer Parametervariation wird untersucht, wie sich die unterschiedlichen in den Lichtraum-Richtlinien genannten Einflussgrößen auf die verbleibende Spaltbreite auswirken.

Genau diese Spaltbreite wurde in einer umfangreichen Messung im regulären Fahrbetrieb im Rahmen der Installation einer Einstiegshilfe zur Verringerung der Spaltbreite zwischen Fahrzeug und Bahnsteig über mehrere Monate erfasst und statistisch ausgewertet.

Der Vergleich der rechnerisch und messtechnisch ermittelten Spaltbreiten lässt Rückschlüsse auf die real vorherrschenden Bedingungen zu. Darauf aufbauend lässt sich Potential für die Verbesserung und eine praxisnähere Gestaltung des Nachweises finden. Da es sich bei dieser Arbeit jedoch lediglich um eine erste Untersuchung anhand eines einzelnen Fallbeispiels handelt, ist auch das Ziel noch keine allgemein gültige Änderung des Nachweisverfahrens.

2 Theoretische Grundlagen und Hintergrund

Ein Schienenfahrzeug bewegt sich als spurgeführtes Fahrzeug entlang eines vorgegebenen Weges. Da diese Fahrzeuge oftmals lange Bremswege haben und die Möglichkeit einem Hindernis auszuweichen nicht besteht, muss sichergestellt sein, dass der Fahrweg nicht versperrt ist. Dafür reicht es nicht aus, lediglich eine Röhre mit dem Querschnitt des Fahrzeugs um den Weg herum freizuhalten, denn der tatsächliche Raumbedarf geht durch unterschiedliche Einflüsse im Betrieb darüber hinaus. Um diesen tatsächlichen Raumbedarf berechnen zu können, müssen jegliche Einflussfaktoren betrachtet werden. Daher ist eine grundlegende Kenntnis über den Aufbau und die Technik der Fahrzeuge sowie deren Wechselwirkung mit dem Schienensystem nötig. Diese wird in den folgenden Kapiteln kurz dargestellt. Zuerst werden der Lichtraum und seine Bedeutung als Auslegungskriterium für Fahrzeuge beleuchtet. Abschließend wird ein Überblick über die regelnden Vorschriften und deren Schnittstellen gegeben.

2.1 Lichtraum als Auslegungskriterium

Für einen reibungslosen und sicheren Betrieb im Schienenverkehr kam schon früh der Wunsch auf, den nötigen Raum um den Fahrweg, zuverlässig freizuhalten. Voraussetzung hierfür ist eine allgemeingültige Berechnungsmethode, die als Schnittstelle zwischen Fahrweg und Fahrzeug diesen Raum beschreibt und eine Kollisionsfreiheit gewährleistet. Außerdem wird durch eine Standardisierung gewährleistet, dass Züge problemlos die Schienennetze unterschiedlicher Betreiber befahren können. Aus diesen naheliegenden Gründen stammt die erste Berechnung dieser Art in Deutschland bereits aus dem Jahr 1850. (Jänsch 2019, S. 328)

Um den genannten Anforderungen zu genügen, müssen alle kalkulierbaren und alle nicht kalkulierbaren betrieblichen Einflüsse der unterschiedlichen Systemkomponenten berücksichtigt werden. Zwangsläufig ergeben sich definierte Fahrzeugüberhänge aus der Fahrzeuggeometrie während der spurgeführten Bogenfahrt. Hinzu kommen weniger kalkulierbare Bewegungen des Fahrzeugs durch Spiele innerhalb der Fahrwerke, Bautoleranzen oder dynamische Bewegungen. An der Schnittstelle zwischen Rad und Schiene ergibt sich mit dem Spurspiel eine weitere signifikante Einflussgröße. Aber auch aus Fehlern oder betriebsbedingten Veränderungen des Gleises resultiert eine Änderung der Fahrzeuglage. Zu guter Letzt unterliegen auch ortsfeste Anlagen gewissen Bautoleranzen und Veränderungen im Laufe des Betriebs. Im Folgenden wird nur auf die Beschreibung dieses horizontalen Lichtraums eingegangen, da es in dieser Arbeit speziell um diesen geht, allerdings sei angemerkt, dass eine vertikale Lichtraumbetrachtung ebenso notwendig ist.

Die *Eisenbahn-Bau und Betriebsordnung (EBO)* für den Vollbahnbereich nutzt eine sogenannte „Einschränkungsrechnung“, um die realen Platzverhältnisse theoretisch zu beschreiben. Der Name rührt daher, dass ausgehend von einem in der Gerade stehenden Fahrzeug Einschränkungen der äußeren Abmessungen vorgenommen wurden, um eine Bogenfahrt zu ermöglichen sowie andere Einflüsse zu berücksichtigen und damit die Kollisionsfreiheit sicherzustellen. Daraus ergibt sich die Kontur der maximalen Fahrzeugbreite. Mittlerweile stehen drei Methoden zur Verfügung, die die Einschränkungsberechnung durchzuführen. Die statische, die kinematische und die dynamische Methode unterscheiden sich dabei im Umfang der berücksichtigten Einflüsse. Die dynamische Methode ist so umfangreich, dass sie lediglich mit einer Mehrkörpersimulation durchführbar ist. Allen Methoden gemein ist die Verwendung einer Bezugslinie, bei der es sich um ein Linienprofil handelt, das sich zwischen der Fahrzeugbegrenzungslinie und der Lichtraumumgrenzungslinie befindet und als Referenz für die berechneten Einschränkungen dient. Dadurch ist ein gemeinsamer Bezug bei

Lichtraumbetrachtungen für alle am System beteiligten Zuständigkeiten geschaffen. (Brandhorst et al. 2014, S. 215f.)

Die für die HOCHBAHN gültige *Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab)* verwendet mit ihren *Lichtraum-Richtlinien* einen anderen Ansatz des Lichtraumnachweises. Hierbei wird für ein definiertes Fahrzeug unter den ungünstigsten Bedingungen der höchste Lichtraumbedarf berechnet und direkt mit dem verfügbaren Lichtraum an dieser Stelle im Gleisnetz abgeglichen. Dieser direkte Vergleich ist nur möglich, da bei BOStrab-Betrieben aufgrund der geringeren Größe und der regionalen Beschränkung eine derartig scharfe Trennung zwischen den Zuständigkeiten für Infrastruktur und Fahrzeugen nicht notwendig ist. Den prinzipiellen Unterschied der beiden Ansätze stellt Abbildung 2-1 noch einmal dar. (Brandhorst et al. 2014, S. 216)

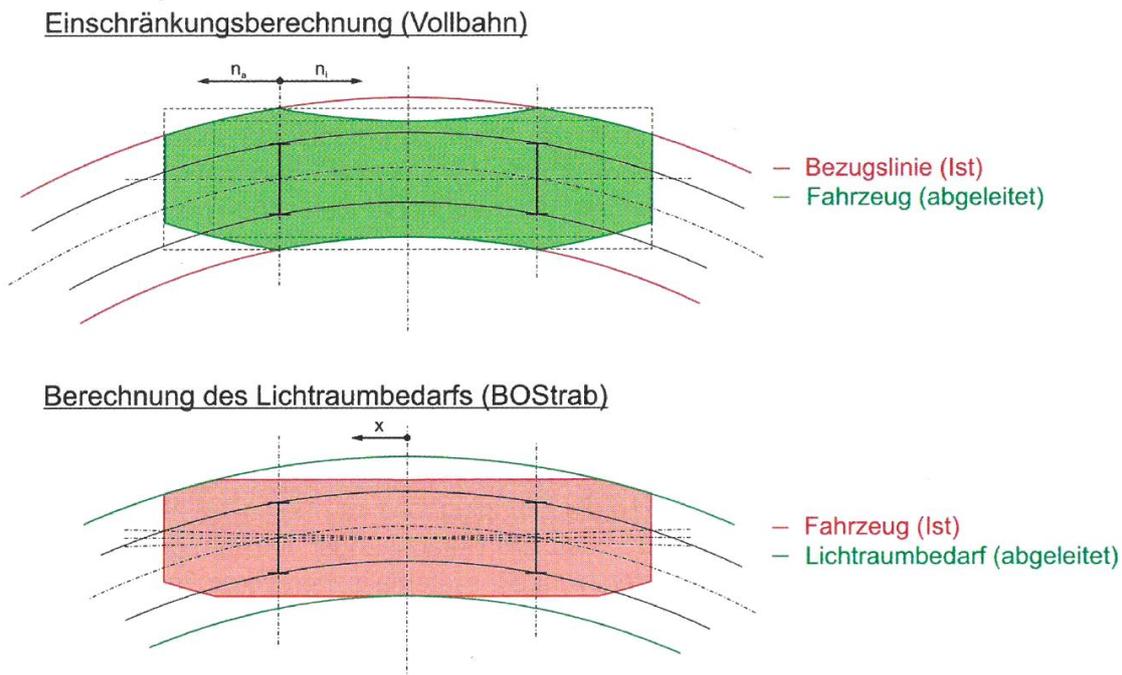


Abbildung 2-1 Prinzipieller Unterschied zwischen *Einschränkungsrechnung* und *Berechnung des Lichtraumbedarfs* im U-Bahn- und Straßenbahnbereich (Brandhorst et al. 2014, S. 217)

Die Lichtraumgrenzung für eine gerade Strecke der HOCHBAHN ist in Abbildung 2-2 dargestellt. Die rechnerische Bezugslinie stellt immer die Senkrechte in der Gleismitte dar. Bei der Lichtraumberechnung in einem überhöhten Gleis kippt das ganze System mit der Lichtraumgrenzung, sodass lediglich Änderungen der Einflüsse durch Schwerkraft und Fliehkräfte berücksichtigt werden müssen, nicht jedoch die Winkeländerung selbst. In Bögen wird der verfügbare Lichtraum seitlich erweitert. Die sogenannte Lichtraumprofilerweiterung - kurz Profilerweiterung oder Lichtraumerweiterung - berücksichtigt die bogengeometrische Ausragung der Fahrzeuge im Bogen. Die Höhe dieser Profilerweiterung wurde vor über 100 Jahren an die bogengeometrische Ausragung des historischen T-Wagens der HOCHBAHN angepasst. Dieser Zusammenhang wird in Kapitel 3.5 noch einmal ausführlicher dargestellt.

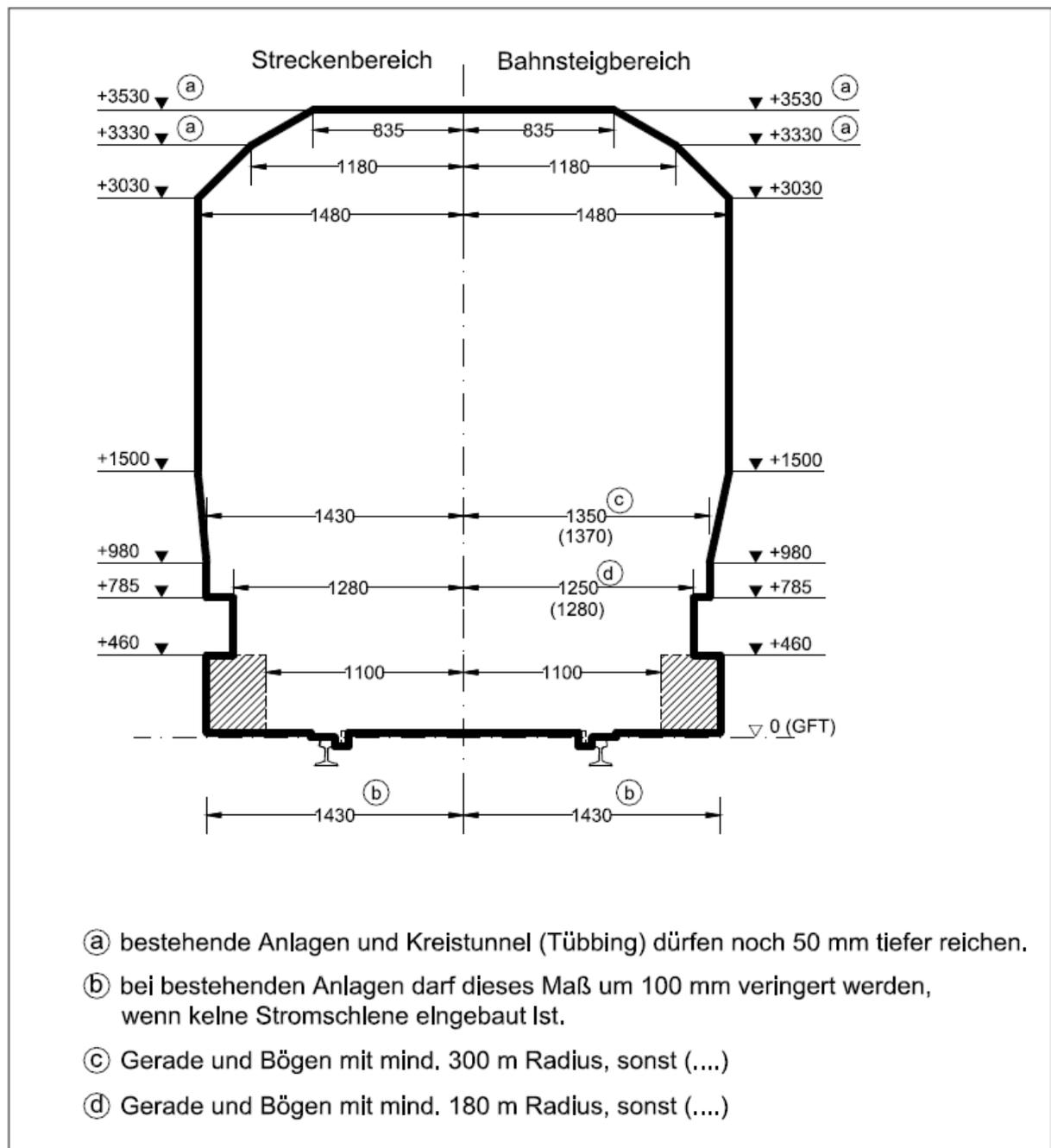


Abbildung 2-2 Lichtraumumgrenzung bei der HOCHBAHN (HOCHBAHN 2010, S. 7)

Diese frühe Entwicklung des Lichtraumprofils in Hamburg stellt heute bei der Neuentwicklung der Fahrzeuge eine besondere Herausforderung dar. Um die Leistungsfähigkeit der U-Bahn weiter zu steigern, soll unter anderem die Kapazität der einzelnen Fahrzeuge erhöht werden. Dafür sollen neue Fahrzeugkonzepte breitere Wagenkästen ermöglichen und den vorhandenen Lichtraum optimal ausnutzen. Hinzu kommen Vorgaben an die Barrierefreiheit des öffentlichen Personennahverkehrs, die speziell beim Ein- und Ausstieg ein Problem darstellen. Im Detail bedeutet das für die U-Bahn-Fahrzeuge, dass die vertikale Stufe und der horizontale Spalt zwischen Fahrzeugeinstieg und Bahnsteig möglichst gering sein sollen. Aufgrund der Lage in engen Gleisbögen stellt diese Anforderung allerdings an einigen Haltestellen in dem alten Gleisnetz der HOCHBAHN ein kaum zu lösendes Problem dar. Hier führt die notwendige Profilerweiterung für eine kollisionsfreie Durchfahrt der Fahrzeuge gleichzeitig zu einem deutlich vergrößerten Spalt zwischen Bahnsteig und Fahrzeugeinstieg.

Zusätzlich sei noch angemerkt, dass die HOCHBAHN durch äußerst geringe zulässige Achslasten im Gleisnetz auch in dieser Hinsicht besondere Anforderungen an neue Fahrzeugkonzepte stellt. Insgesamt zeigt sich somit, dass die mögliche Fahrzeugbreite und damit auch die Verringerung der Spaltbreite am Bahnsteig diametral der Anforderung nach einer kollisionsfreien Fahrzeugdurchfahrt entgegensteht. Um die Auswirkungen dieses Zielkonflikts in Grenzen zu halten, muss durch eine praxisnahe Berechnung der tatsächliche Lichtraumbedarf eines Fahrzeugs so genau beschrieben werden, dass Sicherheitsreserven, die die Fahrzeugbreite einschränken, möglichst weit reduziert werden können.

2.2 Grundlegende Schienenfahrzeugtechnik

Bei Personenfahrzeugen, für die die BOStrab primär ausgelegt ist, haben sich aus Gründen der gewünschten Wagenkastenlänge, der zu durchfahrenden engen Gleisbögen und der höheren Komfortanforderungen weitestgehend Drehgestellfahrzeuge mit zwei Federstufen durchgesetzt. Im einfachsten Fall handelt es sich dabei um ein Brückenfahrzeug aus zwei Fahrwerken mit jeweils zwei Radsätzen und einem symmetrisch auf diesen aufliegenden Wagenkasten, wie es in Abbildung 2-3 zu sehen ist. Zwar weichen die U-Bahn-Fahrzeuge der HOCHBAHN von diesem Konzept ab, die grundlegende Verknüpfung der einzelnen Elemente lässt sich dennoch übertragen. Neben dem im Folgenden erläuterten Fahrzeugaufbau gibt es natürlich viele weitere Fahrzeugkonzepte, die für diese Arbeit jedoch nicht relevant sind.

2.2.1 Aufbau eines Schienenfahrzeugs

In Abbildung 2-3 ist das für Schienenfahrzeuge übliche Koordinatensystem zu sehen. Die x -Richtung verläuft positiv in Fahrtrichtung, die y -Richtung verläuft in Querrichtung und die z -Achse in vertikale Richtung. Der Koordinatenursprung liegt mittig zwischen den Schienen auf Höhe der Fahrflächen. Der Ursprung in x -Richtung befindet sich in der Mitte zwischen den beiden Anlenkpunkten der Fahrwerke. Dieses Koordinatensystem gleicht dem System der Lichtraum-Richtlinien, wobei diese noch eine Ergänzung zu der Ausrichtung der y -Richtung macht. Die positive y -Richtung zeigt im Gleisbogen in bogenäußere Richtung, die negative y -Richtung in bogeninnere Richtung zum Gleisbogenmittelpunkt. (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 31) Die Ausrichtung der positiven x -Richtung in Fahrtrichtung wird dafür vernachlässigt.

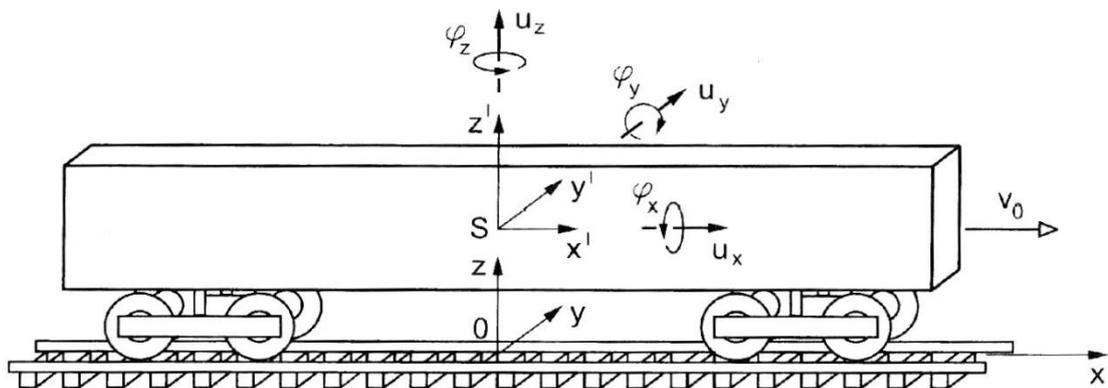


Abbildung 2-3 Koordinatensystem; Bezeichnung der Fahrzeugbewegungen (Knothe et al. 2003, S. 18)

Für die Lichtraumberechnungen nach BOStrab reicht ein Ansatz der Fahrzeuge als Starrkörpermodell mit Koppellementen aus. Zwei Radsätze und ein Drehgestellrahmen bilden gemeinsam ein Drehgestell, wie es schematisch in Abbildung 2-4 zu sehen ist. Die Radsätze (1) sind über die Primärfederstufe (2) mit dem Drehgestellrahmen (4) verbunden. Auch wenn diese Primärfederstufe hauptsächlich die Bewegung in vertikaler Richtung ermöglicht, sind je nach technischer Ausführung auch kleinere Bewegungen in Querrichtung und Längsrichtung möglich und nicht vollständig unterbunden (3). Je nach der Art der

ausgewählten Feder ist eventuell auch die Verwendung eines Schwingungsdämpfers notwendig. Zusätzlich können auch die Radlager mit einem Spiel eine Querverschiebung des Drehgestellrahmens zu den Radsätzen ermöglichen. Diese Bewegungsmöglichkeiten zueinander dienen der Entkopplung von Störungen des Gleises und damit neben der Komfortverbesserung auch der Sicherheit gegen Entgleisungen. (Brandhorst et al. 2014, S. 315)

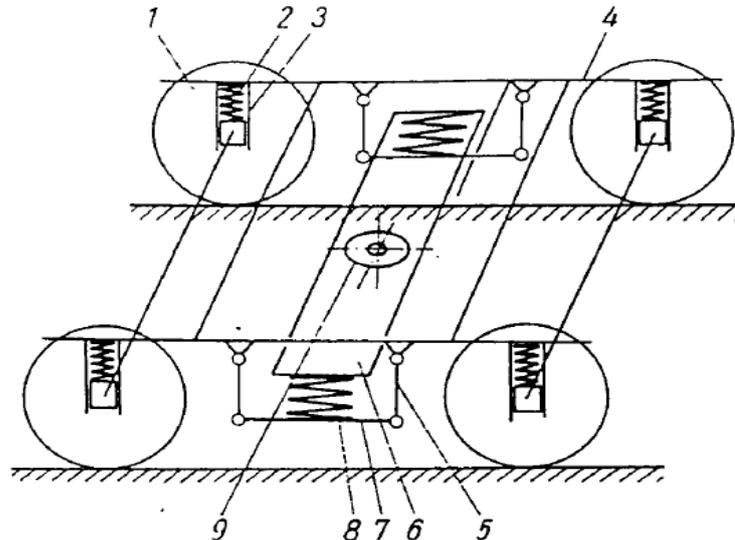


Abbildung 2-4 Allgemeiner Aufbau eines Drehgestells (Hanneforth et al. 1986, S. 40)

In der Sekundärstufe sind die Drehgestelle mit dem Wagenkasten verbunden. Die Funktionsweise ist grundlegend identisch mit der der Primärfederstufe. Neben der gefederten vertikalen Bewegung sind auch unterschiedlich starke Längs- und Querverschiebungen zwischen dem Drehgestell und dem Wagenkasten zugelassen. Für diese Federstufe gibt es viele verschiedene technische Ausführungen, daher ist an diesem Beispiel nur eine mögliche Funktionsweise schematisch dargestellt. Der Wiegenträger (6) stützt sich über die beiden Sekundärfedern (8) im Wiegentrog (7) ab. Über die Wiegenpendel (5) ist der Wiegentrog (7) beweglich mit dem Drehgestellrahmen verbunden. Somit kann der Wiegenträger (6) eine Bewegung in Längs- und Querrichtung zum Drehgestellrahmen ausführen. Die maximalen Ausschläge sind allerdings in einem realen Drehgestell durch starre oder elastische Anschläge stark eingeschränkt. Über die Wagenkastenabstützung (9) ist der Wagenkasten rotatorisch frei beweglich um die Hochachse mit dem Wiegenträger (6) verbunden, wodurch die Verdrehung des Drehgestells in einer Bogenfahrt ermöglicht ist. Dieser Punkt der Wagenkastenankennung ist im Folgenden als Anlenkpunkt bezeichnet.

2.2.2 Aufbaubewegungen eines Schienenfahrzeugs

Da der technische Aufbau eines Schienenfahrzeugs im Kapitel 2.2.1 erläutert wurde, sind nun die daraus resultierenden möglichen Bewegungen des Fahrzeugaufbaus beschrieben. Dabei handelt es sich um drei translatorische und drei rotatorische Bewegungen, die bereits in Abbildung 2-3 eingezeichnet sind. Die drei translatorischen Bewegungen sind die Tauchbewegung u_z , die Querbewegung u_y und die Längsbewegung u_x . Die rotatorischen Bewegungen sind beschrieben durch das Wenden φ_z , das Nicken φ_y und das Rollen φ_x . (Knothe et al. 2003, S. 18) Das Rollen φ_x tritt oft überlagert mit einer Querbewegung u_y auf und wird dann als Wanken bezeichnet. Von diesen sechs Bewegungsmöglichkeiten haben alle, bis auf die Längsbewegung, Auswirkungen auf den Lichtraumbedarf des Fahrzeugs. Von den verbleibenden fünf Bewegungen wirken sich die Querbewegung sowie das Wenden und Rollen auf den seitlichen Lichtraum aus. Die Querbewegung und das Wenden entstehen durch Querverschiebungen der Anlenkpunkte des Wagenkastens. Sind sie im Falle der

Querverschiebung gleichgerichtet an beiden Anlenkpunkten, so sind sie beim Wenden entgegen gerichtet. Diese Ausrichtung wird später durch die Fahrzeugstellen, siehe Kapitel 2.2.4, berücksichtigt. Das Rollen entsteht durch ein einseitiges Ein- und Ausfedern der Primär- und Sekundärstufe und wirkt sich mit der höhenabhängigen horizontalen Komponente auf den seitlichen Lichtraumbedarf aus.

Auch wenn es sich nicht um eine dynamische Aufbaubewegung im klassischen Sinn handelt, soll an dieser Stelle wegen der hohen Bedeutung für den Lichtraum noch die kinematische Bewegung des Wagenkastens bei einer Bogenfahrt dargestellt werden. Die Tatsache, dass der Wagenkasten als Brücke zwischen zwei Drehgestellen oder Radsätzen aufgesetzt ist, bewirkt einen Mehrbedarf an Platz im Bogen in innere und äußere Richtung, wie es in Abbildung 2-5 zu sehen ist. Dieser bogengeometrische Ausragung genannte Mehrbedarf lässt sich genau bestimmen und trägt wesentlich zu den Einschränkungen des Wagenkastens bei.

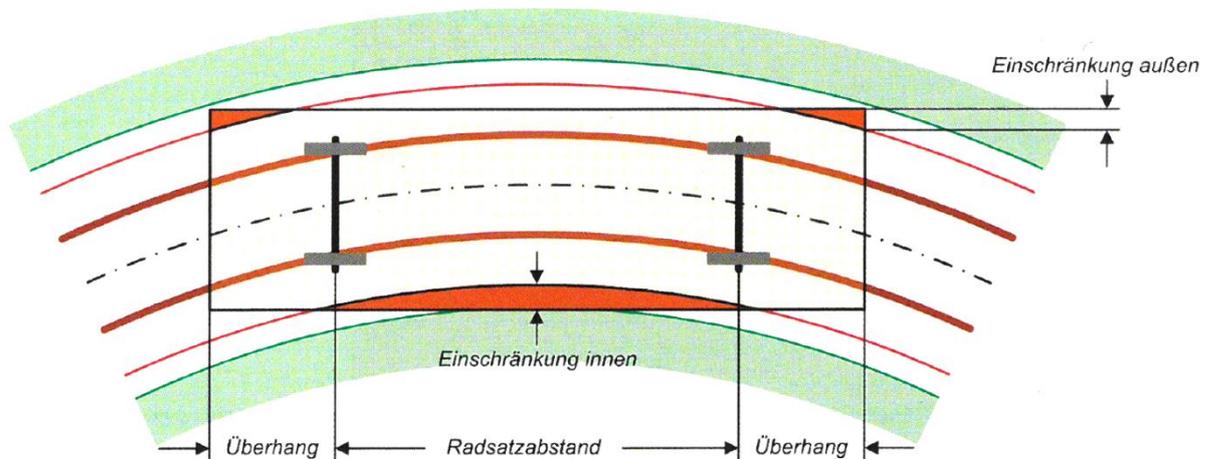


Abbildung 2-5 Platzbedarf im Gleisbogen (Janicki et al. 2008, S. 59)

2.2.3 Der Rad-Schiene-Kontakt und die Spurführung

Der Rad-Schiene-Kontakt und die zugehörige Spurführung stellen sehr komplexe und der Schienenfahrzeugtechnik vorbehaltene Spezialgebiete dar und werden deshalb nur kurz, soweit es für diese Arbeit notwendig ist, angerissen.

Der Rad-Schiene-Kontakt bildet die einzige Verbindung zwischen der Schiene und dem Fahrzeug und überträgt damit auch alle zwischen der Schiene und dem Fahrzeug wirkenden Kräfte. In der Regel werden somit in einer Fläche von $1,5\text{cm}^2$ pro Rad sämtliche Kräfte, die zum Tragen, zum Führen und zum Antreiben beziehungsweise Bremsen des Fahrzeugs nötig sind, übertragen. (Knothe et al. 2003, S. 33) Die hohen Massen von Schienenfahrzeugen lassen in Kombination mit den kleinen Kontaktflächen auf die vorherrschenden Spannungen schließen. Für die meisten dynamischen Betrachtungen von Schienenfahrzeugen genügt jedoch eine Modellierung als Punktkontakt aus, über den die jeweiligen Kräfte in den Radsatz geleitet werden. Neben den Kräften, die zum Tragen, Führen, Bremsen und Antreiben des Fahrzeugs zwischen Rad und Schiene vorliegen, werden über diesen Kontakt auch Störungen aus dem Gleis in das Fahrzeug eingeleitet und versetzen es in hierdurch in Schwingung.

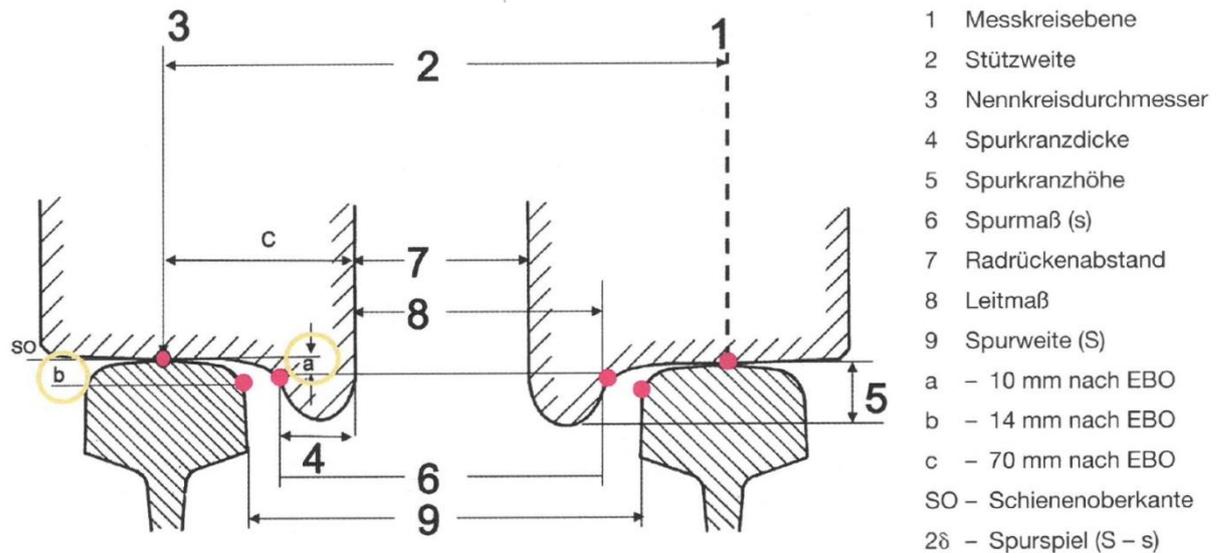


Abbildung 2-6 Geometrie zwischen Radsatz und Gleis (Brandhorst et al. 2014, S. 25)

Der Radsatz mit seinen fest über die Radsatzwelle verbundenen Rädern wird durch die Schienen innerhalb des Spurkanals geführt. Diese Führung ist immer mit einem kleinen Spiel ausgeführt. Dieses Spurspiel, das sich als Differenz aus der Spurweite S des Gleises und dem Spurmaß s des Radsatzes errechnet, ermöglicht dem Radsatz kleine seitliche Verschiebungen innerhalb des Spurkanals. Die Paarung des Schienenprofils und des Radprofils ist eine relevante Größe für die Dynamik eines Schienenfahrzeugs. Die Besonderheit liegt dabei in der Veränderung des wirksamen Radradius bei einer seitlichen Verschiebung des Radsatzes. Die ähnlich einem Konus geformte Lauffläche des Rades ermöglicht so eine annähernd schlupffreie Fahrt in Gleisbögen, indem sich der Radsatz seitlich so verschiebt, dass die Wegdifferenzen zwischen bogeninnerer und bogenäußerer Schiene durch die unterschiedlichen Rollradien der Räder bei gleicher Winkelgeschwindigkeit ausgeglichen werden. Gleichzeitig hat dieses Zusammenspiel auch eine selbstzentrierende Wirkung des Radsatzes in der Schiene, die sich zeigt, wenn ein Radsatz zum Beispiel durch eine Störung des Gleises außermittig steht. Das stetige Pendeln um die Mittellage, welches sich im Fahrbetrieb einstellt, wird *Sinuslauf* genannt. Der Verlauf, wie sich der Rollradius eines Rades bei einer seitlichen Verschiebung verändert, hängt von der Profilpaarung aus Rad und Schiene ab und wird *äquivalente Konizität* genannt.

Da sich der Radsatz im Fahrbetrieb nur innerhalb des Spurspiels seitlich verschieben kann, kann nicht immer die Wegdifferenz der beiden Schienen im Bogen durch eine Anpassung der Rollradien ausgeglichen und damit der quasi schlupffreie Bogenlauf gewährleistet werden. Dies zeigt sich in engeren Gleisbögen oder bei der Verwendung von Radprofilen mit einem flachen ausgeführten Konus, wenn eine hohe seitliche Verschiebung notwendig wäre. In diesem Fall läuft der Radsatz mit seinem Spurkranz gegen die Fahrkante der Schiene an und wird so entlang seiner Bahn gezwungen. Es kommt zu einem zweiten Kontaktpunkt zwischen Rad und Schiene, der jedoch, da die Kontaktpunkte auf zwei unterschiedlichen Radien liegen, beim Abrollen mit höherem Verschleiß verbunden ist. Aufgrund der sehr geringen äquivalenten Konizität der Profilpaarung tritt dieser Fall bei der HOCHBAHN relativ häufig ein. Im Vollbahnbereich ist das Anlaufen des Spurkranzes wegen der größeren Gleisbogenradien und einer höheren äquivalenten Konizität nur selten der Fall. Eine Zweipunktberührung gibt es wegen anderer Radienverhältnisse zwischen Rad und Schiene nicht.

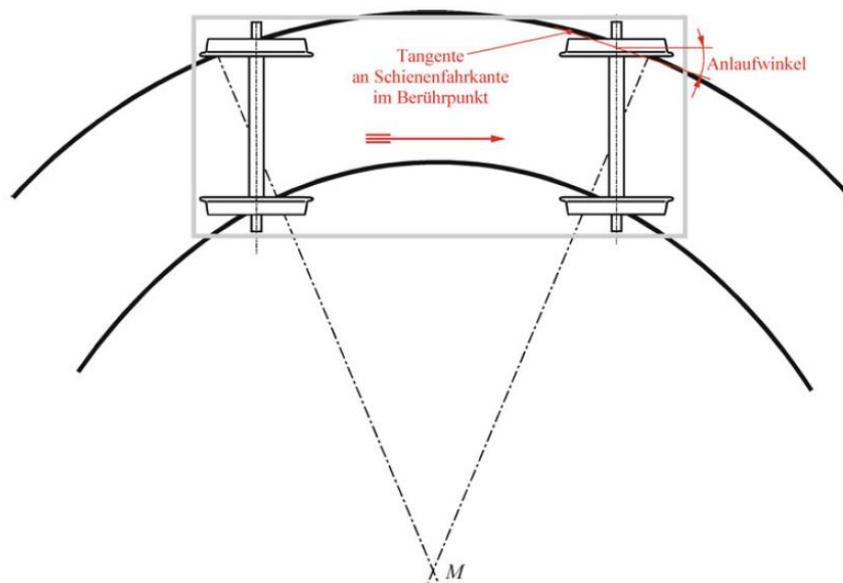


Abbildung 2-7 Bogenstellung eines zweiachsigen Fahrzeugs mit längsstarrer Radsatzführung (Ihme 2016, S. 158)

Für den Lauf im Gleis benötigen die Radsätze eines Schienenfahrzeugs zusätzlich eine Längsführung, die eine Drehung um die Hochachse unterbindet. Da jedoch mindestens zwei Radsätze in einem Fahrzeug oder einem Drehgestell verbaut sind, führt die starre Längsführung dazu, dass sich die Radsätze radial nicht zu dem Gleisbogenmittelpunkt einstellen können, wie es Abbildung 2-7 zeigt. Die Räder laufen mit dem Spurkranz unter einem Winkel an die Fahrkante der Schiene an, wodurch der Radsatz unter einem Querschlepp auf die Bahn entlang der Schienenfahrkante gezwungen wird. Um die Fahrt im Gleisbogen unter diesen Bedingungen überhaupt zu ermöglichen und ein Blockieren oder Aufklettern der Radsätze zu verhindern, sind ein kurzer Achsabstand und ein ausreichendes Spurspiel notwendig. Das Spurspiel kann in Gleisbögen dafür durch eine Spurerweiterung baulich vergrößert sein.

2.2.4 Fahrzeugstellungen im Gleis

Wie im vorherigen Kapitel gezeigt wurde, kommt es im Fahrbetrieb im Rahmen des Spurspiels zu einer seitlichen Verschiebung der Radsätze. Hier sind nur noch einmal beispielhaft die Fahrt durch einen Gleisbogen, der Sinuslauf in der Geraden oder eine Störung durch das Gleis als mögliche Auslöser genannt. Zwar gibt es Erfahrungswerte, wie sich die Radsätze eines Fahrzeugs in bestimmten Fahrsituationen seitlich verschieben, eine sichere Prognose und Reproduzierbarkeit ist dennoch aufgrund der Vielzahl an Einflüssen nicht möglich. Da sich seitliche Verschiebungen der Radsätze schlussendlich auch als Verschiebung des Wagenkastens auswirken, sind diese ein wichtiger Faktor in der Lichtraumuntersuchung. Bei dem Lichtraumnachweis sind deshalb die Auswirkungen der maximal durch das Spurspiel möglichen Verschiebungen zu berücksichtigen.

Die Stellung eines Fahrzeugs oder eines Drehgestells im Gleis ergibt sich aus der Stellung der einzelnen Radsätze. In Abbildung 2-8 ist dargestellt, wie sich die seitliche Verschiebung eines Radsatzes auf die Ausrichtung des Fahrzeugs auswirkt. In dieser Ansicht sind beide Aufstandspunkte eines Radsatzes zusammengezogen, der sich im Bereich der Spurkanals mit der Breite des Spurspiels verschieben kann.

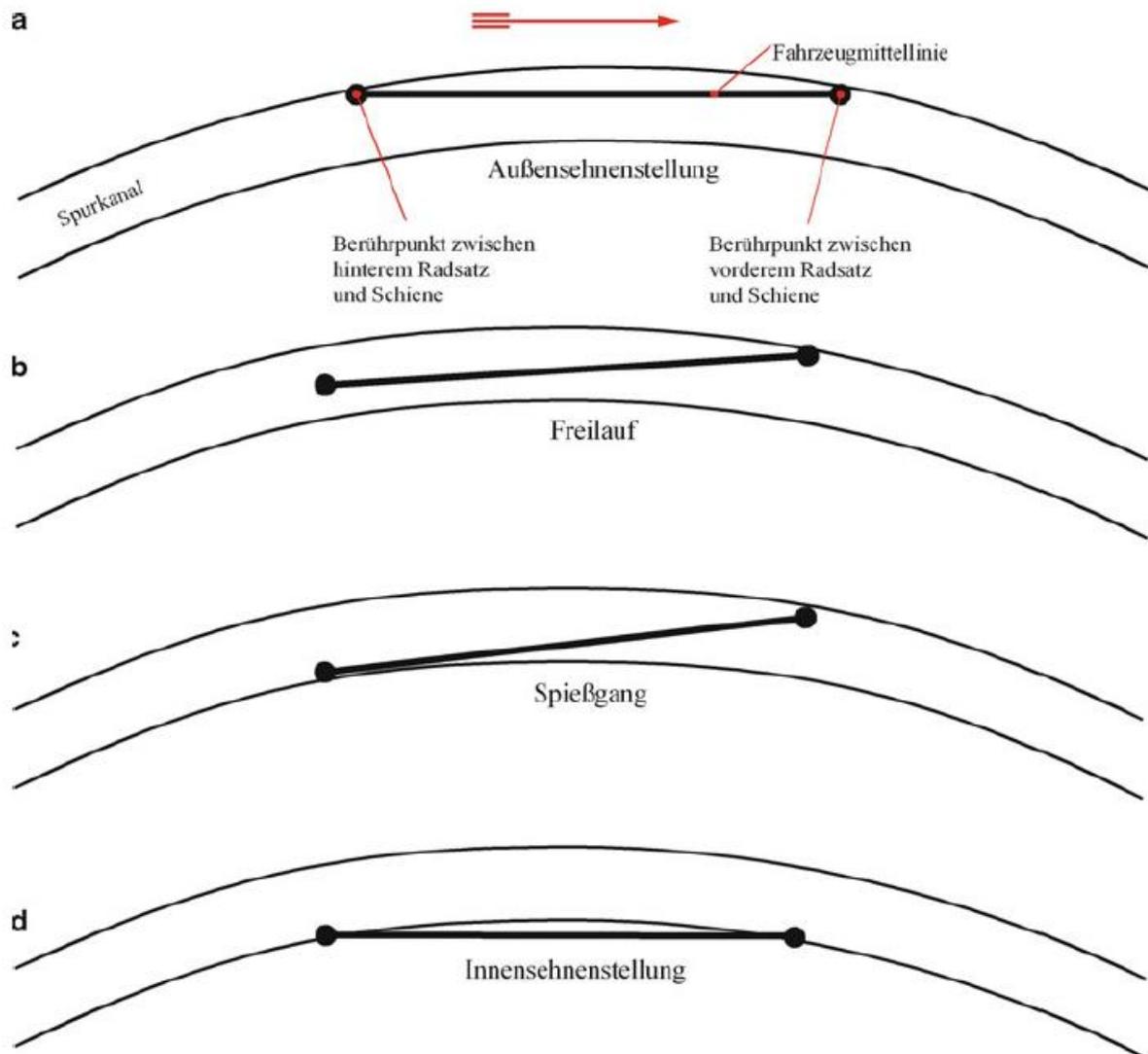


Abbildung 2-8 Mögliche Stellungen eines Schienenfahrzeugs im Gleisbogen (Ihme 2016, S. 159)

Um die Stellung des Wagenkastens eines Drehgestellfahrzeugs zu beschreiben, wird anstelle eines einzelnen Radsatzes der Anlenkpunkt eines Drehgestells angenommen. Um die maximale seitliche Verschiebung an diesem Punkt zu erreichen, sind beide Radsätze eines Drehgestells maximal in dieselbe Richtung verschoben. Somit befindet sich beispielsweise bei der Betrachtung eines Drehgestellfahrzeugs in der Spießgangstellung das vorlaufende Drehgestell als Einzelfahrzeug in der Außensehnenstellung, während sich das nachlaufende Drehgestell in der Innensehnenstellung befindet.

In der späteren Berechnung des Lichtraumbedarfs werden die Außensehnenstellung als Sehnenstellung (+), die Innensehnenstellung als Sehnenstellung (-) und die dargestellte Spießgangstellung als Spießgang (+) bezeichnet. Der Vollständigkeit halber wird auch der Spießgang (-) untersucht, bei dem der vorlaufende Radsatz bzw. das Drehgestell an der bogeninneren Schiene anliegt, während der nachlaufende Radsatz bzw. Drehgestell an der bogenäußeren Schiene anliegt.

Die oben genannten Stellungen sind die theoretisch möglichen Extremstellungen eines Fahrzeugs. Da in dieser Arbeit auch der Lichtraumbedarf im normalen Fahrbetrieb untersucht wird, stellt sich die Frage, welche Fahrzeugstellung unter regulären Betriebsbedingungen überwiegend eintritt. Gleichzeitig bleibt die Überlegung, ob und unter welchen äußeren Bedingungen diese Extremstellungen auftreten können.

Äußerst selten tritt der Fall ein, dass der vorlaufende Radsatz an der bogeninneren Schiene anläuft, da dies eine Verschiebung entgegen des Rollradenausgleichs ist. Unter äußeren Kräften ist diese Radsatzverschiebung dennoch möglich. Dies können zum Beispiel starker Seitenwind, eine hohe Hangabtriebskraft bei sehr langsamer Fahrt in einem deutlich überhöhten Gleis oder eine langsame gezogene Fahrt innerhalb eines Zugverbandes sein. (Ihme 2016, S. 159) Diese Kräfte würden sich jedoch im gleichen Maße auch auf den nachlaufenden Radsatz auswirken, wodurch die innere Sehnensstellung entsteht. Eine Spießgangstellung, bei der der nachlaufende Radsatz bogenaußen anläuft, ist nur unter äußeren Zwangskräften vorstellbar.

Deutlich häufiger tritt der Fall ein, dass der vorlaufende Radsatz an der bogenäußeren Schiene anläuft. Das geschieht immer dann, wenn das maximale Spurspiel kleiner ist als die seitliche Verschiebung, die für eine längsschlupffreie Durchfahrt nötig wäre. Dies passiert bei annähernd jeder Bogenfahrt eines HOCHBAHN-Fahrzeugs. Für den nachlaufenden Radsatz ergeben sich drei mögliche Stellungen. Durch äußere Kräfte, wie Seitenwind oder eine starke Fliehkraft, kann dieser nach Bogenaußen getragen werden. Deutlich häufiger wird dieser aber entweder an der bogeninneren Schiene anlaufen oder sich im Freilauf befinden und an keiner der beiden Schienen mit dem Spurkranz anlaufen. Der Grund für das bogeninnere Anlaufen des Radsatzes ist in dem Zusammenspiel aus Bogen- und Fahrzeuggeometrie und der Bewegungsrichtung des Drehgestells in der Abbildung 2-7 zu sehen. Ein Anlaufen an der bogeninneren Schiene tritt somit vermehrt in engeren Gleisbögen auf.

Grundsätzlich ist es möglich, bei Brückenfahrzeugen die einzelnen Drehgestelle zunächst als Einzelfahrzeuge zu betrachten und mögliche Stellungen im Gleis zu bewerten. Anschließend lässt sich die Verschiebung des Wagenkastens aus den Anlenkpunkten an den Drehgestellen ableiten.

Es zeigt sich, dass für bestimmte Fahrzeugstellungen eine Erklärbarkeit gegeben ist. Diese deckt sich zwar mit Beobachtungen aus der Praxis, ermöglicht aber kein grundsätzliches Ausschließen einzelner Fahrzeugstellungen oder eine sichere Vorhersage. Bei der HOCHBAHN lässt sich in engen Gleisbögen primär eine auftretende Fahrzeugstellung feststellen. Bei der Betrachtung beider Fahrwerke als Einzelfahrzeuge nehmen sie wegen der geringen Konizität die für enge Gleisbögen typische Spießgangstellung ein. Für ein konventionelles Drehgestell mit einem zentral zwischen dem ersten und zweiten Radsatz gelegenen Anlenkpunkt kommt es dabei zu keiner Querverschiebung in diesem und damit auch nicht zu einer Verschiebung des Wagenkastens. Da die HOCHBAHN auch Fahrzeuge mit exzentrischen Anlenkungen betreibt, ergibt sich aus dieser Drehgestellstellung eine Relevanz für die späteren Lichtraumuntersuchungen.

2.3 Rechtliche Vorgaben

„Die Umgrenzung des lichten Raumes sowie die lichtraumtechnisch maßgebenden Merkmale der Fahrzeuge und des Gleises müssen so aufeinander abgestimmt sein, daß es in keinem zulässigen Betriebszustand zu gefährdenden Berührungen zwischen Fahrzeugen und Gegenständen sowie zwischen Fahrzeugen auf benachbarten Gleisen kommen kann“ (§ 19 Abs. 2 BOSTrab) schreibt die *Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOSTrab)* vor. Wie diese Vorschrift erfüllt werden kann, ist den *BOSTrab-Lichtraum-Richtlinien* geregelt. Dabei handelt es sich um eine detaillierte Anweisung, die insbesondere definiert, wie die zulässigen Betriebszustände zu berücksichtigen sind. Dafür werden Grundbegriffe geklärt sowie alle zu berücksichtigenden Einflussparameter und deren Auswirkung auf den Lichtraumbedarf des Fahrzeugs genannt. Das Verfahren wird durch umfangreiche Berechnungsbeispiele ergänzt. Das in dieser *Lichtraum-Richtlinie* genannte

Verfahren zur Bestimmung des Lichtraumbedarfs wird auch im Folgenden angewandt und genauer erläutert.

In den unternehmensinternen Dokumenten der *Richtlinien für Planung, Entwurf und Bau von U-Bahn-Anlagen in Hamburg* sind die für den Nachweis notwendigen Informationen über das Gleisnetz zu finden. In *Teil 2: Trassierung (RUT)* ist die Streckenführung, die Ausgestaltung des Lichtraums sowie die zugehörige Lichtraumerweiterung beschrieben. *Teil 3: Oberbau (RUO)* beschreibt dagegen die Gestaltung der Gleise mit den zulässigen lage- und verschleißbedingten Änderungen.

Die Motivation dieser Arbeit besteht zu einem nicht unerheblichen Teil in der Problematik der großen Spaltbreite zwischen Bahnsteig und Fahrzeugeinstieg. Die BOStrab macht dabei die Vorgabe, dass der waagerechte Spalt zwischen Bahnsteigkante und Fahrzeugfußboden möglichst klein sein soll, im ungünstigsten Fall jedoch 25cm nicht überschreiten darf (§31 Abs. 6 BOStrab). Für einen gefahrlosen und selbstständigen Ein- und Ausstieg ergeben sich im Rahmen des Gesetzes zur Gleichstellung behinderter Menschen (BGG) jedoch deutlich höhere Anforderungen an diesen verbleibenden Spalt. Ziel ist es, dass mindestens an einem Fahrzeugeinstieg ein waagerechter Spalt von weniger als 5cm sowie eine vertikale Stufe von weniger als 5cm vorliegen. Nur dann gilt der Fahrzeugeinstieg entsprechend DIN 18040-3 als uneingeschränkt barrierefrei, siehe Abbildung 2-9. Spaltbreiten bis 10cm erlauben den Fahrzeugeinstieg nur mit Erschwernissen oder fremder Hilfe.

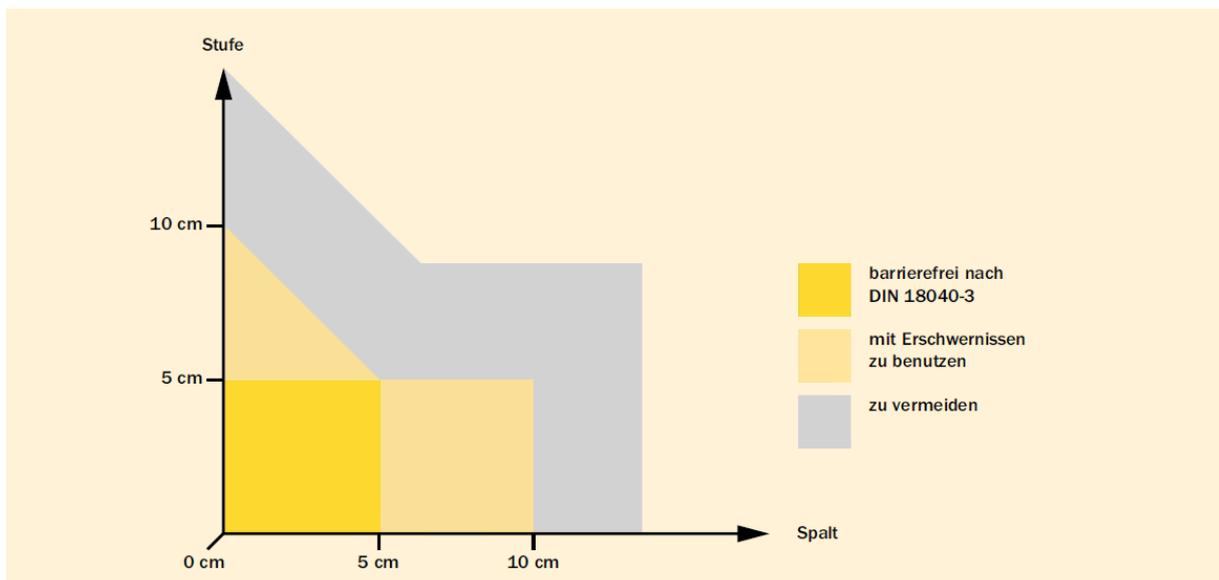


Abbildung 2-9 Reststufe und Restspalt nach DIN 18040-3 (ADAC 2018, S. 24)

3 Lichtraumberechnung nach der BOStrab

In Kapitel 2.3 wurden die Bestimmung und der grobe Inhalt der *Lichtraum-Richtlinien* dargestellt. Im Folgenden wird das Vorgehen in enger Anlehnung an die Richtlinie dargestellt. Dafür werden die Methodik und die berücksichtigten Einflussgrößen für die Berechnung des seitlichen Lichtraumbedarfs erläutert. Ergänzend dazu wird an einzelnen Stellen sowie zum Ende dieses Kapitels auf notwendige HOCHBAHN-spezifische Besonderheiten sowie die Anwendung in dieser Arbeit eingegangen.

3.1 Vorgehensweise

Das allgemeine Vorgehen des Lichtraum-Nachweises besteht darin, den Lichtraumbedarf eines Fahrzeugs unter Berücksichtigung der sich auf den Lichtraumbedarf auswirkenden Einflüsse zu berechnen und diesen mit der Lichtraumumgrenzung abzugleichen. Der Lichtraumbedarf wird dabei nach den *BOStrab-Lichtraum-Richtlinien* berechnet, während die

Lichtraumumgrenzung der Trassierungsvorschrift *RUT*, siehe Kapitel 2.3, entnommen werden kann. Niemals darf der Lichtraumbedarf die Lichtraumumgrenzung überschreiten.

Eine grundlegende Schwierigkeit besteht darin, dass der individuelle Lichtraumbedarf für einen Punkt auf der Fahrzeugoberfläche in einem definierten Betriebszustand berechnet wird. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass für einen sicheren Lichtraumnachweis eine Kenntnis sowohl über die örtlich kritischen Punkte der Fahrzeugkontur als auch aller möglichen sich negativ auf den Lichtraumbedarf auswirkenden Betriebszustände erforderlich ist. Die Richtlinie gibt an dieser Stelle nur vor, dass das Fahrzeug in den ungünstigsten Stellungen im Gleis und an den lichtraumtechnischen ungünstigsten Punkten zu betrachten ist. (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 16) Es ist Aufgabe des Nachweisführenden durch Vorüberlegungen die zu berechnenden Kombinationen der Fahrzeugpunkte und -zustände auf ein sinnvolles Maß zu beschränken. Diese Vorüberlegungen lassen sich reduzieren, indem durch eine Automatisierung der Lichtraumberechnung eine systematische Variation einzelner Parameter erfolgt.

Die Methodik der Berechnung des seitlichen Lichtraumbedarfs ist an dieser Stelle kurz zusammengefasst, bevor sie im folgenden Kapitel detailliert dargestellt wird. Es ist zunächst der Punkt der Fahrzeugkontur im Fahrzeugkoordinatensystem zu definieren, für den der Lichtraumbedarf berechnet wird. Aus der Fahrzeuggeometrie und dem vorliegenden Bogenradius des Gleises lässt sich die bogengeometrische Ausragung an diesem Punkt ermitteln. Anschließend sind weitere Einflüsse betrachtet, die eine seitliche Verschiebung oder ein Rollen des Fahrzeugs bewirken, wodurch dieses aus der Soll-Lage der Gleismitte abweicht. Eine grundlegende Annahme ist zunächst durch die Fahrzeugstellung im Gleis getroffen, wodurch auch die Wirkrichtung weiterer einzelner Einflüsse definiert ist. Die zu betrachtenden Stellungen sind nach Richtlinie die Spießgangstellung in der Geraden und die Spießgangstellung sowie Sehnenstellung im Gleisbogen. (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 30) Die weiteren Einflüsse ermitteln sich aus Fahrzeugparametern, Gleisparametern sowie aus dynamischen und statischen Belastungen. Dabei sind durch Vergrößerungsfaktoren für jeden dieser Einflüsse die individuelle Auswirkung auf den Lichtraumbedarf am betrachteten Punkt berücksichtigt. Die Einflüsse selbst sind in zufällige und nicht zufällige Einflüsse kategorisiert. Damit ist berücksichtigt, dass sich sämtliche zufälligen Einflüsse mit genügender Wahrscheinlichkeit nicht im ungünstigsten Fall überlagern.

Der gesamte Lichtraumbedarf ermittelt sich dann aus der Fahrzeugbreite am untersuchten Punkt, der bogengeometrischen Ausragung, dem zusätzlichen Lichtraumbedarf durch die nicht zufälligen Einflussfaktoren sowie den zusätzlichen Lichtraumbedarf durch die zufälligen Einflussfaktoren (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 16). Aus Symmetriegründen ergibt sich der Lichtraumbedarf in der Geraden zu beiden Fahrzeugseiten gleich und ist somit nur in einer Richtung zu berechnen. Dagegen ist aufgrund der bogengeometrischen Ausragung und der möglichen Asymmetrie von Gleisparametern bei einem Fahrzeug in einem Bogen eine Rechnung zu beiden Fahrzeugseiten, also nach Bogeninnen und nach Bogenaußen, notwendig.

Eine weitere notwendige Vorüberlegung liegt darin begründet, dass die Lichtraumumgrenzung nicht über die gesamte Höhe identisch ist. Sie weist beispielweise bei der HOCHBAHN im höheren Bereich des Wagenkastens eine größere Breite auf als im unteren Bereich des Drehgestells. Für den Lichtraumnachweis ist also zu berücksichtigen, dass es zum Beispiel durch dynamische Belastungen oder durch einen Defekt, wie etwa die Absenkung auf Notfedern, zu einem Absinken des gesamten Wagenkastens kommen kann. Der verfügbare Lichtraum durch die höhenabhängige Lichtraumumgrenzung kann an dieser Stelle kleiner sein als am selben Punkt der Fahrzeuggeometrie, wenn sich das Fahrzeug in

Konstruktionslage befindet. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer vertikalen Lichtraumbedarfsrechnung.

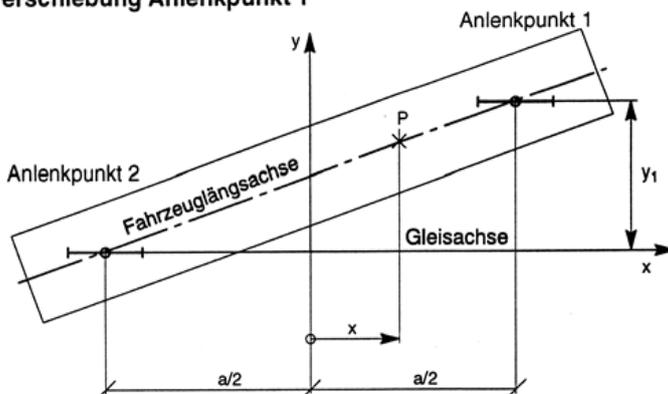
3.2 Berücksichtigte Einflussgrößen

Die Richtlinie gibt vor, welche Einflüsse bei der Lichtraumbedarfsrechnung zu berücksichtigen sind. Für die meisten berücksichtigten fahrzeugtechnischen Einflüsse ist der Grenzwert von den Verkehrsbetrieben oder den Fahrzeugherstellern selbst bestimmt und ergibt sich beispielsweise aus Verschleißgrenzen oder Wartungsintervallen der Fahrzeuge. Gleistechnische Grenzwerte stammen auch direkt aus den Richtlinien zu Oberbau und Trassierung (Kapitel 2.3) oder sind in der BOStrab vorgegeben. (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 18) Da der maximale Lichtraumbedarf berechnet wird, sind grundsätzlich immer die maximal zulässigen Werte anzunehmen.

Wie in der Lichtraum-Richtlinie erfolgt hier die Einordnung nach dem Ursprung des Einflusses und der resultierenden Fahrzeugbewegung. Die betrachteten Bewegungen sind hierbei eine rein translatorische Verschiebung eines Fahrzeugquerschnitts in Querrichtung und eine Verlagerung, was einem Wanken entspricht. Diese Winkeländerung enthält somit eine Vertikal- und Querkomponente, wodurch die Auswirkung auf den seitlichen Lichtraumbedarf höhenabhängig ist. Einflussgrößen, die sich nur auf den vertikalen Lichtraumbedarf auswirken, sind in der Richtlinie ebenfalls angegeben, hier aber wegen der Fokussierung auf den seitlichen Lichtraum nicht aufgeführt.

Die meisten Einflussfaktoren, die eine Querverschiebung hervorrufen, wirken an einem der beiden Anlenkpunkte der Drehgestelle. Um die individuelle Querverschiebung an dem untersuchten Punkt zu erhalten, sind zwei Vergrößerungsfaktoren f_1 und f_2 definiert, die abhängig von der Längskoordinate des Punktes und dem Drehzapfenabstand die absolute Querverschiebung auf den untersuchen Punkt übertragen.

Verschiebung Anlenkpunkt 1



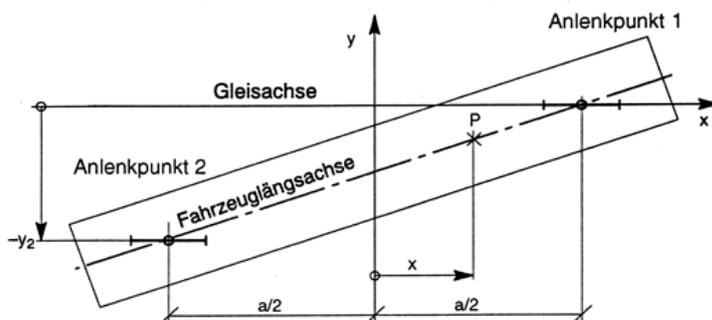
$$y(x) = y_1 * \left(\frac{1}{2} + \frac{x}{a} \right) \quad (3.1)$$

Faktor Anlenkpunkt 1:

$$f_1 = \frac{y(x)}{y_1} = \frac{1}{2} + \frac{x}{a} \quad (3.2)$$

Abbildung 3-1 Faktor 1 für die Wagenkastenverschiebung infolge Querverschiebung der Anlenkpunkte (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 33)

Verschiebung Anlenkpunkt 2



$$y(x) = y_2 * \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{a} \right) \quad (3.3)$$

Faktor Anlenkpunkt 2:

$$f_2 = \frac{y(x)}{y_2} = 1 - f_1 \quad (3.4)$$

Abbildung 3-2 Faktor 2 für die Wagenkastenverschiebung infolge Querverschiebung der Anlenkpunkte (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 33)

3.2.1 Bogengeometrische Ausragung

Die bogengeometrische Ausragung beschreibt den Abstand in Querrichtung eines Punktes der Fahrzeugkontur zur Gleismitte. Geometrisch betrachtet handelt es sich dabei um die Länge einer Normalen des Gleisbogens von der Gleismitte bis zum untersuchten Punkt der Fahrzeugkontur, in Abbildung 3-3 rot dargestellt. Die bogengeometrische Ausragung ist frei von allen weiteren Einflüssen berechnet. Dafür sind eine mittige Stellung im Spurkanal und Sollwerte von Gleis- und Fahrzeugparametern angenommen. (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 34) Für diese Berechnung ist der Abstand zur Gleismitte als bogengeometrische Ausragung definiert und beinhaltet damit außerdem eine halbe Fahrzeugbreite.

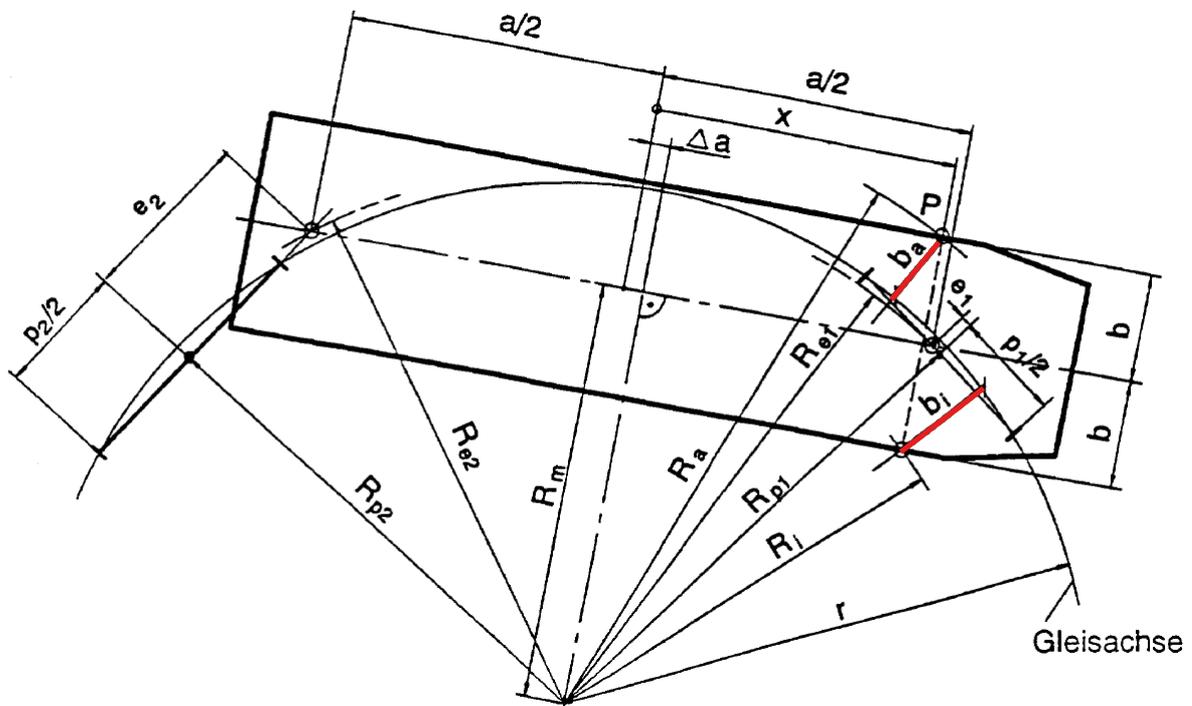


Abbildung 3-3 Bogengeometrische Ausragung einschließlich halber Fahrzeugbreite (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 34)

Die Berechnung erfolgt mit der Fahrzeuggeometrie, der untersuchen Punktkoordinaten sowie dem Gleisbogenradius r . Die notwendigen Maße der Fahrzeuggeometrie setzen sich zusammen aus dem Drehzapfenabstand a , den Achsabständen der Fahrwerke p_1 und p_2 und den Exzentrizitäten der Drehgestelle e_1 und e_2 . Die Exzentrizität ist eine Verschiebung des Anlenkpunktes des Wagenkastens auf der Längsachse des Fahrwerks. Weitere benötigte Parameter sind die Längskoordinate in x -Richtung des untersuchten Punktes und die zugehörige halbe Fahrzeugbreite b sowie der Gleisbogenradius r . Die bogengeometrischen Ausragungen für den Außenbogen b_a und für den Innenbogen b_i lassen sich dann mit Gleichungen (3.5) und (3.6) berechnen.

$$b_a = \sqrt{\left(\sqrt{r^2 - \frac{a^2}{4} - \frac{p_1^2 + p_2^2}{8} + \frac{e_1^2 + e_2^2}{2} - \left(\frac{p_1^2 - p_2^2}{8a} - \frac{e_1^2 - e_2^2}{2a} \right)^2} + b \right)^2 + \left[x - \left(\frac{p_1^2 - p_2^2}{8a} - \frac{e_1^2 - e_2^2}{2a} \right) \right]^2} - r \quad (3.5)$$

$$b_i = r - \sqrt{\left(\sqrt{r^2 - \frac{a^2}{4} - \frac{p_1^2 + p_2^2}{8} + \frac{e_1^2 + e_2^2}{2} - \left(\frac{p_1^2 - p_2^2}{8a} - \frac{e_1^2 - e_2^2}{2a} \right)^2} - b \right)^2 + \left[x - \left(\frac{p_1^2 - p_2^2}{8a} - \frac{e_1^2 - e_2^2}{2a} \right) \right]^2} \quad (3.6)$$

Je nach Fahrzeugkonzept und der individuellen Fahrzeuggeometrie können die größten Ausragungswerte auch in den an den Gleisbogen anschließenden Geraden oder Übergangsbögen liegen. (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 34)

3.2.2 Querverschiebung durch Spurspiel

Abbildung 3-4 zeigt, wie der Einfluss des Spurspiels sich auf die Querverschiebung der Radsätze beziehungsweise Fahrwerke auswirkt und so eine Spießgang- oder Sehnenstellung ermöglicht.

Das maximale Spurspiel $\max \sigma$ setzt sich zusammen aus dem Nennspurspiel, das sich aus der Differenz von Spurweite s und Spurmaß S errechnet, dem Spurkranzverschleiß am Rad und der Spurerweiterung. Das Nennspurspiel und der Spurkranzverschleiß sind in dem Parameter Δs zusammengefasst. Die konstruktive Spurerweiterung im Gleisbogen ist mit der Spurerweiterung durch den Verschleiß an der Schienenfahrkante zusammengefasst berücksichtigt. Da das Nennspurspiel und die konstruktive Spurerweiterung bereits festgelegt sind und sich Verschleiß zwangsläufig im Fahrbetrieb ergeben, handelt es sich hierbei um vier nicht zufällige Einflüsse. Für den Verschleiß sind maximale Werte anzunehmen. Der Spurkranzverschleiß teilt sich symmetrisch auf beide Räder auf, während der Schienenverschleiß, dessen Grenzwert als Summe aus dem Verschleiß an der bogenäußeren Schiene ΔS_a und der bogeninneren Schiene ΔS_i angegeben ist, sich unterschiedlich auf beide Fahrkanten aufteilen kann. Durch diese unsymmetrische Verschiebung der Fahrkanten weicht die tatsächliche Spurmitte um den Wert $y_{\sigma 0}$ von der Gleisachse ab. Die Tatsache, dass sich die Aufteilung des Schienenverschleißes über eine Fahrzeuglänge ändern kann und sich somit die Spurmitte zwischen dem vorderen Fahrwerk und dem hinteren Fahrwerk verschiebt, wird in der Spurmitten-Ablenkung berücksichtigt.

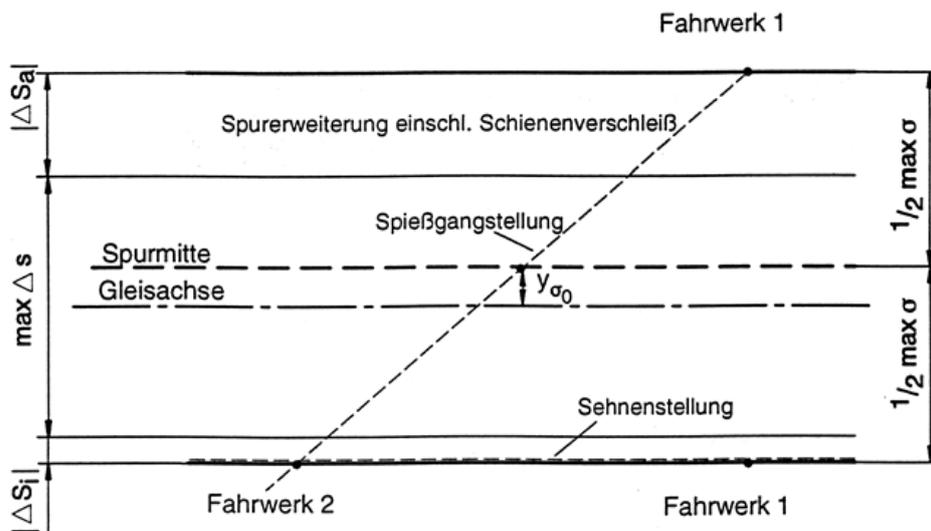


Abbildung 3-4 Querverschiebung infolge maximalen Spurspiels (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 37)

3.2.3 Querverschiebung durch fahrzeugtechnische Faktoren

Die Querverschiebung beschreibt die Verschiebung in y -Richtung eines bestimmten Fahrzeugquerschnitts auf der Fahrzeuglängsachse. Alle Einflüsse auf die Verschiebung an einem Fahrwerk sind gebündelt in dieselbe Richtung angenommen, wie es die vorher angenommene Fahrzeugstellung im Gleis an dem jeweiligen Fahrwerk vorgibt. Einflüsse, die auf den Wagenkasten wirken, sind so angenommen, dass sie sich ungünstig auf den aktuell berechneten Lichtraumbedarf auswirken.

Berücksichtigt sind die zufällig ausgeprägten Bautoleranzen der Radsätze, die Bautoleranzen der Achslager, die Einbautoleranz der Primärfederung, die Bautoleranz des Wagenkastens sowie die Einbautoleranz der am Wagenkasten montierten Anbauteile. Als

nicht zufällig sind dagegen das Drehzapfenspiel inklusive möglichem Verschleiß und das Achslagerspiel zu berücksichtigen. Die Federelemente in einer möglichen Radbandagen-Federung, der Primärfederung und der Sekundärfederung können je nach Bauart zufällige und nicht zufällige Komponenten für eine Querbewegung aufweisen. Es handelt sich dabei um „freie“ Querfederwege mit geringer Rückstellkraft, die wie Spiele berücksichtigt sind. Darüber hinaus treten zufällige Querbewegungen durch dynamische Seitenkräfte auf, die zum Beispiel über einen Gleislagefehler eingeleitet sind. Für jeden einzelnen dieser Einflüsse ist die jeweilige Wirkung auf den untersuchten Fahrzeugquerschnitt über die Vergrößerungsfaktoren f_1 und f_2 berücksichtigt. (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 19, S. 39)

3.2.4 Querverschiebung durch gleistechnische Faktoren

Bei der Querverschiebung der Gleise weicht die Gleisachse seitlich von ihrer Nennlage ab. Da mittig an dieser Nennlage auch die Lichtraumumgrenzung ausgerichtet ist, nähern sich die Gleise und damit das Fahrzeug der Lichtraumumgrenzung an. Beide Schienen sind dabei um denselben Betrag in dieselbe Richtung verschoben, wodurch die Spur unverändert bleibt. Die Verschiebung der Gleise kann bleibend sein, wenn sie sich entweder durch Herstellungstoleranzen oder durch eine dauerhafte zufällige Veränderung aus der betrieblichen Beanspruchung ergibt. Gleise im Haltestellenbereich sind in der Regel durch Abstandsfixierungen zusätzlich gegen die Bahnsteigkante festgelegt und weisen deshalb deutlich geringere maximal zulässige Verschiebungen auf. Die Querverschiebung der Gleise kann sich über eine Fahrzeuglänge hin, wie schon der Schienenverschleiß, verändern. Die Ablenkung der Gleisachse zwischen vorderem und hinterem Fahrwerk ist durch den Gleisverschiebewechsel berücksichtigt, der eine maximale seitliche Veränderung der Gleisachse pro Meter entlang des Gleises vorgibt, wodurch die Auswirkung auf den seitlichen Lichtraum abhängig von dem Fahrwerksabstand des Fahrzeugs ist.

Daneben treten elastische Querverschiebungen der Gleise auf. Diese resultieren aus den auf die Gleise wirkenden Richtkräften, die sich aus der Spurführung und anderen auf das Fahrzeug wirkenden Kräften ergeben. Sie treten damit nicht zufällig auf und sind in die bogenäußere Richtung stärker ausgeprägt als in die bogeninnere Richtung. (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 40)

3.2.5 Verlagerung durch statische und dynamische Kräfte

Die Verlagerung beschreibt eine Fahrzeugbewegung, bei der die Fahrzeugmittellinie als Hochachse in einem Fahrzeugquerschnitt um einen Winkel von der entwurfstechnischen Gleismittellinie abweicht. Es handelt sich dabei abhängig von der Lage der Wankpole um eine Überlagerung von einem Rollen und einer Querbewegung, also einem Wanken, wie es in Kapitel 2.2.2 dargestellt wurde. In Abbildung 3-5 ist zu sehen, wie der Wagenkasten um die Wankwinkel η_p in der Primärfederstufe und η_s in der Sekundärfederstufe um die jeweiligen Wankpole zur entwurfstechnischen Gleismitte gedreht ist. Grundsätzlich wirkt sich bei dieser Fahrzeugbewegung die Masse des Wagenkastens auf die Höhe des Wankwinkels aus. Da die Wagenkastenmasse je nach Besetzungszustand stark variieren kann, müssen sowohl ein leeres wie auch ein nach BOStrab voll besetztes Fahrzeug betrachtet werden. (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 28)

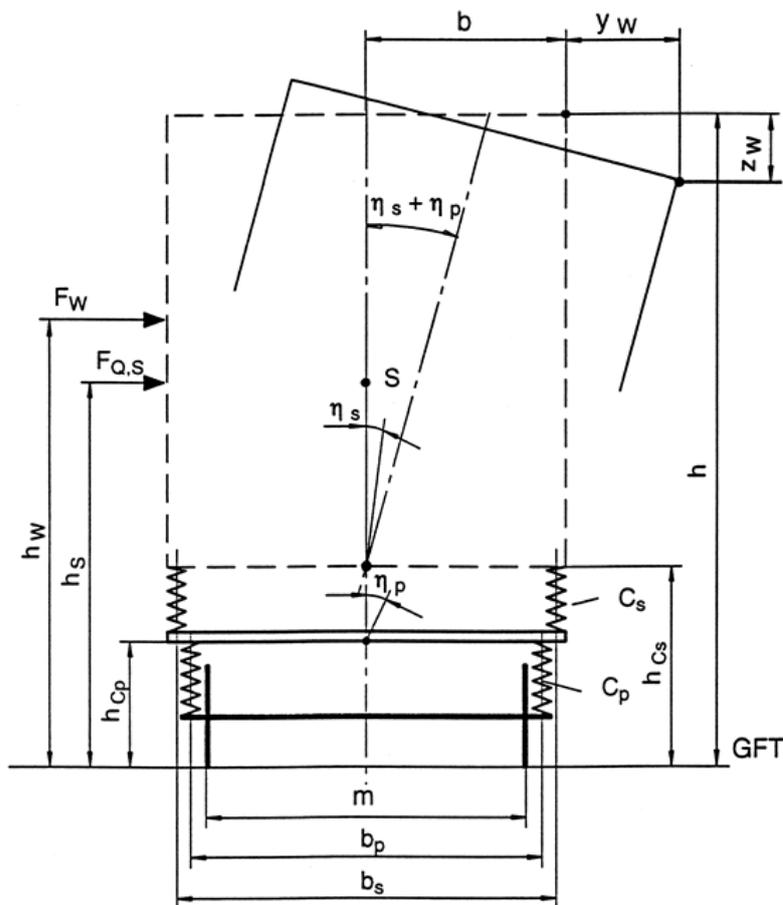


Abbildung 3-5 Schema der Fahrzeugfeder-Verlagerungen (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 46)

Bei den Kräfteinflüssen, die eine Verlagerung bewirken, handelt es sich um eine nicht zufällige quasistatische Querbeschleunigung bei einer Bogenfahrt, die aus einem Fliehkräfteüberschuss resultiert, der nicht durch eine bauliche Überhöhung im Gleis kompensiert wird. Die für den Wankwinkel verantwortliche Kraft errechnet sich zusammen mit der Masse des Wagenkastens. Daneben treten zufällig über das Fahrwerk eingeleitete Querbeschleunigungen durch Seitenstöße aus Störungen in der Gleislage auf. Diese Seitenstoßbeschleunigung wird, da nicht alle Fahrwerke im selben Moment dieselbe Anregung erfahren, mit der anteiligen auf einem Fahrwerk liegenden Wagenkastenmasse in eine Kraft umgerechnet. Hinzu kommt eine direkt als Seitenwind wirkende zufällig auftretende Kraft.

Bei einer Wankbewegung kommt es zusätzlich zu einer Verlagerung des Schwerpunktes aus der Mittellage heraus, welche einen zusätzlichen Wankwinkel verursacht und in dem Vergrößerungsfaktor f_F berücksichtigt wird. Unter Berücksichtigung des Vergrößerungsfaktors, der Fahrwerksgeometrie und der Federsteifigkeiten lässt sich die höhenabhängige Querverschiebung eines Wagenkastenpunktes errechnen.

Die Gleisüberhöhung, die in einer Bogenfahrt die Querbeschleunigung wirksam reduziert, wirkt sich auch auf ein stehendes Fahrzeug aus. Zwar kippt das Lichtraumprofil mit der Gleisüberhöhung, sodass daraus keine Annäherung an die Lichtraumumgrenzung folgt, jedoch führt die schräge Fahrzeugstellung zu einer Schwerpunktverlagerung des Wagenkastenschwerpunktes, woraus ein zusätzlicher Wankwinkel aus der Hangabtriebskraft entsteht. Dieser Einfluss ist nicht zufällig. (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 45 ff.)

3.2.6 Verlagerung durch fahrzeugtechnische Faktoren

Aus fahrzeugtechnischer Sicht wirkt sich die Einstellungstoleranz des Wagenkastens wie eine Verlagerung aus. Diese Winkelstellung ist als Toleranz zufällig ausgeprägt. Weiterhin kann eine Verlagerung aus einer unsymmetrischen Besetzung des Fahrzeugs folgen. Hierbei ist zu beachten, dass das nach BOStrab voll besetzte Fahrzeug den lichtraumkritischen Fall darstellt. Das heißt, dass eine unsymmetrische Besetzung bei gleichzeitig maximaler Besetzung beispielsweise durch eine unsymmetrische Verteilung von Steh- und Sitzplätzen entsteht. Fahrgastgewohnheiten, die eine unsymmetrische Besetzung bewirken, kommen nur bei einer Teilbesetzung zum Tragen. (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 50)

3.2.7 Verlagerung durch gleistechnische Faktoren

Eine gegenseitige Abweichung der Höhenlage der Schienenfahrkante von der Solllage bewirkt eine Schrägstellung des Fahrzeugs. Da diese Abweichung der Höhenlage, entgegen der Gleisüberhöhung, nicht baulich geplant ist, ist hier die Lichtraumumgrenzung nicht gekippt. Der Wagenkasten nähert sich höhenabhängig durch die Schräglage des Gleises sowie den zusätzlich entstehenden Wankwinkel durch die Schwerpunktverlagerung der Lichtraumumgrenzung an. Die Abweichung der gegenseitigen Höhenlage kann sich entweder zufällig und dauerhaft im Betrieb einstellen oder sich nicht zufällig elastisch bei der Fahrzeugüberfahrt ausprägen.

3.3 Berechnung des gesamten Lichtraumbedarfs

In Kapitel 3.2 und den zugehörigen Unterkapiteln wurden alle für die Berechnung des seitlichen Lichtraumbedarfs zu berücksichtigenden Einflussgrößen vorgestellt. Dabei ist für alle Einflüsse die Auswirkung auf einen identischen vorher definierten Punkt der Fahrzeugkontur bestimmt. Je nach Einfluss ist diese Auswirkung auf den definierten Punkt in der Regel abhängig von der Längs- oder Höhenkoordinate. Die Breite des Fahrzeugs ist in der bogengeometrischen Ausragung berücksichtigt.

Für die Berechnung des gesamten Lichtraumbedarfs am definierten Punkt sind die bogengeometrische Ausragung inklusive halber Fahrzeugbreite, die Verschiebung durch das Spurspiel sowie die nicht zufälligen Einflüsse arithmetisch zu addieren. Die zufälligen Einflussgrößen sind zunächst unter einer Wurzel quadriert und summiert. Durch diese an das Gauß'sche Fehlerfortpflanzungsgesetz angelehnte Operation wird die Wahrscheinlichkeit des gemeinsamen Auftretens der zufälligen Einflussgrößen berücksichtigt. (BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996, S. 54)

Der berechnete maximale Lichtraumbedarf ist anschließend mit dem verfügbaren Lichtraum in der jeweiligen Höhe abzugleichen.

3.4 Anwendung in dieser Arbeit

In dieser Arbeit wird die Lichtraumberechnung mit ihren Einflüssen und den Auswirkungen auf den Lichtraumbedarf untersucht. Aufgrund der Vielzahl der dafür notwendigen Rechnungen ist die seitliche Lichtraumberechnung mit den in Kapitel 3.2 genannten Einflussgrößen in Microsoft Excel aufgebaut. Die Verwendung von Microsoft Excel für die schnelle Lichtraumberechnung hat sich schon bei bisherigen Berechnungen des Lichtraumbedarfs bei der HOCHBAHN bewährt. Das Prinzip der Berechnung gleicht dabei der manuellen Berechnung aller Einzeleinflüsse und der anschließenden Aufsummierung zu dem gesamten Lichtraumbedarf, wie es in der Richtlinie vorgeschrieben ist.

Um die Berechnung aller Fahrzeugkoordinaten zu ermöglichen, ist vorab die Allgemeingültigkeit geprüft und gegebenenfalls durch kleine Änderungen gewährleistet worden. Die Berechnung von negativen x-Koordinaten am Fahrzeug ist problemlos möglich. Weiterhin ist angenommen, dass alle Ausragungen und Verschiebungen in bogeninnere Richtung negative Vorzeichen aufweisen. Einflüsse, die in bogenäußere Richtung wirken,

haben grundsätzlich positive Vorzeichen. Somit ergibt sich für eine Rechnung des bogeninneren Lichtraumbedarfs ein negativer Wert und für die Rechnung des bogenäußeren Lichtraumbedarfs ein positiver Wert. Der Nullwert liegt weiterhin in der Solllage der Gleisachse.

Einen wesentlichen Einfluss auf den Lichtraumbedarf hat die Stellung des Fahrzeugs im Gleis, wovon sich auch, da sie ungünstig angenommen sind, die Wirkrichtung vieler Einflüsse ableitet. Um diese Vorgabe in der Excel Rechnung zu realisieren, sind die zwei Parameter $st1$ und $st2$ für beide Fahrwerke des Fahrzeugs eingeführt, die definieren, ob das Fahrwerk an der bogenäußeren Schiene oder an der bogeninneren Schiene anliegt. Der Parameter $st1$ beschreibt das Fahrwerk mit positiver Fahrzeuglängskoordinate, $st2$ beschreibt das Fahrwerk mit negativer Längskoordinate. Durch diese Parameter sind ebenfalls die Wirkrichtung der Einflüsse an diesem Fahrwerk sowie die Stellung des Gesamtfahrzeugs im Gleis definiert. Für eine Anlage an der bogenäußeren Schiene ist der Parameter als +1 definiert, bei einer Anlage des Fahrwerks an der bogeninneren Schiene ist der Parameter als -1 definiert, wodurch gleichzeitig ein Faktor für die Berechnung für die Wirkrichtung weiterer Einflüsse geschaffen ist.

Da im Streckenbereich und im Bahnsteigbereich teilweise sehr unterschiedliche Grenzwerte für die Gleislage, Verschleiß und Lichtraumgrenzung vorliegen, ist die Lichtraumberechnung parallel für beide Situationen mit den jeweiligen Grenzwerten dargestellt.

Die Untersuchung des Lichtraumbedarfs in dieser Arbeit konzentriert sich auf die Fahrzeugfußbodenhöhe bzw. die Bahnsteighöhe, da für diese Höhe die Vergleichsmesswerte der Spaltbreiten vorliegen. Alle folgenden Berechnungen sind daher mit derselben Höhe durchgeführt. Dadurch kann der vertikale Lichtraumbedarf zu Anfang einmalig geprüft werden und muss anschließend nicht mehr in jeder einzelnen Rechnung betrachtet werden.

Für ein besseres Verständnis der Lichtraumverhältnisse in Höhe des Bahnsteigs, ist die Lichtraumberechnung von einem Einzelpunkt auf der Fahrzeugkontur auf eine Lichtraumberechnung über die ganze Fahrzeuglänge erweitert. Dafür ist mithilfe eines Makros in Microsoft Excel die Lichtraumberechnung mit einer schrittweisen Variation der Fahrzeuglängskoordinate iterativ durchgeführt. Hierbei hat es sich als praktisch erwiesen, da man von Änderungen der Wagenkastenbreite über die Fahrzeuglänge hinweg unabhängig ist, eine Einschränkungsrechnung durchzuführen, die der Lichtraumberechnung der *Eisenbahn-Bau und Betriebsordnung* aus Kapitel 2.1 ähnelt. Dafür ist zunächst der bei der Lichtraumberechnung verfügbare Lichtraum aus der regulären Lichtraumgrenzung und der Lichtraumerweiterung, abhängig vom Bogenradius, bestimmt. Mit diesem verfügbaren Lichtraum als Fahrzeugbreite ist ein Berechnungs-Dummy erstellt, mit dem die weitere Lichtraumbedarfsberechnung unter den definierten Parametern der Fahrzeuggeometrie und den Einflüssen durchgeführt ist. Da das Dummy-Fahrzeug bereits die Breite des verfügbaren Lichtraums aufweist, kommt es bei der Lichtraumbedarfsrechnung unter Berücksichtigung der zusätzlichen Einflüsse zu einer Überschreitung des verfügbaren Lichtraums. Wird die Dummy-Fahrzeugbreite um den Betrag der Überschreitung des verfügbaren Lichtraums reduziert, ergibt sich daraus die Fahrzeugbreite, bei der der Lichtraumbedarf unter Berücksichtigung der jeweiligen Einflüsse gleich dem verfügbaren Lichtraum ist. Es handelt sich somit um die maximale Fahrzeugbreite an dieser Längskoordinate.

Die maximale Breite für ein Fahrzeug mit einem Drehzapfenabstand a von 7000mm und einem Achsabstand p von 2100mm, was dem klassischen T-Wagen der HOCHBAHN entspricht, ist im Folgenden beispielhaft dargestellt. Dabei wurde lediglich der Einfluss durch die bogengeometrische Ausragung betrachtet. Als Gleisabschnitt wurde ein Gleisbogen mit

einem 300m-Radius im Streckenbereich gewählt, wodurch sich nach der Lichtraumumgrenzung der HOCHBAHN in der Höhe des Bahnsteigs von ca. 980mm ein Regellichtraum von 1430mm ergibt. Dieser Wert ist der Abbildung 2-2 entnommen. Zusätzlich liegt eine Profilerweiterung von 43,9mm in bogenäußere Richtung vor und es entsteht damit ein verfügbarer Lichtraum von 1473,9mm. Die Profilerweiterung in bogeninnere Richtung liegt bei 22,3mm, womit ein Lichtraum von 1452,3mm vorhanden ist. Die Ermittlung der Höhe der Profilerweiterung bei der HOCHBAHN wird später in Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 an einem Beispiel durchgeführt.

Die maximale Fahrzeugbreite durch die bogenäußere Lichtraumeinschränkung ist in Abbildung 3-6 zu sehen. Die kritischen Punkte stellen die mit der Fahrzeuglänge größer werdenden Überhänge nach vorne und nach hinten dar, wodurch die maximale Fahrzeugbreite stetig reduziert wird. In der Fahrzeugmitte ist die maximale Breite dagegen durch das Aufliegen und Durchhängen des Wagenkastens zwischen den beiden Drehgestellen sogar größer als der verfügbare Lichtraum in diesem Gleisbogen.

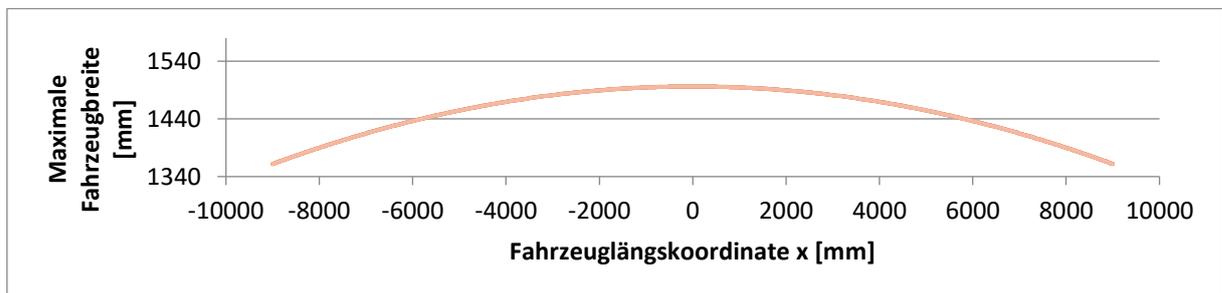


Abbildung 3-6 Maximale Fahrzeugbreite durch bogenäußere Lichtraumumgrenzung

Abbildung 3-7 zeigt dagegen die maximale Fahrzeugbreite durch die bogeninnere Lichtraumeinschränkung. Das Durchhängen des Wagenkastens zwischen den beiden Drehgestellen führt in diesem Fall dazu, dass das kritische Minimum der maximalen Breite in der Fahrzeugmitte liegt.

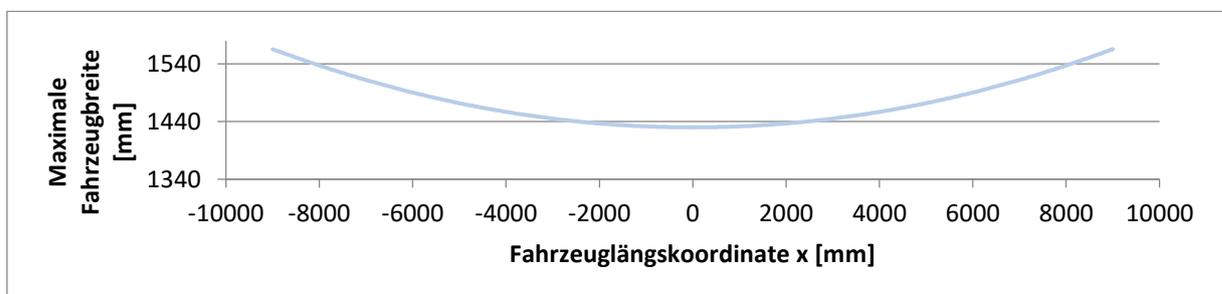


Abbildung 3-7 Maximale Fahrzeugbreite durch bogeninnere Lichtraumumgrenzung

Da Schienenfahrzeuge in der Regel Gleisbögen in beide Richtungen gleichermaßen befahren sollen, ist somit eine Betrachtung beider ermittelten maximalen Fahrzeugbreiten notwendig. Aus der Überlagerung ergibt sich die in Abbildung 3-8 dargestellte Kurve für die maximale Fahrzeugbreite in Abhängigkeit der Längskoordinate. Dieser Kurvenverlauf ist bereits in Abbildung 2-1 bei der Darstellung der Einschränkungsberechnung zu erkennen.

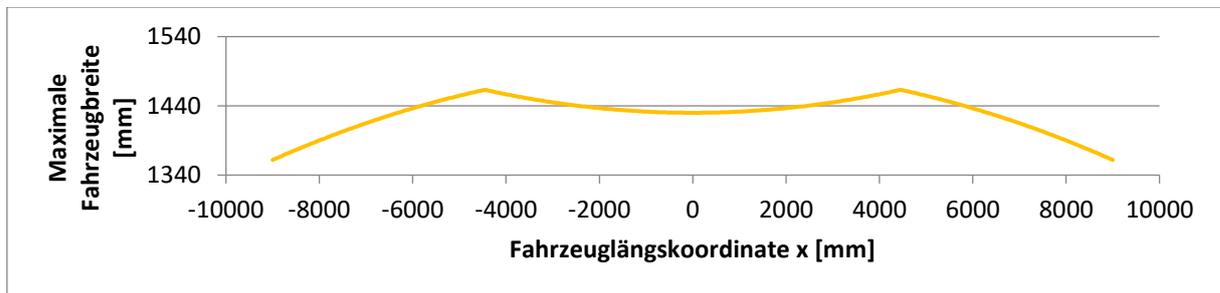


Abbildung 3-8 Maximale Fahrzeugbreite durch Lichtraumumgrenzung

3.5 Vergleich des Lichtraumbedarfs und der Profilerweiterung

In Kapitel 2.1 wurde schon erwähnt, dass die Lichtraumumgrenzung der HOCHBAHN bereits sehr früh festgelegt wurde und neuentwickelte Fahrzeuge diesen Anforderungen noch heute genügen müssen. Die Höhe der Profilerweiterung ist an dem alten Fahrzeugkonzept des T-Wagens orientiert. Dieses konventionelle Drehgestellfahrzeug mit symmetrischem Wagenkasten hat einen Drehzapfenabstand von 7000mm, einen Achsabstand von 2100mm und eine Wagenkastenlänge von 12600mm. In Abbildung 3-9 ist zu sehen, wie die Profilerweiterung auf den zusätzlichen Raumbedarf in einer Bogenfahrt abgestimmt ist. Dazu sind die maximalen Fahrzeugbreiten über die Fahrzeuglängen für Gleisbogenradien im Bereich von 80m bis 10000m, also annähernd einer gerade Strecke, dargestellt. Betrachtet ist dabei nur der Einfluss der bogengeometrischen Ausragung.

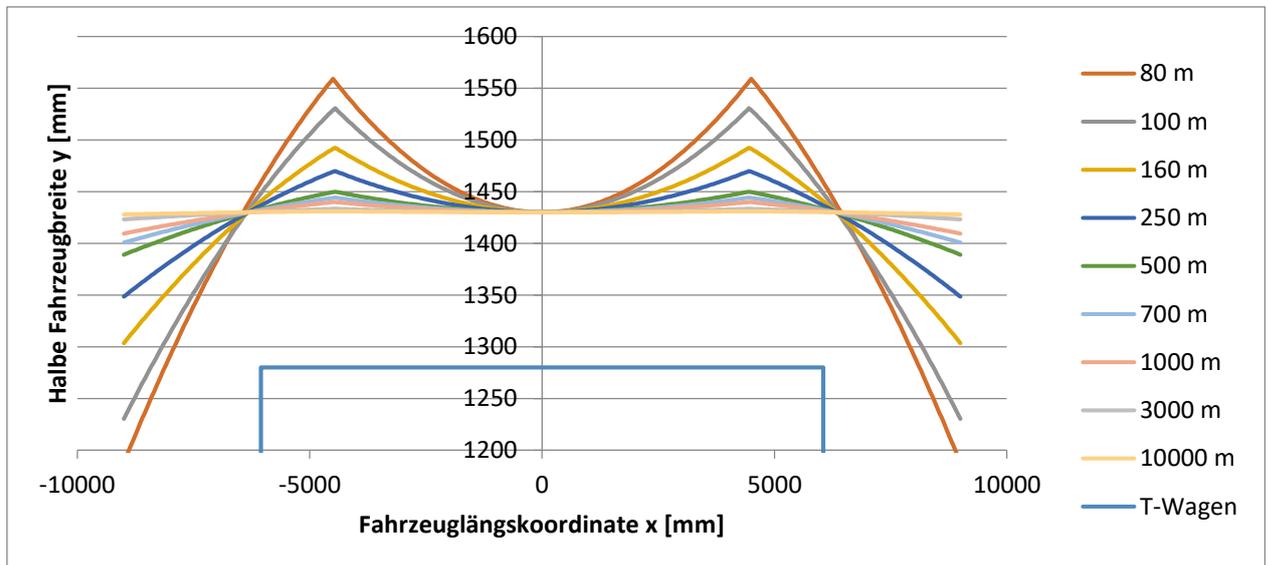


Abbildung 3-9 Maximale Fahrzeugbreite mit Profilerweiterung in Abhängigkeit des Gleisbogenradius

Für den Wagenkasten des T-Wagens mit rechteckiger Grundfläche und einer halben Fahrzeugbreite von 1280mm, wie er in der Abbildung dargestellt ist, ist die maximale Fahrzeugbreite im Bereich der Fahrzeuglängskoordinate von ca. -6300mm bis ca. +6300mm, für jeden Bogenradius identisch. An dem bogeninneren lichtraumkritischen Punkt in der Fahrzeugmitte ist die Profilerweiterung so gewählt, dass der zusätzliche Lichtraumbedarf des Fahrzeugs durch die Lichtraumerweiterung ausgeglichen wird. Daher ist die maximale Fahrzeugbreite für alle Bogenradien in der Fahrzeugmitte auf gleichem Niveau. An den

kritischen Überhängen am Anfang und Ende des Fahrzeugs ist die Profilerweiterung in bogenäußere Richtung so gewählt, dass die Fahrzeugbreite ebenfalls nicht eingeschränkt wird. Die Einschränkung der Fahrzeugbreite bei engen Gleisbögen beginnt erst außerhalb der beiden Schnittpunkte der Kurven der maximalen Breite. Durch die Spurführung der Drehgestelle kommt es im Bereich der Drehzapfen zu einer geringeren bogengeometrischen Ausragung des Wagenkastens. Mit der steigenden Profilerweiterung in engeren Gleisbögen nimmt der verfügbare Lichtraum zu, wodurch auch die maximale Wagenkastenbreite in diesen Bereichen, in denen die bogengeometrische Ausragung gering ist, zunimmt. Daraus resultieren die beiden Maxima der Fahrzeugbreiten.

Der vertikale Abstand zwischen einer Kurve der maximalen Fahrzeugbreite und der Kontur des Wagenkastens an einer bestimmten Längskoordinate stellt gleichzeitig den Spalt dar, der sich zwischen der Lichtraumumgrenzung und dem Wagenkasten einstellt. Mit diesem Abstand lässt sich also auch der Abstand beschreiben, der sich entlang eines Wagens zu dem Bahnsteig einstellt, sofern dieser direkt entlang der Lichtraumumgrenzung gebaut ist.

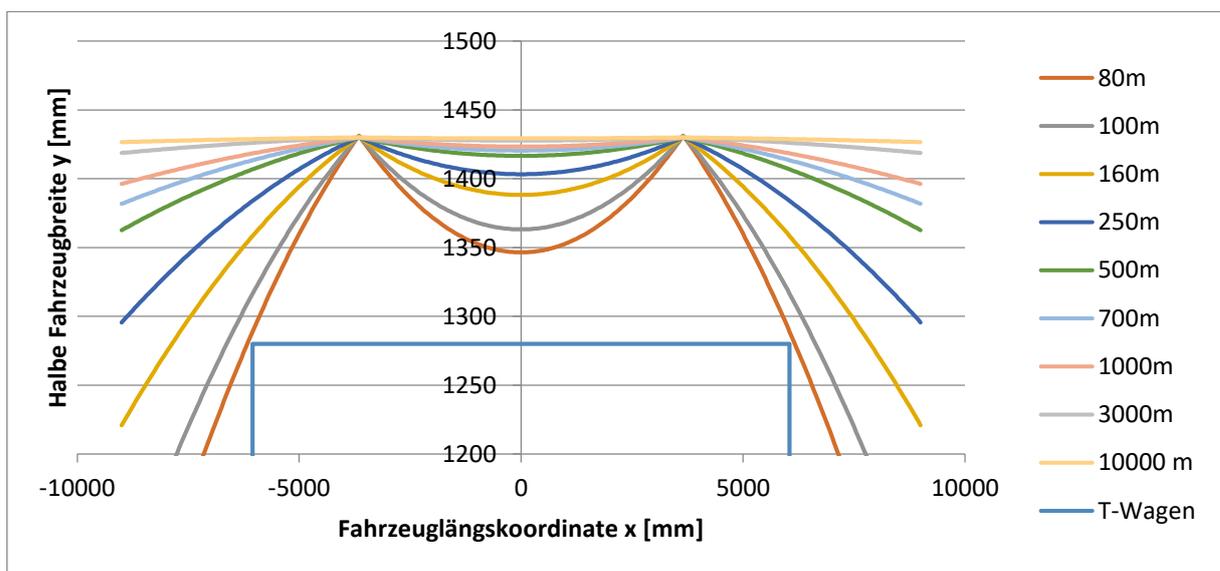


Abbildung 3-10 Maximale Fahrzeugbreite ohne Profilerweiterung in Abhängigkeit des Gleisbogenradius

Im Vergleich dazu ist in Abbildung 3-10 die maximale Fahrzeugbreite, für den Fall, dass keine Profilerweiterung vorhanden ist, aufgezeigt. Es ist deutlich zu sehen, dass es mit kleiner werdendem Gleisbogenradius in der Mitte und an den Enden des Fahrzeugs durch die Überhänge zu massiven Einschränkungen der maximalen Fahrzeugbreite kommt. Die theoretisch maximalen Fahrzeugbreiten nähern sich an diesen kritischen Stellen der Kontur des Wagenkastens des T-Wagens an. Wie oben bereits erwähnt wurde, betrachtet die Berechnung der maximalen Fahrzeugbreite an dieser Stelle lediglich die bogengeometrische Ausragung. Die Berücksichtigung weiterer Einflüsse würde zu einer weiteren Verringerung der maximalen Fahrzeugbreite führen, wodurch die tatsächliche Wagenkastenbreite die maximal zulässige Wagenkastenbreite überschreiten würde.

Alle aktuell bei der HOCHBAHN eingesetzten Personenfahrzeuge weichen deutlich von dem klassischen Brückenfahrzeug T-Wagen mit seinem symmetrischen rechteckigen Wagenkasten ab. Damit ändert sich auch das Bewegungsverhalten der Wagenkästen bei einer Bogenfahrt, wodurch sich andere Kurven der maximalen Fahrzeugbreite ergeben. Dabei kann es dazu kommen, dass aufgrund des Fahrzeugkonzepts und der Außenkontur des Wagenkastens die für den Lichtraum kritischen Betriebsfälle im Bereich von geraden Streckenabschnitten oder in Bögen mit größeren Radien liegen, da in diesen Bereichen keine oder nur eine geringe Lichtraumprofilerweiterung vorliegt.

4 Lichtraumbedarfsrechnung bei der HOCHBAHN

Die allgemeine Lichtraumbedarfsrechnung ist für die Anwendung bei den Fahrzeugen und der Infrastruktur der HOCHBAHN angepasst. Neben den Grenzwerten der infrastrukturbedingten Einflussparameter der HOCHBAHN sind die technischen Besonderheiten des Fahrzeugs der Baureihe DT4 in die Lichtraumberechnung integriert. Mit weiteren Anpassungen ist die Lichtraumberechnung von der Berechnung des maximal möglichen Lichtraumbedarfs zu der Berechnung der tatsächlichen Lichtraumverhältnisse in der Praxis abgewandelt.

Die allgemeinen Annahmen der HOCHBAHN sind im Folgenden kurz beschrieben. Die Grenzwerte der gleistechnischen Einflüsse sind in den Richtlinien zum Oberbau (RUO) dokumentiert. Die Grenzwerte der Schienenverschiebung und des Schienenverschleißes variieren je nach Betriebsfall teilweise erheblich und müssen für unterschiedliche Berechnungsfälle individuell bestimmt werden. Die Ermittlung der aktuellen Grenzwerte erfordert grundsätzlich eine Unterscheidung zwischen dem Streckenbereich und dem Bahnsteigbereich. Innerhalb des Bahnsteigbereichs ist zusätzlich eine Unterscheidung der untersuchten Fahrzeugseite nötig, da unterschiedliche Grenzwerte der Gleislage für die bahnsteigzugewandte Seite und die bahnsteigabgewandte Seite gelten. Weiterhin ist beruhend Erfahrungen der Schienenverschleiß in engen Gleisbögen an der äußeren Schiene maximal zulässig und an der bogeninneren Schiene dagegen gering angenommen. In der Geraden ist ein kleiner gleichmäßig verteilter Schienenverschleiß zu beiden Seiten angenommen. Dies ist möglich, da die Verschleißgrenze der seitlichen Fahrkante im Betrieb nicht ausgenutzt ist, weil vorher die verschleißbedingte Änderung der Höhenlage der Schiene den zulässigen Wert erreicht. Die Parameter sind je nach Bogenradius zwischen den Grenzwerten für den engen Bogen und der geraden Strecke linear interpoliert.

Die Einflussparameter der Schienenverschiebung und des Schienenverschleißes sind neben den einzelnen Grenzwerten mit einem zulässigen gemeinsamen Grenzwert als seitliche Verschiebung der Schienenfahrkante versehen. Um eine konservative Rechnung durchzuführen, ist hier aufgrund der späteren Summation der zufälligen und nicht zufälligen Einflüsse eine definierte Aufteilung notwendig. Deshalb ist der nicht zufällige Schienenverschleiß, der stärker in den Gesamtlichtraumbedarf eingeht, so groß wie möglich angenommen und der zufällige Grenzwert der Schienenverschiebung im Rahmen des gemeinsamen Grenzwertes eingeschränkt.

In der folgenden Berechnung sind speziell zwei jeweils 13m langen Gleisabschnitte der Haltestelle Klosterstern nachgebildet und der Restspalt zwischen dem Zug und dem Bahnsteig bestimmt, da in diesem Gleisbereich die gemessenen Daten der tatsächlichen minimalen Restspaltbreite zum Vergleich vorliegen.

4.1 Die Baureihe DT4

Von 1988 bis 2005 wurden insgesamt 126 Fahrzeuge des Doppeltriebwagens 4, kurz DT4, gebaut. In dieser Zeit wurde die Fahrzeugbaureihe mehrfach überarbeitet und fährt in acht Versionen in den Unterbaureihen DT4.1 bis DT4.6. Das Fahrzeugkonzept sowie die Hauptabmessungen sind jedoch in allen Versionen identisch geblieben. Im Folgenden sind die Fahrzeugkomponenten technisch beschrieben, die sich auf den seitlichen Lichtraumbedarf des Fahrzeugs auswirken. Es handelt sich dabei um die Radsätze, die Drehgestelle, die Wagenkästen sowie die verbindenden Koppelelemente. Ein Überblick der Fahrzeugdaten findet sich in Anhang A1.

Ein Fahrzeug besteht aus vier Wagen. An den Fahrzeugenden mit den Wagennummern 1 und 4 befinden sich zwei geometrisch identische Kopfwagen mit Führerstand, dazwischen sind mit den Nummern 2 und 3 zwei ebenfalls äußerlich gleiche Mittelwagen eingesetzt. Jeweils ein Kopfwagen und ein Mittelwagen bilden einen Halbzug. Die beiden Wagen eines

Halbzugs liegen zum einen jeweils auf einem Triebdrehgestell und zum anderen über eine exzentrische Anlenkung auf einem gemeinsamen Laufdrehgestell in Jakobs-Bauart auf. Über die sogenannte Kurzkupplung sind zwei Halbzüge zu einem Fahrzeug gekoppelt. Für die Lichtraumberechnung müssen damit nur zwei unterschiedliche Wagentypen und die Tatsache, dass bei der Durchfahrt eines Fahrzeugs die Wagentypen jeweils in beiden Fahrtrichtungen passieren, berücksichtigt werden.

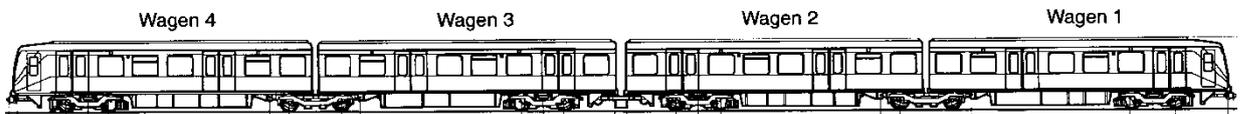


Abbildung 4-1 Übersicht eines Gesamtfahrzeugs DT4 (HOCHBAHN)

Das Laufdrehgestell zwischen einem Kopfwagen und einem Mittelwagen bildet bei diesem Fahrzeug eine technische Besonderheit. Es handelt sich um ein Jakobs-Drehgestell „Hamburger Bauart“, bei dem die beiden Wagenkästen des Drehgestells über eine Kupplungsstange, in Abbildung 4-2 rot dargestellt, miteinander verbunden sind und über diese angelenkt werden.

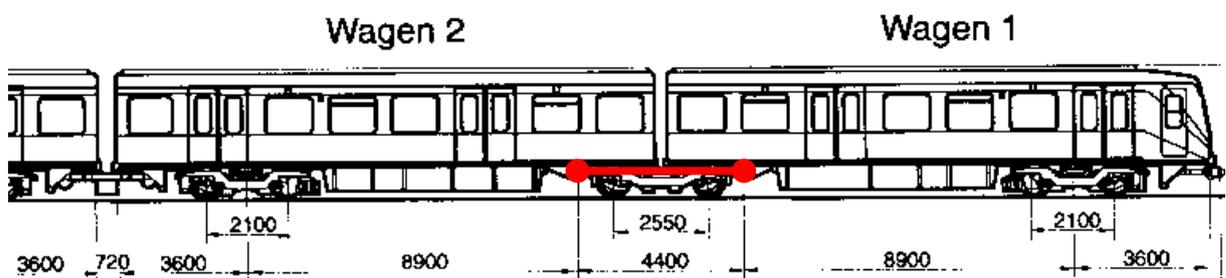


Abbildung 4-2 Übersicht eines Halbzugs DT4 (HOCHBAHN)

Diese ausgeprägte exzentrische Anlenkung bewirkt eine fiktive Verkürzung des Drehzapfenabstandes, wodurch der sonst notwendigen Verkürzung der Wagenkästen bei Jakobs-Drehgestellen entgegengewirkt werden kann. Der verfügbare Lichtraum der HOCHBAHN kann damit auch in engen Gleisbögen optimal ausgenutzt werden.

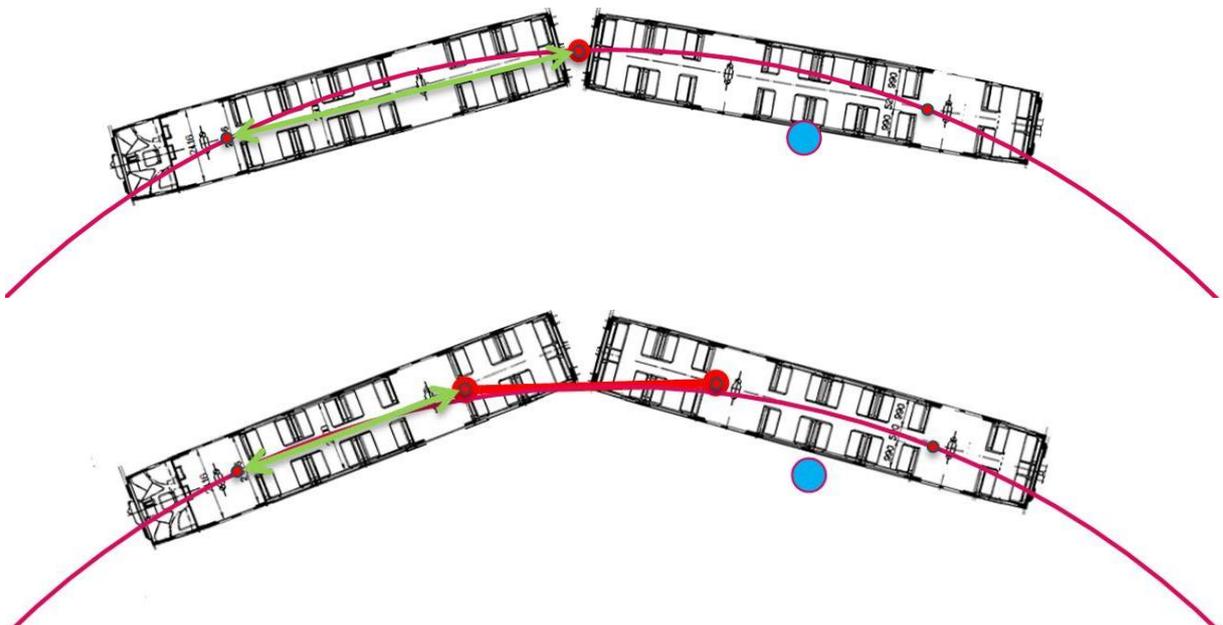


Abbildung 4-3 Wirkweise des Jakobs-Drehgestells "Hamburger Bauart" (HOCHBAHN)

Die Wirkweise des Jakobs-Drehgestells „Hamburger Bauart“ ist in Abbildung 4-3 schematisch dargestellt. Die obere Darstellung zeigt zwei Wagenkästen auf einem gemeinsamen Jakobs- Drehgestell mit einem zentrischen Anlenkpunkt. Bei langen Wagenkästen kommt es so zu einer hohen bogengeometrischen Ausragung in bogeninnere Richtung und damit zu einer Kollision mit dem durch den blauen Punkt dargestellten potentiellen Hindernis. Zwar ließe sich mit kürzeren oder schmaleren Wagenkästen diese Kollision vermeiden, jedoch würde damit auch eine Verringerung der Kapazität einhergehen. Die untere Abbildung zeigt dagegen, wie die exzentrische Anlenkung die Wagenkastenenden in bogenäußere Richtung verschiebt und somit die bogeninnere Ausragung verringert. Der Drehzapfenabstand, als grüner Pfeil dargestellt, ist bei gleicher Wagenkastenlänge deutlich geringer. Bei identischem Bogenradius und identischen Wagenkastenlängen kommt es durch dieses Fahrzeugkonzept zu keiner Kollision mit dem dargestellten Hindernis.

In anderen Gleisabschnitten, wie zum Beispiel im Bogeneinlauf oder in S-Kurven, erzeugt diese Fahrzeugkonfiguration aber auch unerwünschte Wagenkastenverschiebungen, die lichtraumtechnisch berücksichtigt werden müssen. Besonders zu beachten ist dabei, dass die Kuppelstange durch ihren langen Hebel auch zu lichtraumkritischen Querverschiebungen an unerwarteten Streckenbereichen führen kann.

4.1.1 Radsatz

Die Radsätze der Personenfahrzeuge der HOCHBAHN haben ein Spurmaß von 1422,9mm. Eine weitere Vergrößerung des Spurspiels ergibt sich im Betrieb aus dem Spurkranzverschleiß. Das Nennmaß der Spurkranzdicke beträgt 30,2mm. Das Abbildung 4-4 entnommene minimale Grenzmaß von 25,0mm ermöglicht damit einem Verschleiß von 5,2mm. Im Betrieb macht das Erreichen der maximalen Spurkranzhöhe durch den Laufflächenverschleiß eine Neuprofilierung der Räder notwendig, bevor der maximale Spurkranzverschleiß erreicht ist. Der Spurkranzverschleiß liegt in der Regel bei maximal zwei bis drei Millimetern, wenn die Neuprofilierung durchgeführt wird. Die Spurkranzmessanlage erfasst regelmäßig die Spurkranzdicke der im Netz befindlichen Fahrzeuge. Aus diesen Daten lässt sich eine mittlere Spurkranzdicke von 29,9mm ermitteln, womit sich ein Verschleiß von durchschnittlich nur 0,3mm ergibt.

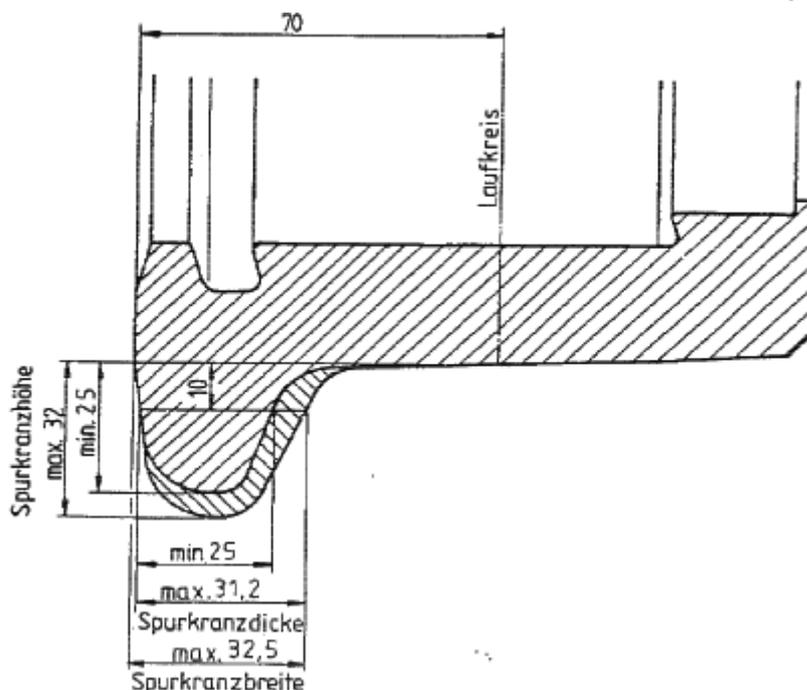


Abbildung 4-4 Grenzmaße des Radprofils (HOCHBAHN)

Jedes Radsatzende ist über zwei Rollenlager im Radsatzlagergehäuse aufgenommen. Die Rollenlager sind auf ein Axialspiel von $\pm 1\text{mm}$ eingestellt.

Eine weitere Besonderheit in der Rad-Schiene-Profilpaarung der HOCHBAHN ist die bereits erwähnte sehr geringe äquivalente Konizität. Sie entsteht hauptsächlich durch das verwendete Radprofil Nr. 3A. Dies vergrößert zwar nicht direkt den Lichtraumbedarf der Fahrzeuge, führt aber aufgrund der Tatsache, dass praktisch kein Rollradiusausgleich zwischen dem bogeninneren und dem bogenäußeren Rad stattfinden kann, dazu, dass die Radsätze häufig mit dem Spurkranz an die Schienenfahrkante anlaufen und das vorhandene Spurspiel damit voll ausnutzen.

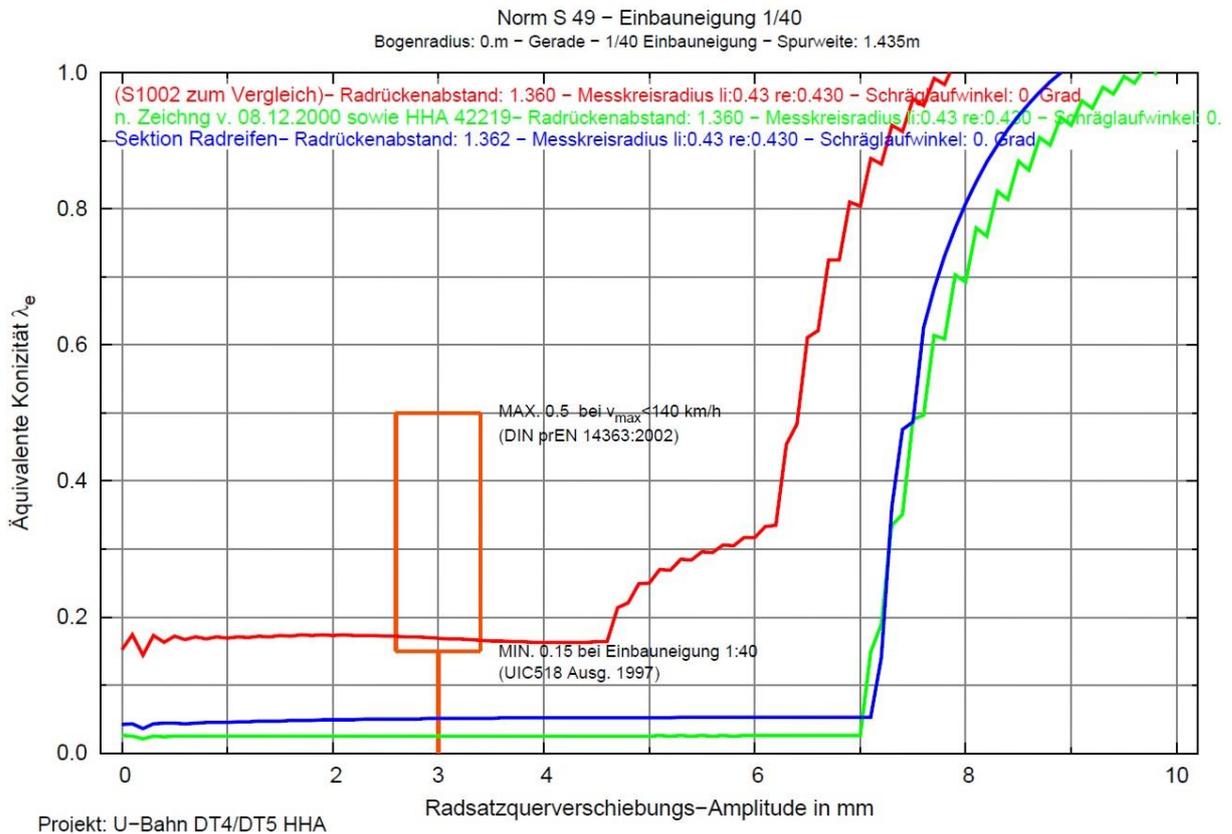


Abbildung 4-5 Äquivalente Konizität der Profilpaarung der HOCHBAHN (HOCHBAHN)

Abbildung 4-5 zeigt mit der blauen und grünen Kurve die geringe äquivalente Konizität der HOCHBAHN im Vergleich zu dem häufig verwendeten rot dargestellten S1002-Radprofil. Die geringe Konizität der HOCHBAHN steigt auch bei der Querverschiebung des Radsatzes zunächst nicht an. Ab einer Querverschiebung von mehr als 7mm kommt es zum Kontakt zwischen Spurkranz und Schienenfahrkante und damit einer Zweipunktberührung. Bei weiterer Querverschiebung läuft der Kontaktpunkt entlang des Spurkranzes und führt damit zu der massiven Änderung des Rollradius und dem steilen Anstieg der Konizität. Die Darstellung in Anhang A2 bestätigt den plötzlichen Kontaktflächenwechsel. Im Gegensatz dazu zeigt die rot dargestellte Profilpaarung mit dem S1002-Radprofil, dass die ohnehin schon höhere äquivalente Konizität ab einer Querverschiebung von ca. 4,5mm weiter ansteigt, bevor es zu dem steilen Anstieg durch das Hochlaufen des Kontaktpunktes am Spurkranz kommt. Mit dieser Profilpaarung können somit Gleisbögen mit größerem Bogenradius auch ohne Anlaufen des Spurkranzes durchfahren werden können. Der Verlauf der äquivalenten Konizität lässt sich in der Darstellung der Kontaktflächen in Anhang A3 nachvollziehen.

4.1.2 Triebdrehgestell

Jeder Wagenkasten liegt auf einem Triebdrehgestell mit einem Achsabstand von 2100mm in konventioneller Bauart auf. In diesen Drehgestellen werden beide Achsen von jeweils einem Fahrmotor angetrieben.

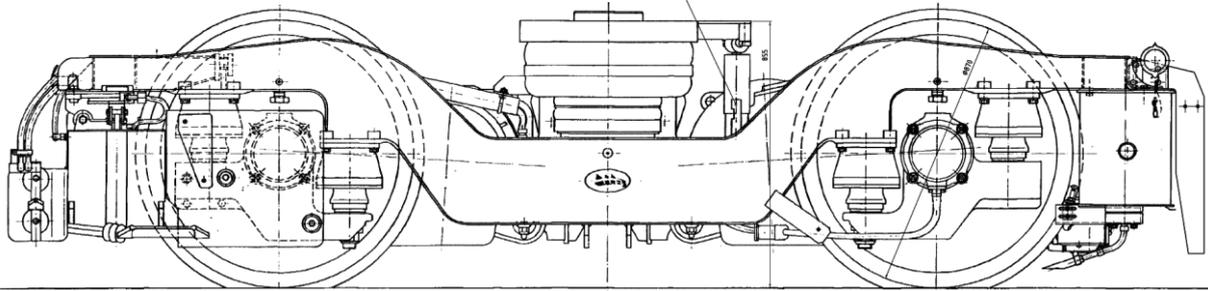


Abbildung 4-6 Seitenansicht Triebdrehgestell (HOCHBAHN)

Die Primärfederstufe zwischen den Radsatzlagergehäusen und dem Drehgestellrahmen ist mit Rollfedern ausgeführt. Zwei identische Rollfedern sind jeweils an einem Radsatzlagergehäuse verbaut, wie es in Abbildung 4-6 zu sehen ist. Bei einer Rollfeder ist ein Gummiring auf einem Dorn von einem Gehäuse umgeben. Das Gehäuse ist dabei am Drehgestellrahmen und der Dorn am Radsatzlagergehäuse befestigt. Bei einer vertikalen Einfederung rollt der Gummiring auf dem Dorn und innerhalb des ihn umgebenden Gehäuses ab. Durch die veränderliche Kontur des Dorns und des Gehäuses und die damit notwendige Deformation des dazwischen liegenden Gummirings wird eine individuelle Federkennlinie erreicht. Neben der vertikalen Bewegung ermöglicht die Rollfeder auch eine Bewegung mit deutlich höherer Federsteifigkeit in lateraler Richtung. Dies entspricht einer Verschiebung in Fahrzeugquer- und Längsrichtung. In der lichtraumrelevanten Querrichtung ist die Federsteifigkeit durch einen Versuch ermittelt worden und liegt unter der betrieblichen vertikalen Vorspannung bei ca. 1,4kN/mm, siehe Anhang A4. Eine radiale Einstellung der Radsätze zum Gleisbogenmittelpunkt ist aufgrund dieser hohen Steifigkeit nicht anzunehmen. Ein separates Dämpfungselement ist wegen der Dämpfung des verbauten Gummirings in der Primärstufe nicht notwendig.

Die Sekundärfederstufe des Triebdrehgestells besteht aus der mittig angeordneten Anlenkung des Drehzapfens sowie den beiden seitlich davon liegenden Luftfedern, von denen eine mittig in Abbildung 4-6 zu sehen ist. Die Luftfedern dienen dabei lediglich der vertikalen Abstützung. Da diese sowohl am Wagenkasten als auch am Drehgestell fixiert sind, kommt es bei einer Querverschiebung des Wagenkastens oder einem Ausdrehen des Drehgestells zu einer lateralen Verschiebung der Luftfederanbindungspunkte. Während beim Ausdrehen des Drehgestells Verschiebungen über 70mm erreicht werden können, welche dabei einen Widerstand gegen das Ausdrehen des Drehgestells darstellen, sind die auftretenden Querverschiebungen des Wagenkastens so gering, dass der Einfluss der Luftfeder nicht berücksichtigt wird. Parallel zu jeder Luftfeder ist ein Schwingungsdämpfer verbaut.

Die Drehzapfenanlenkung ist mittig zwischen den äußeren Luftfedern und mittig zwischen dem vorderen und dem hinteren Radsatz angeordnet. Sie überträgt Längs- und Querkräfte zwischen Triebdrehgestell und Wagenkasten. Abbildung 4-7 zeigt eine Draufsicht auf die Drehzapfenanlenkung im Triebdrehgestell. Der grüne Pfeil symbolisiert die Fahrtrichtung. In dem zentral angeordneten Mitnehmerkreuz ist der wagenkastenseitige, schraffiert dargestellte Drehzapfen über eine mit Metall verstärkte Gummiverbundfeder verspannt. Diese Verbindung ermöglicht eine spielfreie Rotation des Drehzapfens im Mitnehmerkreuz und unterbindet eine seitliche Verschiebung.

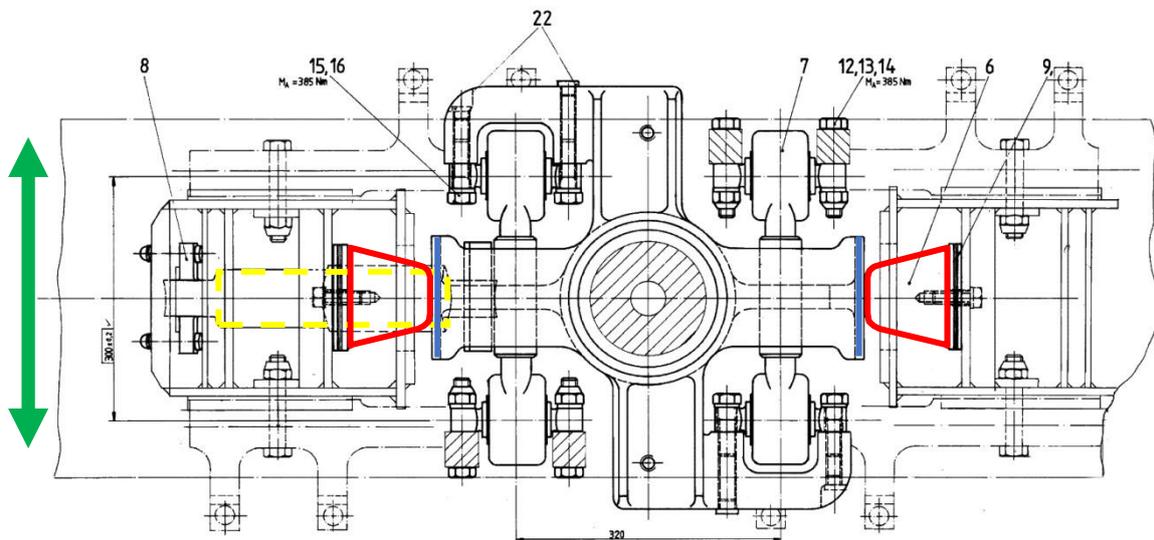


Abbildung 4-7 Draufsicht auf das Mitnehmerkreuz des Triebdrehgestells (HOCHBAHN)

Das Mitnehmerkreuz ist in Fahrzeuginnenrichtung über zwei Achsstreben mit dem Drehgestellrahmen verbunden, über die die Fahrzeuginnenkräfte übertragen werden. Die Achsstreben ermöglichen die vertikale Bewegung des Mitnehmerkreuzes zum Drehgestellrahmen, zu der es bei einer Einfederung des über die Luftfedern getragenen Wagenkastens kommt. Da die Achsstreben punktsymmetrisch zum Drehzapfen ausgerichtet sind, kommt es dabei zu keiner Lageänderung des Drehzapfens in Längs- oder Querrichtung. Die Querverschiebung zwischen Wagenkasten und Triebdrehgestelle ist zu beiden Richtungen durch den Anschlag des Mitnehmerkreuzes an einen an dem Drehgestellrahmen montierten Querpuffer aus Gummi beschränkt. In Mittellage ist zwischen der Anschlagfläche des Mitnehmerkreuzes (blau dargestellt) und dem Querpuffer (rot dargestellt) ein Spalt und damit freier Weg von 1mm voreingestellt. Bei größeren auftretenden Kräften in Querrichtung wird der Querpuffer entsprechend seiner Kennlinie, siehe Anhang A5, deformiert und ermöglicht so die Querverschiebung des Mitnehmerkreuzes und damit des Wagenkastens zum Drehgestell. Mit dem horizontalen Schwingungsdämpfer zwischen dem Mitnehmerkreuz und dem Drehgestellrahmen (gelb gestrichelt dargestellt) sind Schwingungen des Wagenkastens in Querrichtung gedämpft.

4.1.3 Laufdrehgestell

Abbildung 4-8 zeigt das Laufdrehgestell als Jakobs-Drehgestell in der Sonderform „Hamburger Bauart“, auf dem jeweils ein Kopfwagen und ein Mittelwagen aufgesetzt sind. Der Achsabstand ist mit 2550mm gegenüber dem Triebdrehgestell verlängert. Die Primärfederstufe gleicht mit zwei Rollfedern pro Radsatzlagergehäuse der des Triebdrehgestells. Es handelt sich um dieselben Bauteile mit somit gleicher Kennlinie.

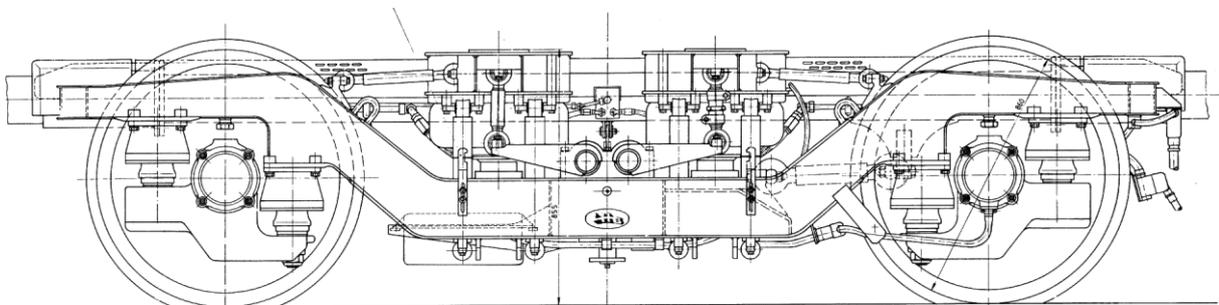


Abbildung 4-8 Seitenansicht des Laufdrehgestells (HOCHBAHN)

Ausgeprägte Unterschiede zu dem Triebdrehgestell zeigen sich in der Sekundärfederstufe. Wie bereits in Kapitel 4.1 beschrieben, sind die Anlenkpunkte der Wagenkästen durch eine Kupplungsstange mit einer Gesamtlänge von 4400mm exzentrisch außerhalb des Laufdrehgestells angeordnet. In Abbildung 4-2 und Abbildung 4-3 ist die Lage der Kupplungsstange im Gesamtfahrzeug zu sehen. Die vertikale Abstützung erfolgt je Wagenkastenende über jeweils zwei zentral zwischen den Radsätzen angeordnete Luftfedern. Durch die exzentrische Anlenkung kommt es bei Bogenfahrten an dieser Stelle zu hohen Querverschiebungen zwischen dem Wagenkasten und der Luftfeder, weshalb eine direkte Anbindung der Luftfeder am Wagenkasten und dem Laufdrehgestell, wie es bei dem Triebdrehgestell der Fall ist, nicht möglich ist. Auf den Luftfedern ist deshalb je Wagenkasten eine längs- und quergeführte Wiege aufgesetzt, auf der sich über Gleitplatten der Wagenkasten vertikal abstützt. In Abbildung 4-9 sind mittig beide Wiegen in der Draufsicht zu sehen.

Beide Wagenkästen sind über die Kupplungsstange, in Abbildung 4-9 blau und an beiden Enden gekürzt dargestellt, miteinander verbunden. Sämtliche Quer- und Längskräfte, die zwischen Wagenkasten und Drehgestell auftreten, werden über diese Kupplungsstange geführt. An den Anbindungspunkten an den Wagenkästen werden über ein Sphärolager rotatorische Bewegungen zwischen der Kupplungsstange und den Wagenkästen, wie sie bei vertikaler Federung oder einer Bogenfahrt auftreten, ermöglicht. In Fahrzeuginnenrichtung und -querrichtung ermöglichen die Lager die spielfreie Kraftübertragung. Verschiebungen sind auch bei hohen Querkräften in diesem Lager nicht anzunehmen.

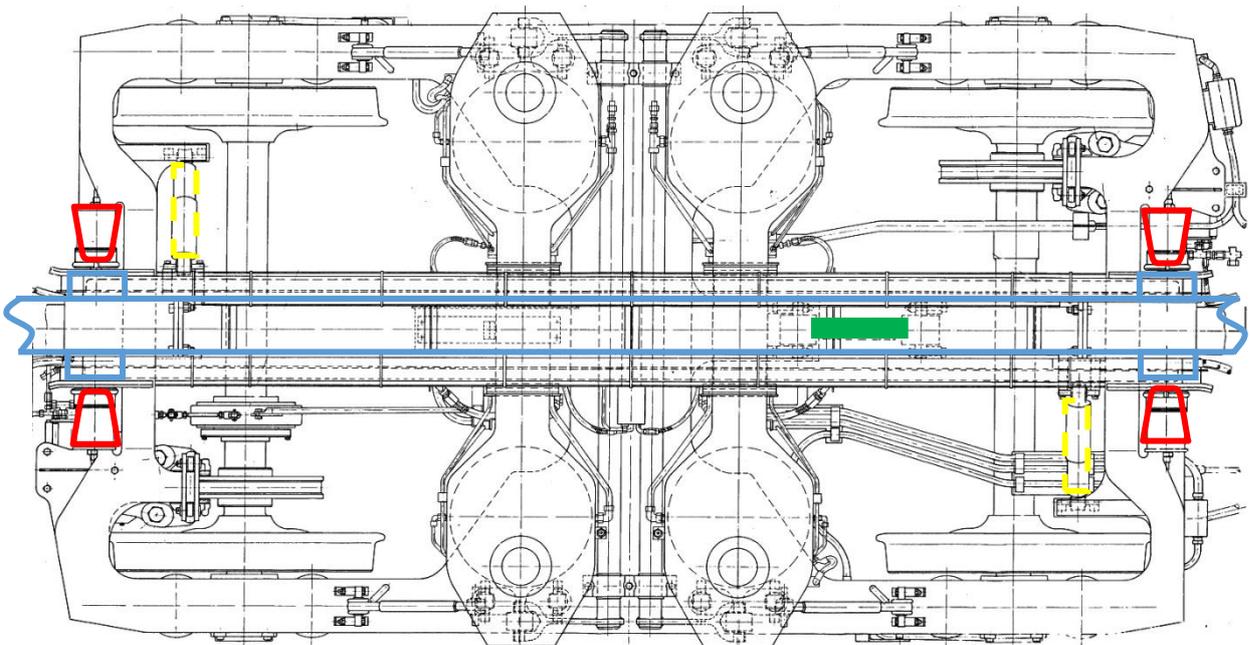


Abbildung 4-9 Draufsicht auf das Laufdrehgestell (HOCHBAHN)

Die grün eingefärbte Achsstrebe stellt die Verbindung in Fahrzeuginnenrichtung zwischen der Kupplungsstange und dem Drehgestellrahmen her, die insbesondere bei der Übertragung der Bremskräfte notwendig ist. In Fahrzeuginnenrichtung ist die Kupplungsstange an beiden Enden des Drehgestells durch die rot dargestellten Anschlagspuffer geführt. Diese sind, wie auch beim Triebdrehgestell, aus Gummi mit einem voreingestellten Spalt von 1mm zwischen Puffer und Kupplungsstange ausgeführt. Bei höheren Querkräften kommt es auch hier zu einer Deformation entsprechend einer Kennlinie, siehe Anhang A5. Durch die gelb dargestellten Schwingungsdämpfer werden Querschwingungen der Kupplungsstange und der Wagenkästen kontrolliert.

4.1.4 Wagenkasten

Da speziell der Lichtraum auf Bahnsteighöhe betrachtet wird, wird auch der Wagenkasten nur in diesem Bereich betrachtet. Trotz des unterschiedlichen Aufbaus weisen sowohl der Kopfwagen als auch der Mittelwagen auf dieser Höhe die gleiche, jedoch in Fahrtrichtung gespiegelte, Kontur auf. Diese Kontur zeichnet sich im Wesentlichen durch eine weitgehend konstante, an den Wagenkastenenden jedoch verjüngte, Fahrzeugbreite aus. Die Verjüngung an dem Wagenkastenende auf dem gemeinsamen Laufgestell ist dabei deutlich geringer ausgeprägt, als die an den freien Enden zu der Kurzkupplung oder an dem Führerstand. Weitere Anbauteile wie die Kupplung oder der Kletterschutz sind durch ihre Positionierung nicht lichtraumrelevant und müssen nicht weiter betrachtet werden.

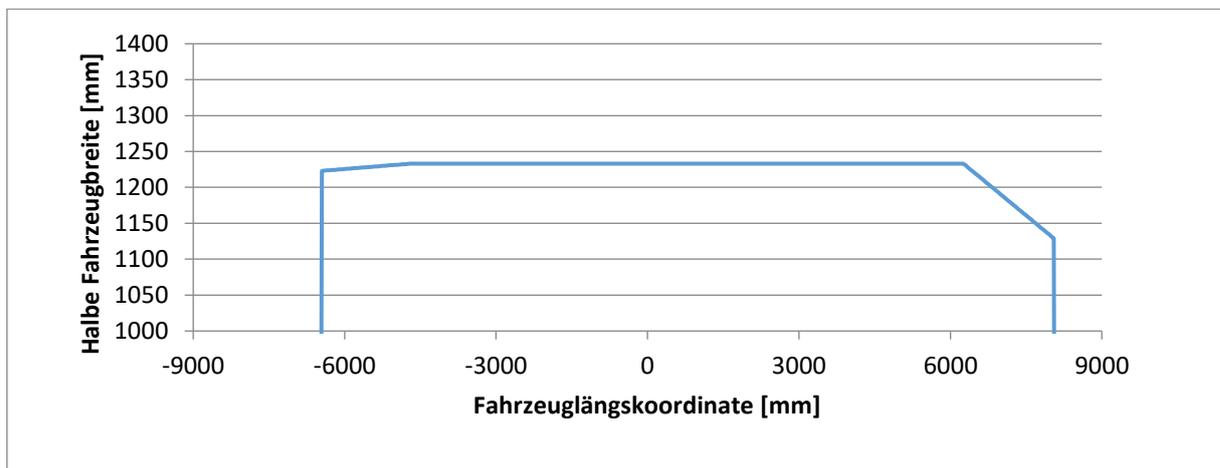


Abbildung 4-10 Wagenkastenbreite des DT4

Abbildung 4-10 zeigt den Verlauf der Wagenkastenbreite mit ihren Einzügen über der Fahrzeuginnenlänge. Die Breite ist dabei als halbe Wagenkastenbreite mit dem Nullpunkt auf der Längsachse des Fahrzeugs entsprechend des Koordinatensystems in Kapitel Abbildung 2-3 angegeben. Zur Verdeutlichung der Kontur sind die Fahrzeugbreite und die Fahrzeuginnenlänge maßstäblich nicht korrekt zueinander aufgetragen. Der Nullpunkt der Fahrzeuginnenlänge liegt mittig zwischen den beiden Anlenkpunkten der Fahrwerke. Dies sind der Drehzapfen am Triebdrehgestell und die Anbindung der Kupplungsstange am Laufdrehgestell. Der Verlauf, wie er dort zu sehen ist, gleicht in seiner Orientierung den Wagen 1 und Wagen 3 in Abbildung 4-1. Eine Spiegelung an einer senkrechten Achse des Nullpunktes der Längskoordinate ergibt die Wagenausrichtung der Wagen 2 und Wagen 4.

In der untersuchten Höhe sind zusätzlich am Wagenkasten Begrenzungsleisten bzw. Trittleisten montiert, die die Fahrzeugbreite pro Seite um bis zu 45mm erhöhen. Während die untersuchte Wagenkastenkontur für alle Fahrzeuge identisch ist, unterscheiden sich die Begrenzungsleisten zwischen Kopf- und Mittelwagen und nach der Unterbaureihe des DT4. Die Baureihen DT4.1 und DT4.2 sind mit einer durchgehenden Begrenzungsleiste ausgestattet, welche mit den Enden des Wagenkastens etwas eingezogen werden. Im Bereich des Führerstandes enden sie früher. Die Baureihen DT4.3 bis DT4.6 sind nur noch mit kurzen Begrenzungsleisten im Bereich der Fahrgasttüren ausgerüstet. Im Folgenden sind mit der Bezeichnung DT4.1 alle älteren Baureihen mit durchgehender Begrenzungsleiste und mit der Bezeichnung DT4.6 alle jüngeren Baureihen mit unterbrochener Begrenzungsleiste gemeint.

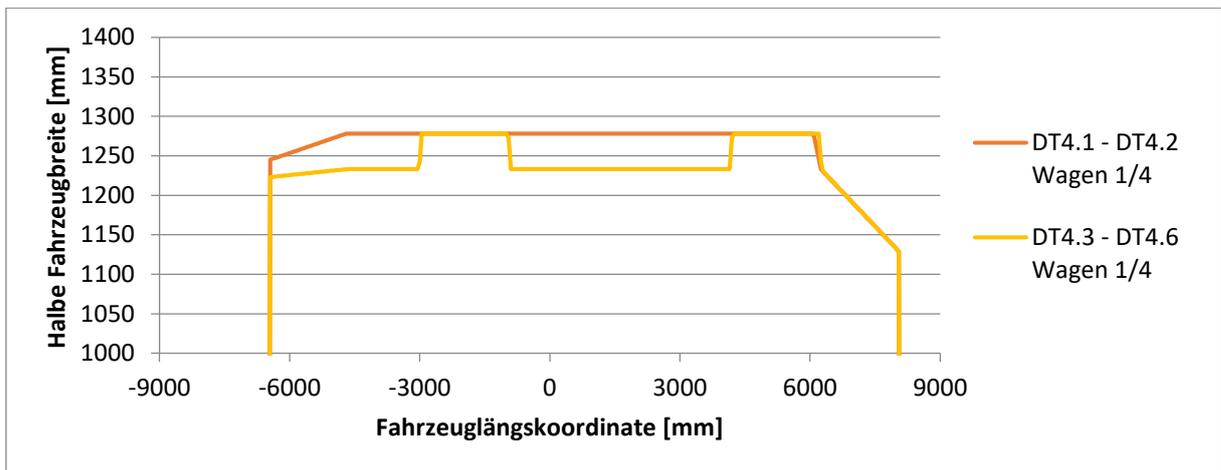


Abbildung 4-11 Halbe Fahrzeugbreite des DT4 Wagen 1/4

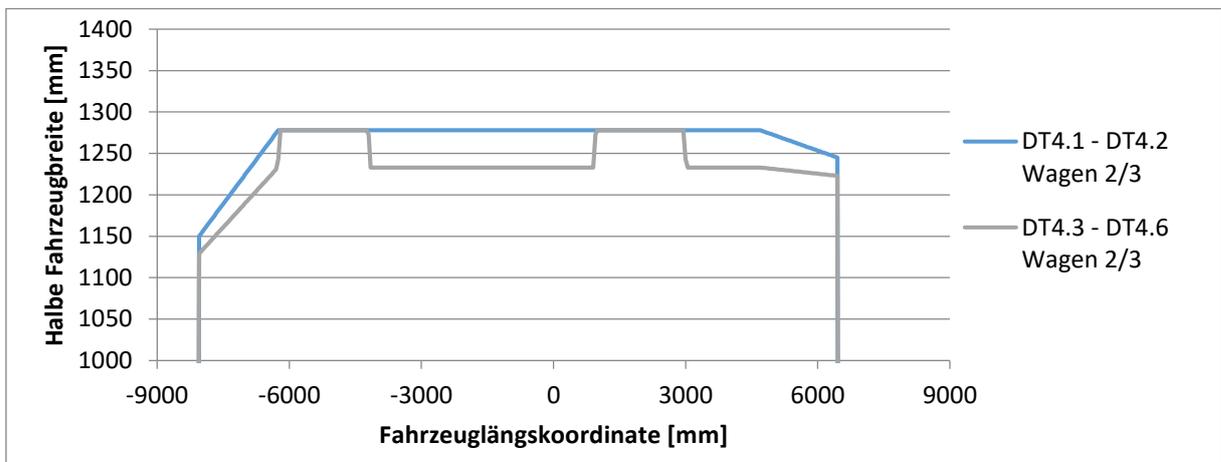


Abbildung 4-12 Halbe Fahrzeugbreiten des DT4 Wagen 2/3

Die Abbildung 4-11 und Abbildung 4-12 zeigen die für den Lichtraumbedarf wirksame Fahrzeugbreite je nach Unterbaureihe des Fahrzeugs und des untersuchten Wagens. Die Wagen in Abbildung 4-11 entsprechen nach Kontur und Ausrichtung dem Wagen 1 sowie die Wagen in Abbildung 4-12 dem Wagen 2 aus Abbildung 4-1. Die genauen angenommenen Eckpunkte der berechneten Fahrzeugkontur finden sich in Anhang A6 und A7.

Am echten Fahrzeug sind sämtliche Eckpunkte am Wagenkasten und den Begrenzungsleisten mit geringen Radien ausgeführt, welche in der Berechnung jedoch nicht berücksichtigt werden. In diesen Bereichen kann damit der berechnete Lichtraumbedarf den tatsächlichen Lichtraumbedarf minimal übersteigen.

4.2 Die Haltestelle Klosterstern

Die in dem 1930 fertiggestellten Streckenabschnitt liegende zweigleisige Haltestelle Klosterstern befindet sich in einem engen Gleisbogen mit einem Radius von etwa 200m. (HOCHBAHN 2019) Dabei ist an beiden Gleisen die bogenäußere Schiene um 50mm erhöht. Der vollständig auf 980mm über Schienenoberkante und damit auf Fahrzeugfußbodenhöhe erhöhte Bahnsteig befindet sich zwischen den beiden Gleisen. Auf dieser Höhe wurde in einem Bereich von ca. 13m an jedem Bahnsteig der Lichtraumbedarf der Züge über die Messung des verbleibenden Spalts zwischen Zug und Bahnsteig erfasst.

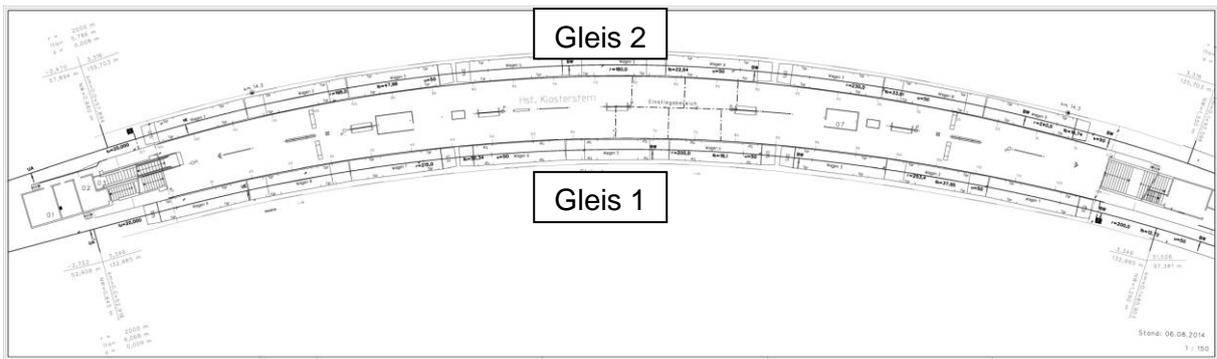


Abbildung 4-13 Übersicht der Haltestelle Klosterstern (HOCHBAHN)

Um praxisnahe Ergebnisse in der Lichtraumberechnung zu erhalten, die anschließend mit den erfassten Messwerten verglichen werden können, ist die Berechnung mit den Parametern der tatsächlichen Gleislage durchgeführt. Dabei handelt es sich zum einen um die aktuellen Verschleiß- und Lageänderungen der Schienen, aber auch um Abweichungen zu der regulären Lichtraumumgrenzung aufgrund des Haltestellenalters. Die reguläre Lichtraumumgrenzung in der Höhe von 980mm im Bahnsteigbereich läge entsprechend der Abbildung 2-2 aufgrund des Gleisbogenradius von weniger als 300m bei 1370mm.

An der Haltestelle Klosterstern entspricht dies nicht der tatsächlichen Entfernung des Bahnsteigs von der Gleismitte. Der für die Berechnung anzunehmende Wert der Lichtraumumgrenzung, die auch die Entfernung des Bahnsteigs darstellt, ist deshalb aus Messungen der Gleislage ermittelt. Daneben wird die Auswirkung der Gleisüberhöhung auf die Lichtraumverhältnisse durch eine Korrektur berücksichtigt.

4.2.1 Bogeninneres Gleis 1

Das bogeninnere Gleis 1 liegt in einem Übergangsbogen mit Radien zwischen 196m und 253,4m. Der untersuchte Haltestellenbereich befindet sich im kleinsten Radius bei 196m. Auf Basis von Messungen mit dem Gleismesswagen ist in diesem Bereich eine Spurerweiterung des Gleises von 7mm angenommen. Die Spurweite ergibt sich aus der Sollspurweite von 1432mm mit der Spurerweiterung zu insgesamt 1439mm. Der entsprechende Ausschnitt aus dem Messprotokoll ist in Abbildung 4-14 zu sehen. Das gesamte Protokoll, in dem zusätzlich noch die Gleishöhenlage, die Gleisüberhöhung, die Pfeilhöhen links und rechts sowie die Gleisverwindung erfasst sind, ist in Anhang A8 abgelegt. Für den untersuchten Bereich zeigen diese Parameter keine Abweichungen von ihren Sollwerten.

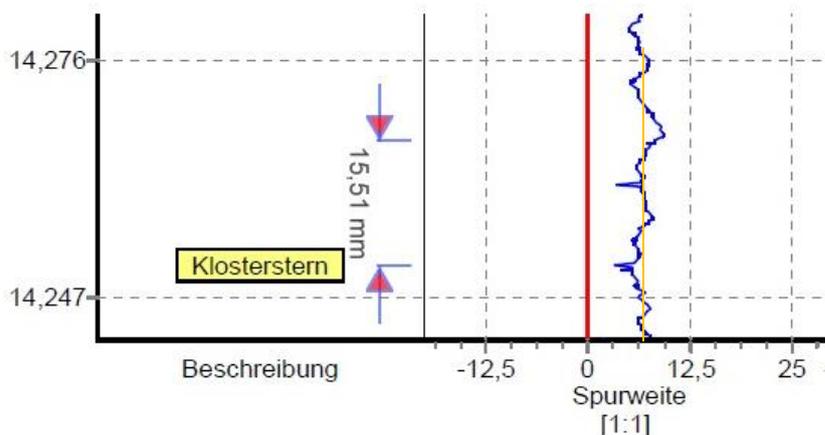


Abbildung 4-14 Messung der Spurerweiterung an Gleis 1 (HOCHBAHN)

Weiterhin ist durch Kontrollmessungen die mittlere Lage der Gleismitte zum Bahnsteig zu 1383mm festgestellt und ist damit gegenüber dem Sollwert von 1385mm um 2mm verringert.

Dafür ist die Lage der bahnsteigzugewandten Schiene bestimmt und ausgehend von der Sollspurweite von 1432mm die Gleismitte definiert worden. Die tatsächliche Spurmitte weicht jedoch aufgrund der Spurerweiterung von dieser Gleismitte ab.

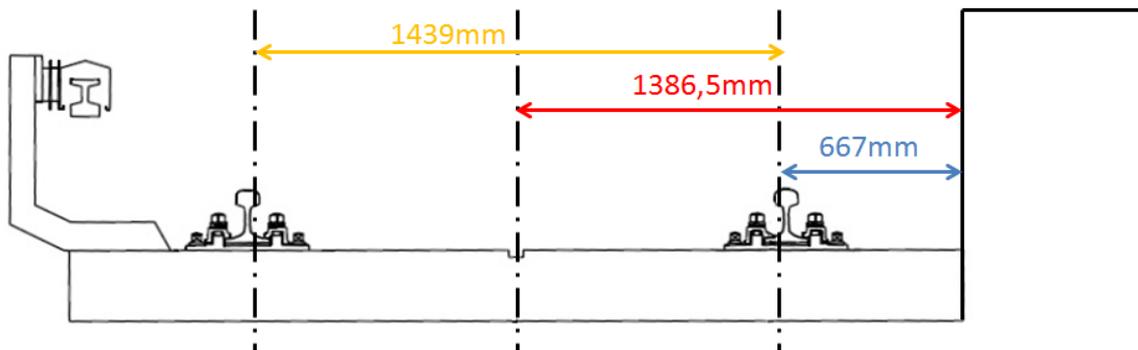
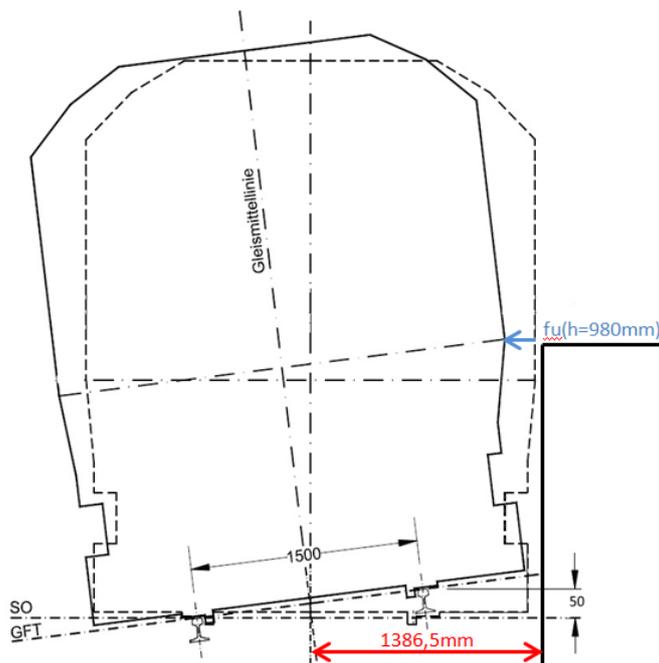


Abbildung 4-15 Ermittlung der tatsächlichen Spurmitte an Gleis 1(HOCHBAHN)

Der gemessene Abstand der bahnsteigzugewandten Schiene zu dem Bahnsteig von 667mm ergibt sich durch die Differenz der mittleren gemessenen Gleismitte von 1383mm und der halben Nennspurweite von 716mm. Damit ergibt sich mit der halben tatsächlichen Spurweite von 1439mm die Spurmitte in einem Abstand von 1386,5m zum Bahnsteig.

In Kapitel 3.2.5 wurde bereits genannt, dass das Lichtraumprofil bei einer Gleisüberhöhung mit dieser kippt und die Winkellage des Zuges daher in der Berechnung nicht weiter berücksichtigt ist. Die höhenabhängige Querverschiebung des Zuges durch die Gleisüberhöhung ist daher vorab durch eine Verschiebung der Gleismitte vom Bahnsteig weg korrigiert. Dafür wird gemäß der RUT mit Gleichung (4.1) die Fahrzeugausragung infolge von Überhöhung f_u für die Höhe $h=980mm$ bei einer Überhöhung $u=50mm$ bestimmt.



$$f_u = \frac{h}{1500mm} * u \quad (4.1)$$

$$f_u(h = 980mm, u = 50mm) =$$

$$\frac{980mm}{1500mm} * 50mm$$

$$= 32,7mm \approx 33mm$$

Abbildung 4-16 Korrektur der Gleisüberhöhung Gleis 1 (HOCHBAHN)

Der für die Berechnung mit dem nicht gekippten Lichtraumprofil zugrunde zu legende Abstand der Gleismitte zum Bahnsteig beträgt somit

$$1386,5mm + 33mm = 1419,5mm.$$

Da die Lichtraumberechnung die aktuelle gleisbogenradiusabhängige Erweiterung des Lichtraums berücksichtigt, ist diese zunächst von diesem Wert subtrahiert. Die Lichtraumerweiterung f_{ba} in Metern berechnet sich nach der RUT für einen Bogenradius von 196m in bogenäußerer Richtung nach (4.2).

$$f_{ba} = \frac{13,17}{r} = \frac{13,17}{196m} = 0,0672m \approx 67mm \tag{4.2}$$

Der anzunehmende Abstand der Spurmitte zu der Lichtraumumgrenzung beträgt schlussendlich 1352,5mm. Gleichzeitig ergibt sich das Spurspiel als Differenz von Spurweite S und Spurmaß s zu:

$$\sigma = S - s = 1439mm - 1422,9mm = 16,1mm \tag{4.3}$$

4.2.2 Bogenäußeres Gleis 2

Analog zu Gleis 1 werden auch für das bogenäußere Gleis 2 der für die Berechnung anzunehmende Abstand der Spurmitte zum Bahnsteig sowie das Spurspiel ermittelt. Im Haltestellenbereich liegt auch dieses Gleis in einem Übergangsbogen mit Radien zwischen 180m und 240m. In dem berechneten Bahnsteigabschnitt beträgt der Radius im Mittel 191m.

Für Gleis 2 ist eine mittlere Spurerweiterung von 5mm entsprechend der Messung in Abbildung 4-17 angenommen. Daraus ergibt sich eine tatsächliche Spurweite von 1437mm. Die vollständige Gleismessung ist in Anhang A9 zu sehen.

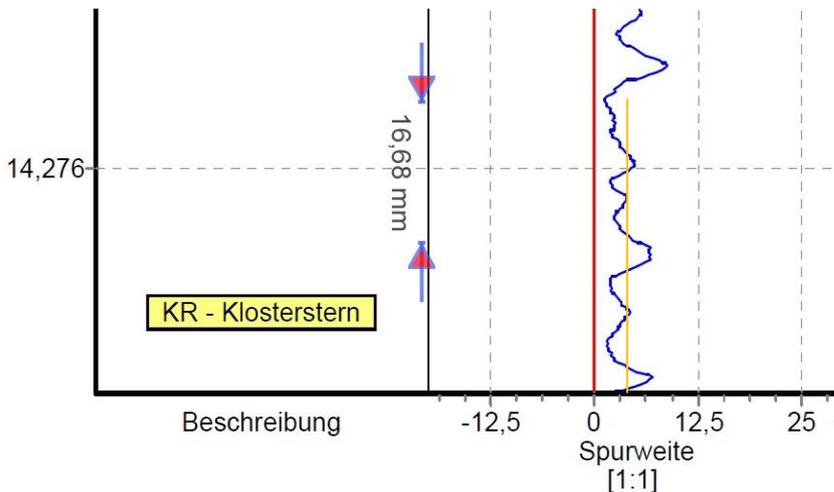


Abbildung 4-17 Messung der Spurerweiterung an Gleis 2 (HOCHBAHN)

Die Gleislage zum Bahnsteig beträgt in der Messung durchschnittlich 1419mm und liegt damit minimal unter dem Sollwert von 1420mm. Hiermit lässt sich nach demselben Vorgehen wie bei Gleis 1 entsprechend Abbildung 4-18 der Abstand der Spurmitte zum Bahnsteig zu 1421,5mm bestimmen.

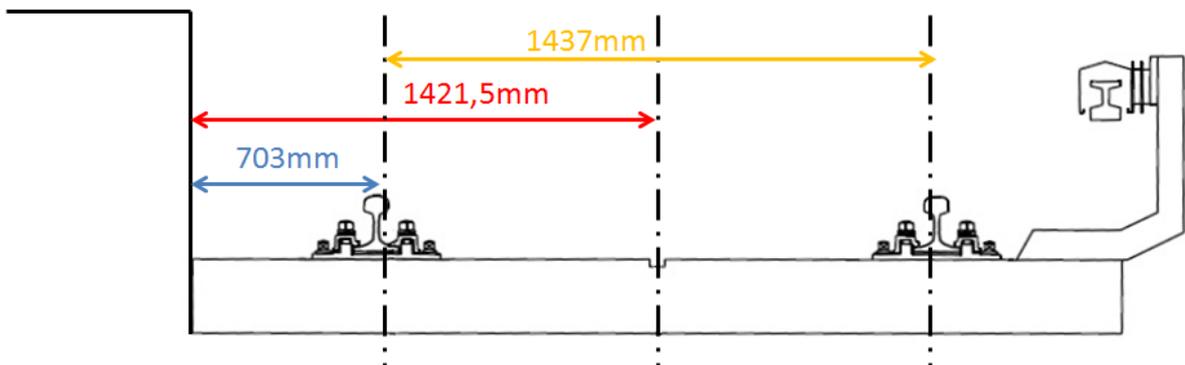


Abbildung 4-18 Ermittlung der tatsächlichen Spurmitte an Gleis 2 (HOCHBAHN)

Aufgrund der identischen Gleisüberhöhung von 50mm an Gleis 1 und Gleis 2 ist für den Betrag der Querverschiebung für die Korrektur des gekippten Fahrzeugs nach Abbildung 4-16 ebenfalls 33mm anzunehmen. Aufgrund der Tatsache, dass das Fahrzeug auf diesem bogenäußeren Gleis zu dem Bahnsteig geneigt ist, ist der Abstand der Spurmitte zum Bahnsteig um diesen Betrag reduziert. Dieser ergibt sich für die Berechnung eines nicht gekippten Gleises damit zu 1388,5mm. Nach Abzug der Lichtraumerweiterung in bogeninnere Richtung f_{bi} von

$$f_{bi} = \frac{6,68}{r} = \frac{6,68}{191m} = 0,035m = 35mm \quad (4.4)$$

ergibt sich der für die Berechnung anzunehmende Abstand der Lichtraumumgrenzung zu dem Bahnsteig zu 1353,5mm.

Das Spurspiel beträgt:

$$\sigma = S - s = 1437mm - 1422,9mm = 14,1mm \quad (4.5)$$

4.3 Berechnung der Spaltbreite

In Kapitel 3.4 wurde dargestellt, wie in Abhängigkeit der individuellen Fahrzeugparameter, der Parameter des Gleises sowie des verfügbaren Lichtraums die längsabhängige maximal mögliche Breite des Wagenkastens ermittelt wird. Der vorhandene Restspalt zwischen der Bahnsteigkante und dem Fahrzeug ergibt sich abhängig von der Längskoordinate als Differenz der theoretischen maximalen Wagenkastenbreite und der tatsächlichen Wagenkastenbreite. Voraussetzung dafür ist, dass die Bahnsteigkante und die der Berechnung zugrunde gelegte Lichtraumumgrenzung denselben Abstand zur Gleismitte aufweisen.

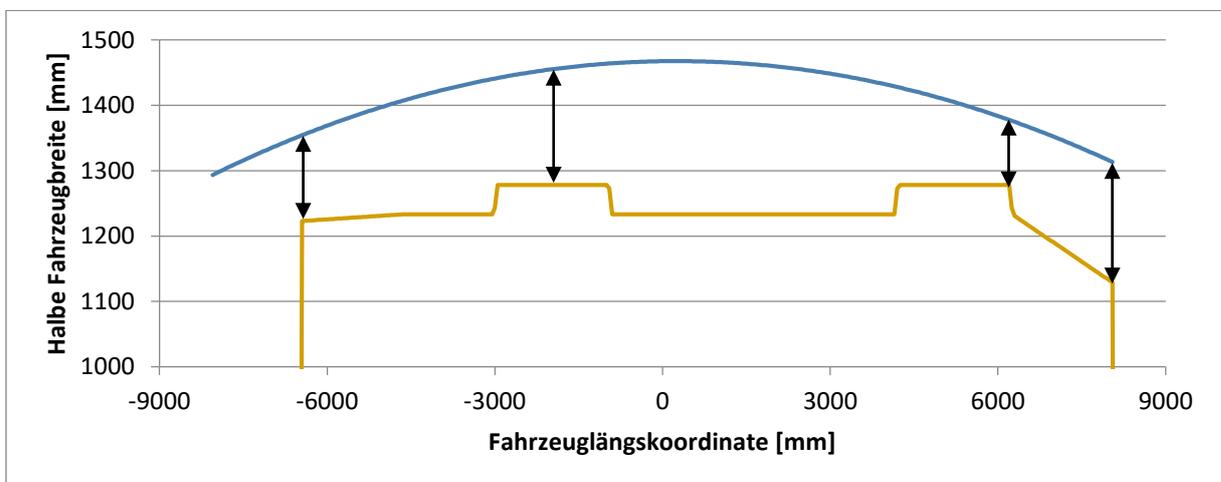


Abbildung 4-19 Berechnung des Restspaltes an Gleis 1

Exemplarisch ist diese Methodik in Abbildung 4-19 gezeigt. Die blau dargestellte Kurve zeigt die parameterabhängige maximale Fahrzeugbreite in bogenäußere Richtung und ist entsprechend der Abbildung 3-6 entstanden. In Gelb ist die aus Abbildung 4-11 bekannte tatsächliche halbe Wagenkastenbreite des Wagens 1/4 des Fahrzeugs DT4.3-6 zu sehen. Die schwarzen Pfeile zeigen den Restspalt, der sich in Abhängigkeit der Fahrzeuflängskoordinate zwischen dem Fahrzeug und dem Bahnsteig einstellt.

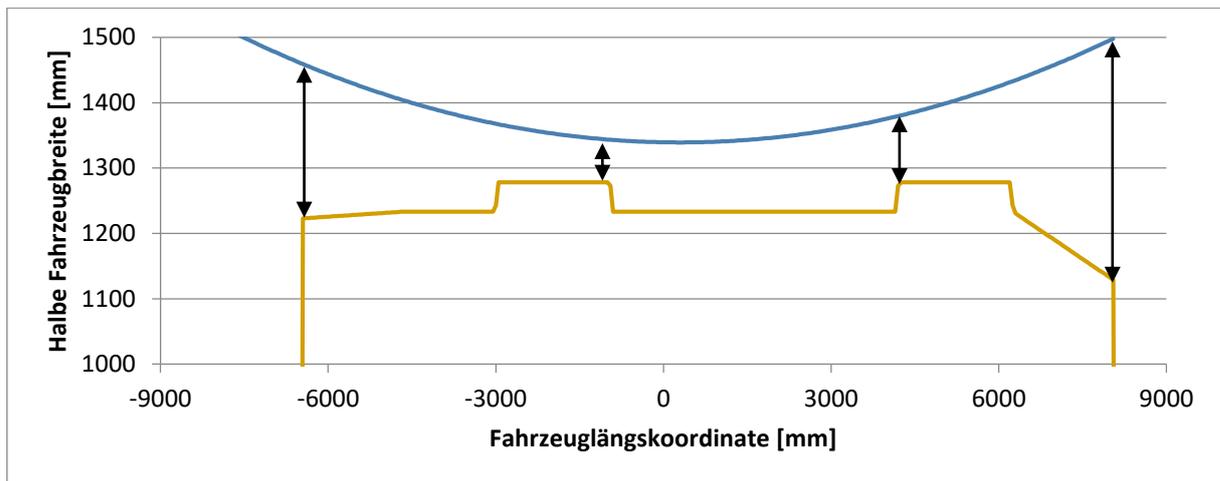


Abbildung 4-20 Berechnung des Restspaltes an Gleis 2

Abbildung 4-20 zeigt die Berechnung des Restspaltes in bogeninnere Richtung an Gleis 2. Die blaue Linie der maximalen Fahrzeugbreite ist wie Abbildung 3-7 entstanden.

Ziel der Berechnung der Spaltbreite ist es zunächst die durchschnittlichen minimalen Spaltbreiten in der Praxis nachzubilden und mit den tatsächlich gemessenen Spaltbreiten abzugleichen. Dafür sind bereits die anzunehmenden Parameter der Gleisinfrastruktur ermittelt. Für die Bestimmung der Fahrzeugparameter sind weitere Annahmen nötig. Die zufälligen Fahrzeugparameter sind Bau- und Einstelltoleranzen, die als normalverteilt angenommen sind. Daher kommen sie bei der Berechnung der durchschnittlichen Spaltbreiten nicht zum Tragen und sind zu Null gesetzt. Verbleibende anzunehmende Einflussparameter sind die Fahrzeugstellung im Gleis aufgrund des Spurspiels, das Radsatzlagerspiel, die Querverschiebungen in der Primär- und Sekundärfederstufe sowie die Fahrgeschwindigkeit, die sich auf das Wankverhalten des Fahrzeugs auswirkt.

Aufgrund der Vielzahl an Parameterkombinationen ist eine Parametervariation durchgeführt. Für diese Betrachtung sind folgende Faktoren betrachtet:

- Kopfwagen 1/4 und Mittelwagen 2/3
- Baureihe DT4.1 und DT4.6
- 15 Fahrzeugstellungen im Gleis
- 3 definierte Betriebszustände (neutral, stehend, fahrend)
- 6 Parametervariationen

Insgesamt ergeben sich mit diesen berücksichtigten Parameterwerten 1080 Spaltbreiten zwischen Wagen und Bahnsteig. Darin enthalten sind alle denkbaren Kombinationen. Von diesen sind die meisten für diese Untersuchung wegen der möglichst praxisnahen Abbildung jedoch nicht relevant und müssen daher nicht im Detail geprüft werden.

4.3.1 Fahrzeugstellungen in der Haltestelle

Die Fahrzeugstellung im Gleis stellt eine wesentliche Annahme für die Berechnung des Restspaltes zwischen Fahrzeug und Bahnsteig dar. Neben dem direkten Einfluss durch die Querverschiebung aufgrund des Spurspiels ist sie auch herangezogen, um die Wirkrichtung weiterer fahrzeugtechnischer Einflüsse zu definieren.

Der Vollständigkeit halber sind verschiedene Fahrzeugstellungen, unabhängig von ihrer tatsächlichen Auftretenswahrscheinlichkeit, in der Parametervariation berücksichtigt. In Kapitel 2.2.4 wurden bereits verschiedene Fahrzeugstellungen, wie sie auch in dem Lichtraumnachweis nach der BOStrab angenommen sind, gezeigt. Diese zwei Spießgangstellungen und zwei Sehnenstellungen sind um eine Neutrallage, in der sich beide Drehgestelle in Spurmitte befinden, ergänzt.

Bei diesen fünf Fahrzeugstellungen sind immer beide Radsätze eines Drehgestells identisch ausgerichtet. Sie befinden sich also entweder beide in der Spurmitte im Freilauf oder laufen beide an derselben Fahrschienenkante an. Die einzelnen Drehgestelle können jedoch auch selbst im Spießgang stehen, wodurch beide Radsätze eines Drehgestells an unterschiedlichen Schienenfahrkanten anlaufen. Dieser Zustand wird im Folgenden die Gierstellung des Laufdrehgestells oder des Triebdrehgestells genannt. Dies ist nötig, da eine praxisnahe Berechnung des Fahrzeugs gewünscht ist und diese Fahrzeugstellungen im Fahrbetrieb erfahrungsgemäß auftreten. Daneben ist speziell die Betrachtung der Gierstellung des Laufdrehgestells aufgrund der großen Exzentrizität durch die Kupplungsstange von Interesse für die Lichtraumbetrachtungen. Die Auswirkung auf die Querverschiebung des Anlenkpunktes am Wagenkasten durch eine Spießgangstellung des Laufdrehgestells mit der Kupplungsstange zeigt Abbildung 4-21 schematisch.

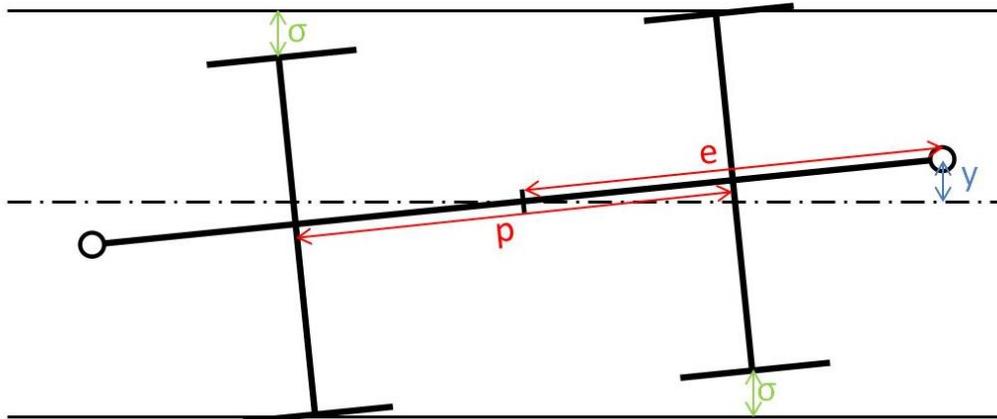


Abbildung 4-21 Auswirkung der Spießgangstellung des Laufdrehgestells auf den Anlenkpunkt

Der Querverschiebung des Anlenkpunktes y lässt sich mithilfe des Spurspiels σ , dem Achsabstand p sowie der Exzentrizität e mit (4.6) berechnen.

$$y = \sigma * \frac{e}{p} \quad (4.6)$$

Für den DT4 ermittelt sich beispielsweise mit einem Spurspiel σ von 14,1mm, dem Achsabstand p im Laufdrehgestell von 2550mm sowie der Exzentrizität e von 2200mm eine Querverschiebung

$$y = 14,1\text{mm} * \frac{2200\text{mm}}{2550\text{mm}} = 12,2\text{mm}$$

Die Gierstellung des Triebdrehgestells bewirkt aufgrund der zentralen Lage des Drehzapfens keine Querverschiebung des Anlenkpunktes. Dennoch wirkt sich die Gierstellung in der Berechnung auf den Lichtraumbedarf des Gesamtfahrzeugs aus, da sich die Wirkrichtung weiterer fahrzeugtechnischer Einflüsse an ihr orientiert. Für die weitere Berechnung ist dabei die Lage des vorlaufenden Radsatzes ausschlaggebend. Eine Spießgangstellung, in der der vorlaufende Radsatz an der bogenäußeren Schiene anläuft, bewirkt, dass abhängige Einflussparameter ebenfalls in bogenäußere Richtung wirken. Ein vorlaufender Radsatz an der bogeninneren Schiene führt entsprechend zu einer zum Gleisbogenmittelpunkt gerichteten Wirkrichtung der abhängigen Einflussparameter.

In Kapitel 3.4 wurde bereits genannt, dass in der Realisierung der Berechnung in Microsoft Excel die Parameter $st1$ und $st2$ die Stellung der Drehgestelle im Gleis definieren. Mit den Werten +1, 0 oder -1 beschreiben sie die äußere Sehnenstellung, die neutrale Stellung in Spurmitte oder die innere Sehnenstellung des Drehgestells. Für die Beschreibung der Gierstellung genannten Spießgangs eines Drehgestells, ist für Triebdrehgestell der Parameter TG und für das Laufdrehgestell der Parameter LG eingeführt. Für das

Triebdrehgestell dient das Vorzeichen des Parameters aufgrund der zentralen Lage des Drehzapfens, lediglich als Hinweis auf die Wirkrichtung der abhängigen Einflussparameter. Für das Laufdrehgestell gibt er zusätzlich die Querverschiebungsrichtung des exzentrischen Anlenkpunktes an. Bei einem positiven Wert steht das Laufdrehgestell so im Gleis, dass der Anlenkpunkt in bogenäußere Richtung, bei einem negativen Wert in bogeninnere Richtung verschoben wird.

Insgesamt ergeben sich aus dieser Variation 15 Fahrzeugstellungen pro Wagenkasten, die in Anhang A10 schematisch dargestellt sind. Das Auftreten der in Kapitel 2.2.4 vorgestellten Fahrzeugstellungen ist bereits mit möglichen Betriebsfällen verknüpft. Bei der Betrachtung des Fahrzeugs DT4 in der Haltestelle Klosterstern ist jedoch nicht jeder dieser Betriebsfälle zu berücksichtigen. Daraus ergibt sich, dass ebenfalls nicht alle der 15 untersuchten Fahrzeugstellungen für die praxisnahe Abbildung des Restspalts relevant sind und in der Auswertung betrachtet werden müssen. Für die Beurteilung ist der bereits genannte Ansatz, jedes Drehgestell als Einzelfahrzeug zu betrachten, verfolgt.

Die äußere Sehnenstellung (+) erfordert hohe Kräfte in bogenäußere Richtung, die über den Wagenkasten in das Drehgestell eingeleitet werden. Da es sich um eine Tunnelhaltestelle handelt, in deren Mitte das Fahrzeug zum Stehen kommt, ist weder mit Seitenwind noch mit hohen Fliehkräften zu rechnen. Daher stellen Fahrzeugstellungen, in denen mindestens eines der Drehgestelle in der äußeren Sehnenstellung (+) ist, keinen relevanten Betriebsfall dar.

Die Neutralstellung des Fahrzeugs stellt eine Referenz dar. Die Drehgestelle befinden sich in Spurmitte und sind entlang daran ausgerichtet. Ausgehend von der Neutralstellung wird der tatsächliche Einfluss auf die Änderung der Spaltbreite durch Veränderung der Fahrzeugstellung oder anderer Einflussfaktoren sichtbar. Die Definition der Fahrzeugstellung des Wagen 1 in dem Parametersystem der Berechnung lautet aufgrund der neutralen Stellungen der Drehgestelle: $st1=0$; $st2=0$; $TG=0$; $LG=0$

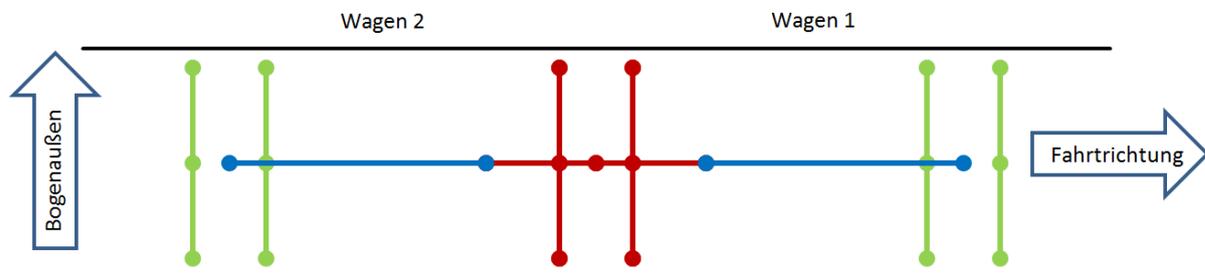


Abbildung 4-22 Neutrale Fahrzeugstellung DT4-Halbzug

Im Haltestellenbereich ist die bogenäußere Schiene um 50mm gegenüber der bogeninneren erhöht. Diese Überhöhung bewirkt eine auf das Fahrzeug wirkende Hangabtriebskraft in Richtung der Gleisbogenmitte. Unter dieser Kraft ist bei einem anhaltenden oder stehenden Fahrzeug ein seitliches Gleiten der Radsätze abwärts bis an die bogeninnere Schiene denkbar. Die entstehende innere Sehnenstellung (-) in Abbildung 4-23 ist daher eine zu betrachtende Fahrzeugstellung, die insbesondere in bogeninnere Richtung einen lichtraumkritischen Fall darstellt. Die Parameter der Fahrzeugstellung für Wagen 1 lauten: $st1=-1$; $st2=-1$; $TG=0$; $LG=0$

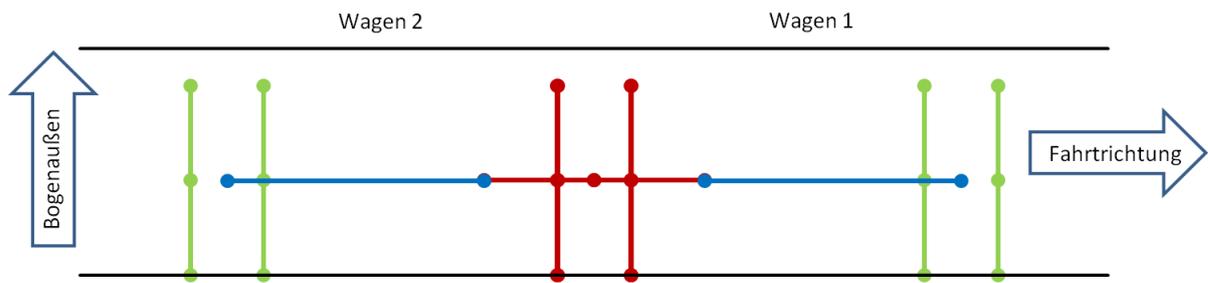


Abbildung 4-23 Innere Sehnenstellung DT4-Halbzug

Die erfahrungsgemäß häufigste Stellung in engen Gleisbögen ist ein Spießgang. Der Gleisbogenradius von 200m im untersuchten Gleisabschnitt in Kombination mit der geringen äquivalenten Konizität der HOCHBAHN-Profilpaarung untermauern diese Annahme. Diese Annahme gilt für jedes Drehgestell des gesamten Fahrzeugverbandes separat. Abbildung 4-24 zeigt, wie jedes Drehgestell mit dem vorlaufenden Radsatz an der bogenäußeren und mit dem nachlaufenden an der bogeninneren Schiene anläuft. Die Parameter der Fahrzeugstellung lauten: $TG=1$; $LG=1$

Die Parameter st_1 und st_2 werden in diesem Fall von den Parametern TG und LG überlagert, sodass ihr Wert keinen direkten Einfluss auf die Fahrzeugstellung hat. Es muss jedoch bedacht werden, dass die Wirkrichtung weiterer fahrzeugtechnischer Einflüsse anhand dieser Parameter definiert wird, wodurch ihre Wahl nicht beliebig ist.

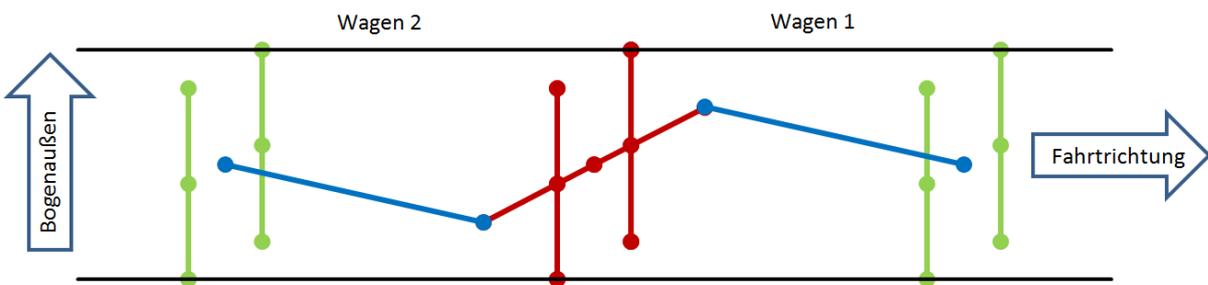


Abbildung 4-24 Spießgangstellung DT4-Halbzug

Bei dieser Auswahl der möglichen genauer zu betrachtenden Fahrzeugstellungen bleibt die Tatsache zu berücksichtigen, dass in einem DT4-Fahrzeug der Kopf- und Mittelwagen jeweils in beiden Fahrtrichtungen gekoppelt sind. Für die neutrale Fahrzeugstellung sowie die innere Sehnenstellung ergeben sich daraus keine Änderungen des Lichtraumbedarfs. Für die richtungsabhängige Spießgangstellung wird dieser Umstand durch eine gedachte Änderung der Fahrtrichtung bei der Beurteilung der auftretenden Fahrzeugstellungen berücksichtigt. Abbildung 4-25 zeigt die Drehgestellstellung des nachlaufenden DT4-Halbzugs. Die Parameter der Fahrzeugstellung für Wagen 4 lauten in diesem Fall: $TG=-1$; $LG=-1$

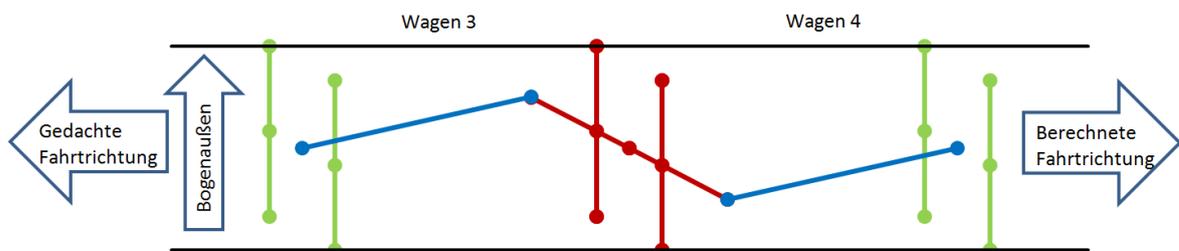


Abbildung 4-25 Spießgangstellung des nachlaufenden DT4-Halbzugs

Die längsabhängige Spaltbreite für den Wagen 1 am bogeninneren Gleis 1 ist in der soeben gezeigten neutralen Fahrzeugstellung, der inneren Sehnenstellung und der Spießgangstellung ohne Berücksichtigung weiterer Einflussgrößen in Abbildung 4-26 zu sehen.

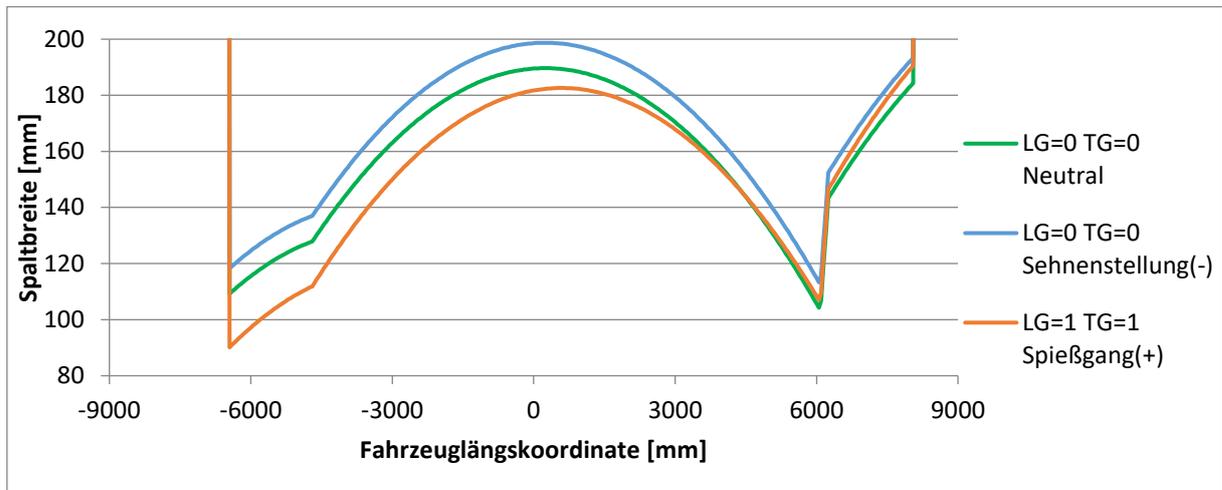


Abbildung 4-26 Spaltbreitenveränderung durch Fahrzeugstellung von Wagen 1 eines DT4.1 an Gleis 1

	LG=0 TG=0 Neutral	LG=0 TG=0 Sehnenstellung(-)	LG=1 TG=1 Spießgang(+)
Minimale - Spaltbreite [mm]	104,25	113,30	90,11
Längskoordinate x	6050,00	6050,00	-6450,00

Die grüne Kurve zeigt die Stellung in Spurmitte. An beiden Enden kommt es durch die Überhänge des Wagenkastens zu einer Verengung des Spalts, die insbesondere im Kopfbereich ab 6000mm mit der Verjüngung des Wagenkastens und dem Beginn der seitlichen Trittleiste überlagert ist. Im mittleren Bereich ergibt sich durch die Ausragung des Fahrzeugs in bogeninnere Richtung auf der bogenäußeren Seite eine hohe Spaltbreite. Mit der blauen Kurve der inneren Sehnenstellung ist zu sehen, wie der Spalt zum bogenaußen gelegenen Bahnsteig konstant um das halbe Spurbreite vergrößert ist, wenn das Fahrzeug an die bogeninneren Fahrschiene verschoben ist. Die orange Kurve beschreibt den Fall, dass beide Drehgestelle im Spießgang stehen. Im Bereich des Drehzapfens am Triebdrehgestell bei 4450mm ist erkennbar, dass dieser durch seine zentrale Lage bei einem Gieren des Drehgestells keine Querverschiebung erfährt und daher, wie die Neutralstellung, in Spurmitte liegt. Das Gieren des Laufdrehgestells bewirkt durch die Exzentrizität eine große Querverschiebung in bogenäußere Richtung, die somit den Spalt zum Bahnsteig verringert.

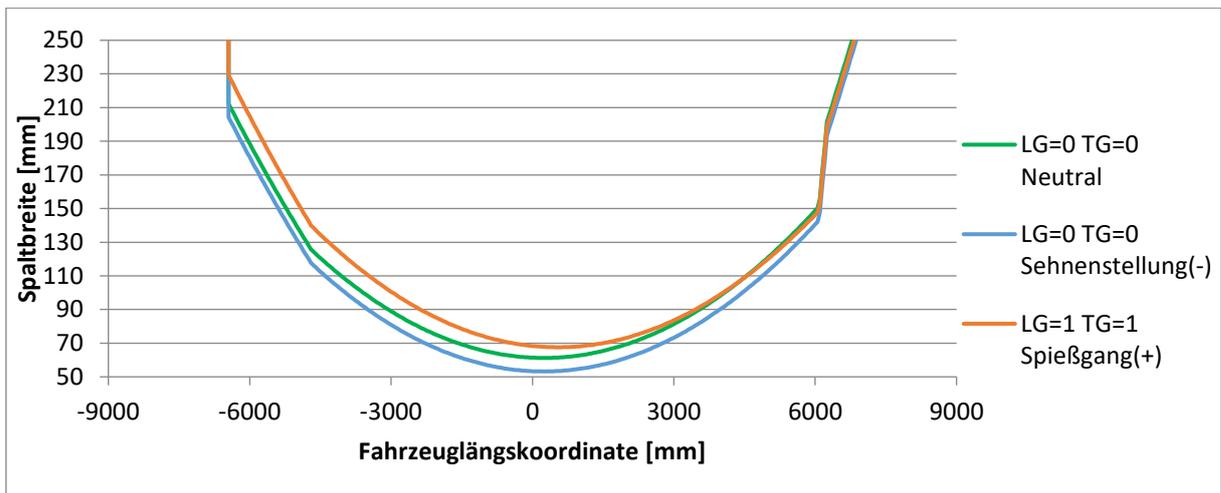


Abbildung 4-27 Spaltbreitenveränderung durch Fahrzeugstellung von Wagen 1 eines DT4.1 an Gleis 2

	LG=0 TG=0 Neutral	LG=0 TG=0 Sehnenstellung(-)	LG=1 TG=1 Spießgang(+)
Minimale - Spaltbreite [mm]	61,24	53,19	67,57
Längskoordinate x	250,00	250,00	550,00

Abbildung 4-27 zeigt, wie sich dieselben Fahrzeugstellungen für dasselbe Fahrzeug auf den Bahnsteigspalt am bogenäußeren Gleis auswirken. Die Engstellen zwischen Fahrzeug und Bahnsteig, der nun auf der bogeninneren Seite des Fahrzeugs liegt, befindet sich in der Mitte des Fahrzeugs zwischen den Anlenkpunkten, während sich an den Fahrzeugenden durch die nach außen ragenden Fahrzeugüberhänge große Spaltbreiten einstellen. Die innere Sehnenstellung bewirkt bei dieser inneren Bahnsteiglage eine Verringerung der Spaltbreite gegenüber der Neutralstellung. Das Gieren des Laufdrehgestells führt mit seiner Querverschiebung in bogenäußere Richtung zu einem vergrößerten Bahnsteigspalt in dem Bereich des Anlenkpunktes.

4.3.2 Fahrzeugbetriebszustände

Für die Untersuchung sind drei Betriebszustände des Fahrzeugs definiert, anhand derer sich die Ausprägung der einzelnen Fahrzeugparameter orientiert. Die getroffenen Annahmen der Auswirkung einzelner Fahrzeugparameter sind dabei mit Unsicherheiten verbunden.

Der erste Betriebszustand ist die neutrale Lage. In dieser quasi Nulllage sind die freien Wege und die Federwege in der Konstruktionslage. Der zweite Betriebszustand beschreibt das stehende Fahrzeug mit der durch die Gleisüberhöhung wirkenden Hangabtriebskraft und der dritte Betriebszustand die Ausfahrt bei maximal erreichbarer Geschwindigkeit.

Für alle Betriebszustände ist eine Besetzung des Fahrzeugs mit mittlerer Last nach BOStrab angenommen. Aufgrund der bei der BOStrab maximal zugrunde gelegten Nutzlast von 5000N/m² im Stehflächenbereich (§ 33 Abs. 2 BOStrab) entspricht dies bereits einem deutlich besetzten Fahrzeug. Die massenabhängigen Fahrzeugparameter der Federsteifigkeiten und Schwerpunktlagen sind an diese Fahrzeugbesetzung angepasst. Die Verteilung der Masse im Wagenkasten ist an der Massenverteilung des vollbesetzten Fahrzeugs orientiert, bei der zwei Drittel der Fahrzeugmasse auf dem Triebdrehgestell und ein Drittel der Fahrzeugmasse auf dem Laufdrehgestell liegen.

Die neutrale Lage berücksichtigt lediglich Auswirkungen auf den Restspalt, die sich aus der bogengeometrische Ausragung und den unterschiedlichen Fahrzeugstellungen im Rahmen des Spurspiels ergeben. Die Radsatzlager, die Primärfederstufe sowie die Sekundärfederstufe sind nicht ausgelenkt, womit auch kein Wanken des Fahrzeugs vorliegt.

Für das an der Haltestelle stehende Fahrzeug sind neben der bogengeometrischen Ausragung und der Fahrzeugstellung auch die Auswirkungen der Spiele, der freien- und Federwege auf die Spaltbreite berücksichtigt. Im Detail handelt es sich dabei

- um das Achslagerspiel. Das Achslagerspiel wirkt an beiden Radsätzen eines Drehgestells in derselben Richtung, wie es die Stellungsparameter $st1$ und $st2$ des Drehgestells vorgeben. In der inneren Sehnenstellung führt das Achslagerspiel somit zu einer weiteren Verschiebung in bogeninnere Richtung und in der äußeren Sehnenstellung in bogenäußere Richtung. In neutraler Drehgestellstellung befinden sich auch die Achslager in Mittellage. Das Achslagerspiel beträgt $\pm 1\text{mm}$.
- um die Querverschiebung in der Primärfeder. Diese wirkt wie das Achslagerspiel entsprechend der inneren oder äußeren Stellung des Drehgestells. Der angenommenen Wert beträgt wegen der hohen Steifigkeit des Federelements $\pm 0,5\text{mm}$.
- um die Querverschiebung durch freien Weg in der Drehzapfenanbindung am Triebdrehgestell. Dieser wirkt ebenfalls entsprechend der inneren oder äußeren Stellung des Drehgestells. Der freie Weg beträgt $\pm 1\text{mm}$.
- um den freien Weg in der Querführung der Kupplungsstange am Laufdrehgestell. Dieser freie Weg stellt sich entsprechend der Gierstellung LG des Laufdrehgestells ein. Die Verdrehung der Kupplungsstange und damit die Querverschiebung des Anlenkpunktes am Wagenkasten werden damit verstärkt. Der freie Weg bis zum Queranschlag beträgt $\pm 1\text{mm}$.
- um die quasistatische Querverschiebung der Drehzapfenanlenkung im Triebdrehgestell in den Querpuffer. Die wirkende Kraft in diese Richtung ist die Hangabtriebskraft zur Gleisbogenmitte. Die Höhe der Querverschiebung ist aus den auftretenden Kräften und der Federkennlinie des Querpuffers bestimmt.
- um die quasistatische Querverschiebung der Kupplungsstange im Laufdrehgestell in den Querpuffer. Die wirkende Kraft in diese Richtung ist die Hangabtriebskraft zur Gleisbogenmitte. Die Höhe der Querverschiebung ist aus den auftretenden Kräften und der Federkennlinie des Querpuffers bestimmt.
- um ein zusätzliches Wanken des Wagenkastens durch die Schwerpunktverlagerung infolge der Gleisüberhöhung. Die direkte Querverschiebung durch Krängung des Fahrzeugs aufgrund der Überhöhung ist in der Ermittlung der Gleislage zum Bahnsteig in Kapitel 4.2 berücksichtigt. Der Wankwinkel ist aus der aus der Gleisüberhöhung resultierenden Querbeschleunigung berechnet.

Im dritten Fall des fahrenden Fahrzeugs wirkt zusätzlich eine Querbeschleunigung, welche infolge der Gleisüberhöhung reduziert ist. Die Auswirkung der kraftabhängigen Einflussparameter ändert sich damit infolge des Fliehkraftüberschusses zu

- einer quasistatischen Querverschiebung der Drehzapfenanlenkung im Triebdrehgestell in den Querpuffer in Richtung der resultierenden Fliehkraft. Die Höhe der Querverschiebung ist aus dem resultierenden Fliehkraftüberschuss und der Federkennlinie des Querpuffers bestimmt.
- einer quasistatischen Querverschiebung der Kupplungsstange im Laufdrehgestell in den Querpuffer in Richtung der resultierenden Fliehkraft. Die Höhe der Querverschiebung ist aus dem resultierenden Fliehkraftüberschuss und der Federkennlinie des Querpuffers bestimmt.
- einem Wanken des Wagenkastens in bogenäußere Richtung. Der Wankwinkel ist aus der resultierenden Querbeschleunigung berechnet.

Die angenommene Geschwindigkeit des fahrenden Fahrzeugs ergibt sich aus der Tatsache, dass die Messstelle der Vergleichsdaten mittig am Bahnsteig liegt. Da im regulären Fahrbetrieb zwei DT4-Fahrzeuge gekoppelt fahren, befindet sich im Stillstand an der

Haltestelle somit auf jeder Seite der Messstelle ein komplettes DT4-Fahrzeug. Unter der Annahme der maximalen Beschleunigung und einer Fahrzeuglänge von 60m ergibt sich damit beim Passieren des letzten Fahrzeugteils an der Messstelle eine Ausfahrgeschwindigkeit von ca. 40km/h.

4.4 Variationen der durchschnittlichen minimalen Spaltbreite

In Kapitel 4.3.2 wurden die berücksichtigten fahrzeugtechnischen Einflussparameter mit ihrer Abhängigkeit von der Stellung im Gleis, der Hangabtriebskraft und des Fliehkräfteüberschusses vorgestellt. Wie stark und reproduzierbar sich diese Parameter im Fahrbetrieb unter dem Einfluss von innerer Reibung, Losbrechkräften, unterschiedlichem Brems- und Beschleunigungsverhalten oder anderen betrieblichen Variationen tatsächlich ausprägen, ist nicht genau vorherzusagen. Mit einer Parametervariation lässt sich stufenweise die Entwicklung des Lichtraumbedarfs und der resultierenden Spaltbreite über die zunehmende Berücksichtigung der Einflussparameter nachvollziehen. Dabei zeigt sich auch die Signifikanz der einzelnen Einflussgrößen.

Die auftretenden Wankwinkel sowie die quasistatischen Verschiebungen in der Sekundärfederstufe sind über eine Betrachtung der Kräfte abgeschätzt. Bei der Berechnung der auftretenden Flieh- und Hangabtriebskräfte reicht die Berücksichtigung der Wagenkastenmasse aus. Aufgrund der Lage der Wankpole der Primärfederstufe führen die Drehgestellmassen zu keinem vergrößerten Wankwinkel. Eine quasistatische Querverschiebung in der Primärfederstufe durch die auftretenden Fliehkräfte ist aufgrund der sehr hohen Steifigkeit der Rollfeder vernachlässigbar klein. Mit der Gleichung (4.7), die die resultierende Querbeschleunigung abhängig von der Fahrgeschwindigkeit, dem Gleisbogenradius und der Reduzierung infolge der Gleisüberhöhung ergibt, und der Gleichung (4.8) aus den Lichtraum-Richtlinien ergibt sich die auftretende Querkraft.

$$a_q = \frac{v^2}{3,6^2 * r} - g * \frac{u}{m} \quad (4.7)$$

$$F_q = m_W * a_q \quad (4.8)$$

Mit der angenommenen Massenverteilung im Wagenkasten teilt sich auch die wirkende Querkraft auf die beiden einzelnen Anlenkpunkten der Drehgestelle im selben Verhältnis auf. Im Anlenkpunkt des Triebdrehgestells ergibt sich diese nach Gleichung (4.9) und im Anlenkpunkt des Laufdrehgestells nach Gleichung (4.10).

$$F_{qTG} = \frac{2}{3} * F_q \quad (4.9)$$

$$F_{qLG} = \frac{1}{3} * F_q \quad (4.10)$$

Die resultierende Querbeschleunigung wird vereinfachend mit gleichen Beträgen für das stehende und das fahrende Fahrzeug angenommen. Für das bogenäußere Gleis 2 ergeben sich folgende Zahlenwerte, die auch für Gleis 1 angenommen werden.

$$a_{q0km/h} = \frac{0km/h^2}{3,6^2 * 191m} - 9,81 \frac{m}{s^2} * \frac{50mm}{1500mm} = -0,327 \frac{m}{s^2} \approx -0,33 \frac{m}{s^2}$$

$$a_{q40km/h} = \frac{40km/h^2}{3,6^2 * 191m} - 9,81 \frac{m}{s^2} * \frac{50mm}{1500mm} = 0,319 \frac{m}{s^2} \approx 0,33 \frac{m}{s^2}$$

Mit der Gleichung (4.9) ergibt sich die am Triebdrehgestell wirkenden Querkraft zu

$$F_{qTG} = \frac{2}{3} * 17350kg * 0,33 \frac{m}{s^2} = 3817N$$

und entsprechend für das Laufdrehgestell mit Gleichung (4.10) zu

$$F_{qLG} = \frac{1}{3} * 17350kg * 0,33 \frac{m}{s^2} = 1908,5N$$

Mithilfe der im Anhang A5 gegebenen Federkennlinien der Querpuffer und den ermittelten Kräften lässt sich die quasistatische Querverschiebung für das stehende und das fahrende Fahrzeug bestimmen. Diese liegt in der Sekundärstufe des Triebdrehgestells bei 7mm und bei der Kupplungsstange im Laufdrehgestell bei 8mm.

4.4.1 Variation 1: Fahrzeugwanken

In dieser ersten Variation ist der Einfluss des Spurspiels inklusive eines Spurkranzverschleißes von 1mm auf die Fahrzeugstellung mit einer Wankbewegung infolge der auftretenden Hangabtriebskraft beziehungsweise der resultierenden Fliehkraft überlagert. Die folgenden Abbildungen zeigen den Kopfwagen 1/4 der Baureihe DT4.1 – DT4.2, die auf Bahnsteighöhe mit einer durchgehenden Trittleiste ausgerüstet ist. Die Baureihe DT4.3 – DT4.6 sowie die Mittelwagen 2/3 sind ebenfalls betrachtet, sind jedoch nur bei Bedarf dargestellt.

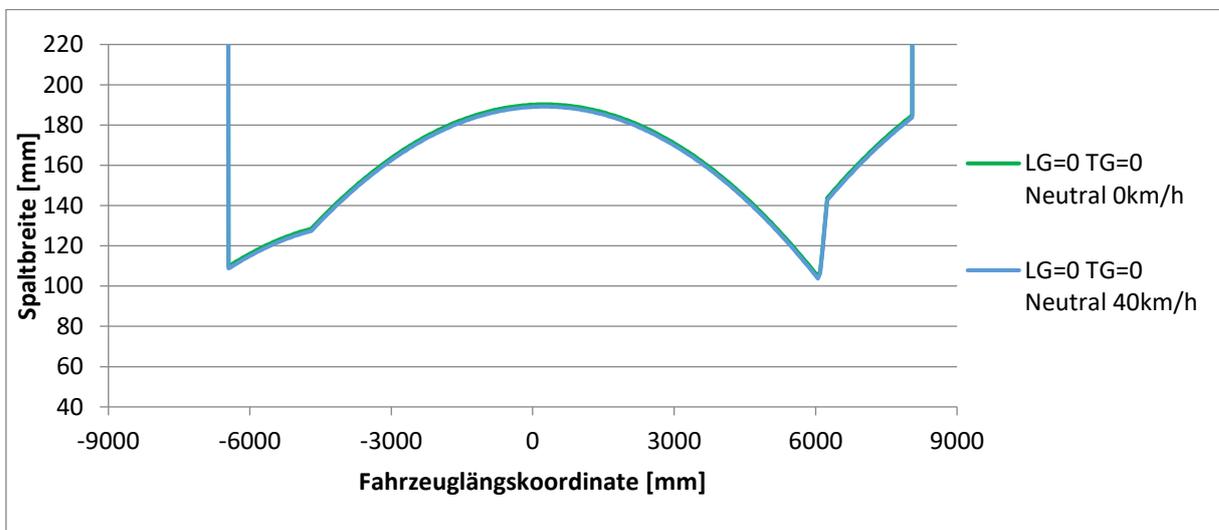


Abbildung 4-28 Variation 1: DT4.1 Wagen 1 an Gleis 1 Einfluss des Fahrzeugwankens

	LG=0 TG=0 Neutral 0km/h	LG=0 TG=0 Neutral 40km/h
Minimale - Spaltbreite [mm]	104,84	103,71
Längskoordinate x	6050,00	6050,00

Abbildung 4-28 zeigt, wie sich die Wankbewegung des Fahrzeugs auf die Spaltbreite zur Bahnsteigkante an Gleis 1 auswirkt. Die grün dargestellte Kurve beschreibt die minimal größere Spaltbreite zum Bahnsteig bei einem stehenden Fahrzeug, die durch das Wanken in bogeninnere Richtung aufgrund der wirkenden Hangabtriebskraft entsteht. Mit der blauen Kurve des fahrenden Fahrzeugs ergeben sich minimal kleinere Spaltbreiten aufgrund der Wankbewegung durch die Fliehkraft, welche in bogenäußere Richtung zum Bahnsteig gerichtet ist. Die beiden äquidistanten Kurven weisen jedoch lediglich einen Abstand von ca. 1,2mm auf. Diese geringe Querverschiebung infolge des Fahrzeugwankens ergibt sich durch die Lage der Wankpole, deren Höhen mit 442mm in der Primärstufe und 772mm in der Sekundärstufe nicht sehr stark von der untersuchten Fahrzeughöhe von 980mm abweichen.

Wie bereits im Kapitel 4.3.1 erläutert wurde, sind für die Abbildung der realen Spaltbreiten mit der Neutralstellung, der inneren Seihenstellung, der vorwärtsfahrenden Spießgangstellung und der rückwärtsfahrenden Spießgangstellung vier Fahrzeugstellungen für die Untersuchung von Interesse. Für eine weitere Reduzierung der zu betrachtenden

Fahrzeugzustände wird das Fahrzeug fortan an Gleis 1 im fahrenden Zustand und an Gleis 2 im stehenden Zustand betrachtet. Die resultierende Querkraft aus Fliehkraft und Hangabtriebskraft ist somit in beiden Fällen zum Bahnsteig gerichtet und führt damit zu den geringsten Spaltbreiten. Für das stehende Fahrzeug an Gleis 2 sind die vier genannten Fahrzeugstellungen jeweils dargestellt. Für das fahrende Fahrzeug an Gleis 1 ist die innere Seitenstellung wegen der nicht vorhandenen Erklärbarkeit des praktischen Auftretens nicht dargestellt.

Die minimal auftretende Spaltbreite jeder Fahrzeugstellung aus Abbildung 4-29 ist mit ihrer Lage am Fahrzeug in der anschließenden Tabelle dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Lage der lichtraumkritischen Punkte am Fahrzeug abhängig von der Fahrzeugstellung ist. Gegenüber der jeweiligen Fahrzeugstellung aus Abbildung 4-26, in der kein Wanken des Fahrzeugs berücksichtigt ist, zeigen sich die um ca. 0,6mm kleineren minimalen Spaltbreiten durch den Wankeneinfluss.

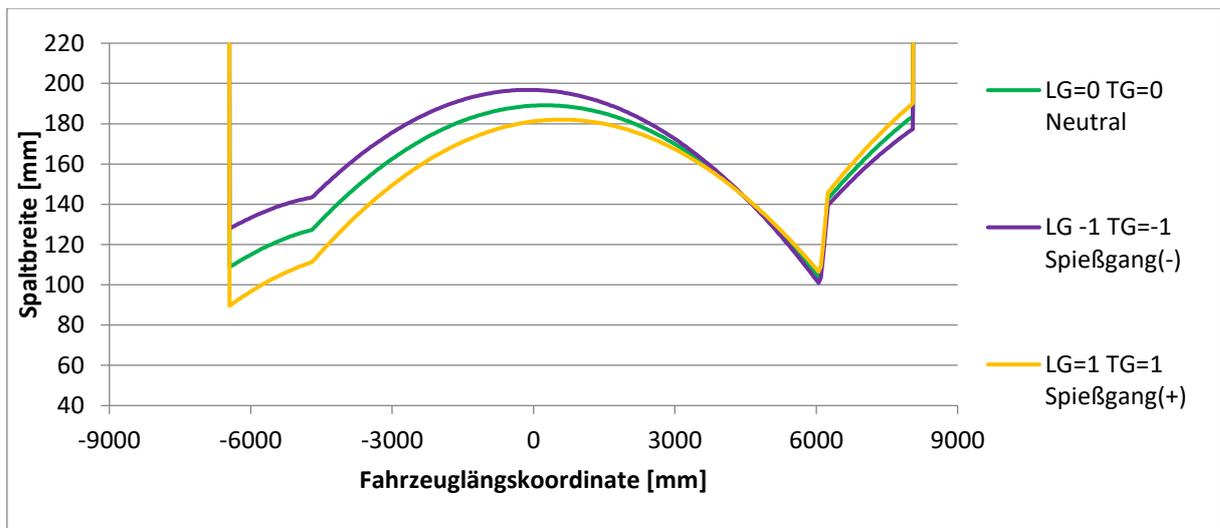


Abbildung 4-29 Variation 1: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 1 des fahrenden Fahrzeugs unter Wankbewegung

	LG=0 TG=0 Neutral	LG=1 TG=1 Spießgang (+)	LG -1 TG=-1 Spießgang (-)
Minimale - Spaltbreite [mm]	103,71	89,57	100,90
Längskoordinate x	6050,00	-6450,00	6050,00

Abbildung 4-30 zeigt die Spaltbreite zum bogeninnen gelegenen Bahnsteig an Gleis 2 für das stehende Fahrzeug. Die nachfolgende Tabelle zeigt die minimale Spaltbreite mit der Lage am Fahrzeug in Abhängigkeit der Fahrzeugstellung. Auch hier zeigen sich im direkten Vergleich mit der Abbildung 4-27 die minimal verringerten Spaltbreiten aufgrund der zum Bahnsteig gerichteten Wankbewegung des stehenden Fahrzeugs.

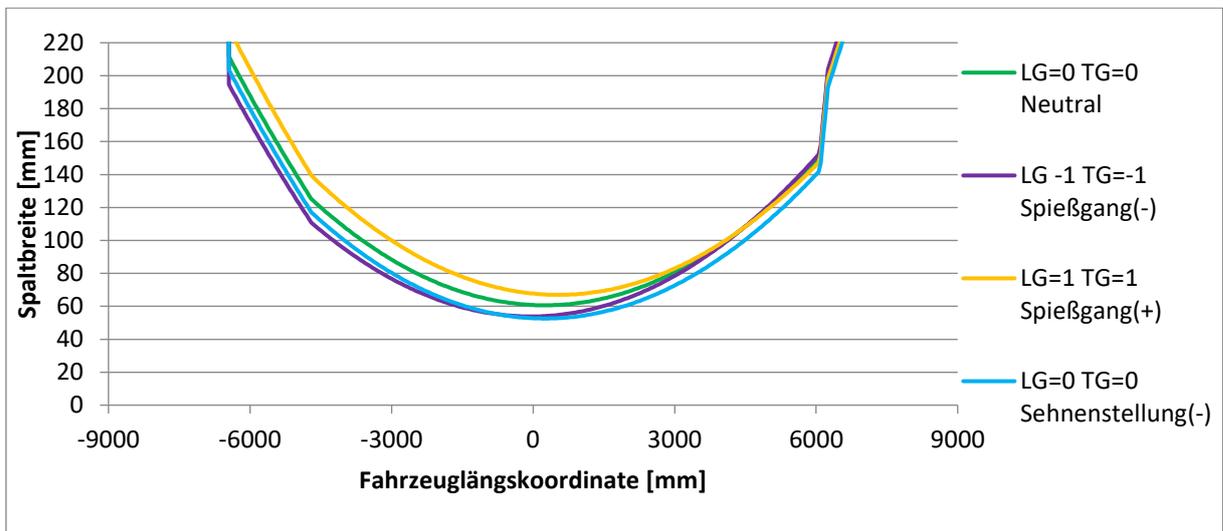


Abbildung 4-30 Variation 1: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 2 des stehenden Fahrzeugs unter Wankbewegung

	LG=0 TG=0 Neutral	LG=0 TG=0 Sehnenstellung(-)	LG=1 TG=1 Spießgang (+)	LG -1 TG=-1 Spießgang (-)
Minimale - Spaltbreite [mm]	60,65	52,60	66,99	53,86
Längskoordinate x	250,00	250,00	550,00	-50,00

4.4.2 Variation 2: Fahrzeugbewegung durch freie Wege

Diese Variation berücksichtigt zusätzlich die freien Wege im Fahrzeug in Form des Achslagerspiels, der freien Querverschiebung des Drehzapfens am Triebdrehgestell und der Verdrehung der Kupplungsstange im Laufdrehgestell mit jeweils $\pm 1\text{mm}$. Der Einfluss des Fahrzeugwankens ist weiterhin berücksichtigt.

Abbildung 4-31 zeigt, wie sich die Spaltbreiten unter diesen Bedingungen einstellen. Im direkten Vergleich mit Variation 1 zeigt sich, dass sich der minimale Spalt der vorwärtsfahrenden Spießgangstellung (+) um ca. 2mm, entsprechend der Summe der freien Wege in Sekundär- und Primärstufe, verringert hat. Für den rückwärtsfahrenden Spießgang (-) hat sich der Spalt aufgrund der entgegengesetzt angenommenen Wirkrichtung der freien Wege vergrößert. Insgesamt hat die Berücksichtigung der freien Wege aber aufgrund ihrer Größe nur einen geringen Einfluss auf die Änderung der Spaltbreite.

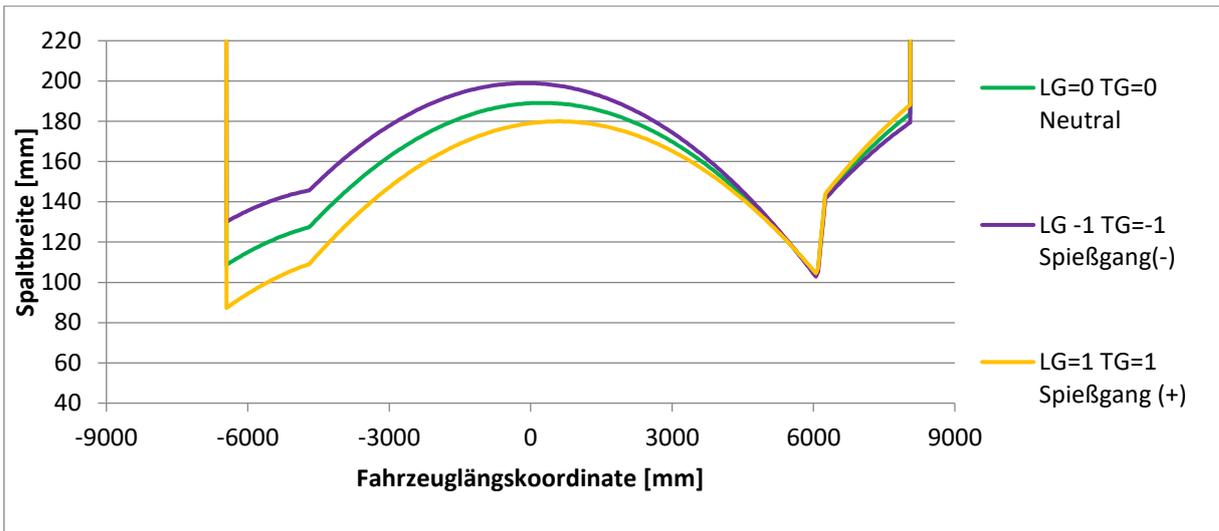


Abbildung 4-31 Variation 2: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 1 des fahrenden Fahrzeugs unter zusätzlichem Einfluss der freien Wege

	LG=0 TG=0 Neutral	LG=1 TG=1 Spießgang (+)	LG -1 TG=-1 Spießgang (-)
Minimale - Spaltbreite [mm]	103,71	87,28	102,86
Längskoordinate x	6050,00	-6450,00	6050,00

Abbildung 4-32 zeigt, wie sich die minimale Spaltbreite für die innere Sehenstellung sowie die rückwärtsfahrende Spießgangstellung (-) verringert. In der vorwärtsfahrenden Spießgangstellung (+) kommt es zu einer kleinen Vergrößerung des Spalts.

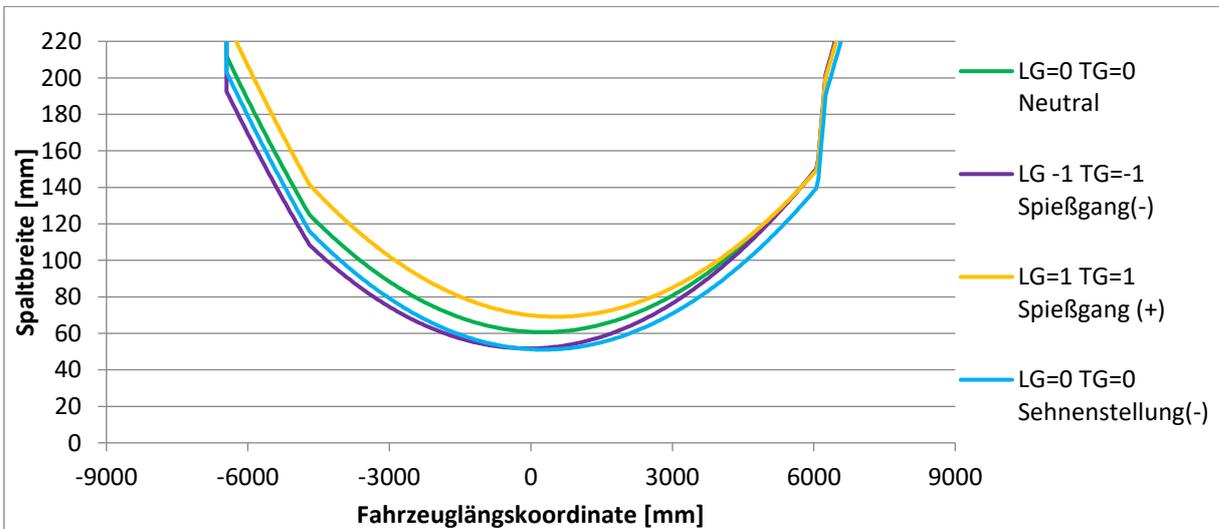


Abbildung 4-32 Variation 2: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 2 des stehenden Fahrzeugs unter zusätzlichem Einfluss der freien Wege

	LG=0 TG=0 Neutral	LG=0 TG=0 Sehenstellung (-)	LG=1 TG=1 Spießgang (+)	LG -1 TG=-1 Spießgang (-)
Minimale - Spaltbreite [mm]	60,65	51,07	69,09	51,73
Längskoordinate x	250,00	250,00	550,00	-50,00

4.4.3 Variation 3: Fahrzeugverschiebungen durch Querkräfte

Beim fahrenden Fahrzeug bewirkt die quasistatische Querverschiebung infolge des Fliehkräfteüberschusses eine zusätzliche Verschiebung der beiden Anlenkpunkte in bogenäußere Richtung. Mit der damit verbundenen Verschiebung des Wagenkastens ergibt

sich für alle Fahrzeugstellungen die in Abbildung 4-33 zu sehende Verringerung des Spalts in Höhe der quasistatischen Querverschiebung in die Puffer der Sekundärstufe, die in Kapitel 4.4 bestimmt wurde. Die Einflüsse des Wankens und der freien Wege aus Variation 1 und Variation 2 sind weiterhin berücksichtigt.

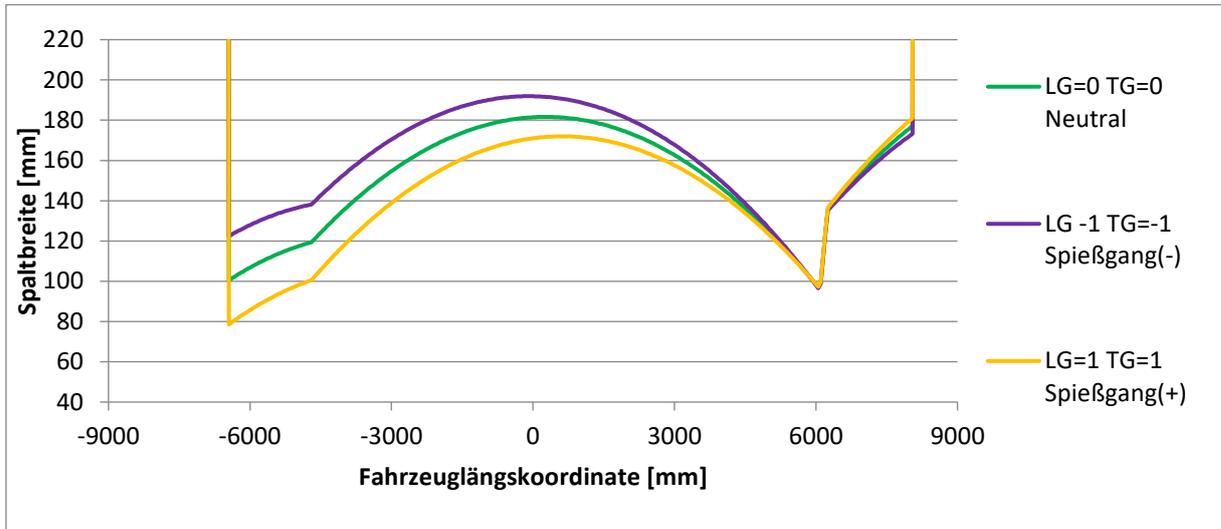


Abbildung 4-33 Variation 3: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 1 des fahrenden Fahrzeugs unter zusätzlichem Einfluss quasistatischer Querverschiebung

	LG=0 TG=0 Neutral	LG=1 TG=1 Speißgang (+)	LG -1 TG=-1 Speißgang (-)
Minimale - Spaltbreite [mm]	96,89	78,55	96,54
Längskoordinate x	6050,00	-6450,00	6050,00

Für das an Gleis 2 im stehenden Zustand betrachtete Fahrzeug verursacht die Hangabtriebskraft als Querbeschleunigung eine Querverschiebung aller Fahrzeugstellungen in bogeninnere Richtung, welche damit zu einer Verringerung der Spaltbreite führt.

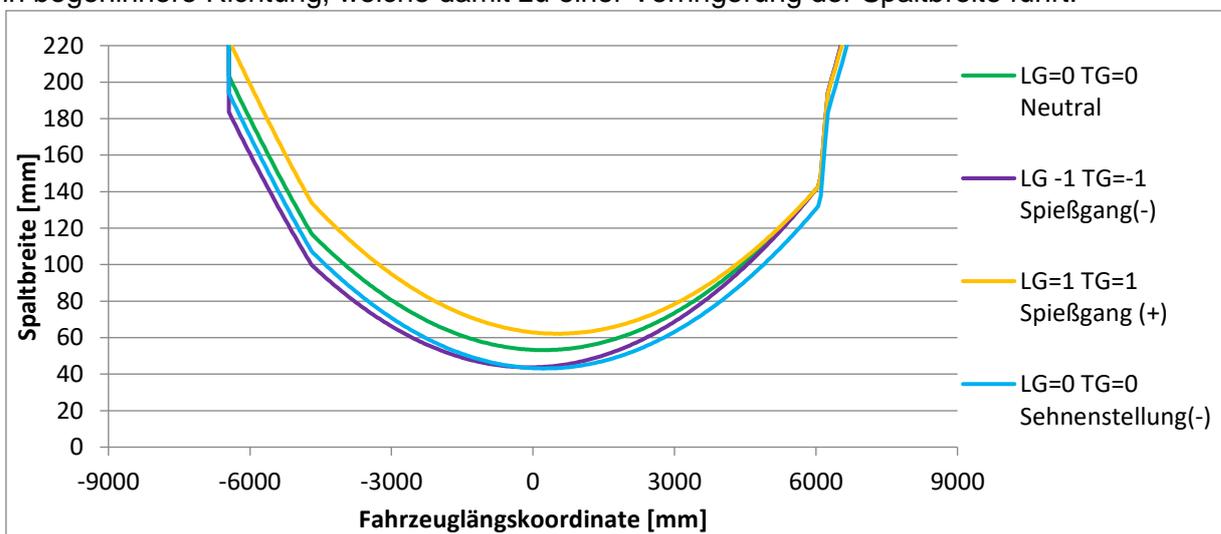


Abbildung 4-34 Variation 3: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 2 des stehenden Fahrzeugs unter zusätzlichem Einfluss quasistatischer Querverschiebung

	LG=0 TG=0 Neutral	LG=0 TG=0 Sehnenstellung (-)	LG=1 TG=1 Speißgang (+)	LG -1 TG=-1 Speißgang (-)
Minimale Spaltbreite [mm]	53,18	43,10	62,15	43,73
Längskoordinate x	200,00	250,00	500,00	-100,00

In Abbildung 4-34 ist die Spaltbreite für ein Fahrzeug der Unterbaureihe DT4.1 mit durchgehender seitlicher Begrenzungsleiste dargestellt. Abbildung 4-35 zeigt dagegen die Spaltbreiten unter denselben Bedingungen für ein Fahrzeug der Unterbaureihe DT4.6, das nur mit kurzen Begrenzungsleisten im Bereich der Fahrgasttüren ausgestattet ist. Im kritischsten Bereich ist keine Leiste verbaut, wodurch die minimalen Spaltbreiten etwas höher liegen als bei der älteren Baureihe DT4.1.

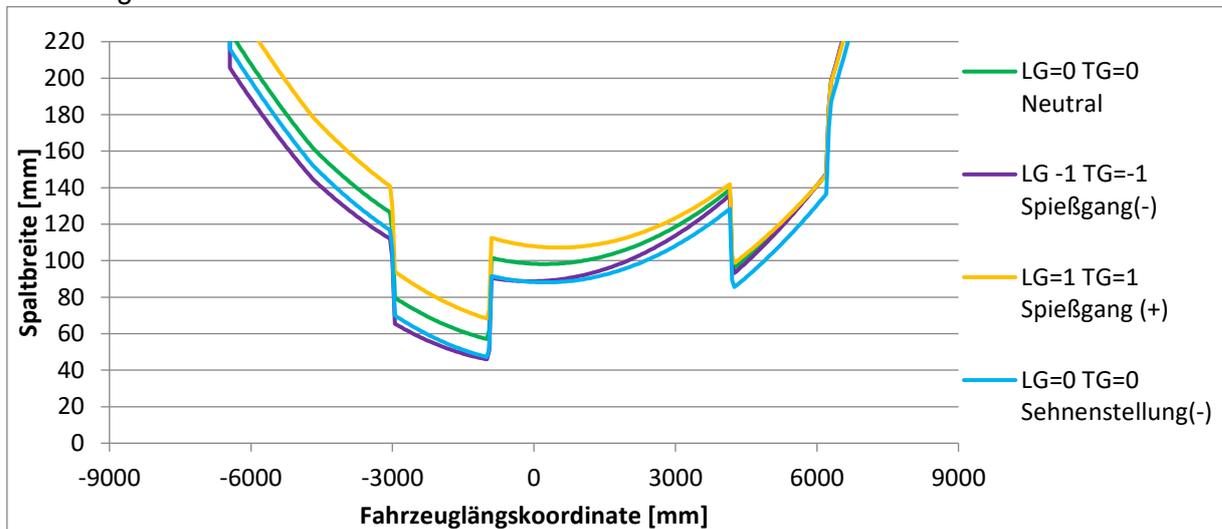


Abbildung 4-35 Variation 3: Spaltbreite DT4.6 Wagen 1 an Gleis 2 des stehenden Fahrzeugs unter zusätzlichem Einfluss quasistatischer Querverschiebung

	LG=0 TG=0 Neutral	LG=0 TG=0 Sehnenstellung (-)	LG=1 TG=1 Spießgang (+)	LG -1 TG=-1 Spießgang (-)
Minimale Spaltbreite [mm]	57,11	47,17	68,26	45,96
Längskoordinate x	-1000,00	-1000,00	-1000,00	-1000,00

4.5 Variationen der geringsten minimalen Spaltbreite

In der bisherigen Variation wurde die durchschnittliche im Betrieb auftretende minimale Spaltbreite bestimmt. In den folgenden Variationen ist die minimale Spaltbreite unter der Berücksichtigung weiterer ungünstiger Einflüsse betrachtet. Die erste Variation beschreibt einen praktischen Fall mit höherem Verschleiß und ungünstig ausgeprägten Bautoleranzen. In einer weiteren Variation wird der Einfluss der fahrzeugtechnischen Einflussparameter betrachtet, wenn diese mit den Grenzwerten nach der Lichtraum-Richtlinie der BOStrab angenommen sind. Eine dritte Variation legt weitere hohe Werte der gleistechnischen Einflussparameter zugrunde, wie sie in der Lichtraum-Richtlinie angenommen sind.

4.5.1 Variation 4: Geringste betrieblich auftretende minimale Spaltbreite

In der folgenden Variation ist über die Betrachtung von zusätzlichem Verschleiß, Fahrzeugbautoleranzen und einer höheren Fahrzeugbesetzung die minimal im realen Fahrbetrieb verbleibende Spaltbreite ermittelt. Diese angenommenen Werte der Einflussgrößen orientieren sich an den erwarteten Werten der Praxis.

Der Spurkranzverschleiß ist mit 3mm überdurchschnittlich hoch, jedoch noch deutlich unter der Verschleißgrenze, angenommen. Aufgrund des früheren Erreichens der Verschleißgrenze im Laufflächenbereich werden im Fahrbetrieb jedoch keine höheren Werte erreicht. Die Fahrzeugbesetzung entspricht mit einer Besetzung von 80% nach BOStrab einer sehr hohen Auslastung. Die daraus resultierenden höheren Querkräfte führen zu erhöhten Wankwinkeln und quasistatischen Querverschiebungen in der Sekundärstufe. Die Radsatz-Bautoleranzen, die Achslager-Bautoleranzen, die Einbautoleranz des Drehzapfens bzw. der Kupplungsstange, die Einbautoleranz der Primärfederung, Bautoleranz der

Anbauteile sowie die Bautoleranz des Wagenkastens wirken sich an beiden Gleisen ungünstig auf die Spaltbreite aus. Die zufällige Überlagerung der Toleranzen ist entsprechend der Lichtraum-Richtlinie, siehe Kapitel 3.3, berücksichtigt.

Gegenüber Abbildung 4-33 mit durchschnittlichen Verschleiß-, Toleranz- und Fahrzeugbesetzungswerten zeigt die Abbildung 4-36 für die Spießgangstellung (+) einen um etwa 10mm verringerten minimalen Spalt. Dieser Wert setzt sich zu zwei großen Teilen aus den ungünstig angenommenen Toleranzwerten und dem höheren Spurspiel infolge des Spurkranzverschleißes zusammen. Letzteres führt insbesondere zu einem größeren Gieren des Laufdrehgestells mit der exzentrischen Anlenkung. Weniger ausschlaggebend sind dagegen die höhere Querverschiebung in der Sekundärstufe und der Wankwinkel aufgrund der höheren Fahrzeugbesetzung. Für die neutrale Fahrzeugstellung und den Spießgang (-) ergibt sich eine geringere Verringerung der Spaltbreite, da sich die größere Querverschiebung an dem Anlenkpunkt der Kupplungsstange für diese Fahrzeugstellung nicht auf die minimale Spaltbreite im Bereich des Triebdrehgestells auswirkt.

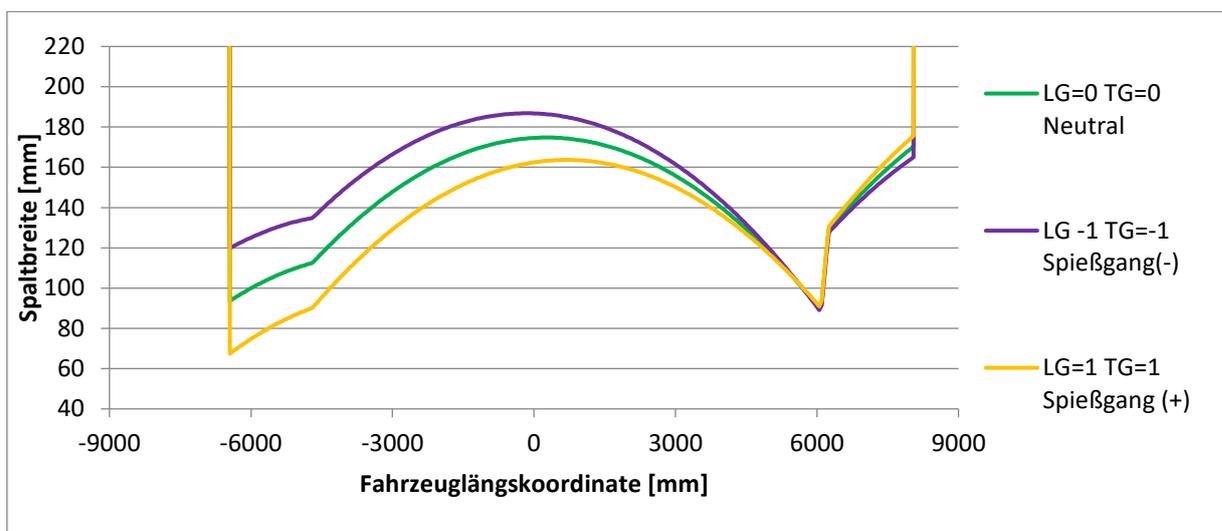


Abbildung 4-36 Variation 4: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 1 des fahrenden Fahrzeugs unter zusätzlichem Einfluss von betrieblichem Verschleiß und Toleranzen

	LG=0 TG=0 Neutral	LG=1 TG=1 Spießgang (+)	LG -1 TG=-1 Spießgang (-)
Minimale Spaltbreite [mm]	90,92	67,46	89,05
Längskoordinate x	6050,00	-6450,00	6050,00

Für das bogeninnere Gleis 2 zeigt sich in Abbildung 4-37 ebenfalls eine deutliche Verringerung der Spaltbreite um etwa 7,5mm bei drei der untersuchten Fahrzeugstellungen. Bei der Neutralstellung wirkt sich der vergrößerte Spurkranzverschleiß nicht aus, wodurch die Verringerung der Spaltbreite in dieser Fahrzeugstellung etwas geringer ausfällt. Insgesamt ist die maximale Verringerung der Spaltbreite im Gegensatz zu Gleis 1 geringer, da der lichtraumkritische Bereich in der Mitte des Fahrzeugs liegt, an der sich die höhere Querverschiebung durch das Gieren des Laufdrehgestells weniger stark auswirkt als am Wagenkastenende.

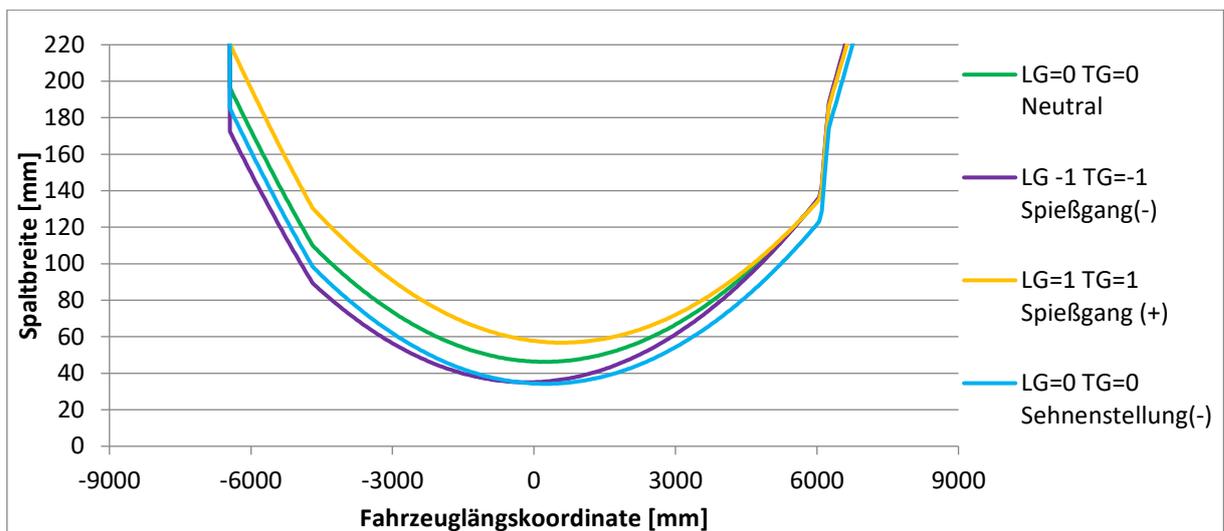


Abbildung 4-37 Variation 4: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 2 des stehenden Fahrzeugs unter zusätzlichem Einfluss von betrieblichem Verschleiß und Toleranzen

	LG=0 TG=0 Neutral	LG=0 TG=0 Sehnenstellung (-)	LG=1 TG=1 Spießgang (+)	LG -1 TG=-1 Spießgang (-)
Minimale Spaltbreite [mm]	46,30	34,22	56,78	35,08
Längskordinate x	200,00	250,00	600,00	-150,00

4.5.2 Variation 5: Minimale Spaltbreite bei Fahrzeugparametern nach BOStrab

Die in den bisherigen Variationen angenommenen Parameter des Spurkranzverschleißes und der Querverschiebung in der Primär- und Sekundärstufe sind durch Messungen oder die Betrachtung der zu erwartenden Kräfte entstanden. Für den Lichtraumnachweis nach BOStrab sind hier kraftunabhängige theoretische Maximalwerte anzunehmen.

Der Spurkranzverschleiß ermittelt sich aus Abbildung 4-4 zu 5,2mm, die anzunehmende Querverschiebung in der Primärstufe beträgt 4mm und an den beiden Anlenkpunkten in der Sekundärstufe 19mm. Das Fahrzeug ist zu 100% besetzt und entspricht damit vollständig den fahrzeugtechnischen Annahmen der Lichtraum-Richtlinien. Lediglich die Einstelltoleranz des Wagenkastens ist aufgrund des vernachlässigbaren Einflusses in dieser Fahrzeughöhe nicht berücksichtigt. Wie sich diese Annahmen auf die Spaltbreite an Gleis 1 auswirken, ist in Abbildung 4-38 zu sehen. Die zusätzliche Verringerung der minimalen Spaltbreite von ca. 18mm gegenüber der Spießgangstellung in Variation 4 ist ca. zur Hälfte auf die höhere Querverschiebung in der Sekundärstufe zurückzuführen. Hinzu kommen die um 3,5mm vergrößerte Querverschiebung in der Primärstufe sowie die deutlich höhere Querverschiebung des Anlenkpunktes aufgrund des stärkeren Gierens des Laufdrehgestells wegen des maximalen Spurkranzverschleißes.

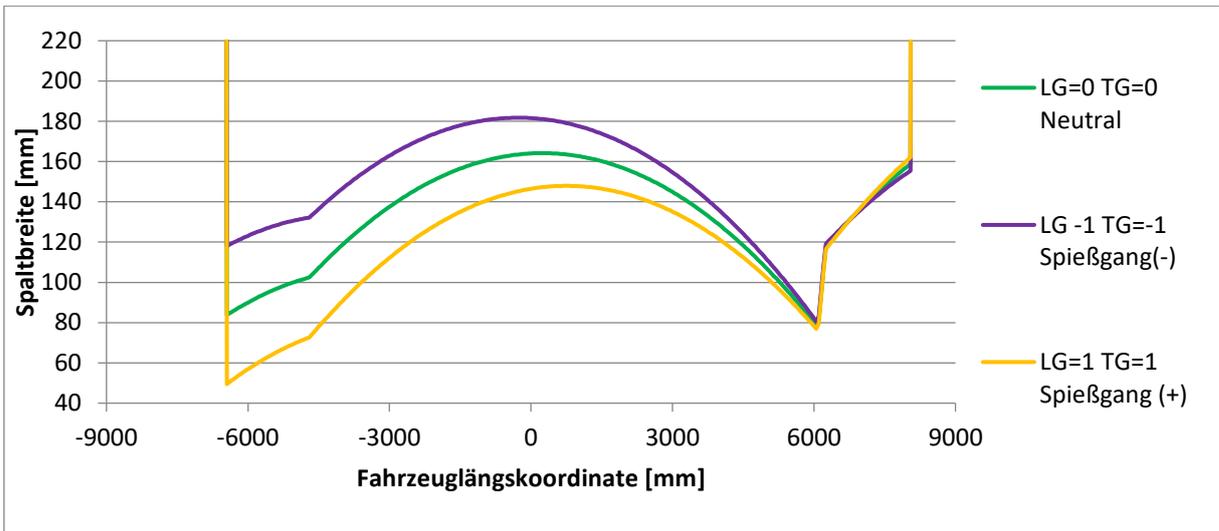


Abbildung 4-38 Variation 5: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 1 des fahrenden Fahrzeugs unter maximalen fahrzeugtechnischen Einflüssen

	LG=0 TG=0 Neutral	LG=1 TG=1 Spießgang (+)	LG -1 TG=-1 Spießgang (-)
Minimale Spaltbreite in mm	78,75	49,45	80,60
Längskoordinate x	6050,00	-6450,00	6050,00

Abbildung 4-39 zeigt die Auswirkungen der maximalen fahrzeugtechnischen Einflussfaktoren auf den Restspalt zum bogeninneren Gleis 2. Auch hier ist der verbleibende Restspalt noch einmal deutlich verringert.

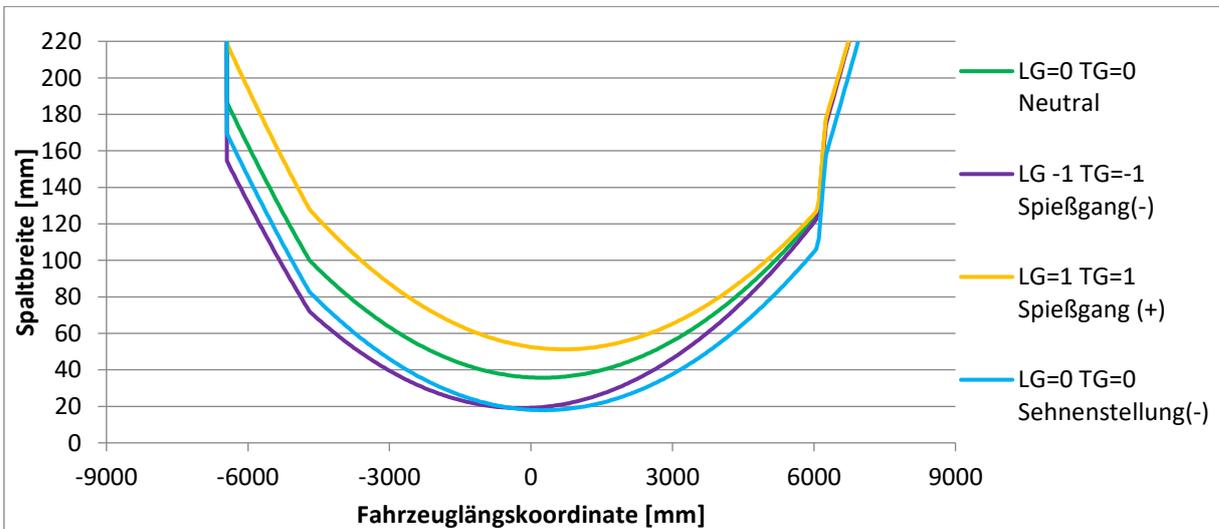


Abbildung 4-39 Variation 5: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 2 des stehenden Fahrzeugs unter maximalen fahrzeugtechnischen Einflüssen

	LG=0 TG=0 Neutral	LG=0 TG=0 Sehnenstellung (-)	LG=1 TG=1 Spießgang (+)	LG -1 TG=-1 Spießgang (-)
Minimale Spaltbreite in mm	35,68	17,90	51,24	19,03
Längskoordinate x	250,00	250,00	700,00	-200,00

4.5.3 Variation 6: Minimale Spaltbreite bei maximal veränderter Infrastruktur

Die bisherigen Variationen folgten dem Ziel, die derzeitig an der Haltestelle Klosterstern auftretenden Spaltbreiten zu untersuchen. In Variation 1 bis 3 wurden dafür in mehreren Stufen durchschnittliche Fahrzeugbetriebszustände nachgebildet. Variation 4 stellt den

ungünstigsten betrieblich zu erwartenden Fahrzeugzustand dar und Variation 5 den ungünstigsten Fahrzeugzustand mit den maximal anzunehmenden fahrzeugtechnischen Einflüssen nach den Lichtraum-Richtlinien. Dieser ungünstigste betriebliche Fahrzeugzustand ist im Folgenden mit weiteren ungünstigen Änderungen der Infrastruktur überlagert. Die berücksichtigten Änderungen der Infrastruktur setzen sich zusammen aus der Erweiterung der Spur durch Schienenverschleiß, einer seitlichen Verschiebung der Gleise, einer bleibenden und einer elastischen Änderung der gegenseitigen Höhenlage der Schienen sowie einer Querelastizität der Schiene. Die Einflüsse werden entsprechend der Richtlinie als zufällige und nicht zufällige Einflüsse betrachtet. Damit sind bis auf wenige Ausnahme alle Einflüsse, die in den Lichtraum-Richtlinien genannt sind, berücksichtigt. Die nicht berücksichtigten Einflüsse sind aus Gründen der schwierigen Implementierbarkeit in der automatisierten Berechnung bei gleichzeitig geringer Auswirkung auf den Gesamtlichtraumbedarf vernachlässigt worden. Sie können gegebenenfalls bei der Berechnung eines kritischen Einzelpunktes berücksichtigt werden.

Die Entwicklung der Spaltbreite für diesen Fall ist in Abbildung 4-40 zu sehen. Im Vergleich zu Variation 5 ist die Spurerweiterung um 3mm auf einen nach RUO zulässigen Wert von insgesamt 10mm erhöht. Die Fahrkante der bahnsteigzugewandten Schiene hat sich durch den Verschleiß an der Schiene und die Verschiebung der Spurmitte um den maximal zulässigen Wert von 5mm dem Bahnsteig angenähert. Zusammen mit den weiteren gleistechnischen Einflüssen verringert sich der minimale Abstand um weitere 10mm gegenüber Variation 5.

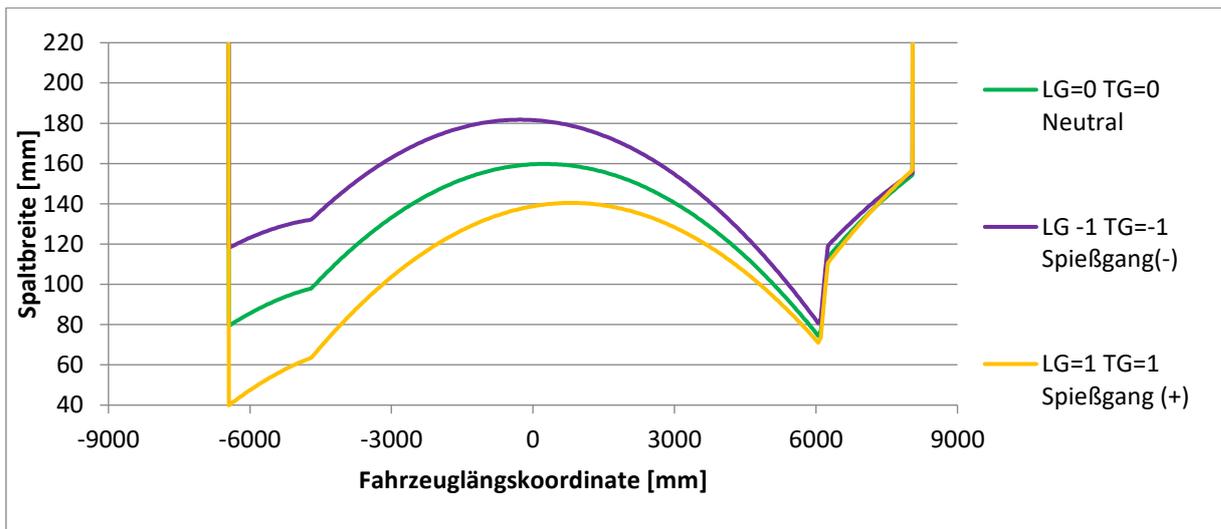


Abbildung 4-40 Variation 6: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 1 des fahrenden Fahrzeugs unter maximalen fahrzeugtechnischen und gleistechnischen Einflüssen

	LG=0 TG=0 Neutral	LG=1 TG=1 Speißgang (+)	LG -1 TG=-1 Speißgang (-)
Minimale Spaltbreite in mm	74,35	39,88	80,60
Längskoordinate x	6050,00	-6450,00	6050,00

Auch an Gleis 2 ist das Spurspiel auf 10mm erhöht und die bahnsteigzugewandte Schiene um die maximal zulässigen 5mm von der Sollage zum Bahnsteig verschoben. Der minimale Spalt verringert sich um etwa 6mm gegenüber Variation 5.

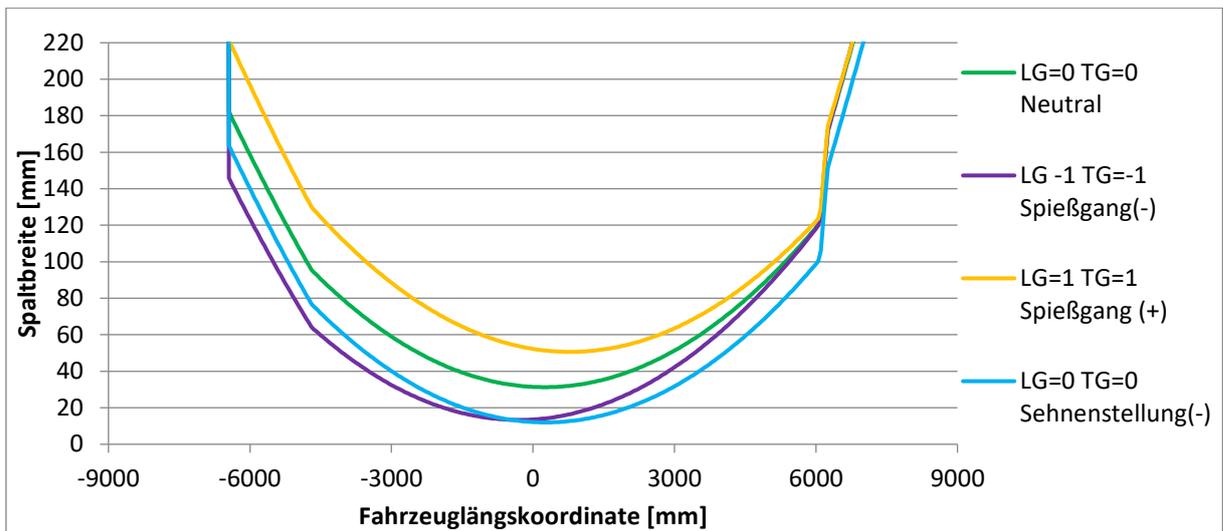


Abbildung 4-41 Variation 6: Spaltbreite DT4.1 Wagen 1 an Gleis 2 des stehenden Fahrzeugs unter maximalen fahrzeugtechnischen und gleistechnischen Einflüssen

	LG=0 TG=0 Neutral	LG=0 TG=0 Sehnenstellung (-)	LG=1 TG=1 Spießgang (+)	LG -1 TG=-1 Spießgang (-)
Minimale Spaltbreite in mm	31,28	12,00	50,64	13,35
Längskordinate x	250,00	250,00	800,00	-300,00

In Abbildung 4-42 ist zusammenfassend dargestellt, wie sich der verbleibende minimale Spalt zwischen dem Fahrzeug und dem Bahnsteig durch die zunehmende Betrachtung der Einflussgrößen in der Parametervariation kontinuierlich verringert. Die zusätzliche Annahme der fahrzeugtechnischen Einflussgrößen nach BOStrab in der fünften Variation führt dabei zu der stärksten Verringerung gegenüber der Vorgängervariation. In Anhang A11 sind die angenommenen Parameter der einzelnen Variationen im Detail aufgelistet.

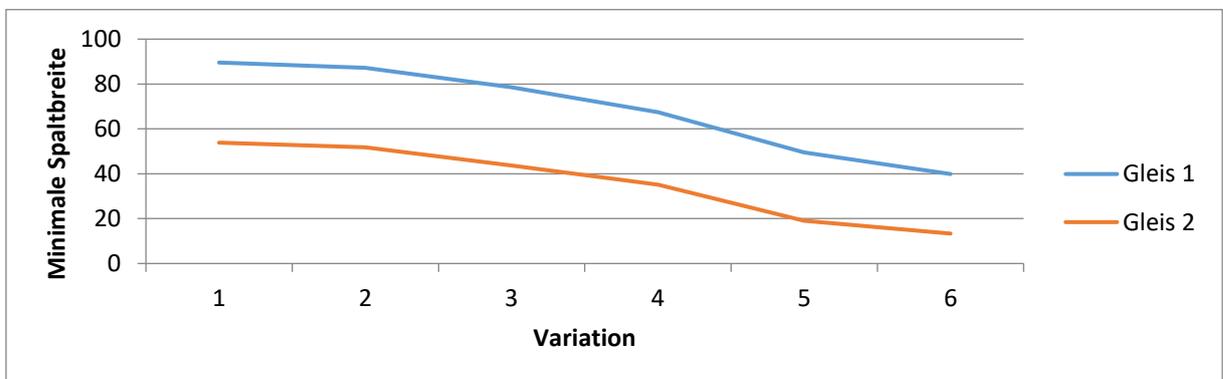


Abbildung 4-42 Minimale berechnete Spaltbreite der Spießgangstellungen der Variationen 1-6

Insgesamt wurden in dieser Betrachtung mit den Größen

- Wagen 1 und Wagen 2
- Baureihe DT4.1 und DT4.6
- 15 Fahrzeugstellungen im Gleis
- 3 Betriebszustände (neutral, stehend, fahrend)
- 6 Parametervariationen

1080 Spaltbreiten zwischen Wagen und Bahnsteig berechnet. Darin enthalten sind jedoch alle denkbaren Kombinationen, von denen die meisten für diese Untersuchung wegen der möglichst praxisnahen Abbildung nicht relevant sind und daher nicht im Detail geprüft wurden.

5 Messungen der Spaltbreite im Fahrbetrieb

Mit dem Projekt GAP-Filler begegnet die HOCHBAHN den Anforderungen des barrierefreien Zugangs zu den U-Bahn-Fahrzeuge, der wegen des großen Spaltes zwischen Zug und Bahnsteig insbesondere in den im Gleisbogen liegenden älteren Haltestellen ein schwer zu lösendes Problem darstellt. Der GAP-Filler ist eine Leiste aus in vertikaler Richtung belastbarer und damit betretbarer Lamellen. Er befindet sich direkt an der Bahnsteigkante zwischen dem Zug und dem Bahnsteig und verringert damit aktiv den Spalt. Im Falle einer Zugdurchfahrt können sich die Lamellen in horizontaler Richtung deformieren und dem Zug ausweichen. An der Haltestelle Klosterstern wird der GAP-Filler erstmalig eingesetzt.

Da dieser GAP-Filler ein direkter Eingriff in die Lichtraumgrenzung ist und gleichzeitig aus Verschleißgründen überwiegend keine Berührungen zwischen den Zügen und dem GAP-Filler stattfinden sollen, wurde vorab zur Bestimmung der Breite des GAP-Fillers über einen längeren Zeitraum der tatsächliche minimale Spalt zwischen Zug und Bahnsteig jeder einzelnen Zugdurchfahrt erfasst. Nach dem Einbau des GAP-Fillers wurde in einer weiteren Messung die Häufigkeit der tatsächlichen Berührung eines Fahrzeugs am GAP-Filler erfasst. Die in diesem Rahmen entstandenen Ergebnisse werden für diese Arbeit verwendet mit dem Ziel, den Lichtraum und die Berechnung dessen exemplarisch auf Höhe des Bahnsteigs zu beleuchten. Daher sind für diese Untersuchung des Lichtraums die Haltestelle Klosterstern sowie das Fahrzeug DT4, welches hauptsächlich diese Linie bedient, vorgegeben.

In den Messwerten sind die Durchfahrten aller Züge in dem Zeitraum erfasst. Zum überwiegenden Teil handelt es sich um Fahrzeuge der Baureihe DT4, von denen wiederum 51 Fahrzeuge mit der durchgehenden Begrenzungsleiste und 75 Fahrzeuge mit der unterbrochenen Begrenzungsleiste ausgerüstet sind. Diese unterschiedlichen Baureihen werden allerdings auch untereinander gekoppelt, sodass das gemessene Minimum einer Zugdurchfahrt oft anhand beider Fahrzeugbaureihen bestimmt ist. Eine allgemeine Aufschlüsselung, wie die Züge im Betrieb und damit während der Messungen zusammengesetzt sind, ist nicht möglich. Daneben beinhalten die Messdaten auch die seltene Durchfahrt von Personenzugfahrzeugen der Baureihen DT3 und DT5 sowie anderer Betriebsfahrzeuge, welche jedoch aufgrund der sehr geringen unbekanntem Anzahl in den Gesamtergebnissen vernachlässigt werden.

Der Einsatz des GAP-Fillers soll ebenfalls auf die Haltestelle Landungsbrücken ausgeweitet werden. Auch an dieser Haltestelle wurde mithilfe von Ultraschallsensoren die Spaltbreite dafür erfasst. Da an dieser Haltestelle kein durchgehend erhöhter Bahnsteig vorhanden ist, konnte diese Messung jedoch nur indirekt durchgeführt werden. Daneben handelt es sich im Gegensatz zu der Haltestelle Klosterstern um keine Tunnelhaltestelle, weshalb die Ultraschallmessungen infolge der Witterungseinflüsse mit einem sehr hohen Messrauschen behaftet sind, wodurch auch eine veränderte Auswertung erforderlich wurde. Aus diesen Gründen eignen sich diese Messungen an der Haltestelle Landungsbrücken nicht für den Vergleich mit der Berechnung der Spaltbreite. Eine Erweiterung der Untersuchung auf die Haltestelle Landungsbrücken ist daher nicht möglich.

5.1 Ultraschall Messungen

In einer ersten Messung wurde über den Zeitraum von etwa zehn Wochen mithilfe von Ultraschallsensoren die minimal auftretende Spaltbreite für jedes Gleis gemessen. In dieser Zeit waren etwa 13.000 Zugdurchfahrten zu erwarten. Durchgeführt und ausgewertet wurde die Messung durch die Hafencity Universität Hamburg (HCU).

5.1.1 Messaufbau und Datenauswertung

Im mittleren Bahnsteigbereich ist mit 13 Ultraschallsensoren in einem Abstand von jeweils einem Meter an jedem Gleis der Abstand zum Zug erfasst worden. Die Sensoren sind dabei

10mm unterhalb der Bahnsteigkante von 980mm über Schienenoberkante verbaut und liegen damit auf Höhe der Begrenzungsleiste am Wagenkasten.

Der Öffnungswinkel des Messkegels der Sensoren von $7,5^\circ$ ergibt bei einer Spaltbreite von beispielsweise 100mm einen Messkreisdurchmesser von ca. 25mm. In Abbildung 5-1 ist die Entwicklung des Kegels schematisch dargestellt. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die Messung vollständig im Bereich der Begrenzungsleiste erfolgt. Die Messabweichung kann für diesen Fall mit maximal 3mm angenommen werden. Daneben erfolgte eine Nullpunktkorrektur jedes einzelnen Sensors, während aufgrund der geringen Distanzen auf eine Maßstabskorrektur der Sensoren verzichtet wurde. Zur frühen Eliminierung eines reproduzierbaren Messfehlers in den Rohdaten wurden nur Messwerte unterhalb von 400mm erfasst.

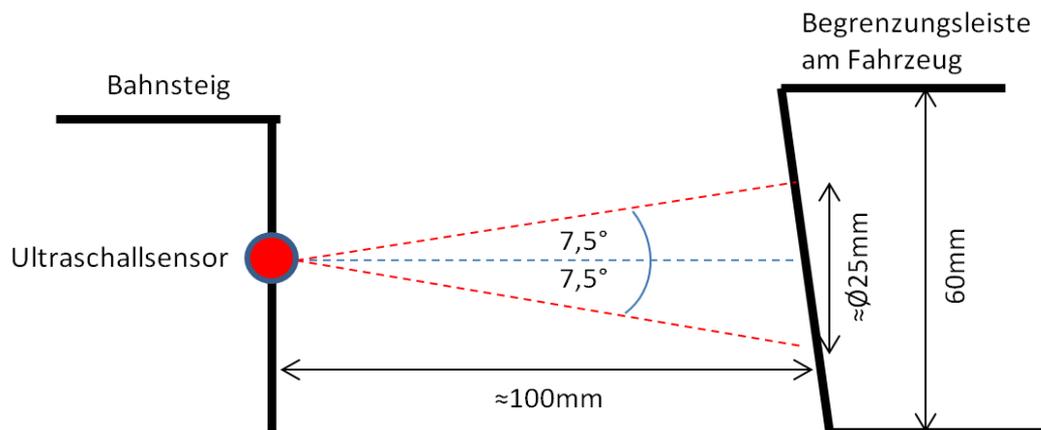


Abbildung 5-1 Messkegel der Ultraschallsensoren

Es wurden an jedem Sensor separat die Zugdurchfahrten gemessen und abgespeichert. Dafür wurde bei Unterschreitung eines Grenzabstandes ein einfahrender Zug detektiert, die Messung gestartet und bei einer anhaltend hohen Distanz der Zug als ausgefahren angesehen. Aus technischen Gründen ist kein Zeitbezug der Daten möglich, wodurch einzelne gemessene Zugdurchfahrten nicht mit bestimmten durchgefahrenen Fahrzeugen verknüpft werden können. Eine Filterung, mit der ausschließlich Abstandsmessungen von DT4-Fahrzeugen berücksichtigt werden, ist daher nicht möglich. Erfasst wurden die Daten mit einer Messfrequenz von 10Hz. Inwieweit diese Frequenz ausreicht, um zuverlässig bei einem ausfahrenden Zug mit hoher Geschwindigkeit das tatsächliche Minimum der Spaltbreite zu erfassen, ist offen.

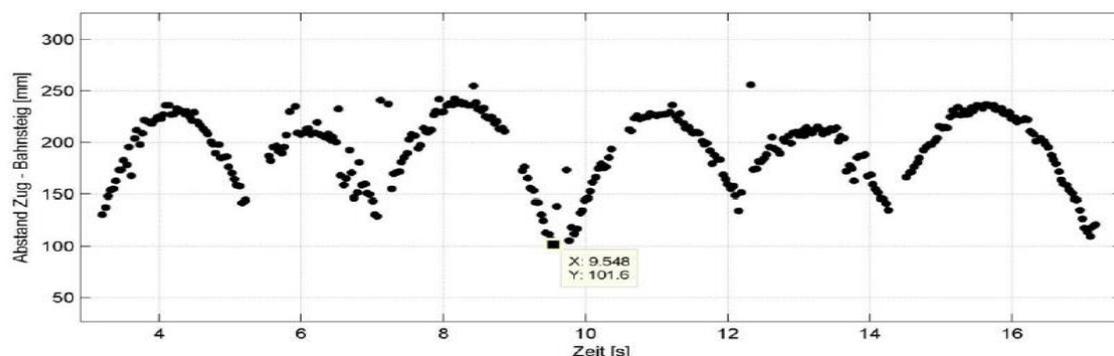


Abbildung 5-2 Abstandsmessung bei konstanter Fahrt an Gleis 1 (Willemsen et al. 2016, S. 8)

Die gemessenen Abstände eines Sensors bei Vorbeifahrt eines Zuges sind in Abbildung 5-2 dargestellt. Diese Messung ist im Rahmen einer Voruntersuchung mit einem DT5-Fahrzeug mit sechs einzelnen Wagen an Gleis 1 durchgeführt worden. Aufgrund der konstanten geringen Fahrgeschwindigkeit ergeben sich die sechs gleichmäßig verteilten Höcker.

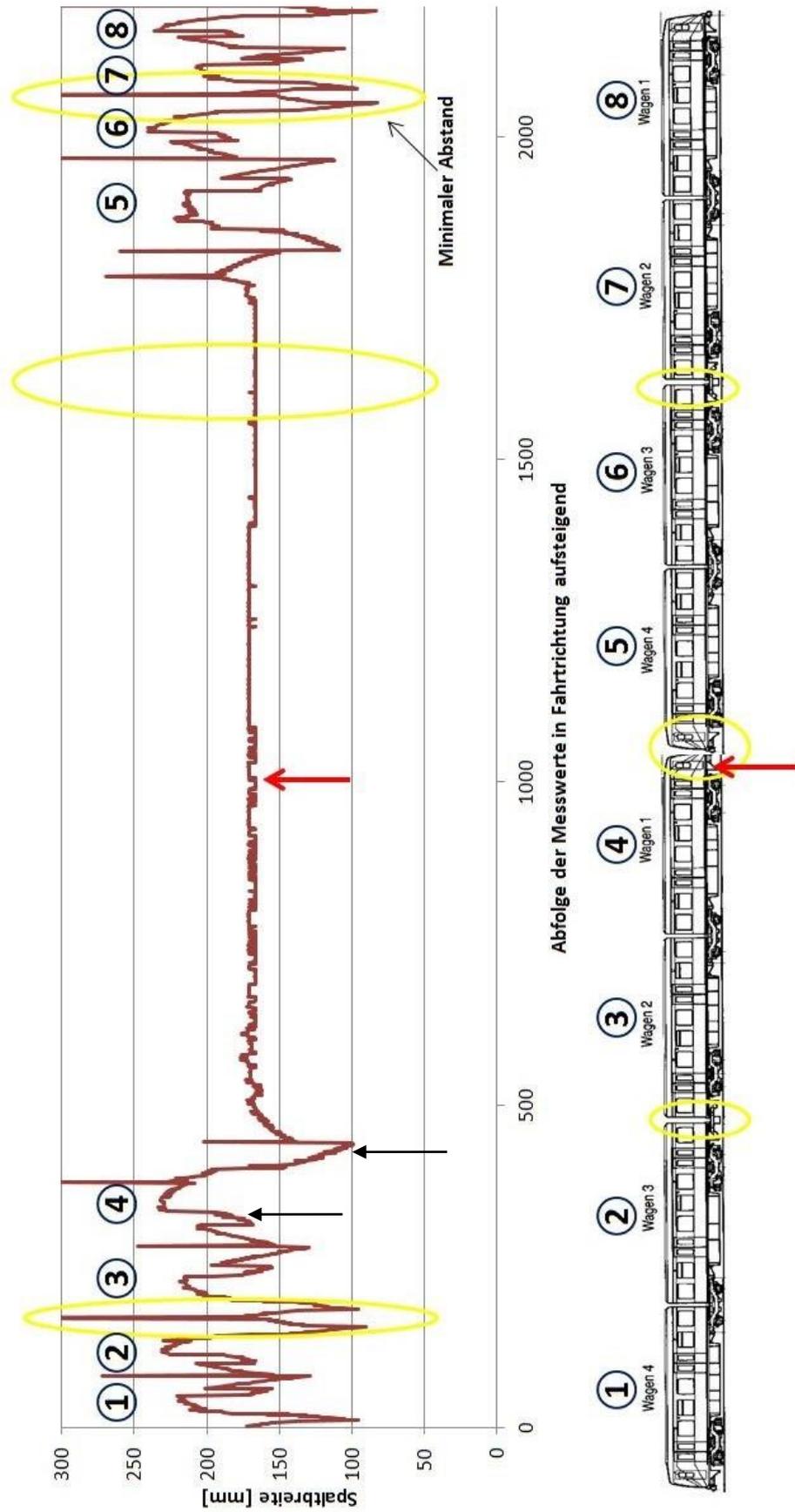


Abbildung 5-3 Abstandsmessung einer einzelnen Zugdurchfahrt eines DT4.6 an Gleis 1 (HOCHBAHN)

Abbildung 5-3 zeigt die Darstellung der Abstandsmessung einer einzelnen Zugdurchfahrt an einem Sensor im regulären Betrieb an Gleis 1. Die dargestellte Kurve entspricht den Rohdaten. Für eine bessere Übersichtlichkeit wurden lediglich einzelne Datenpunkte vor der Einfahrt und nach der Ausfahrt des Zuges in die Haltestelle entfernt. Dabei handelt es sich um Nullwerte, die abgelegt werden, wenn kein Sensorsignal vorliegt, sowie einen sehr großen Abstand, der bei Ausfahrt des Zuges detektiert wird. Die einzelnen Datenpunkte sind in der Reihenfolge der Erfassung aufgetragen und stellen somit einen Zeitbezug dar. Im Bereich der Punkte bis 400 findet die Einfahrt der vier ersten Wagen des Zuges statt, nach der anschließenden Standzeit des Fahrgastwechsels bis zum Datenpunkt 1300 beginnt die Ausfahrt, in der die verbleibenden vier Wagen den Sensor passieren. Es ist ebenfalls die kürzere Durchlaufzeit der einzelnen Wagen zu Beginn und Ende des gesamten Zuges wegen der höheren Fahrgeschwindigkeit zu erkennen.

Mit Positionsnummern sind jeweils die Wagenkastenmitten sowie die dabei auftretenden Maxima des Abstandes gekennzeichnet. Die gelben Markierungen zeigen den Bereich der Kurzkupplungen der Halbzüge sowie die Kupplung der beiden DT4-Fahrzeuge. Der an dieser Stelle charakteristische Verlauf des Abstandes ist auf die Verjüngung der Wagenkästen in diesem Bereich zurückzuführen. Mit dem roten Pfeil ist die Position des Fahrzeugs gekennzeichnet, an der während der Standzeit der Abstand erfasst wird. Die beiden schwarzen Pfeile kennzeichnen die Verringerung der Spaltbreite bei den Begrenzungsleisten an Wagen 4 im Bereich der Fahrgasttüren des DT4.6, wie sie in Abbildung 4-11 zu sehen sind. Ca. bei Datenpunkt 1750 liegt der minimale Abstand vor, der für die weitere statistische Auswertung für diese Zugdurchfahrt verwendet wird.

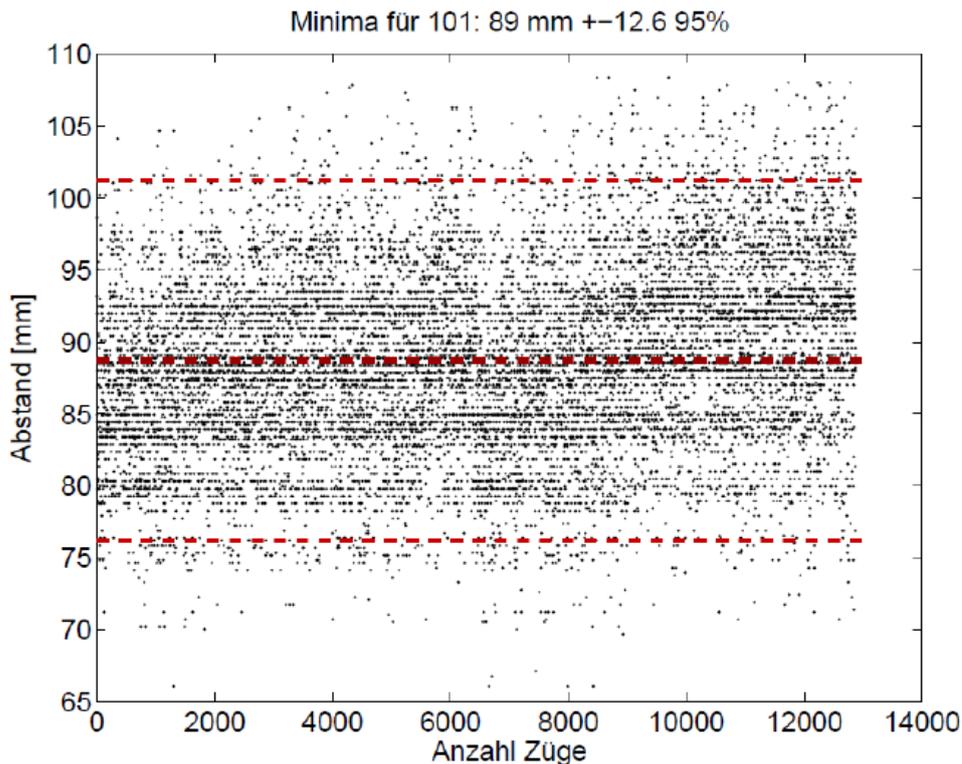


Abbildung 5-4 Minimale Distanzen aller Züge an einem Sensor (Willemsen et al. 2016, S. 13)

Jedes Minimum des Abstandes der ca. 13.000 eindeutig als Zugdurchfahrt identifizierten Messungen ist exemplarisch für einen Sensor in Abbildung 5-4 dargestellt. Die roten Linien stellen den arithmetischen Mittelwert sowie die minimale und maximale 95%-Streuung dar. Der angegebene Wert der 95%-Streuung von 12,6mm entspricht näherungsweise der zweifachen Standardabweichung.

Die Überlegung den Einfluss der Fahrgeschwindigkeit auf die Querverschiebung des Fahrzeugs über die Veränderung des Abstandes bei Ein- und Ausfahrt des Zuges zu ermitteln, konnte aufgrund von erhöhtem Messrauschen im Bereich der schnelleren Ausfahrt des Zuges nicht automatisiert ausgewertet werden. Zusätzlich steht dem entgegen, dass kein direkter Bezug der einzelnen Abstandsmessungen zu Positionen am Fahrzeug möglich ist und daher nicht sicher derselbe Punkt der Fahrzeuggeometrie verglichen werden kann. Eine exemplarische Betrachtung einzelner Messungen in Bezug auf diese Fragestellung erfolgt in der späteren Auswertung.

5.1.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messung sind die mittleren minimalen Abstände zwischen Zug und Bahnsteig für jeden Sensor mit der zugehörigen 95%-Streuung. Der Gesamtüberblick aller Messergebnisse der 13 Sensoren je Bahnsteig ist in Anhang A12 (Willemsen et al. 2016, S.14) zu finden. Für die weitere Betrachtung und den anschließenden Vergleich mit der Berechnung werden der Mittelwert und die Streuung über alle Sensoren eines Bahnsteigs gemittelt.

An Gleis 1 ergibt sich ein mittlerer minimaler Abstand d_{G1} von 86,6mm mit einer 95%-Streuung von 12,65mm. Die einfache Standardabweichung σ_{G1} beträgt 6,45mm. Mit diesen Werten lassen sich folgende Aussagen formulieren.

- Mit der einfachen Standardabweichung werden 15,9% der Züge einen minimalen Abstand von 80,2mm unterschreiten.
- Mit der zweifachen Standardabweichung werden 2,28% der Züge einen minimalen Abstand von 73,7mm unterschreiten.
- Mit der dreifachen Standardabweichung werden 0,14% der Züge einen minimalen Abstand von 67,3mm unterschreiten.

Analog bestimmt sich der mittlere minimale Abstand für Gleis 2 d_{G2} zu 59,7mm mit einer 95%-Streuung von 8,42mm. Die einfache Standardabweichung σ_{G2} beträgt 4,3mm. Damit ergeben sich folgende Prognosen.

- Mit der einfachen Standardabweichung werden 15,9% der Züge einen minimalen Abstand von 55,4mm unterschreiten.
- Mit der zweifachen Standardabweichung werden 2,28% der Züge einen minimalen Abstand von 51,1mm unterschreiten.
- Mit der dreifachen Standardabweichung werden 0,14% der Züge einen minimalen Abstand von 46,8mm unterschreiten.

Bei der Auswertung der Messung wurde zusätzlich eine Abschätzung der Anzahl der Kollisionen durchgeführt, wenn an Gleis 1 ein GAP-Filler mit einer Stärke von 75mm und an Gleis 2 mit einer Stärke von 50mm verbaut wird. Diese Abschätzung ergab, dass an Gleis 1 4,8% und an Gleis 2 3,4% der durchfahrenden Züge mit dem GAP-Filler kollidieren. Für diese Abschätzung wurden die einzelnen gemessenen Minima betrachtet, wodurch es zu leichten Abweichungen von den Prognosen mittels der Standardabweichung kommt.

5.2 Berührungsmessungen mit Biegesensoren

Im Anschluss an die Messung der Spaltbreite mittels der Ultraschallsensoren wurden in diesem Bereich an beiden Bahnsteigen GAP-Filler verbaut. Am bogeninneren Gleis 1 wurde dieser in einer Stärke von 75mm verbaut und an Gleis 2 in einer Stärke von 50mm. Dort, wo zuvor die Ultraschallsensoren platziert waren, wurden einzelne Lamellen mit Biegesensoren ausgerüstet und über einen Zeitraum von vier Monaten überwacht. Dabei ließen sich die prognostizierte Zahl an Kollisionen aus den Ultraschallmessungen durch die tatsächlich detektierten Kollisionen durch die Biegesensoren für jede Messstelle separat bestätigen. Lediglich an zwei Sensoren kam es zu einer größeren Abweichung der Kollisionsanzahl.

Insgesamt ergaben sich an Gleis 1, an dem bei 4,6% der Zugdurchfahrten eine Kollision prognostiziert wurde, bei 1,8% der Züge tatsächliche Berührungen mit dem GAP-Filler. An Gleis 2 waren bei 3,4% der Zugdurchfahrten Kollisionen zu erwarten. Die Messung der Biegesensoren ergab, dass es bei 3,0% der Zugdurchfahrten zu einer Berührung gekommen ist. Insgesamt ließen sich somit die Ergebnisse der Ultraschallmessung bestätigen. Diese Aussage ist jedoch aufgrund vieler Annahmen, die für die Auswertung der Messung der Berührungen getroffen werden mussten, mit hoher Unsicherheit verbunden nur als Näherung zu betrachten. (Barnefske 2017, S. 10ff.)

Der Versuch, die Tiefe der Eindringung in die Lamellen des GAP-Fillers abzuleiten, konnte wegen zu hoher Messungenauigkeit und der hohen Sensitivität der Sensoren im Fahrbetrieb nicht umgesetzt werden.

Weiterhin lässt sich feststellen, dass die Unsicherheit, inwieweit das tatsächliche Minimum der Spaltbreite bei der Messfrequenz von 10Hz und hoher Fahrgeschwindigkeit erfasst wird, vernachlässigbar ist. Die minimale Spaltbreite sollte sich infolge der Fliehkraft bei der Ausfahrt des Zuges an Gleis 1 einstellen. Da die Anzahl der tatsächlichen Kollisionen unterhalb der prognostizierten Zahl liegt, wird entweder das Minimum erfasst, die Fliehkraft wirkt sich weniger stark aus oder es liegen grundlegende Fehler in der Messung vor. Ebenfalls kann aufgrund der Übereinstimmung von prognostizierten und tatsächlichen Kollisionen davon ausgegangen werden, dass die Ultraschallsensoren näherungsweise den Punkt am Zug des minimal auftretenden Abstands erfasst haben. Diese Frage stellte sich, da nicht genau zu sagen ist, welchen exakten Zahlenwert die Ultraschallsensoren bei ihrem Messbereich auf der schrägen Begrenzungsleiste detektieren, siehe Abbildung 5-1.

6 Vergleich von Berechnung und Messung

In Kapitel 4 wurden für unterschiedliche Annahmen der Fahrzeugstellung im Gleis, der Fahrzeugbetriebszustände und einer Variation von Parametereinflüssen der verbleibende Spalt zwischen einem DT4-Fahrzeug und dem Bahnsteig der Haltestelle Klosterstern berechnet. Im anschließenden Kapitel 5 wurde die praktische Messung der Spaltbreite und die statistische Auswertung erläutert. Diese theoretisch berechneten minimalen Spaltbreiten werden nun mit dem Ziel, die getroffenen Annahmen zu verifizieren oder zu falsifizieren, mit den praktisch gemessenen Werten verglichen.

In den bisherigen Berechnungen der Spaltbreite war die Fahrtrichtung in Richtung der positiven Längskoordinate, also nach rechts in der grafischen Darstellung, angenommen. Die Messwerte ergeben durch die Darstellung der zeitlichen Abfolge der Messwerte eine Fahrtrichtung nach links in der grafischen Darstellung. Für den Vergleich sind die Berechnungsergebnisse transformiert, sodass in den folgenden grafischen Darstellungen die Fahrtrichtung nach links ausgereicht ist.

6.1 Vergleich von Einzelmessungen

Vorab werden exemplarisch die Verläufe von Abstandsmessungen einzelner Sensoren von zufällig ausgewählten Zugdurchfahrten mit dem berechneten Abstand entlang der Fahrzeuglänge verglichen. Hierdurch lassen sich zum einen die Berechnung und die Messung für sich, aber auch die Tauglichkeit für den direkten Vergleich der beiden überprüfen.

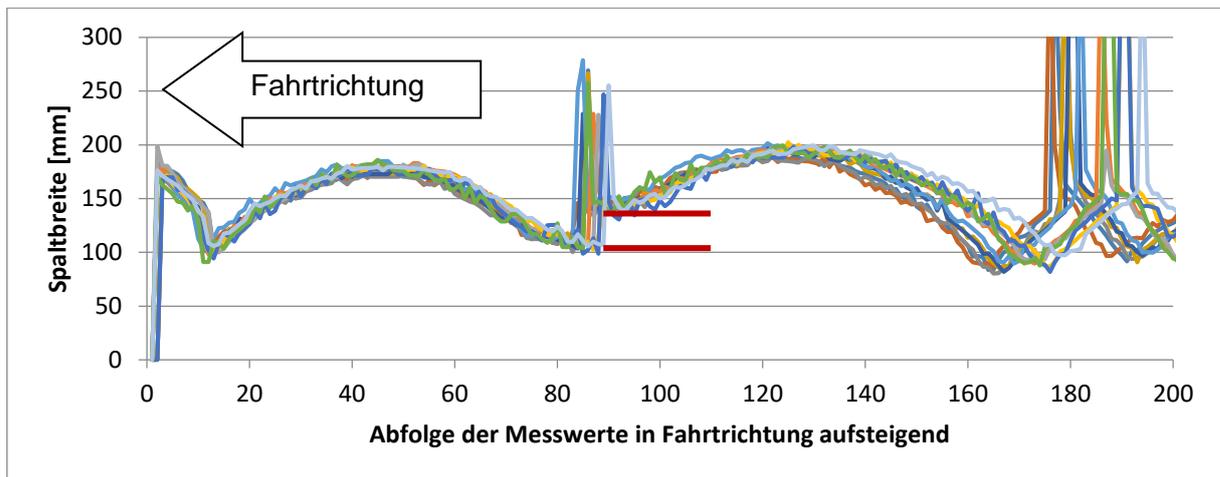


Abbildung 6-1 Einzelmessungen eines DT4.1 an den Sensoren an Gleis 1

Abbildung 6-1 zeigt eine zufällig ausgewählte Zugdurchfahrt an den 13 Sensoren an Gleis 1. Im Vergleich zu Abbildung 5-3 sind hier lediglich die ersten beiden durchfahrenden Wagen eines DT4.1 - erkennbar an der nicht unterbrochenen Begrenzungsleiste - dargestellt. Anhand dieser 13 Messungen derselben beiden Wagen lässt sich die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit des Abstandes an allen Sensoren erkennen. Bei der Betrachtung der vollständigen Messungen des gesamten Zuges kommt es mit aufsteigenden Messwerten wegen der unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Standzeiten an den unterschiedlichen Sensoren zwar zu Verschiebungen der Messungen, wodurch die Übersichtlichkeit bei der Darstellung mehrerer Messungen nicht mehr gegeben ist, der Vergleich zeigt aber auch hier die reproduzierbaren Abstände.

Auch ohne den Vergleich mit der Berechnung lässt sich bereits durch diese Abbildung die Annahme der Spießgangstellung im Laufdrehgestell bestätigen. Im mittleren Bereich zwischen dem ersten und dem zweiten Wagen kommt es trotz identischer Wagenkastenbreite zu der sprunghaften, durch die roten Linien dargestellten Änderung der Spaltbreite, da an dieser Stelle beide Wagen über das im Spießgang stehende Laufdrehgestell gekoppelt sind. Der vorlaufende Wagen links ist durch die Querverschiebung des Anlenkpunktes der Kupplungsstange infolge des Spießgangs in bogenäußere Richtung verschoben. Die Folge ist ein geringerer Spalt zum bogenäußeren Bahnsteig. Der nachlaufende Wagen ist folglich an seinem Anlenkpunkt an derselben Kupplungsstange in bogeninnere Richtung verschoben, wodurch ein größerer Spalt entsteht.

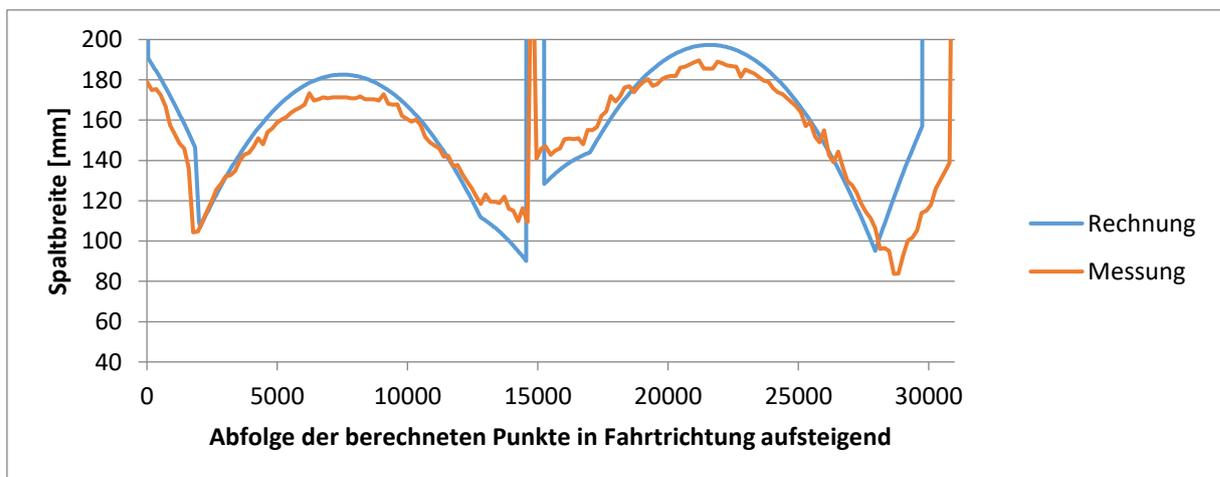


Abbildung 6-2 Vergleich der ersten beiden Wagen eines DT4.1 an Gleis 1 mit der Berechnung

In Abbildung 6-2 ist eine zufällig ausgewählte Messung Spaltbreite der ersten beiden in die Haltestelle einfahrenden Wagen mit der Berechnung derselben Wagen in der Spießgangstellung jedes Drehgestells überlagert. Die Berechnung berücksichtigt lediglich die bogengeometrische Ausragung sowie die Fahrzeugstellung durch das Spurspiel inklusive des Spurkranzverschleißes. Infolge der abnehmenden Fahrgeschwindigkeit während der Messung kommt es zu der leichten horizontalen Dehnung der Messwerte. Da es sich um die Messung der ersten beiden Wagen handelt, ist eine mittlere Fahrgeschwindigkeit und damit überwiegend eine gegenseitige Kompensation der Hangabtriebskraft und der Fliehkraft zu erwarten. Die Verläufe der Spaltbreite über die Fahrzeuglängen zeigen eindeutig dieselben Charakteristika und weichen lediglich vereinzelt voneinander ab. Insbesondere ist dabei die Spaltbreite im mittleren Bereich des Laufdrehgestells zu nennen, die in der Berechnung geringer ausfällt als gemessen.

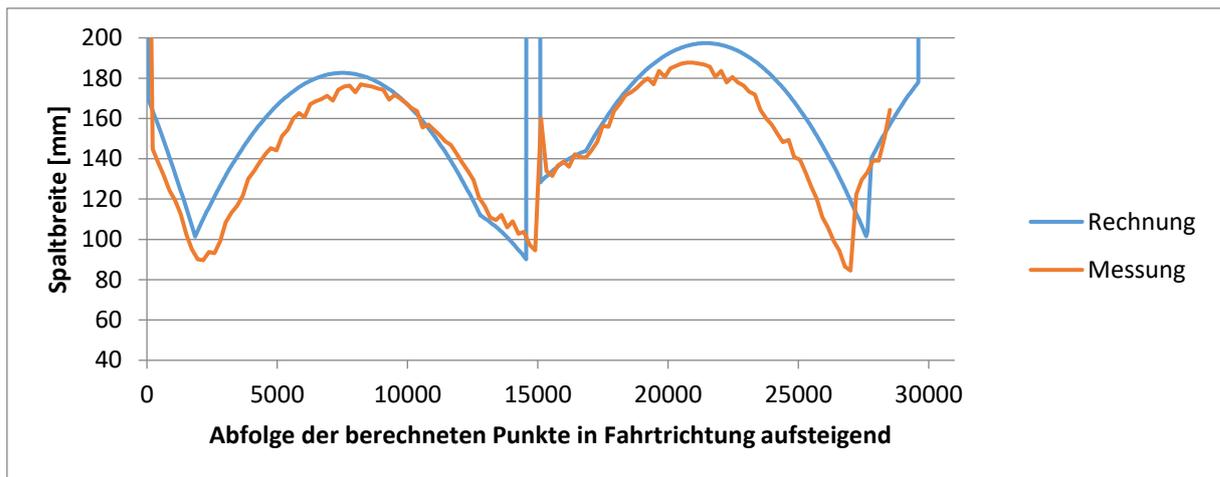


Abbildung 6-3 Vergleich der letzten beiden Wagen eines DT4.1 an Gleis 1 mit der Berechnung

Abbildung 6-3 zeigt die letzten beiden mit hoher Geschwindigkeit ausfahrenden Wagen desselben Zuges wie in Abbildung 6-2. Die zunehmende Fahrgeschwindigkeit zeigt sich an der horizontalen Stauchung des gemessenen zweiten Wagens. In der Berechnung sind ebenfalls lediglich die bogengeometrische sowie die Fahrzeugstellung berücksichtigt. Es ist zu erkennen, dass die Spaltbreite der Messung durch die wirkende Fliehkraft insgesamt geringer ist als bei den ersten beiden Wagen. Im äußeren Bereich der Triebdrehgestelle liegt die gemessene Spaltbreite nun infolge Querverschiebung in der Sekundärstufe unterhalb der berechneten Spaltbreite. Die berechnete und die gemessene Spaltbreite im mittleren Bereich des Laufdrehgestells nehmen trotz der wirkenden Fliehkraft sehr ähnliche Werte an. Der einfache Ansatz die Querverschiebung der Anlenkpunkte mithilfe der Fliehkraft und der Kennlinien der Querpuffer ist somit am komplexeren Laufdrehgestell nicht ausreichend für eine genaue Berechnung der Spaltbreite, liefert jedoch konservative Ergebnisse.

Auch bei der Betrachtung weiterer Messungen dieser DT4-Fahrzeuge an Gleis 1 zeigt sich beim Vergleich von Berechnung und Messung, dass die Querverschiebungen an dem Triebdrehgestell und dem Laufdrehgestell in der Berechnung und in der Messung nicht im selben Verhältnis stehen. Wenn die Berechnung im Bereich der Triebdrehgestelle mit der Messung übereinstimmt, liefert sie im Bereich des Laufdrehgestells eine zu geringe Spaltbreite. Stimmt die Berechnung im Bereich des Laufdrehgestells überein, dann liefert sie im Bereich der Triebdrehgestelle zu hohe Spaltbreiten. Die Betrachtungen legen damit nahe, dass sich im Fahrbetrieb am Laufdrehgestell etwas geringere Querverschiebungen einstellen, als infolge der Berechnung erwartet.

Dieser systematische Unterschied zwischen der Berechnung und Messung liegt auch in der folgenden Parametervariation vor. Da die zusätzlich berücksichtigten Einflussgrößen für

beide Drehgestelle gleichermaßen angenommen sind, kommt es in deren Folge auch zu einer gleichmäßigen Verschiebung der berechneten Spaltbreite in den verschiedenen Variationen. Die Diskrepanz im Vergleich der Minima von Rechnung und Messung im Bereich des Tribdrehgestells und des Laufdrehgestells bleibt somit auch während der durchgeführten Parametervariation erhalten.

Dieser Effekt ist zu einem geringen Teil darauf zurückzuführen, dass die Drehgestelle nicht im kompletten Spießgang stehen, sondern sich lediglich im hinteren Freilauf befinden. In dessen Folge ist der mittige Anlenkpunkt am Tribdrehgestell gegenüber dem vollständigen Spießgang in bogenäußere Richtung verschoben und die Spaltbreite verringert. Der exzentrisch gelegene Anlenkpunkt am Laufdrehgestell ist in bogeninnere Richtung verschoben und die Spaltbreite vergrößert. Somit verlagert sich der minimal auftretende Abstand zum Tribdrehgestell. Diese Annahme der Drehgestellstellung des hinteren Freilaufs ist durch Messungen der Belastungen am Radsatz und anschließenden Berechnungen des Fahrzeugs DT4 nach dem *Heumannschen Minimumverfahren* bestätigt. (Liedgens 2008) Zur Bestätigung dieser Annahme sind in Abbildung 6-4 die ersten beiden Wagen von vier zufällig ausgewählten Zugdurchfahrten eines Sensors an Gleis 1 sowie die Berechnung der Spießgangstellung dargestellt. Es sind weitere Messungen im Hinblick auf diese Annahme betrachtet worden.

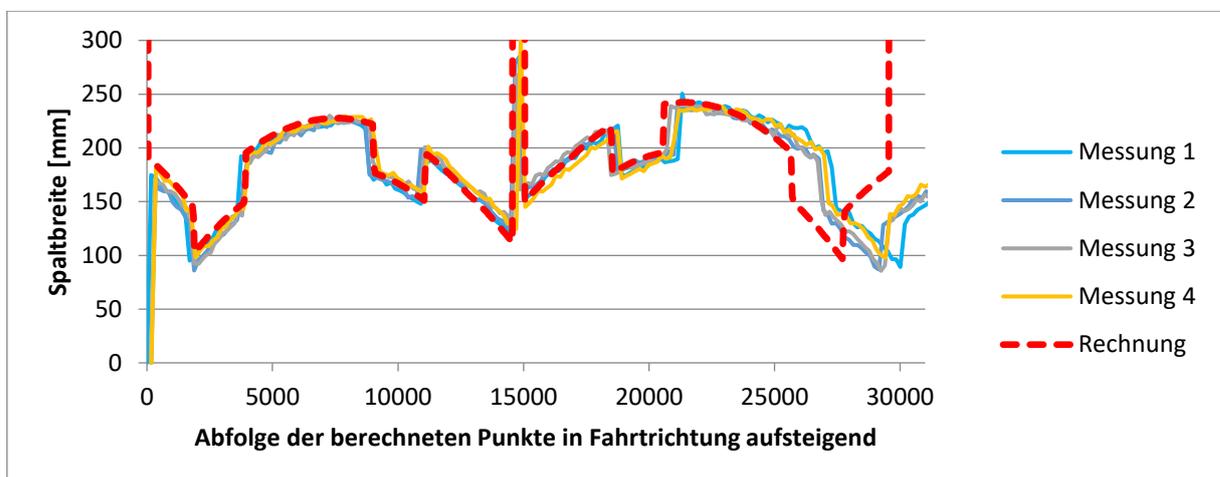


Abbildung 6-4 Vergleich mehrerer Messungen und der Berechnung eines DT4.6 an Gleis 1

Für die Analyse der Fahrzeugstellung sind in Abbildung 6-5 die mittleren beiden Trittleisten als Referenzpunkt am Wagenkasten dargestellt. Für die Trittleiste am vorlaufenden Wagen (links) ist eine hohe Übereinstimmung zwischen der Messung und der Berechnung zu erkennen. Für die Trittleiste am nachlaufenden Wagen (rechts) liefert die Berechnung höhere Spaltbreiten, als sie in der Praxis messbar sind. Dies bestätigt die Annahme des leichten hinteren Freilaufs, da der Freilauf gegenüber dem Spießgang eine Drehung um das bogenäußere Rad des vorlaufenden Radsatzes ist. Wegen der unterschiedlichen Hebellängen zwischen Drehpunkt des Drehgestells und den Anlenkpunkten (925mm zu 3475mm) kommt es dabei zu einer sehr geringen Querverschiebung des Anlenkpunktes am vorlaufenden Wagenkasten zur Spurmitte, während sich am nachlaufenden Wagenkasten eine deutliche größere Verschiebung zur Spurmitte einstellt. Die gemessenen Abstände an der Trittleiste des nachlaufenden Wagens (rechts), die im hinteren Freilauf entstanden sind, zeigen daher eine geringere Spaltbreite als der berechnete Spießgang.

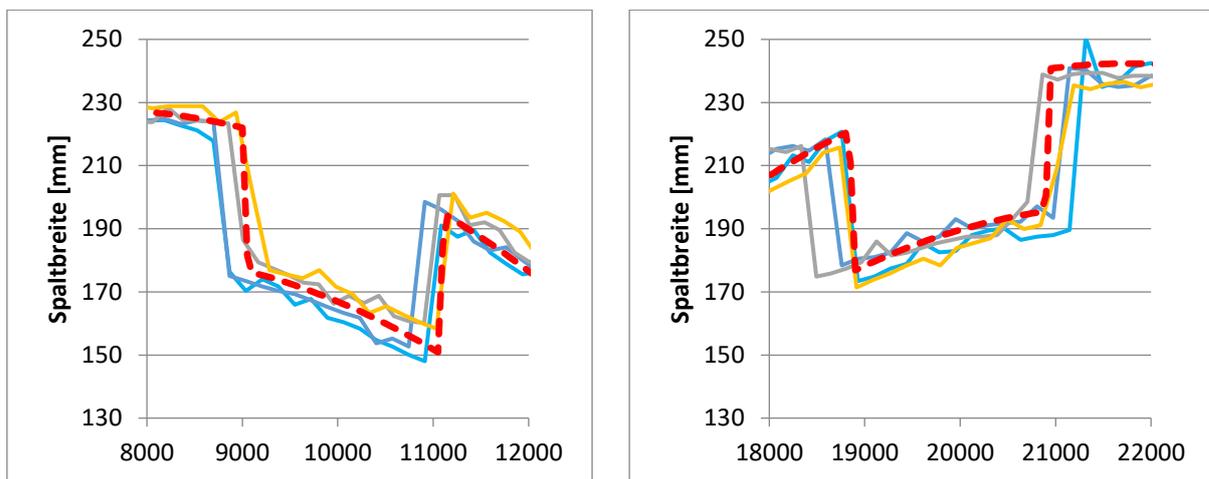


Abbildung 6-5 Detailansicht der mittleren beiden Trittleisten aus Abbildung 6-4

Für die statistische Auswertung wurde für jede einzelne Messung einer Zugdurchfahrt das jeweilige Minimum verwendet. Für die Vergleichbarkeit von Messung und Berechnung ist es damit relevant, dass auch die Lage des Minimums identisch ist und somit derselbe Punkt der Fahrzeugkontur verglichen wird. Die Betrachtungen der Einzelmessungen zeigen, dass dies für die Baureihe DT4.1 nicht immer der Fall ist. Das in den Messungen ausgeprägte Minimum im Bereich der Triebdrehgestelle unterschreitet oftmals das Minimum im Bereich des Laufdrehgestells. Dieser Umstand ist zum Großteil auf die in der Berechnung überschätzten Querverschiebungen in der Sekundärstufe des Laufdrehgestells zurückzuführen. Daneben verstärkt der hintere Freilauf durch die Verlagerung der minimal auftretenden Spaltbreite vom Laufdrehgestell zum Triebdrehgestell diesen Effekt. So ist in der Berechnung ein Minimum generiert, das in der Realität nicht vorliegt. Da das tatsächliche Minimum am Triebdrehgestell ebenfalls berechnet wird und lediglich von dem nicht real auftretenden Minimum am Laufdrehgestell unterschritten wird, ist die einfache Betrachtung der berechneten minimalen Spaltbreite als Ergebnis konservativ, wodurch dieser Fehler akzeptiert werden kann. Eine weitere Differenzierung der Messungen nach Lage des gemessenen Minimums ist ohnehin nicht möglich. Die Fahrzeuge der Baureihe DT4.6 zeigen auch in der Berechnung die Lage des Minimums im Bereich des Triebdrehgestells.

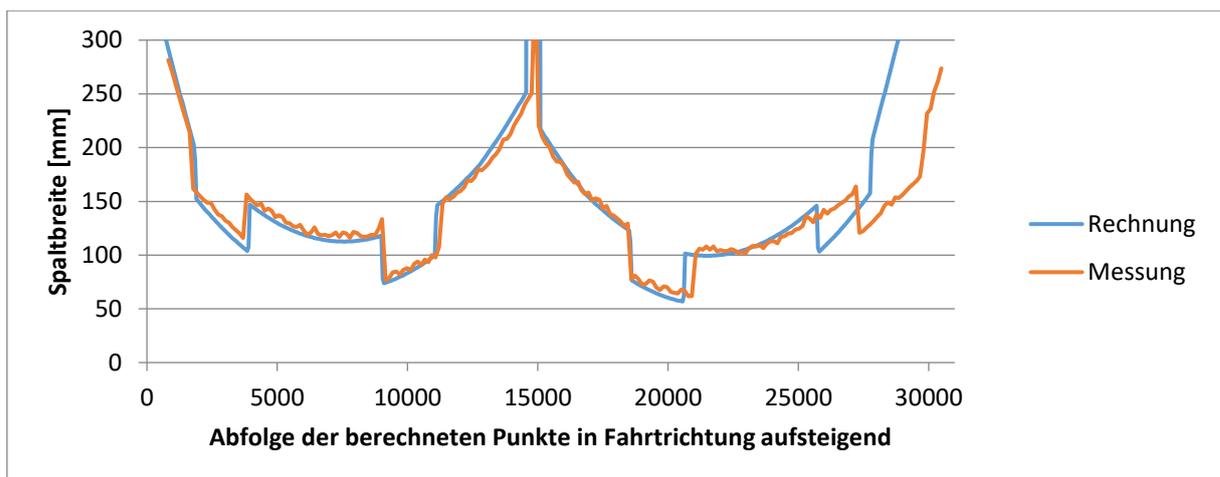


Abbildung 6-6 Vergleich des dritten und vierten Wagens eines DT4.6 an Gleis 2 mit der Berechnung

In Abbildung 6-6 sind die gemessenen Spaltbreiten des dritten und vierten langsamer einfahrenden Wagens eines DT4.6 an Gleis 2 mit der Berechnung eines Fahrzeugs im Spießgang ohne weitere Einflüsse gegenübergestellt. Auch an diesem Gleis ist eine grundsätzliche Übereinstimmung der Berechnung mit den Messwerten zu erkennen. In

diesem Beispiel liefert die Berechnung im mittleren Bereich des Laufdrehgestells eine etwas geringere Spaltbreite durch die Querverschiebung infolge der vollständigen Spießgangstellung. Abbildung 6-7 zeigt die Auswirkung der berechneten Spießgangstellung gegenüber dem gemessenen hinteren Freilauf anhand der dritten und vierten Wagen von vier zufällig ausgewählte Zugdurchfahrten an einem Sensor sowie der Berechnung des Spießgangs.

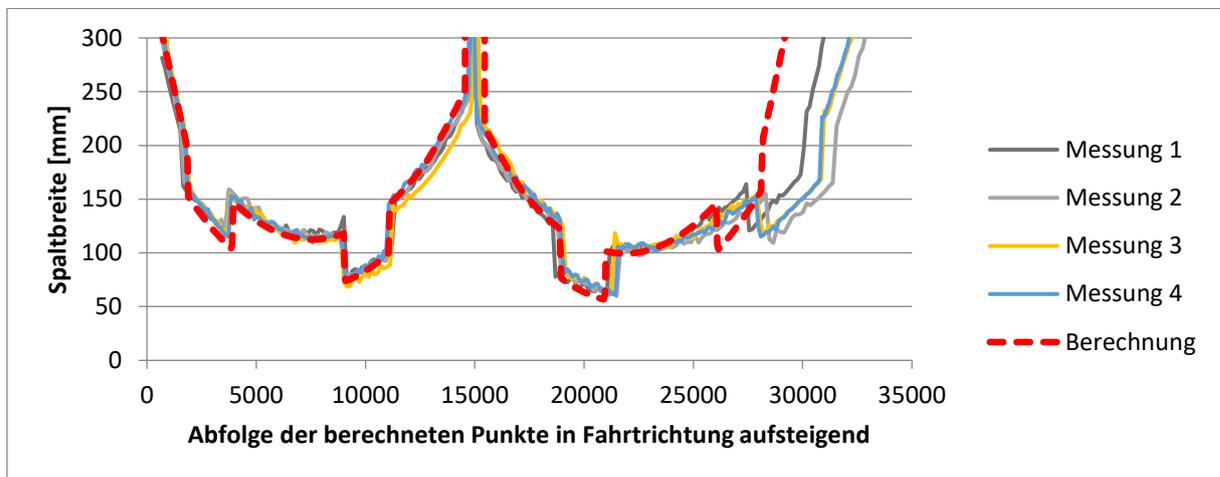


Abbildung 6-7 Vergleich mehrerer Messungen und der Berechnung eines DT4.6 an Gleis 2

Die Detailansicht der Trittleisten in Abbildung 6-8 bestätigt auch an Gleis 2 den hinteren Freilauf des Laufdrehgestells. Gegenüber dem Spießgang führt der Freilauf durch die Drehung des Drehgestells um das vorlaufende bogenäußere Rad zu einer Verschiebung des Anlenkpunktes des nachlaufenden Wagenkastens zur Spurmitte. Diese verringert deutlich die kritische Ausragung des Wagenkastens in bogeninnere Richtung und führt zu einem größeren gemessenen Spalt gegenüber dem berechneten Spießgang (rechts). Am vorlaufenden Wagenkasten (links) kommt es wegen des kurzen Hebels zwischen dem Drehpunkt des Laufdrehgestells und dem Anlenkpunkt zu keiner eindeutigen Querverschiebung.

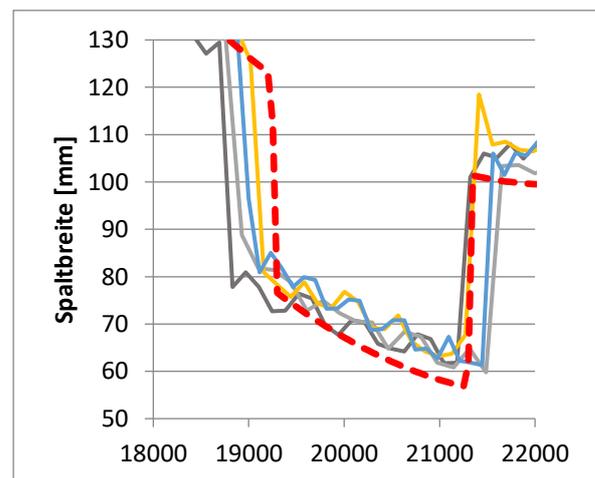
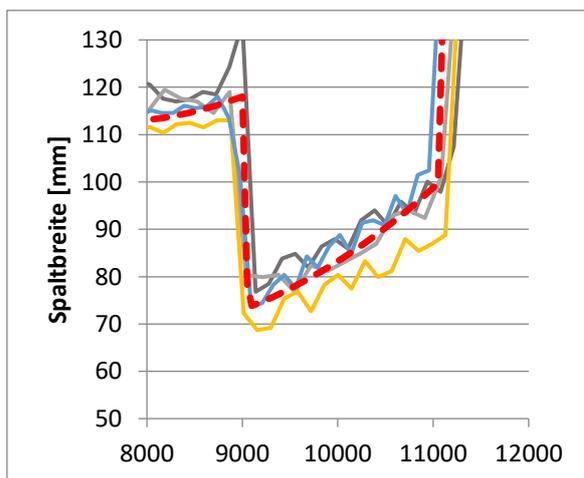


Abbildung 6-8 Detailansicht der mittleren beiden Trittleisten aus Abbildung 6-7

Die Auswirkungen auf die Verschiebung der Anlenkpunkte der Wagenkästen des hinteren Freilaufs gegenüber dem vollständigen Spießgangs ist schematisch in Abbildung 6-9 und Abbildung 6-10 zu sehen. In bogenäußere Richtung, also an Gleis 1 stellt der Wagen 1 den lichtraumkritischen Fall dar. Der hintere Freilauf bewirkt gegenüber dem Spießgang eine kleine Querverschiebung in bogenäußere Richtung am grünen Triebdrehgestell und eine

Verringerung der Querverschiebung am roten Laufdrehgestell. Dies deckt sich mit dem Vergleich der Messungen, die gegenüber der Berechnung die geringste Spaltbreite im Bereich des Triebdrehgestells aufweisen. In die bogeninnere Richtung an Gleis 2 stellt der zweite Wagen den lichtraumkritischen Fall dar. Dabei bewirkt die Drehung des roten Laufdrehgestells eine hohe Verschiebung des Anlenkpunktes zur Spurmittle gegenüber dem Spießgang. Zusätzlich verschiebt sich der Anlenkpunkt am grünen Triebdrehgestell etwas in bogenäußere Richtung. Insgesamt kommt es damit an beiden Anlenkpunkten zu einer Verschiebung in bogenäußere Richtung und damit einer Vergrößerung der Spaltbreite, was sich damit auch mit den höheren Spaltbreiten an Gleis 2 deckt.

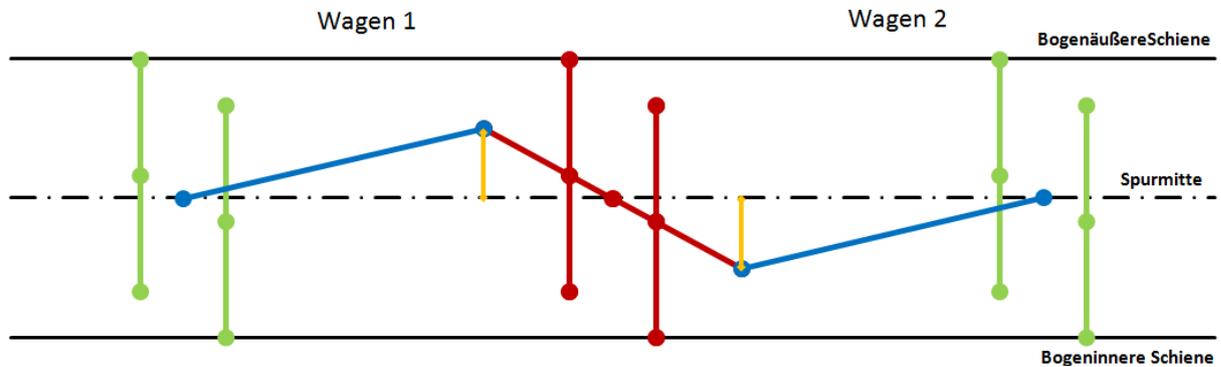


Abbildung 6-9 Verschiebung der Anlenkpunkte im Spießgang

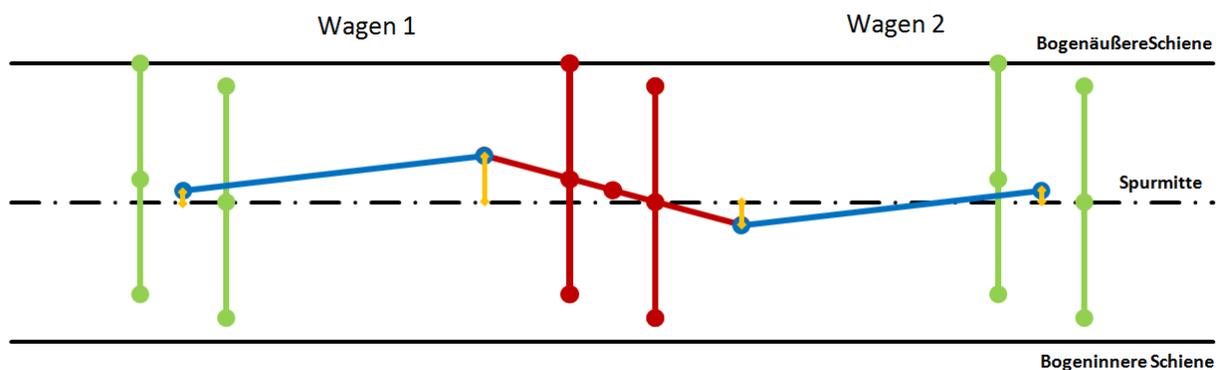


Abbildung 6-10 Verschiebung der Anlenkpunkte im hinteren Freilauf

An Abbildung 6-4 lässt sich zusätzlich die verbleibende Spaltbreite an den Trittleisten und damit die Barrierefreiheit beurteilen. An Gleis 1 in Abbildung 6-4 weist jeweils eine Trittleiste an einem Wagen einen Abstand von ca. 100mm bis 150mm zum Bahnsteig auf, die andere liegt darüber im Bereich zwischen 150mm bis 200mm. Entsprechend der DIN 18040-3 in Abbildung 2-9 ist dieser Einstieg eindeutig nicht barrierefrei. Am bogenäußeren Gleis 2 ist der Abstand zu den Trittleisten in Abbildung 6-7 zu sehen. Dieser liegt im günstigsten Fall bei 60mm bis 80mm. Es liegt damit ein Fahrzeugeinstieg vor, der nur unter Erschwernissen oder mit fremder Hilfe für mobilitätseingeschränkte Menschen zu benutzen ist.

6.2 Mittlere Spaltbreite am bogeninneren Gleis 1

Die Betrachtung der einzelnen Messungen zeigt, dass das reale Fahrverhalten, speziell die Querverschiebung in der Sekundärstufe und die Stellung der Drehgestelle, leicht von der vereinfachten Annahme des vollständigen Spießgangs und der kennlinienabhängigen Querverschiebung in der Berechnung abweicht. Dennoch lassen sich die Ergebnisse der Parametervariation mit den statistisch aus allen Zügen des Messzeitraumes ermittelten mittleren Minima und deren Konfidenzintervallen vergleichen und so die Qualität der Berechnungsergebnisse mit den vereinfacht angenommenen Einflüssen überprüfen.

Die Parametervariationen 1 bis 3 haben das Ziel, die mittlere sich einstellende minimale Spaltbreite zu bestimmen. An Gleis 1 sind zuvor drei Fahrzeugstellungen als praktisch sinnvoll betrachtet worden. Es ist außerdem zu erwarten, dass sich die kleinste Spaltbreite bei dem fahrenden Fahrzeug einstellt, daher ist auch dieser Zustand in der Berechnung angenommen.

Abbildung 6-11 zeigt zunächst die Neutralstellungen der drei Variationen an Gleis 1 und den gemessenen Mittelwert sowie das Konfidenzintervall der einfachen Standardabweichung. Obwohl sich Variation 3 durch die Berücksichtigung der Fliehkraft durch eine verringerte Spaltbreite von den ersten beiden Variationen abhebt, liegt die minimale Spaltbreite um ca. 10mm über dem Mittelwert der gemessenen minimalen Spaltbreite. Dieser kritische Punkt liegt im Bereich des Triebdrehgestells des Wagens.

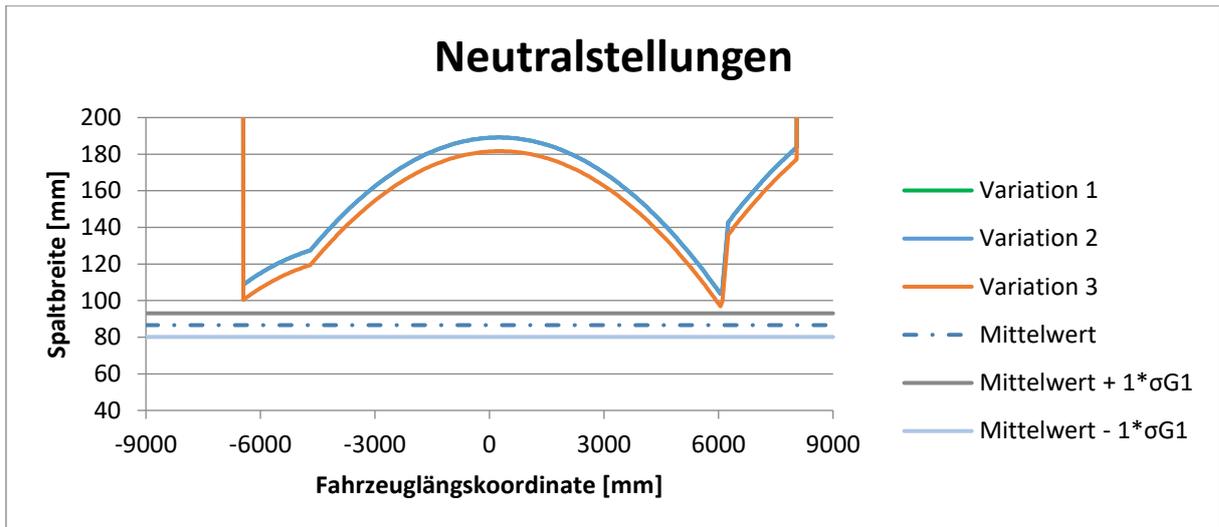


Abbildung 6-11 Spaltbreite der Neutralstellungen der Variationen 1-3 DT4.1 Wagen 1 an Gleis 1 ($st1=0; st2=0; LG=0; TG=0$)

Da bei der Neutralstellung des Fahrzeugs in der Spurmitte allein durch die Ausprägung der fahrzeugtechnischen Parameter der berechnete minimale Spalt deutlich über dem tatsächlich gemessenen minimalen Spalt liegt, wird der Spießgang jedes einzelnen Drehgestells betrachtet. In der Praxis liegt lediglich entsprechend der Beobachtungen ein spießgangnaher hinterer Freilauf vor. Abbildung 6-12 zeigt, wie sich für alle Variationen die engste Spaltbreite nun im Bereich des Laufdrehgestells einstellt.

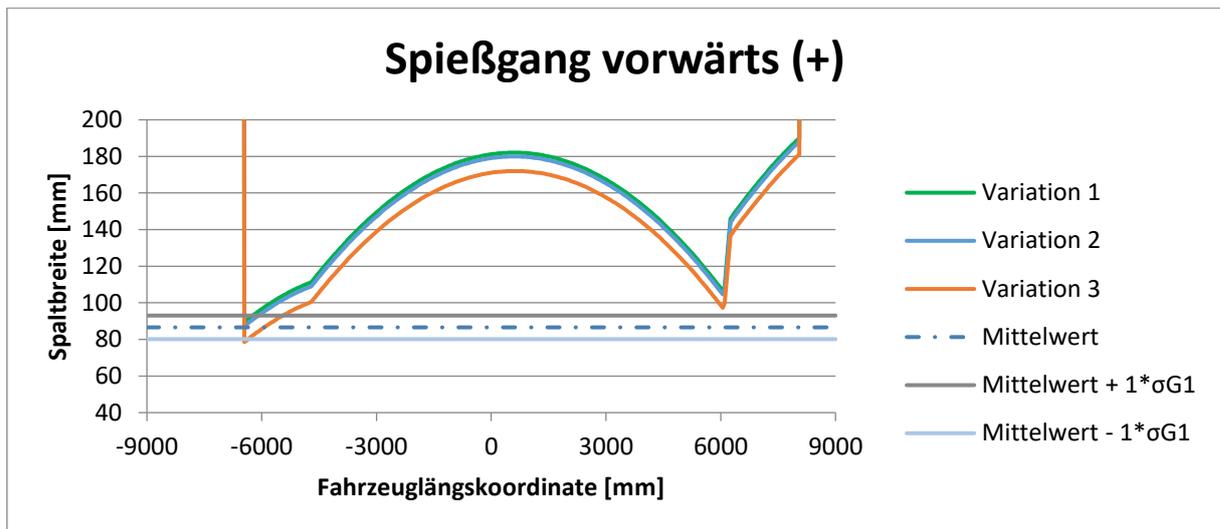


Abbildung 6-12 Spaltbreite des Spießgangs (+) der Variationen 1-3 DT4.1 Wagen 1 an Gleis 1 (st1=1;st2=1;LG=1;TG=1)

Die Vergrößerung dieses Bereichs in Abbildung 6-13 zeigt, dass das Minimum von Variation 2 beinahe exakt mit dem Mittelwert der gemessenen Spaltbreite übereinstimmt. Variation 1 erreicht dieses Minimum ohne die berücksichtigten Querverschiebungen der freien Wege nicht. Die zusätzliche Berücksichtigung der quasistatischen Querverschiebung infolge der Fliehkraft verringert das Minimum der Spaltbreite in Variation 3 um ca. die einfache Standardabweichung des gemessenen Abstandes. Neben der Bestätigung der Annahme, dass vorwiegend die spießgangnahe Fahrzeugstellung im Fahrbetrieb auftaucht, scheint auch die Betrachtung der freien Wege praxisnahe Ergebnisse zu liefern. Die in Kapitel 6.1 gemachte Beobachtung, dass die Querverschiebung in der Sekundärstufe im Laufdrehgestell in der Praxis geringer ausfällt als in der kraftabhängigen Berechnung prognostiziert, zeigt sich damit auch in der statistischen Auswertung.

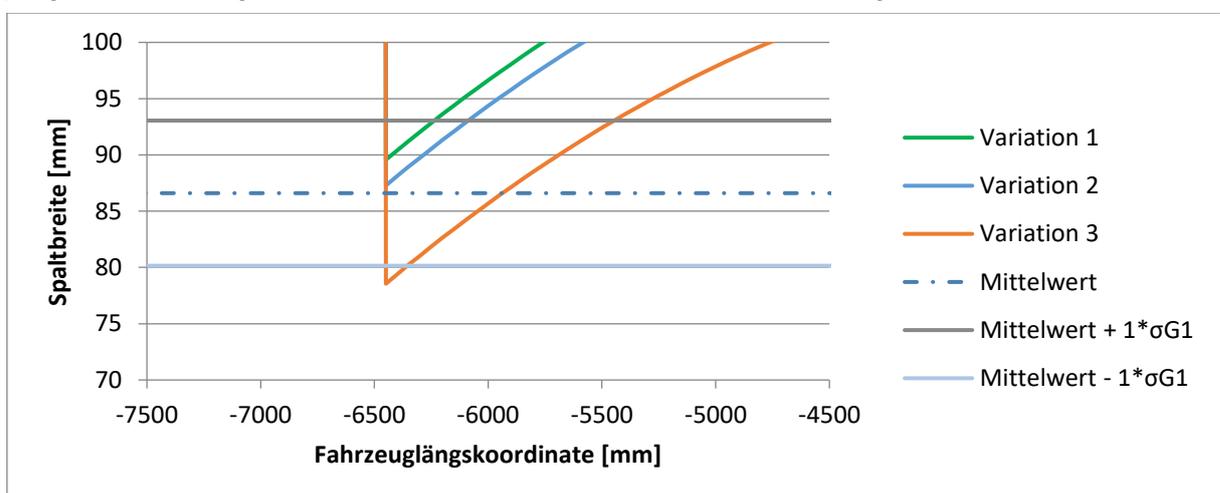


Abbildung 6-13 Lichtraumkritischer Bereich aus Abbildung 6-12

Aufgrund der kürzen Begrenzungsleisten kommt es bei der Baureihe DT4.6 zu anderen Spaltbreiten. Insbesondere verlagert sich das Minimum für die betrachtete Spießgangstellung in den vorderen Bereich des Triebdrehgestells. Es tritt auf bei einem vorlaufenden Laufdrehgestell, welches den Anlenkpunkt in bogeninnere Richtung verschiebt. Die Spaltbreiten für einen Wagen in dieser Fahrtrichtung sind in Abbildung 6-14 zu sehen.

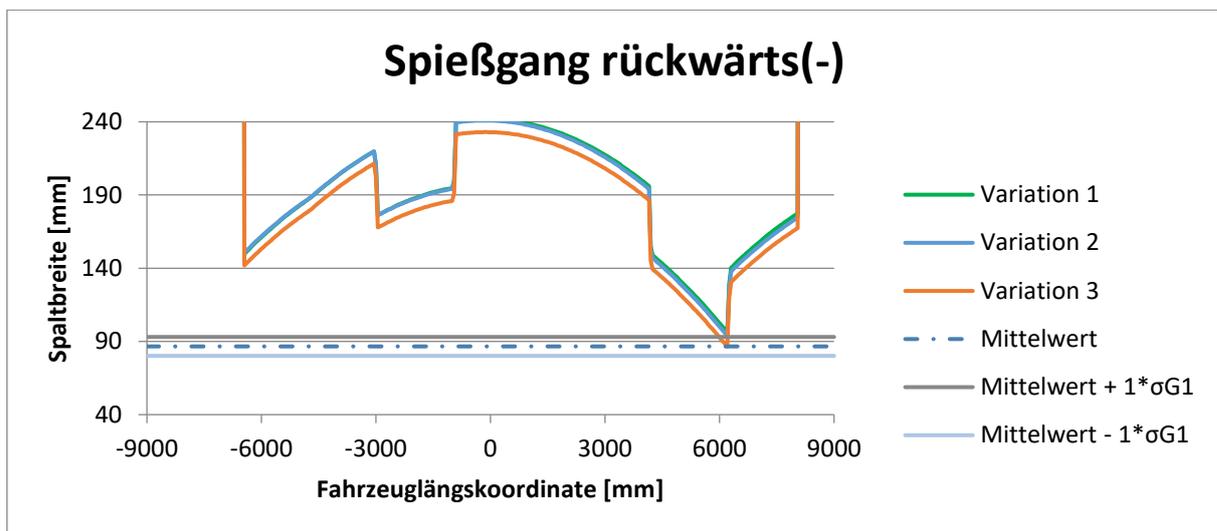


Abbildung 6-14 Spaltbreite des Spießgangs (+) der Variationen 1-3 DT4.6 Wagen 1 an Gleis 1 (st1=1;st2=1;LG=-1;TG=1)

In der Detailansicht Abbildung 6-15 ist erkennbar, dass das Minimum aus Variation 3, welche die kraftabhängige Querverschiebung in der Sekundärstufe berücksichtigt, den gemessenen Mittelwert erreicht. Im Bereich des Triebdrehgestells zeigten sich diese Querverschiebungen bereits in Kapitel 6.1 als praxisnah.

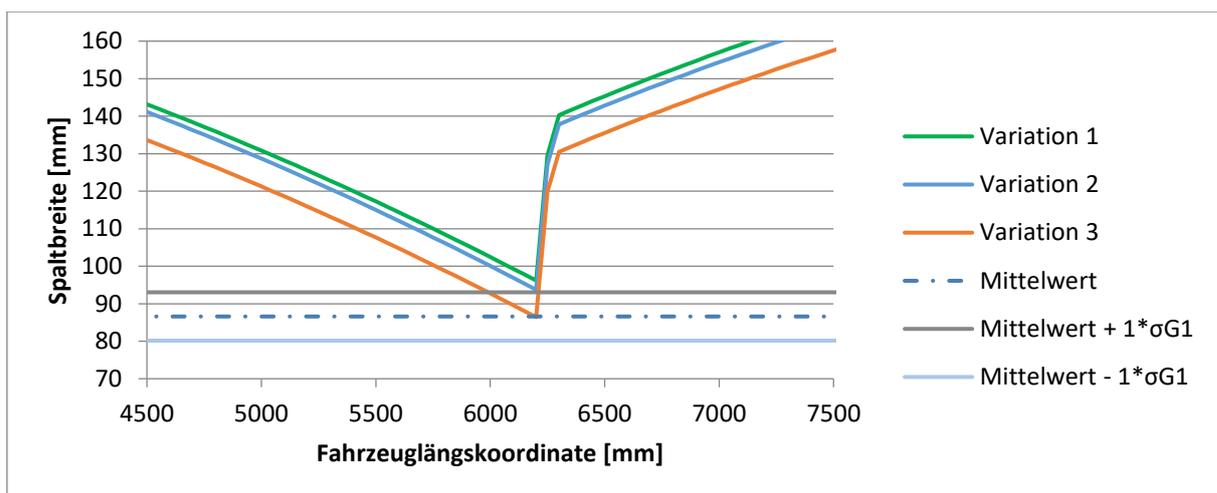


Abbildung 6-15 Lichtraumkritischer Bereich aus Abbildung 6-14

Trotz der Abweichung der kritischen Punkte am Fahrzeug zwischen Berechnung und Messung, ließ sich mit der Berechnung und den Parametervariationen die tatsächliche gemessene Spaltbreite an Gleis 1 sehr gut nachbilden. Die getroffene Annahme der dritten Variation, die im Wesentlichen die freien und kraftabhängigen quasistatischen Verschiebungen in der Primär- und Sekundärfederstufe berücksichtigt, beschreibt mit guter Genauigkeit auf einem sehr einfachen Weg die durchschnittlich auftretende minimale Spaltbreite.

6.3 Mittlere Spaltbreite am bogenäußeren Gleis 2

An Gleis 2 ist das Fahrzeug im stehenden Zustand betrachtet, da dabei infolge der Hangabtriebskraft die geringste Spaltbreite zu erwarten ist. Abbildung 6-16 zeigt, dass in der neutralen Fahrzeugstellung bereits lediglich unter der Berücksichtigung des Wankeinflusses in Variation 1 und Variation 2 der minimale Spalt in der Fahrzeugmitte annähernd identisch zu dem gemessenen mittleren minimalen Spalt ist. Die Annahme, dass sich die

quasistatischen Querverschiebungen infolge Hangabtriebskraft durch die Gleisüberhöhung entsprechend der Kennlinien der Querpuffer ausprägen, wie sie in Variation 3 berücksichtigt sind, scheint in dieser Höhe im Regelfall nicht aufzutreten. Durch diesen Einfluss wird der mittlere Spalt bereits deutlich um mehr als eine Standardabweichung der Messwerte unterschritten.

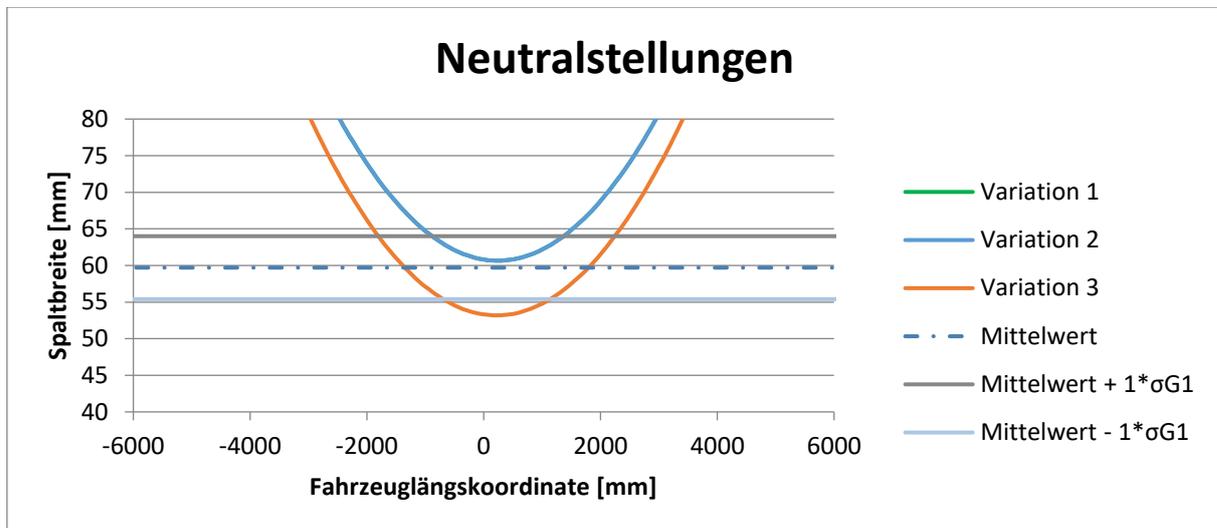


Abbildung 6-16 Spaltbreite der Neutralstellungen der Variationen 1-3 DT4.1 Wagen 1 an Gleis 2
($st1=0;st2=0;LG=0;TG=0$)

Abbildung 6-17 zeigt den rückwärtsfahrenden Spießgang. Das Laufdrehgestell ist dabei so verdreht, dass der Anlenkpunkt in bogeninnere Richtung zum Bahnsteig verschoben ist und damit der minimale Abstand zu erwarten ist. Allein diese Fahrzeugstellung im Gleis führt dabei zu einer Unterschreitung des gemessenen mittleren Abstandes. Die Betrachtung der quasistatischen Querverschiebung in bogeninnere Richtung verringert die Spaltbreite zusätzlich. Auch bei dem Fahrzeug der Baureihe DT4.6 mit der unterbrochenen Begrenzungsleiste kommt es entsprechend der Abbildung 6-18 zu einer ähnlich hohen Unterschreitung des mittleren gemessenen Abstandes in dieser Fahrzeugstellung.

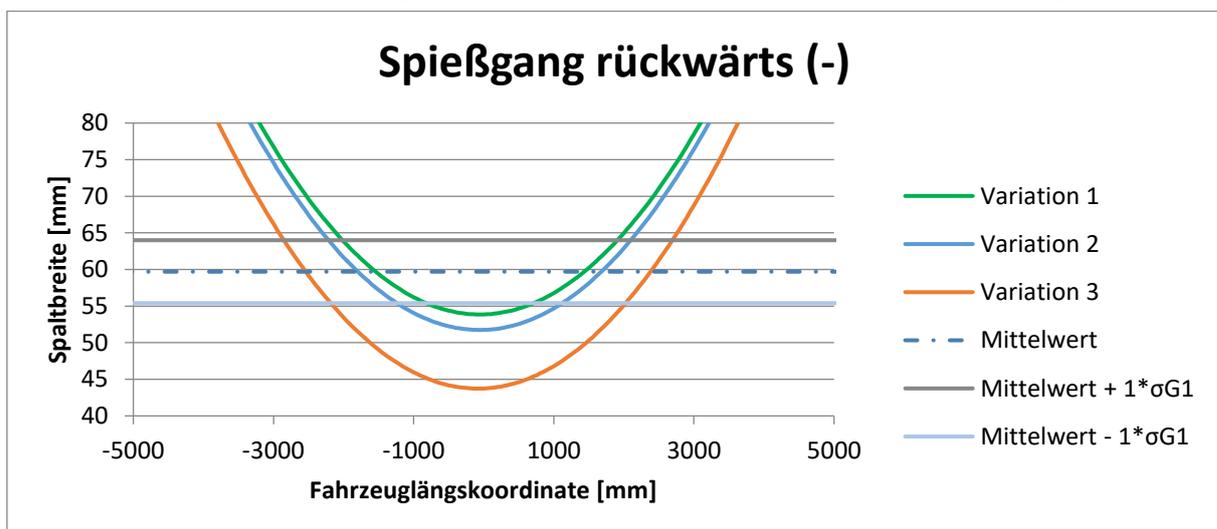


Abbildung 6-17 Spaltbreite des Spießgang (-) der Variationen 1-3 DT4.1 Wagen 1 an Gleis 2
($st1=-1;st2=-1;LG=-1;TG=-1$)

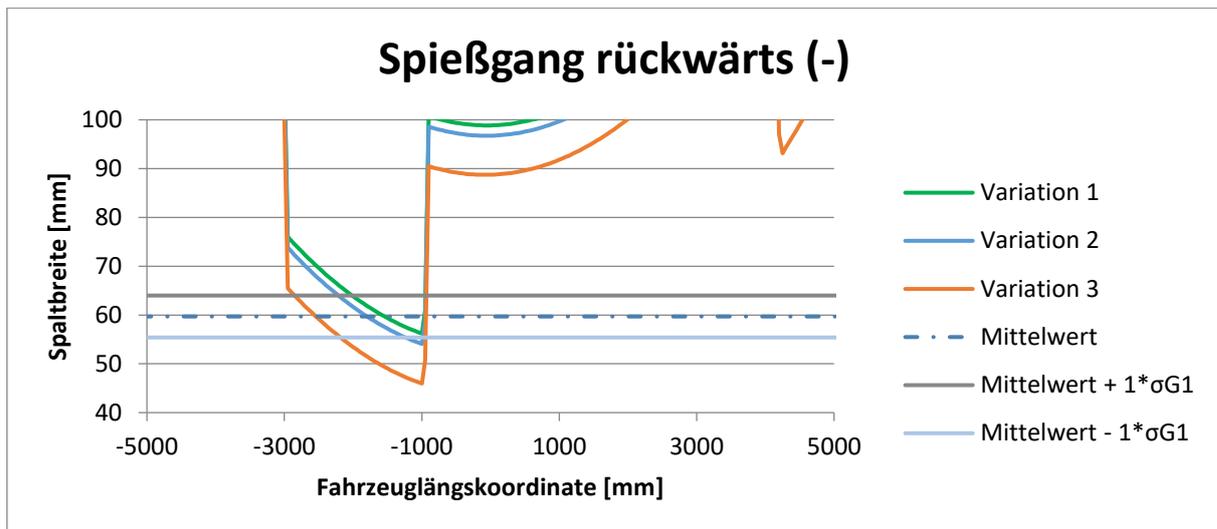


Abbildung 6-18 Spaltbreite des Spießgang (-) der Variationen 1-3 DT4.6 Wagen 1 an Gleis 2
($st1=-1$; $st2=-1$; $LG=-1$; $TG=-1$)

Die an Gleis 2 deutlich geringeren berechneten minimalen Spaltbreiten gegenüber den gemessenen Spaltbreiten lassen sich zu einem Teil auf die in Kapitel 6.1 gemachte Vermutung des hinteren Freilaufs der Drehgestelle zurückführen. Dabei kommt es gegenüber dem vollständigen Spießgang an beiden Anlenkpunkten des kritischen Wagenkastens zu einer Querverschiebung in bogenäußere Richtung und damit zu einer deutlichen Vergrößerung der Spaltbreite. Die Lage der Anlenkpunkte und der Verlauf der Spaltbreite nähern sich damit der Neutralstellung in Abbildung 6-16 an.

Zusätzlich lassen die gemessenen Spaltbreiten annehmen, dass die wirkende Hangabtriebskraft nicht ausreicht, um die hohen quasistatischen Querverschiebungen in der Sekundärstufe der dritten Variation zu bewirken. Vielmehr ist ein Verharren der freien Wege und Lager in bogenäußeren Positionen auch nach Stillstand des Fahrzeugs denkbar.

Insgesamt weist die Berechnung nach der dritten Variation damit mehrere Fehler auf und bildet die Messung weniger genau ab als an Gleis 1. Da jedoch alle erkennbaren Fehler zu einer Verringerung der Spaltbreiten führen, liefert die Berechnung konservative Ergebnisse.

Die zuvor betrachtete innere Sehnenstellung des Fahrzeugs an Gleis 2 ist wegen des eindeutigen in den Messungen zu erkennenden Freilaufs bzw. Spießgangs nicht mehr dargestellt.

6.4 Streuung der Spaltbreite

Der bisherige Vergleich der gemessenen Spaltbreiten mit den Berechnungen der ersten drei Variationen stellt die durchschnittlich auftretenden minimalen Spaltbreiten dar. Die vierte Variation bildet durch eine hohe Fahrzeugbesetzung, ungünstig wirkende Fahrzeugbautoleranzen und höheren Verschleiß den praktischen Betriebsfalls ab, bei dem die geringste Spaltbreite zu erwarten ist. Die Wahrscheinlichkeit des ungünstigen Zusammentreffens der zufälligen Bautoleranzen ist in der Berechnung berücksichtigt.

Abbildung 6-19 zeigt, wie die berechnete minimale Spaltbreite dieses Betriebsfalls und die Streuung der gemessenen minimalen Spaltbreite an Gleis 1 zueinander liegen. Für das Fahrzeug DT4.1 mit durchgehender Trittleiste erreicht das berechnete Minimum den um die dreifache Standardabweichung verringerten durchschnittlichen Messwert. Dieser Fall ist mit ca. 0,14% ein im Betrieb sehr unwahrscheinlich auftretender Fall. Das Fahrzeug DT4.6, mit der unterbrochenen Trittleiste und der kritischen Spaltbreite im Bereich des Triebdrehgestells, erreicht etwa den um die 1,2-fache Standardabweichung verringerten Mittelwert. Dieser Wert wird von ca. 10% der passierenden Züge unterschritten.

Die minimalen Spaltbreiten der vierten Variation liegen abhängig von der Fahrzeugstellung um ca. 1,2 bis 1,7 Standardabweichungen unterhalb der berechneten dritten Variation. Die damit verbundene deutlich geringere Auftretenswahrscheinlichkeit passt zu den getroffenen Annahmen der vierten Variation. Da die Messwerte auch vereinzelt Fahrzeuge anderer Baureihen beinhalten, welche damit auch zu einer erhöhten Standardabweichung beitragen, liegt die Standardabweichung bei der Betrachtung von ausschließlich DT4-Fahrzeugen vermutlich etwas geringer, was die praktische Auftretenswahrscheinlichkeit der berechneten Fahrzeugstellungen der vierten Variation zusätzlich verringert.

Insgesamt lässt sich damit festhalten, dass die vierte Variation, basierend auf praktischen Annahmen von Verschleiß, Fahrzeugbesetzung und Toleranzen, die betrieblich zu erwartenden Schwankungen der Spaltbreite gut nachbildet. Während sie im Bereich des Triebdrehgestells auch im Betrag zu den gemessenen Spaltbreiten passt, zeigt sich auch in dieser Variation, dass die hohen angenommenen Querverschiebungen im Laufdrehgestell in der Praxis offensichtlich nicht auftreten und die Berechnung damit konservativ ausfällt.

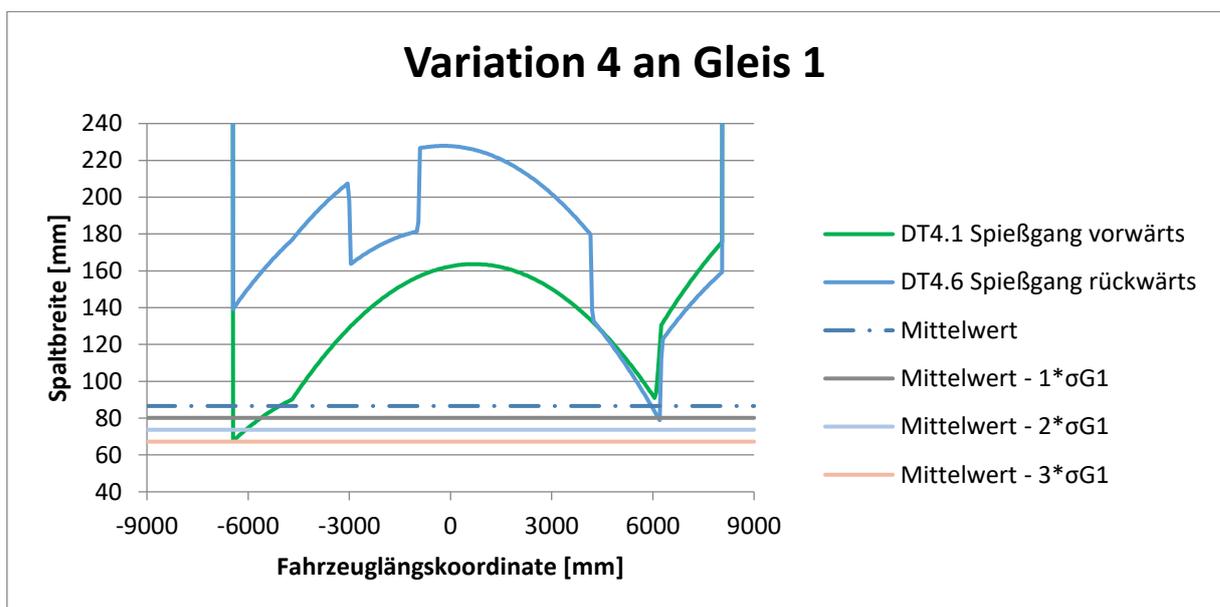


Abbildung 6-19 Spießgangstellungen von DT4.1 ($st1=1;st2=1;LG=1;TG=1$) und DT4.6 ($st1=1;st2=1;LG=-1;TG=1$) der Variation 4 an Gleis 1

Abbildung 6-20 zeigt die Spießgangstellung des stehenden Fahrzeugs an Gleis 2. In den vorherigen Untersuchungen wurde schon festgestellt, dass es an Gleis 2 zu höheren Differenzen der minimalen Spaltbreite zwischen den Berechnungen des Spießgangs und der Messung kommt. Daher wird anhand dieser Betrachtung lediglich eine Aussage über die zusätzliche Verringerung der Spaltbreite für den ungünstigsten Betriebsfall gegenüber dem durchschnittlichen Betriebsfall gemacht. Das Minimum der Spaltbreite der vierten Variation des DT4.1 von 35mm liegt 9mm unterhalb des Werts der dritten Variation, siehe Abbildung 4-34. Dies entspricht etwa dem Betrag von zwei Standardabweichungen der Messwerte an diesem Gleis und passt damit zu der Betrachtung derselben Variationen an Gleis 1.

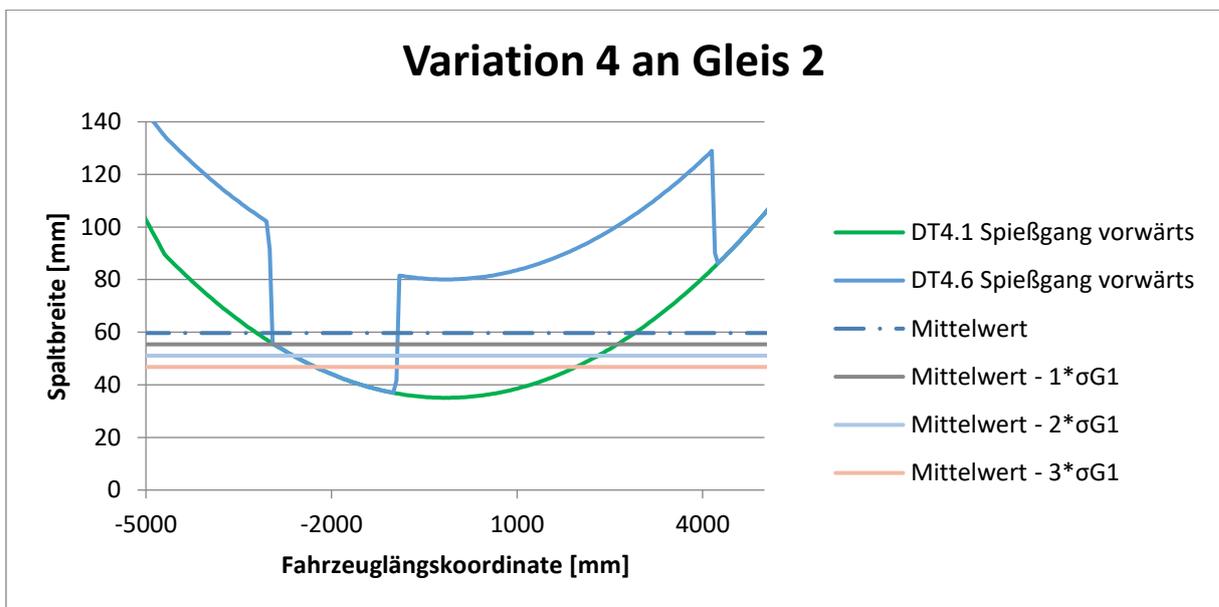


Abbildung 6-20 Spießgangstellungen von DT4.1 ($st1=-1;st2=-1;LG=-1;TG=-1$) und DT4.6 ($st1=-1;st2=-1;LG=-1;TG=-1$) der Variation 4 an Gleis 2

Die Variationen 5 und 6 gehen über die betrieblich zu erwartenden Bewegungen und Veränderungen an Fahrzeug und Infrastruktur hinaus und stellen Extremwerte dar, wie sie in dem Nachweis nach BOStrab angenommen werden. Variation 5 legt maximale Veränderungen der Fahrzeugparameter bei den real vorliegenden Bedingungen der Gleisinfrastruktur zugrunde und ist damit vergleichbar mit den gemessenen Spaltbreiten. Es sind dafür weiterhin die Spießgangstellungen dargestellt. Zwar lassen sich bei der Betrachtung aller untersuchten Fahrzeugstellungen unabhängig von ihrer physikalischen Erklärbarkeit noch etwas geringere Spaltbreiten ermitteln, der Unterschied ist jedoch minimal, sodass die Vergleichbarkeit mit den vorherigen Variationen an dieser Stelle im Vordergrund steht. Die berechnete minimale Spaltbreite an Gleis 1 für diesen Betriebsfall, Abbildung 6-21, liegt auf demselben Niveau wie eine Verringerung des Messwertes um die sechsfache Standardabweichung. Das bedeutet auf Basis der Messwerte, dass theoretisch 1,7 von einer Million passierenden Zügen diese Einflussparameter annehmen könnten und so den Abstand von ca. 48mm unterschreiten. Bei der Betrachtung des auch in der Praxis häufiger auftretenden Minimums im Bereich des Triebdrehgestells erreicht das berechnete Minimum Streuung der vierfachen Standardabweichung des Messwertes. Dieser Abstand von ca. 60mm wird damit mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,00315% unterschritten, womit diese Fahrzeugstellung und insbesondere die Ausprägung dieser fahrzeugtechnischen Einflüsse nach BOStrab offensichtlich in der Praxis nicht eintreten.

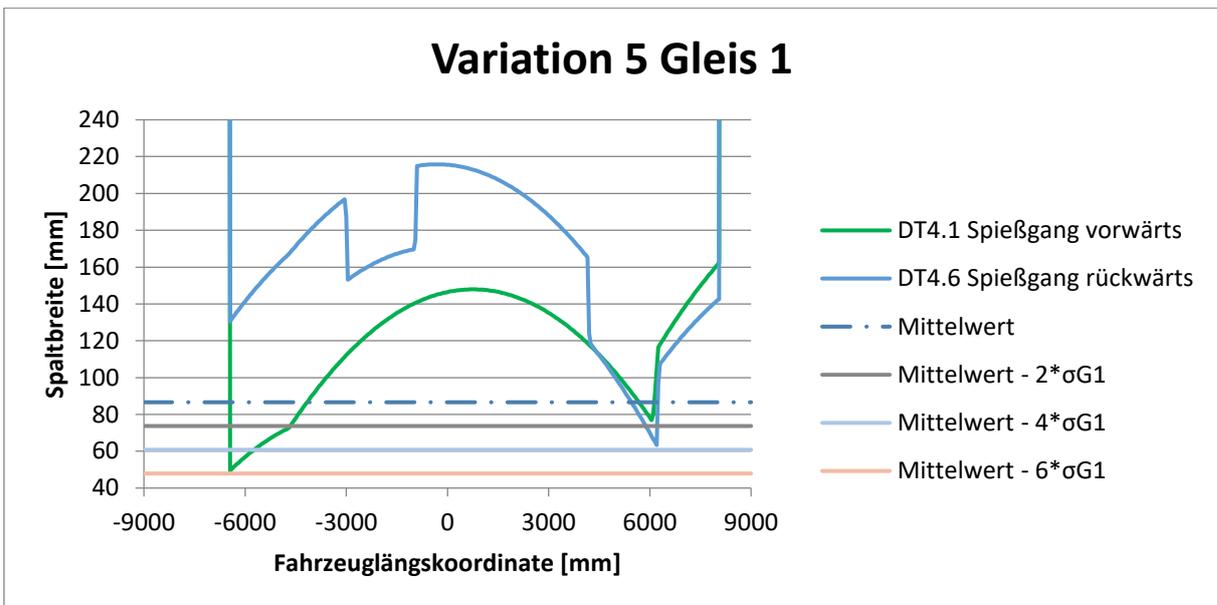


Abbildung 6-21 Spießgangstellungen eines DT4.1(st1=1;st2=1;LG=1;TG=1) der Variation 5 und Variation 6 an Gleis 1

Die Spießgangstellung der fünften Variation an Gleis 2 ist in Abbildung 6-22 dargestellt. Wegen der Berechnung im vollständigen Spießgang und der hohen Querverschiebung infolge der Hangabtriebskraft weicht diese berechnete Spaltbreite noch stärker von der gemessenen Spaltbreite ab als an Gleis 1. Die berechnete Spaltbreite liegt bei etwa der neunfachen Standardabweichung der Messwerte und bildet damit eindeutig keinen realistischen Betriebsfall.

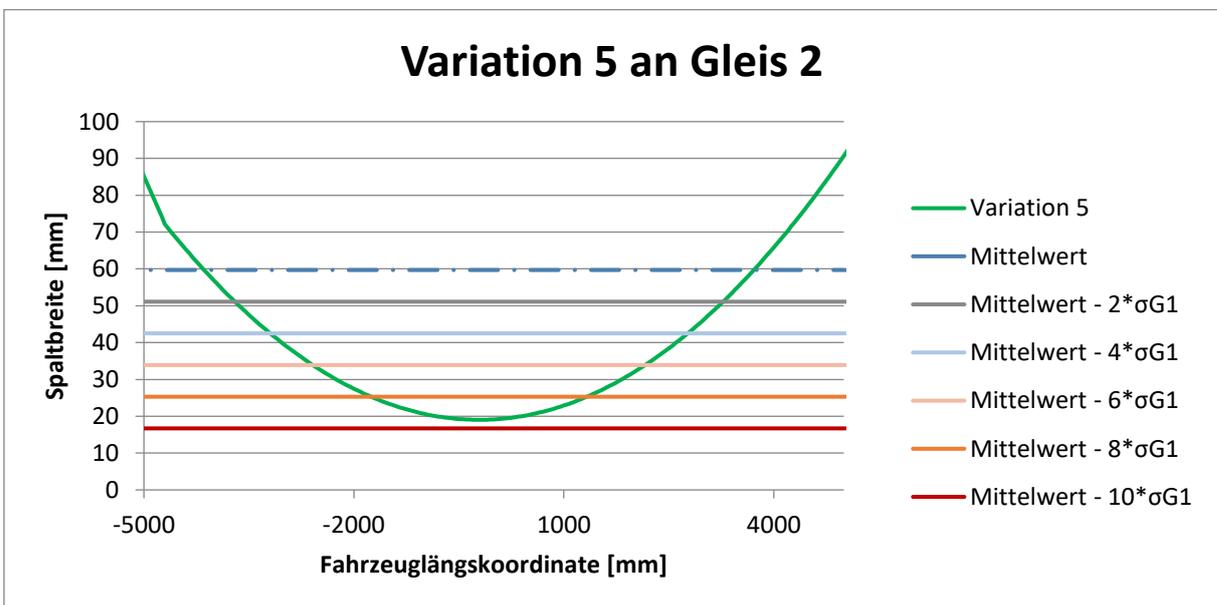


Abbildung 6-22 Spießgangstellungen eines DT4.1(st1=-1;st2=-1;LG=-1;TG=-1) der Variation 5 und Variation 6 an Gleis 2

6.5 Ergebniszusammenfassung

Die genauere Betrachtung der einzelnen Messungen zeigt die hohe Reproduzierbarkeit der realen Spaltbreiten im Betrieb. Dabei unterlag die Messung mit den vereinzelt Fremdfahrzeugen anderer Baureihen, einer geringen Messfrequenz, der gemessenen Gleislage als Grundlage der Berechnung und einer vereinfachten Wagenkastenkontur ohne Radien vielen Unsicherheiten. Trotz der Messunsicherheiten, unterschiedlicher

Fahrzeugbesetzungen, Geschwindigkeiten, Verschleißzuständen und allen weiteren zufällig auf das Fahrzeug einwirkenden Einflüssen streut die gemessene Spaltbreite nur sehr gering.

Daraus ergibt sich notwendigerweise, dass auch die Fahrzeugstellung im Gleis und die fahrzeugtechnischen Querverschiebungen nur geringen Schwankungen unterliegen. Diese prägen sich also wiederkehrend entsprechend der vorherrschenden Kraftverhältnisse aus und reagieren dabei sehr unempfindlich auf betriebliche Variationen und äußere Störgrößen. Auf diesem Weg lässt sich damit der vermutete und rechnerisch bestätigte spießgangnahe hintere Freilauf mit den Messungen bestätigen.

Der direkte Vergleich der berechneten Spaltbreiten und der Messungen der Spaltbreiten zeigt, wie präzise sich die Realität durch eine Berechnung mit wenigen berücksichtigten Einflussfaktoren beschreiben lässt. Der Verlauf der Spaltbreite in Abhängigkeit von der Längskoordinate lässt sich detailliert nachverfolgen und erlaubt so neben der Fahrzeugstellung im Gleis auch Rückschlüsse auf die Querverschiebungen innerhalb des Fahrzeugs. Während sich die durchschnittliche Lage der Querverschiebung der freien Wege im Achslager und in der Primär- und Sekundärstufe aufgrund ihrer geringen Größe nicht eindeutig identifizieren lassen, findet sich die deutlich größere Querverschiebung in der Sekundärstufe in der Messung wieder. Der einfache Ansatz auf Basis der Fliehkraft und der Federkennlinien der Querpuffer für die Berechnung dieser Querverschiebung liefert insbesondere in der Sekundärstufe des Triebdrehgestells gute Ergebnisse. Die Verschiebung der Kupplungsstange im Laufdrehgestell fällt deutlich geringer aus, als die Berechnung auf diesem Weg ermittelt. Die exzentrische Anbindung zweier auf reibungsbehaftetem Gleitplatten aufliegenden Wagenkästen stellt eine komplexe Konstruktion dar, wodurch die einfache kraftabhängige Ermittlung der Verschiebung der Anzahl an gekoppelten Bauteilen und deren Wechselwirkungen nicht gerecht wird. Insgesamt ergeben sich aber auf diesem Weg eindeutig konservative Ergebnisse, wodurch diese vereinfachte Betrachtung in diesem Fall ausreichende Sicherheit bietet. Die wirkende Hangabtriebskraft bei langsamer Fahrt bzw. im Stillstand des Fahrzeugs bewirkt ebenfalls in der Praxis geringere Querverschiebungen als die Berechnung annimmt. Es liegt nahe, dass die Querverschiebung aufgrund der inneren Reibungsverhältnisse in den Federstufen nicht in der berechneten Höhe ausfällt.

Trotz des Versuchs, über die Annahmen in der dritten Variation die mittlere minimale gemessene Spaltbreite möglichst praxisnah nachzubilden, zeigte sich, dass die Berechnung geringere Spaltbreite liefert, als sie in der Praxis auftreten. Diese Abweichung ist jedoch überwiegend auf die in der Berechnung angenommene vollständige Spießgangstellung und die kraftabhängige Querverschiebung in der Sekundärstufe zurückzuführen. Der Fehler ist somit zu identifizieren und führt zu konservativen Ergebnissen.

Über die vierte Variation fand sich die Auswirkung der betrieblichen anzunehmenden Grenzwerte der Schwankungen des Zustands und der Besetzung des Fahrzeugs auf den Lichtraumbedarf in den Messwerten wieder. Eine höhere Fahrzeugbesetzung, ein überdurchschnittlich hoher Spurkranzverschleiß und ungünstig ausfallende Fahrzeugbautoleranzen bewirken zusammen eine plausibel erscheinende Verringerung der mittleren Spaltbreiten um etwa die 1,5-fache Standardabweichung der Messwerte des jeweiligen Gleises. Die gemeinsame Auftretenswahrscheinlichkeit der zufälligen Bautoleranzen ist in der Berechnung berücksichtigt. Ob diese Faktoren tatsächlich in der Praxis diese Streuung der Spaltbreite bewirken oder ob diese durch andere betriebliche Schwankungen, wie zum Beispiel die Fahrgeschwindigkeit, entstehen, ist nicht abzuschätzen.

Die Untersuchung zeigt, dass diese Methode der Lichtraumbedarfsberechnung mit passenden Annahmen auf einem einfachen Weg sehr praxisnahe Ergebnisse liefern kann. In

diesem Fall stellen die Auswirkung der von der Fahrzeuggeometrie abhängigen bogengeometrischen Ausragung und die Fahrzeugstellung im Gleis die mit Abstand signifikantesten Einflussgrößen auf die Spaltbreite und damit den Lichtraumbedarf auf dieser Höhe dar. Die bogengeometrische Ausragung ist eindeutig zu berechnen. Die Fahrzeugstellung im Gleis unterliegt zwar äußeren Einflüssen, zeichnet sich bei den Messungen allerdings durch höchste Reproduzierbarkeit aus und entspricht den Berechnungen und den Erfahrungswerten. Die weiteren Einflüsse der Querverschiebungen in Primär- und Sekundärstufe lassen sich in dieser Untersuchung durch einfache Kräftebetrachtungen beschreiben, welche im Zweifelsfall konservative Ergebnisse liefern. Damit zeigen die Messungen eindeutig, dass die hohen Querverschiebungen, die entsprechend der BOStrab Lichtraumberechnung in der Primär- und Sekundärstufe angenommen werden, im realen Fahrbetrieb nicht auftreten. Unter diesen fahrzeugtechnischen Annahmen weicht das berechnete Minimum um mehr als das Sechsfache der Standardabweichung von dem durchschnittlich gemessenen Minimum der Spaltbreite ab. Die zusätzliche Berücksichtigung aller nach BOStrab notwendigen Einflüsse führt zu einer weiteren Abweichung der berechneten Spaltbreiten und der gemessenen Spaltbreiten. Der Bahnsteig an beiden Gleisen liegt deshalb um etwa die 13-fache Standardabweichung vom gemessenen mittleren Minimum entfernt.

7 Vorschläge zur Modifikation der Berechnung

Die Messungen der Spaltbreiten haben im direkten Vergleich mit der Berechnung des Lichtraumbedarfs nach den Lichtraum-Richtlinien nach BOStrab die Höhe der vorhandenen Sicherheiten in diesem Nachweisverfahren quantifiziert. Die vorhandenen Sicherheiten werden, wie bereits erwartet, in der Praxis bei weitem nicht ausgenutzt. Der Grund dafür liegt in der Anzahl der berücksichtigten Einflussgrößen und deren angenommenen Werten, die die theoretisch ungünstigsten Fälle abbilden sollen. Dies führt zu diesen äußerst konservativen Ergebnissen, welche sich stark einschränkend auf die Baubreite der Wagenkästen auswirken. Die Folge ist eine geringere Fahrgastkapazität und ein vergrößerter Spalt zwischen Zug und Bahnsteig. Eine zusätzliche Betrachtung weiterer möglicherweise auftretender Effekte würde diese bereits jetzt schon ungenutzte Sicherheitsreserve und die komplexe Nachweisführung weiter erhöhen.

Auf Basis dieser Arbeit lässt sich zwar keine Änderung der Berechnungsrichtlinie durchführen, sie zeigt jedoch neben der Höhe der vorhandenen Sicherheiten erste Ansätze mit Verbesserungspotential auf. Diese beziehen sich auf die fahrzeugtechnischen Einflussfaktoren auf den Lichtraumbedarf, da die kurzen Messstrecken keine allgemeinen Rückschlüsse auf die gleistechnischen Einflussfaktoren zulassen. Der Einfluss des Fahrzeugwankens kann durch die Messung auf Bahnsteighöhe, in der ein Wanken kaum Querverschiebung bewirkt und damit nicht messbar ist, nicht untersucht werden. Wie sich dieser Einfluss in anderen Fahrzeughöhen auswirkt und ob die Berechnung nach BOStrab an dieser Stelle praxisnahe Ergebnisse liefert, ist separat zu untersuchen.

Bei der Berechnung der Spaltbreite zeigt sich insbesondere die Fahrzeugstellung im Gleis als äußerst signifikante Einflussgröße. Allein unter der Variation dieses Einflusses lassen sich sehr unterschiedliche Spaltbreiten berechnen. Mit der Berechnung des Spießgangs, der dem tatsächlichen hinteren Freilauf sehr nahekommt, lässt sich mit der Berücksichtigung dieser einen Einflussgröße der Verlauf der Spaltbreite entlang des Fahrzeugs bereits praxisnah bis auf wenige Millimeter genau berechnen. Da die gemessenen Spaltbreiten zeigen, dass in der Realität äußerst reproduzierbar nur eine Fahrzeugstellung eintritt, führt die Berücksichtigung aller denkbaren Fahrzeugstellungen zu hohen Einschränkungen bzw. Sicherheiten. In der Regel lässt sich auf Basis von Erfahrungswerten oder Berechnungs- und Simulationsergebnissen eine vorherrschende Fahrzeugstellung identifizieren. Gleichzeitig

lassen sich andere Fahrzeugstellungen in Kombination mit deren Bedingungen für ein Auftreten für viele Situationen, z.B. starken Seitenwind in einer Tunnelhaltestelle, logisch ausschließen oder wenigstens als unwahrscheinlich und zufällig auftretend kategorisieren. Ein belastbarer Nachweis für diesen sicherheitsrelevanten Aspekt gestaltet sich dennoch schwierig. Es bleibt damit das Wissen, dass mit den unwahrscheinlichen Fahrzeugstellungen der inneren Sehnenstellung und der Spießgangstellung des Wagenkastens, siehe Abbildung 3-4, Fälle betrachtet werden, die vermutlich in der Realität nicht eintreten und damit Sicherheitsreserven geschaffen werden.

Der fahrzeugtechnische Einfluss der Querverschiebung der Primärfederstufe bildet sich in der Praxis vermutlich kaum aus. Eine nennenswerte Querverschiebung in dieser Federstufe würde aufgrund der hohen lateralen Steifigkeit der Rollfeder nicht erklärbar Kräfte erfordern, die in ihrer Folge zu übermäßig hohen Querverschiebungen in der Sekundärstufe führen würden. Die Betrachtung der Kräfte und daraufhin gering angenommene Querverschiebungen liefern sichere Ergebnisse. Für eine konservativere Betrachtung können höhere Verschiebungen als Folge von Unstetigkeiten im Lauf des Fahrzeugs als zufälliger Einfluss berücksichtigt werden. Die Querverschiebungen in den Achslagern und der freien Wege in der Sekundärstufe ließen sich aufgrund ihrer geringen Größe in den Messwerten nicht eindeutig identifizieren, daher haben sie auch nur einen geringen Beitrag zum Lichtraumbedarf beitragen können. Somit ist auch die vereinfachte Annahme, dass die Verschiebungen in der Primärfederstufe und im Achslager an beiden Radsätzen in dieselbe Richtung ausgeprägt sind, für diese Berechnung völlig ausreichend. Eine zusätzliche Differenzierung der beiden Radsätze eines Drehgestells an dieser Stelle erhöht lediglich die Komplexität durch weitere zu betrachtende Parameterkombinationen ohne zusätzlichen Erkenntnisgewinn. Bei Fahrzeugen mit höheren freien Wegen an diesen Elementen wird sich dieser Einfluss vermutlich als signifikant erweisen und erfordert gegebenenfalls eine detailliertere Betrachtung.

Die quasistatische Querverschiebung in der Sekundärstufe stellt sich als signifikanter Einfluss dar, der jedoch durch eine simple Betrachtung der wirkenden Flieh- und Hangabtriebskräfte und der Kennlinien der Querpuffer beschrieben werden kann. Die Berechnung der Querverschiebung in diesem Element fällt in der Praxis wegen der inneren Reibungsverhältnisse geringer aus als die Berechnung annimmt. Somit gestaltet sich dieses Verfahren als konservativ und könnte in einem Nachweis angewandt werden. Die Annahme maximaler Querverschiebungen bis in die Anschläge führt zu überdimensionierten Sicherheiten, da die dafür notwendigen Kräfte nicht vorliegen. Die zusätzlichen zufälligen dynamischen Einflüsse als Seitenstoß oder Laufunstetigkeit lassen sich durch diese Untersuchung nur eingeschränkt beurteilen. Die geringe Streuung der Messwerte legt nahe, dass diese sich kaum ausprägen, jedoch ist der untersuchte Gleisabschnitt nicht repräsentativ. Die Streckenführung lässt keine größeren Störungen erwarten, die über die Gleislage in das Fahrzeug geleitet werden.

Ähnlich hohe Sicherheiten sind durch die bisher nicht betrachteten gleistechnischen Einflussgrößen zu erwarten. Änderungen des Verschleißes und der Lage der Gleise werden sich auch hier größtenteils entsprechend bestimmter Muster und Erfahrungswerte einstellen, sodass die angenommenen Grenzwerte für die Lichtraumberechnung in der Praxis nicht eintreten.

Insgesamt bringt damit annähernd jede der Einflussgrößen eine Sicherheit mit sich, die sich zu diesem hohen einschränkenden Gesamtbetrag aufaddieren, wodurch die zusätzliche Betrachtung weiterer Einflussgrößen bei einer Überarbeitung der Lichtraum-Richtlinien definitiv nicht erforderlich ist. Der Fokus einer Überarbeitung sollte vielmehr auf der Verringerung der Sicherheitsreserve bei einer gleichzeitigen Vereinfachung der komplexen Nachweisführung liegen. In diesem Einzelfall wäre dies durchaus möglich gewesen. Die

Lichtraum-Richtlinien selbst bieten bereits eine Rechnung mit reduzierten Einflüssen, welche mit dem Spurspiel, der Gleisverschiebung und der Abweichung der gegenseitigen Höhenlage der Schienen nur wenige Einflüsse betrachtet. Für die Vernachlässigung aller weiteren Einflussgrößen wird jedoch ein äußerst hoher Sicherheitsabstand zugeschlagen, sodass diese Rechnung letztendlich noch konservativere Ergebnisse liefert als die detailliertere Betrachtung.

Ein Lichtraumnachweis, der die signifikanten Einflussgrößen detailliert mit möglichst praxisnahen Annahmen betrachtet und nicht signifikante Einflussgrößen in einem geringeren Sicherheitszuschlag zusammenfasst, würde den Aufwand des Nachweises verringern und gleichzeitig durch die Bündelung der Sicherheitszuschläge der nicht signifikanten Einflussgrößen die gesamte Sicherheitsreserve verringern. Für diesen Fall wären die Fahrzeugstellung und die quasistatische Querverschiebung in der Sekundärstufe detailliert zu betrachten. Der Vergleich der Berechnung und der Messung zeigt, dass bereits ein Sicherheitszuschlag von zehn bis zwanzig Millimetern, was einer mehrfachen Standardabweichung der Streuung der Spaltbreite entspricht, eine hohe statistische Sicherheit bietet. Für eine allgemeingültige Formulierung der Richtlinie müssten jedoch weitere Fahrzeugbaureihen, Streckenabschnitte, Fahrzeugkoordinaten und andere Faktoren in zusätzlichen statistischen Untersuchungen auf signifikante Einflüsse untersucht werden. Zukünftige Messungen, die in diesem Kontext durchgeführt werden, sollten dabei eine Verknüpfung einzelner Messungen mit bestimmten Zügen herstellen und damit eine Filterung nach Fahrzeugtyp ermöglichen.

8 Fazit

Diese Arbeit stellt eine Untersuchung der Lichtraumbedarfsberechnung von U-Bahn-Fahrzeugen und der darin enthaltenen Sicherheitsreserve dar. Im Zentrum steht dabei eine vergleichende Gegenüberstellung von dem nach dem Verfahren der BOStrab-Lichtraum-Richtlinien berechneten Lichtraumbedarf und dem tatsächlich im Betrieb auftretenden Lichtraumbedarf. Die praktischen Vergleichsdaten bilden die Messungen der verbleibenden Spaltbreite zwischen dem Zug und dem Bahnsteig an einer Haltestelle.

Der Vergleich bestätigte, dass die derzeitige für die Fahrzeugauslegung relevante Lichtraumbedarfsrechnung konservative Ergebnisse mit hoher Sicherheitsreserve liefert. Der verbleibende Spalt zwischen dem Zug und dem Bahnsteig zeigt sich in der Praxis deutlich größer, als die Lichtraumbedarfsrechnung mit der Betrachtung der ungünstigsten denkbaren Fahrzeugannahmen berücksichtigt. Vielmehr noch lieferten die Messungen der verbleibenden Spaltbreiten äußerst reproduzierbar die gleichen Ergebnisse bei einer geringen Streuung. Von der Vielzahl der rechnerisch betrachteten Fahrzeugstellungen und Betriebssituationen tritt somit nur eine unter geringen betrieblichen Schwankungen in der Praxis ein. Der Großteil der in den Lichtraum-Richtlinien betrachteten Fälle ist damit für den regulären Fahrbetrieb irrelevant und wirkt sich dennoch einschränkend auf die Wagenkastenbreite aus.

Mithilfe der Messungen der Spaltbreite und einer Variation der Einflussparameter der Lichtraumberechnung ließen sich die tatsächlichen Spaltbreiten in einer Berechnung nachbilden. Das Berechnungsverfahren selbst gleicht dabei dem Verfahren nach den Lichtraum-Richtlinien und erwies sich grundlegend als geeignet. Dabei zeigten sich insbesondere die angenommene Fahrzeugstellung im Gleis, aber auch die Querverschiebung in der Sekundärfederstufe, als signifikante Einflussgrößen. Die in den Messwerten erkennbare Fahrzeugstellung im Gleis als spießgangnaher hinterer Freilauf deckte sich dabei mit bereits vorhandenen Erfahrungswerten und anderen Berechnungen. Für die Ermittlung der Querverschiebung in der Sekundärstufe zeigte sich ein einfacher kraftabhängiger Ansatz als praxisnäher und zugleich konservativ. Insbesondere für diese

beiden signifikanten Einflussparameter wäre eine ergänzende Untersuchung mit einer Mehrkörper-Simulation von Interesse. Die betrieblich anzunehmenden Schwankungen unterschiedlicher auf den Lichtraumbedarf wirkender fahrzeugtechnischer Einflussgrößen wie Fahrzeugbautoleranzen und Verschleiß bewirkten rechnerisch einer Veränderung der Spaltbreite, die sich innerhalb eines plausiblen 95%-igen Konfidenzintervalls der tatsächlichen gemessenen Spaltbreiten bewegt. Die nach der BOStrab anzunehmenden Grenzwerte der fahrzeugtechnischen Einflussgrößen übersteigen in ihrer Höhe die zu erwartenden praktischen Werte. Für diesen speziellen Fall ließe sich somit insgesamt mit wenigen vereinfachten Annahmen ein statistisch sicherer und gleichzeitig weniger einschränkender Lichtraumnachweis führen.

Insgesamt konnte auf diesem Weg quantifiziert werden, wie stark der berechnete Lichtraum nach den BOStrab-Lichtraum-Richtlinien durch die Berücksichtigung aller Fahrzeugstellungen und hoher Grenzwerte der Einflussparameter den tatsächlichen Lichtraumbedarf übersteigt. Diese Untersuchung bezieht sich wegen der Zuhilfenahme der Messungen der Spaltbreite als betriebliche Referenz auf die Fahrzeugbaureihe DT4 an den beiden 13m-langen Bahnsteigabschnitten der Haltestelle Klosterstern und lässt damit noch keine allgemeingültigen Schlüsse auf die Lichtraumberechnung zu. Gleichzeitig konnte durch die feststehende Infrastruktur keine Aussage zum Einfluss und der Sicherheit gleistechnischer Einflussgrößen gemacht werden.

Die Arbeit zeigt aber Potential auf, mit dem die Betrachtung des Lichtraums als wichtige Fahrzeugauslegungsgröße effizienter gestaltet werden kann. Eine Überarbeitung sollte den Fokus zum einen auf eine Vereinfachung der Nachweisführung durch eine Reduktion auf die wesentlichen Einflussgrößen und zum anderen auf eine Reduktion der vorhandenen und einschränkenden Sicherheiten auf ein sinnvolles Maß legen. Durch anknüpfende umfassende Überlegungen und Untersuchungen kann durch die Betrachtung unterschiedlicher Fahrzeuge, unterschiedlicher Infrastruktur und weiterer betrieblicher Sonderfälle dieser spezielle Einzelfall in eine allgemeingültige Richtlinie überführt werden.

Auf diesem Weg kann partiell den steigenden Anforderungen an den urbanen öffentlichen Nahverkehr mit höhere Fahrzeugkapazitäten und schnellen, selbständigen und barrierefreien Ein- und Ausstiegen für alle Fahrgäste begegnet werden.

9 Literaturverzeichnis

- ADAC 2018** Allgemeiner Deutscher Automobil-Club e.V. (ADAC): *Barrierefreie Verkehrsinfrastruktur*. URL <https://www.adac.de/-/media/pdf/vek/fachinformationen/infrastruktur/barrierefreie-verkehrsinfrastruktur-adac-bro.pdf>. Aktualisierungsdatum: 05.09.2019
- Barnefske 2017** BARNEFKSE, Eike: *Monitoring für Gap-Filler. Bericht über das Monitoring von Zugberührungen am Gap-Filler mit Biegesensoren im U-Bahnhof Klosterstern von 17. März 2017 - 10. Juli 2017*. Hamburg: HafenCity Universität Hamburg; Hamburger Hochbahn AG, 2017.
- BOStrab 1987** BGBl. I S. 2648: *Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (Straßenbahn-Bau- und Betriebsordnung - BOStrab)*, 11.12.1987.
- BOStrab-Lichtraum-Richtlinien 1996** *Vorläufige Richtlinien für die Bemessung des lichten Raumes nach der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab)*, Dezember 1996.
- Brandhorst et al. 2014** BRANDHORST, Michael; DELLMANN, Torsten, HAIGERMOSER, Andreas; HECHT, Markus; KARCH, Stefan; LÖFFLER, Günter; RÖSCH, Wolfgang, SCHINDLER, Christian (Hrsg.): *Handbuch Schienenfahrzeuge*. Hamburg: DVV Media Group | Eurailpress, 2014.
- Hanneforth et al. 1986** HANNEFORTH, Wolfgang; FISCHER, Werner: *Laufwerke*. Berlin: Transpress, 1986.
- HOCHBAHN** Hamburger Hochbahn AG (HOCHBAHN): *Interne Zeichnungen und Dokumente*
- HOCHBAHN 2010** Hamburger Hochbahn AG (HOCHBAHN): *Regeln für Planung, Entwurf und Bau von U-Bahn-Anlagen in Hamburg Teil 2: Trassierung (RUT)*. Hamburg: 2010.
- HOCHBAHN 2019** Hamburger Hochbahn AG (HOCHBAHN): *Einsteigen und die Geschichte der HOCHBAHN erleben*. URL https://www.hochbahn.de/hochbahn/hamburg/de/Home/Unternehmen/Unser_Job_fuer_Hamburg/Geschichte. Aktualisierungsdatum: 28.10.2019
- Ihme 2016** IHME, Joachim: *Schienenfahrzeugtechnik*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2016.
- Janicki et al. 2008** JANICKI, Jürgen; REINHARD, Horst: *Schienenfahrzeugtechnik*. 2. Aufl. Heidelberg: Bahn Fachverlag, 2008.
- Jänsch 2019** JÄNSCH, Eberhard. In: FENDRICH, Lothar (Hrsg.); FENGLER, Wolfgang(Hrsg.): *Handbuch Eisenbahninfrastruktur*. 3. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2019.
- Knothe et al. 2003** KNOTHE, Klaus; STICHEL, Sebastian: *Schienenfahrzeugdynamik*. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
- Liedgens 2008** LIEDGENS, Klaus: *Über die Inspektionsfristen von Radsatzwellen zur Detektion von Ermüdungsanrissen*. TU Clausthal, Dissertation, 2008.

- Willemsen et al. 2016** WILLEMSEN, Thomas, KLEIN, André. *Monitoring für Gap-Filler. Bericht über die Ultraschallmessung im U-Bahnhof Klosterstern vom 12. August 2016 - 01. November 2016.* Hamburg: HafenCity Universität Hamburg; Hamburger Hochbahn AG, 2016.

Anhang

- A1 Fahrzeugdatenblatt
- A2 Kontaktfläche der Profilpaarung S49/3A
- A3 Kontaktfläche der Profilpaarung S49/S1002
- A4 Kennlinie der lateralen Steifigkeit der Primärfederstufe
- A5 Kennlinie der Querpuffer der Sekundärfederstufe
- A6 Eckpunkte der Wagenkastenkontur DT4.1 – DT4.2
- A7 Eckpunkte der Wagenkastenkontur DT4.3 – DT4.6
- A8 Gleismessfahrt an Gleis 1 am 28.01.2016
- A9 Gleismessfahrt an Gleis 2 am 28.01.2016
- A10 Übersicht der untersuchten Fahrzeugstellungen
- A11 Parameterliste der einzelnen Variationen
- A12 Gesamtüberblick der Messergebnisse aller Sensoren
- A13 CD mit Berechnungs- und Ergebnisdateien

Anhang A1 – Fahrzeugdatenblatt

			Wagen 1		Wagen 2	
			TD	LD	TD	
Wagenkasten						
Wagenkastenlänge über Stirnwand	längs	mm	14500		14500	
Wagenkastenhöhe über L.O.	vertikal	mm	2290		2290	
Abstand Drehgestellmitten	längs	mm	11100		11100	
Drehzapfenabstand	längs	mm	8900		8900	
Drehgestellachsstand	längs	mm	2100	2550	2100	
Exzentrizität	längs	mm	0	2200	2200	0
Abstand Luftfeder TD-LD	längs	mm	10740	-	10740	
Abstand Luftfedern LD	längs	mm	-	720	-	
Luftfederabstand	quer	mm	1670	1250	1670	
Achsfederabstand	quer	mm	1850	1850	1850	
Höhe über S.O. leer	vertikal	mm	3320		3320	
Höhe Dachkante über S.O. leer	vertikal	mm	3090		3090	
Höhe Außenknick über S.O. leer	vertikal	mm	1770		1770	
Höhe Fußboden-OK über S.O. leer	vertikal	mm	1030		1030	
Höhe Längsträger-OK über S.O. leer	vertikal	mm	1010		1010	
Statische Einfederung, max. bel,sekund.	vertikal	mm	0	0	0	0
Zusätzl.dyn. Einfederung, max. bel., sekundär	vertikal	mm	+ 15,1	+ 15,9	+ 15,2	+ 14,9
Statische Einfederung, max. belastet,primär	vertikal	mm	+ 18	+ 18	+ 18	+ 18
Zusätzl.dyn. Einfederung, max. bel., primär	vertikal	mm	+ 9,8	+ 9,5	+ 9,4	+ 9,6
Max. stat.+ dyn. Einfederung gesamt	vertikal	mm	+ 43	+ 43	+ 43	+ 42
Absenkung auf Zusatzfeder, leer	vertikal	mm	32,50	30,00	30,00	31,00
Absenkung auf Zusatzfeder, Vollast	vertikal	mm	48,5	48,5	47,1	48,9

Abstand WK-Schwerpunkt/Luftfeder-TD, leer	längs	mm	3464	3630		
max. belastet	längs	mm	3666	3598		
WK-Schwerpunkt über S.O, leer	vertikal	mm	1200	1200		
max. belastet	vertikal	mm	1479	1479		
Drehgestellschwerpunkt über S.O., leer	vertikal	mm	450	450	450	
Wankpolhöhe Primärfederung über S.O., leer	vertikal	mm	450	450	450	
Wankpolhöhe Sekundärfederung ü. S.O., leer	vertikal	mm	780	780	780	780
Windangriffsfläche		m ²	33,2	33,2		
Abstand Windangriffspunkt Luftfeder-TD	längs	mm	3800	3800		
Windangriffspunkt über S.O., leer	vertikal	mm	2165	2165		

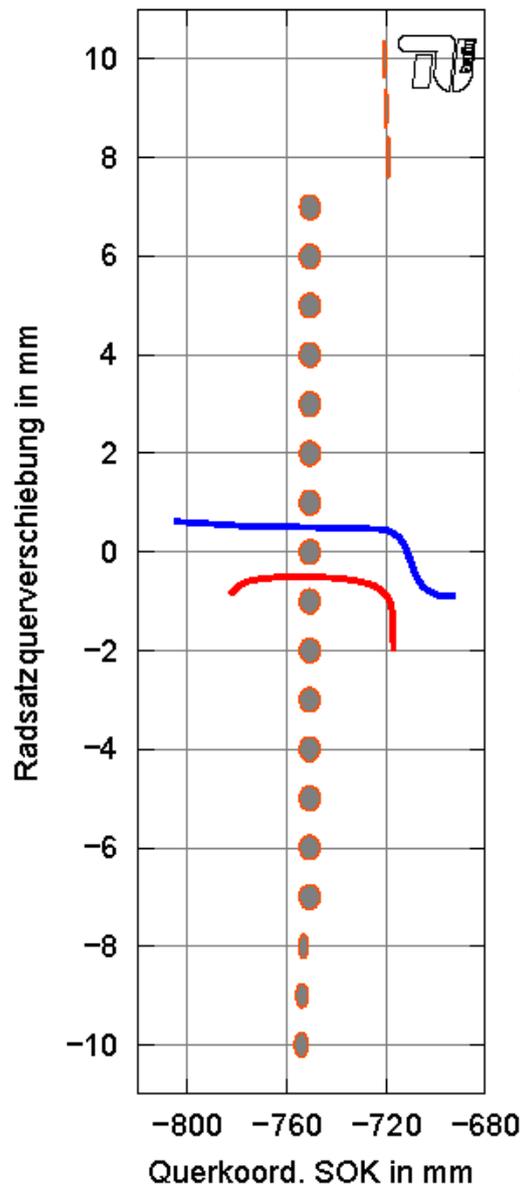
Bautoleranzen, Spiele; Verschleiß horizontal

Spurkranzverschleiß	quer	mm	-6	-6	-6
Radsatzbautoleranz	quer	mm	+1	+1	+1
Achslagerbautoleranz	quer	mm	+/-1	+/-1	+/-1
Achslagerspiel	quer	mm	+/-1	+/-1	+/-1
Drehzapfenspiel	quer	mm	+/-0	+/-0	+/-0
Einbautoleranz Drehzapfen	quer	mm	+/-1	+/-1	+/-1
Einbautoleranz Primärfederung	quer	mm	+/-1	+/-1	+/-1
Bautoleranz Wagenkasten	quer	mm	+2/-4	+2/-4	+2/-4
Bautoleranz Anbauteile	quer	mm	+/-5	+/-5	+/-5

Querfederwege

Radbandagen-Federung	quer	mm	+/-0	+/-0	+/-0
Primärfederung	quer	mm	+/-4	+/-4	+/-4
Sekundärfederung Spiel	quer	mm	+/-1	+/-1	+/-1
Sekundärfederung	quer	mm	+/-19	+/-19	+/-19

Anhang A2 – Kontaktfläche der Profilvereinigung S49/3A (HOCHBAHN)



Nichtelliptische Kontaktflächen Rad/Schiene (Projektion der Fläche auf den Schienenkopf)

Projekt = U-Bahn DT4/DT5 HHA

Schienenseitig:

Seite in Fahrtrichtg. = links

Mess-Stelle = Norm S49 1 zu 40

Strecke = Norm S49

zw. Bahnhöfen =

Walzzeichen =

Gleisausrichtung = Gerade - 1/40 Einbauneigung

Bogenradius = 0. m

Spurweite = 1.435 m

Rechte Profildatei = gs00/s49 1 40 re.prf

Linke Profildatei = gs00/s49 1 40 li.prf

Radseitig:

Fahrzeug = HHA 3A

n. Zeichng v. 08.12.2000 sowie HHA 42219

Radlast = 36.0 kN

Radrückenabstand = 1.360 m

Messkreisradius li = 0.43 m

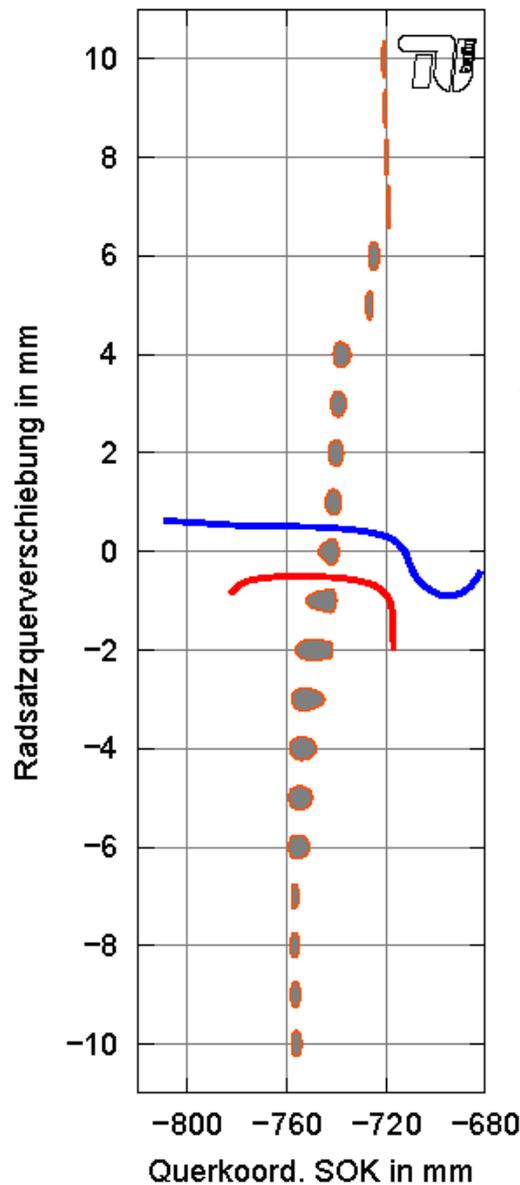
Messkreisradius re = 0.430 m

Schräglaufwinkel = 0. °

Rechte Profildatei = fz00/fz00 re.prf

Linke Profildatei = fz00/fz00 li.prf

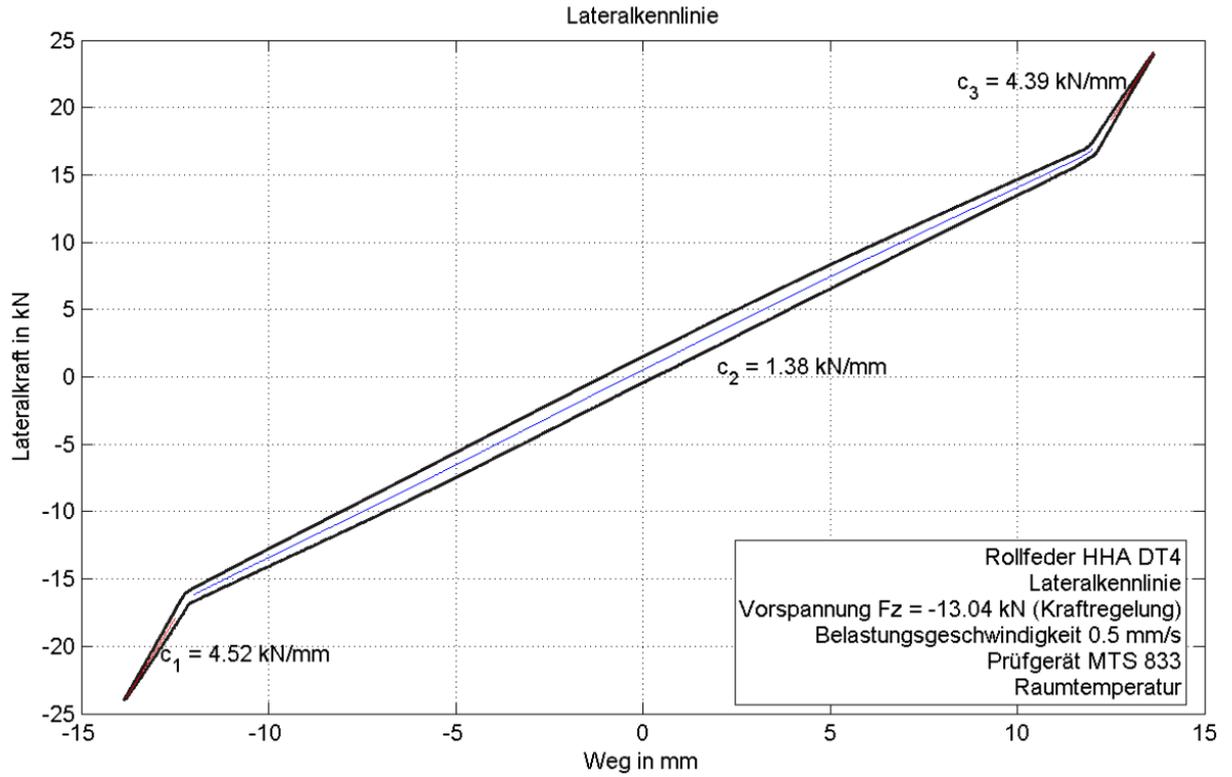
Anhang A3 – Kontaktfläche der Profilverpaarung S49/S1002 (HOCHBAHN)



Nichtelliptische Kontaktflächen Rad/Schiene (Projektion der Fläche auf den Schienenkopf)

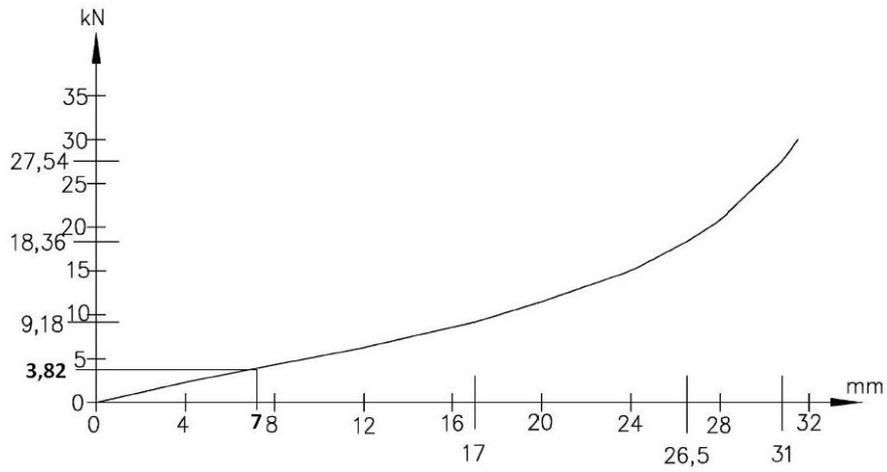
Projekt	U-Bahn DT4/DT5 HHA
Schienenseitig:	
Seite in Fahrtrichtg.	= links
Mess-Stelle	= Norm S49 1 zu 40
Strecke	= Norm S49
zw. Bahnhöfen	=
Walzzeichen	=
Gleisausrichtung	= Gerade - 1/40 Einbauneigung
Bogenradius	= 0. m
Spurweite	= 1.435 m
Rechte Profildatei	= gs00/s49 1 40 re.prf
Linke Profildatei	= gs00/s49 1 40 li.prf
Radseitig:	
Fahrzeug	= S 1002
	(S1002 zum Vergleich)
Radlast	= 36.0 kN
Radrückenabstand	= 1.360 m
Messkreisradius li	= 0.43 m
Messkreisradius re	= 0.430 m
Schräglaufwinkel	= 0. °
Rechte Profildatei	= fz00/s1002 re.prf
Linke Profildatei	= fz00/s1002 li.prf

Anhang A4 – Kennlinie der lateralen Steifigkeit der Primärfederstufe (HOCHBAHN)

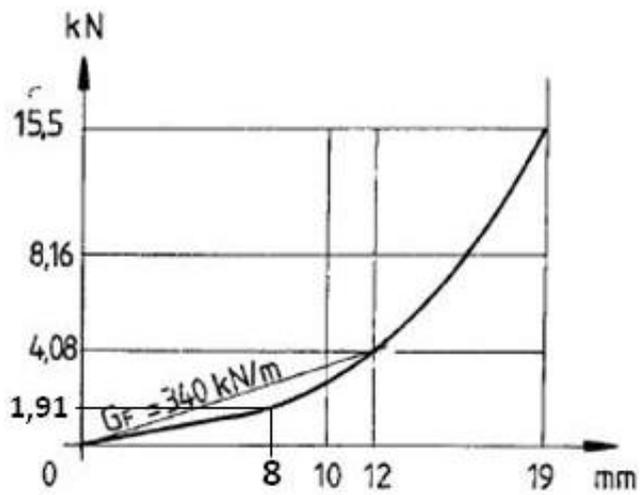


Anhang A5 – Kennlinie der Querpuffer der Sekundärfederstufe (HOCHBAHN)

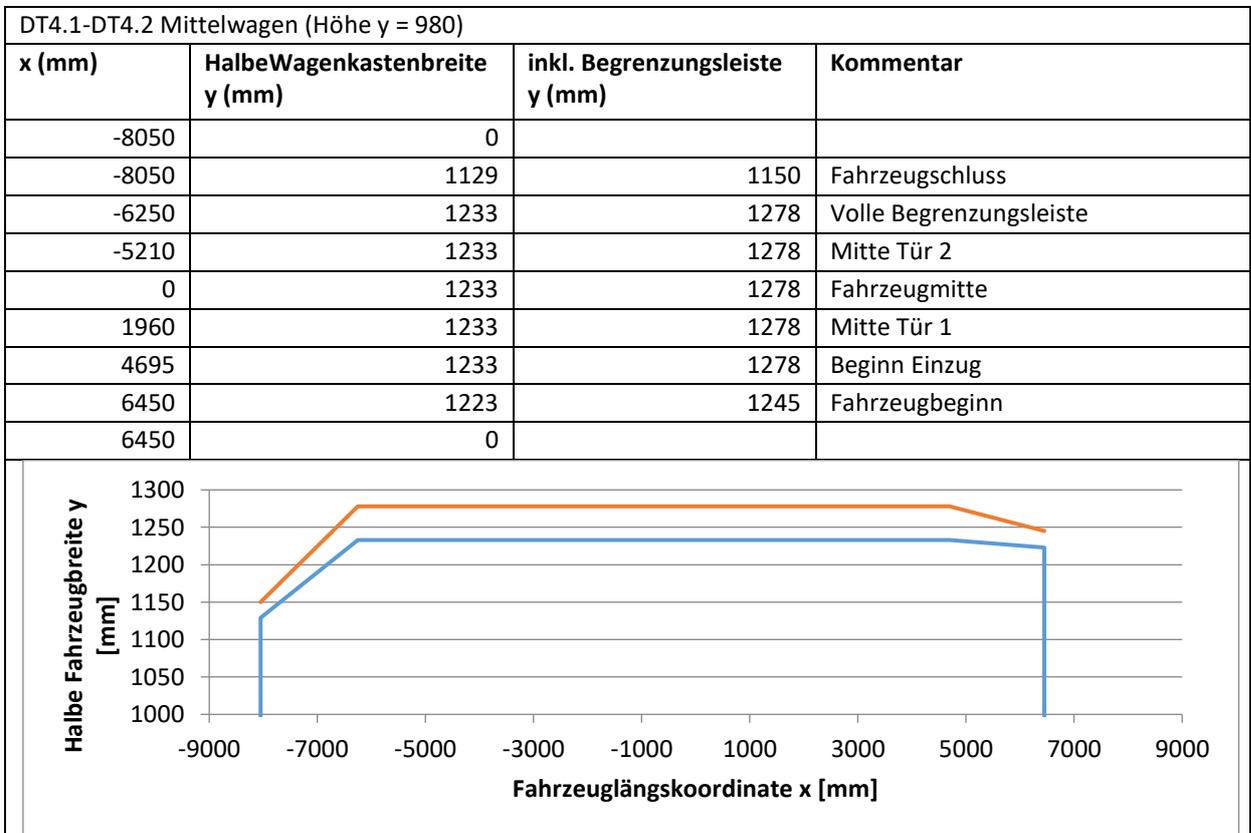
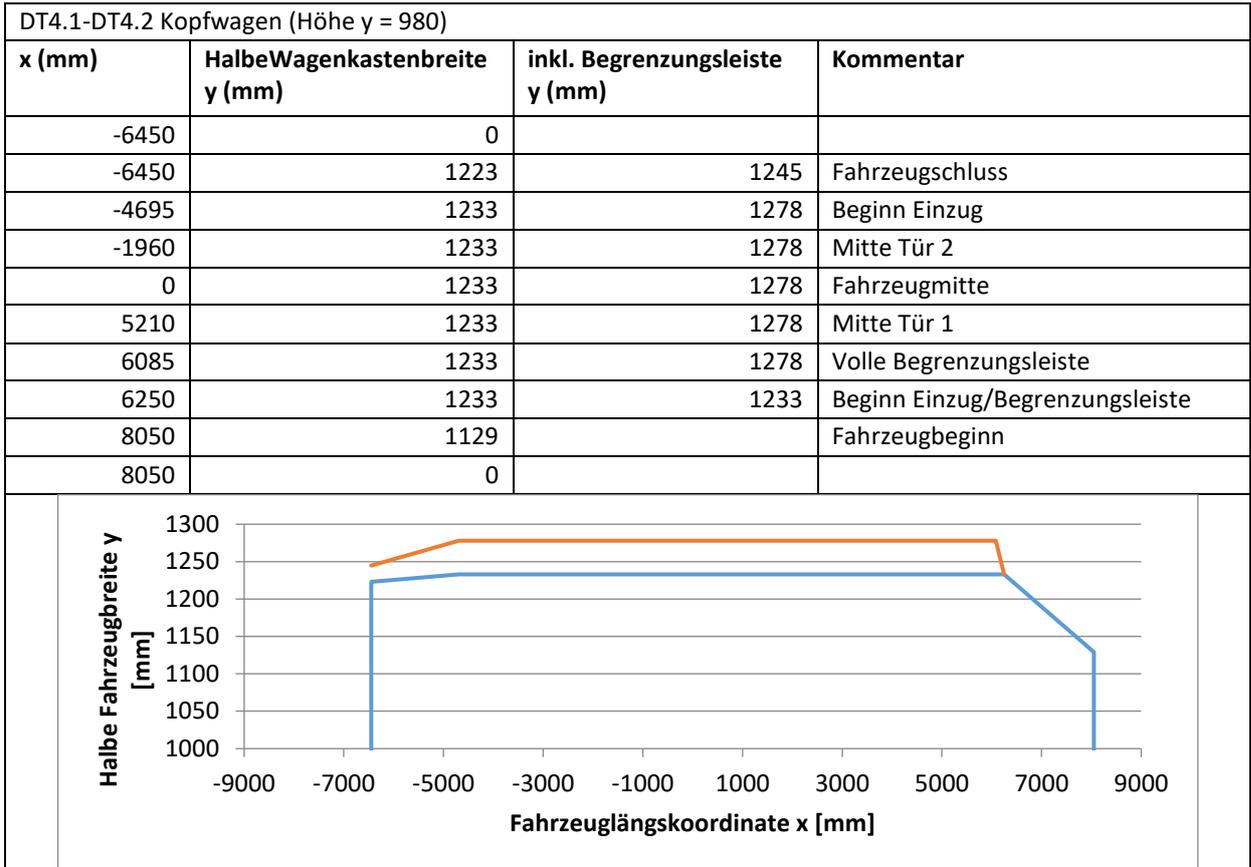
Kennlinie des Querpuffer am Triebdrehgestell



Kennlinie des Querpuffer am Laufdrehgestell

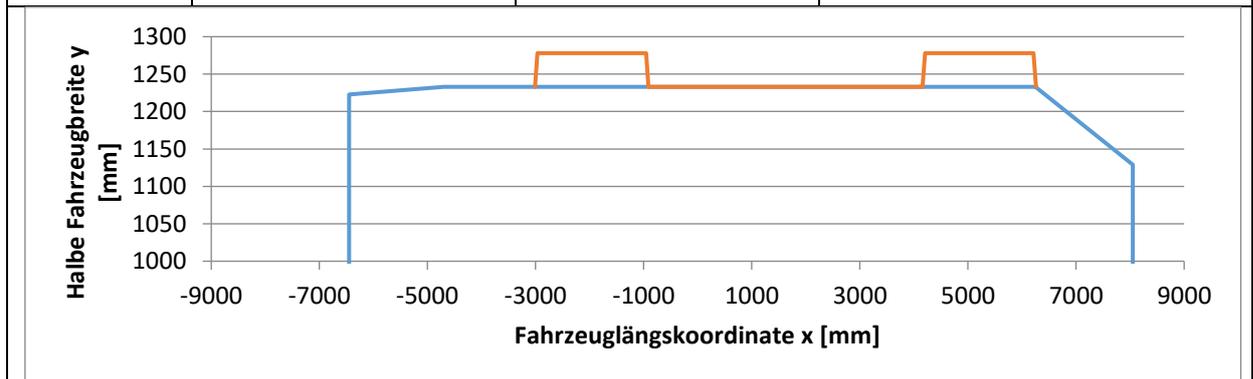


Anhang A6 – Eckpunkte der Wagenkastenkontur DT4.1 – DT4.2

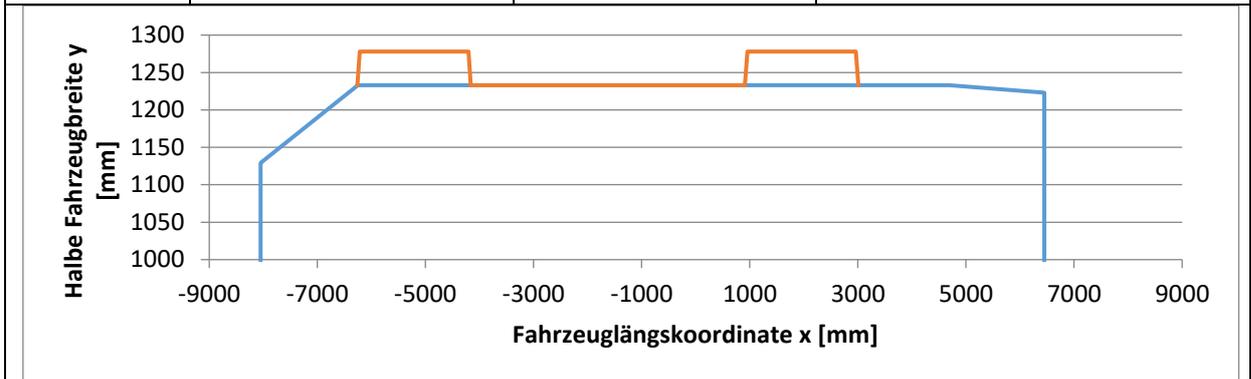


Anhang A3 – Eckpunkte der Wagenkastenkontur DT4.3 – DT4.6

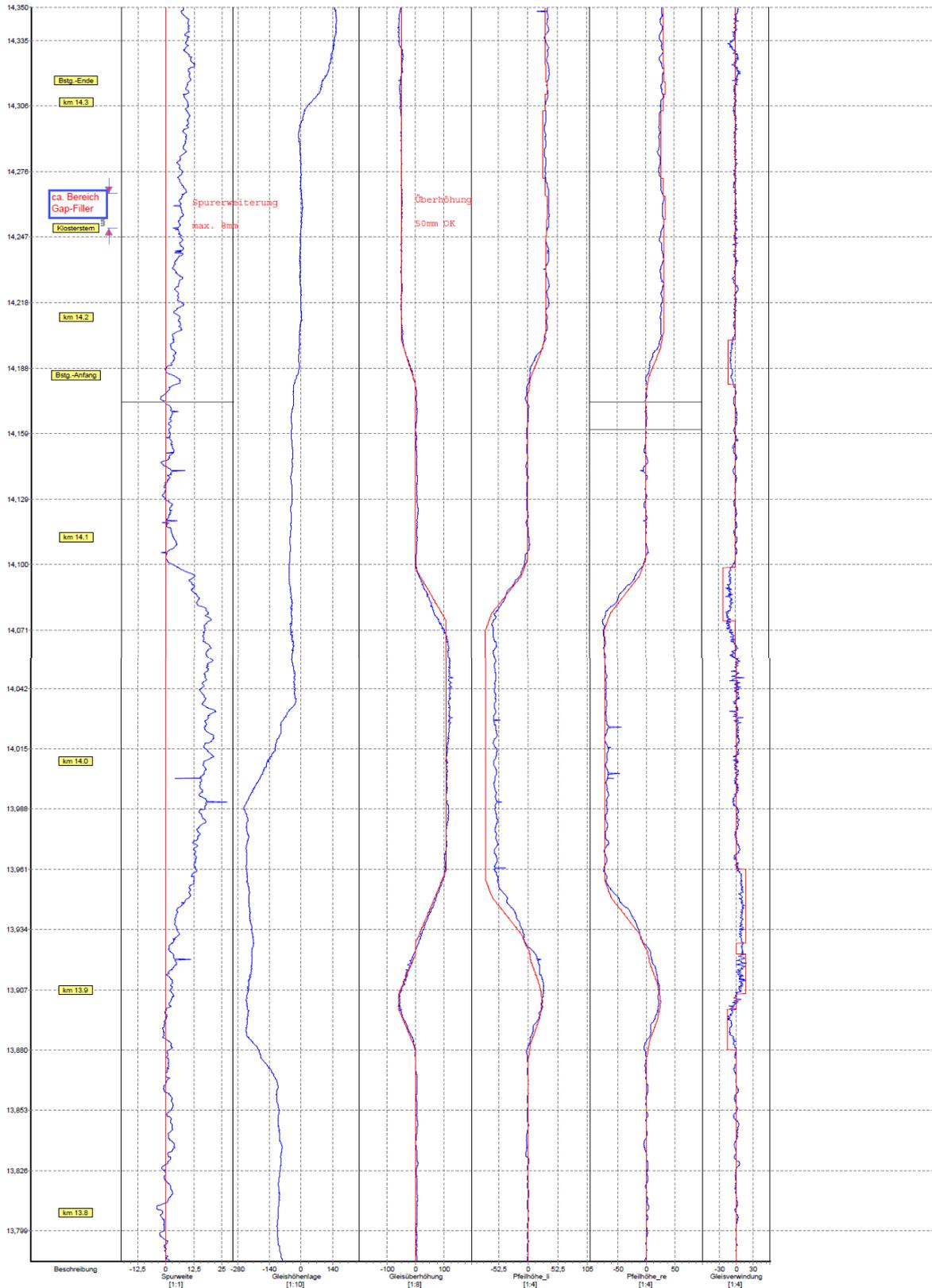
DT4.3-DT4.6 Kopfwagen (Höhe y = 980)			
x (mm)	HalbeWagenkastenbreite y (mm)	inkl. Begrenzungsleiste y (mm)	Kommentar
-6450	0		
-6450	1223		Fahrzeugschluss
-4695	1233		Beginn Einzug
-3010	1233	1233	Beginn Begrenzungsleiste
-2965	1233	1278	Volle Begrenzungsleiste
-1960	1233	1278	Mitte Tür 2
-955	1233	1278	Volle Begrenzungsleiste
-910	1233	1233	Beginn Begrenzungsleiste
0	1233		Fahrzeugmitte
4160	1233	1233	Beginn Begrenzungsleiste
4205	1233	1278	Volle Begrenzungsleiste
5210	1233	1278	Mitte Tür 1
6215	1233	1278	Volle Begrenzungsleiste
6260	1233	1233	Beginn Begrenzungsleiste
6250	1233		Beginn Einzug
8050	1129		Fahrzeugbeginn
8050	0		



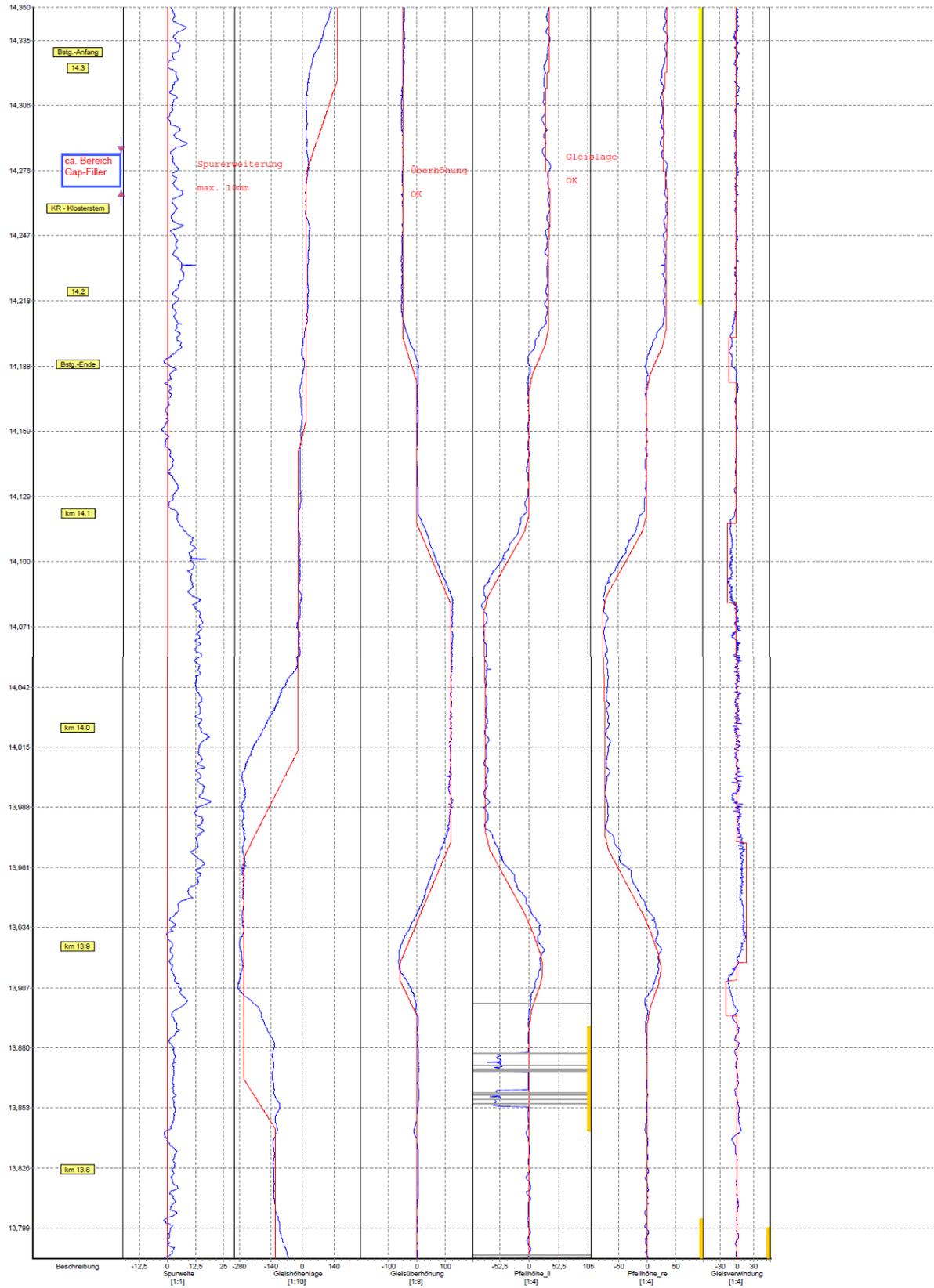
DT4.3-DT4.6 Mittelwagen (Höhe y = 980)			
x (mm)	HalbeWagenkastenbreite y (mm)	inkl. Begrenzungsleiste y (mm)	Kommentar
-8050	0		
-8050	1129		Fahrzeugschluss
-6250	1233		Beginn Einzug
-6260	1233	1233	Beginn Begrenzungsleiste
-6215	1233	1278	Volle Begrenzungsleiste
-5210	1233	1278	Mitte Tür 2
-4205	1233	1278	Volle Begrenzungsleiste
-4160	1233	1233	Beginn Begrenzungsleiste
0	1233		Fahrzeugmitte
910	1233	1233	Beginn Begrenzungsleiste
955	1233	1278	Volle Begrenzungsleiste
1960	1233	1278	Mitte Tür 1
2965	1233	1278	Volle Begrenzungsleiste
3010	1233	1233	Beginn Begrenzungsleiste
4695	1233		Beginn Einzug
6450	1223		Fahrzeugbeginn
6450	0		



Anhang A8 – Gleismessfahrt an Gleis 1 am 28.01.2016 (HOCHBAHN)



Anhang A9 – Gleismessfahrt an Gleis 2 am 28.01.2016 (HOCHBAHN)



Anhang A10 – Übersicht der untersuchten Fahrzeugstellungen

Wagen 1

LG = 0

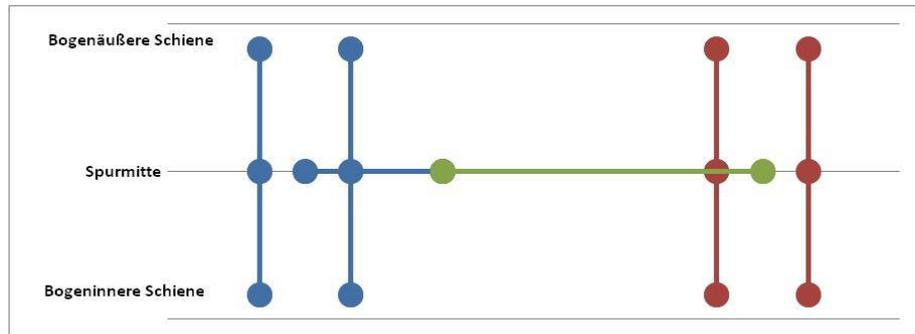
Neutral

St1 = 0

St2 = 0

TG = 0

LG = 0



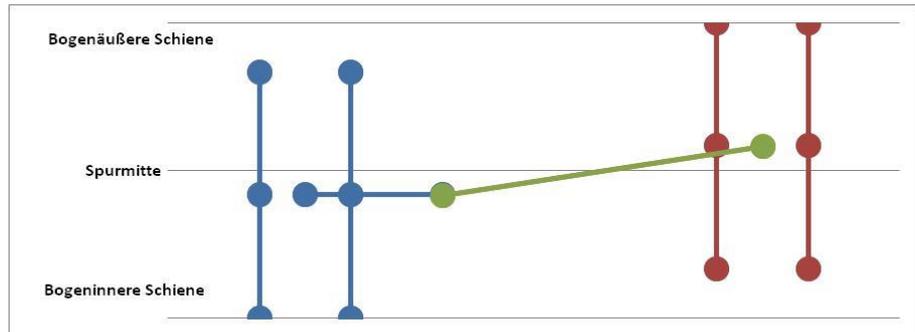
Spießgang (+)

St1 = 1

St2 = -1

TG = 0

LG = 0



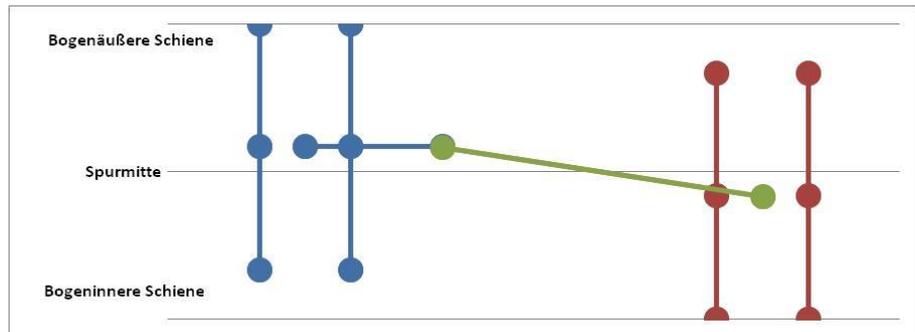
Spießgang (-)

St1 = -1

St2 = 1

TG = 0

LG = 0



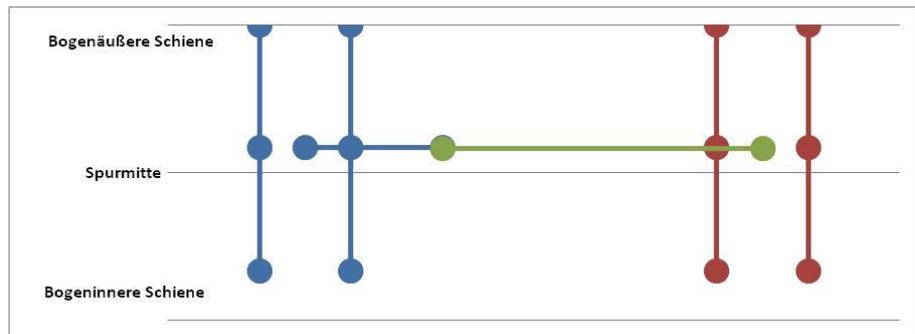
Sehnenstellung (+)

St1 = 1

St2 = 1

TG = 0

LG = 0



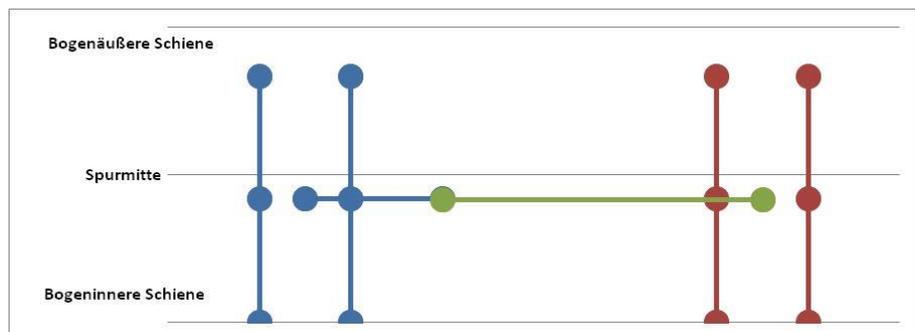
Sehnenstellung (-)

St1 = -1

St2 = -1

TG = 0

LG = 0



Wagen 1

Neutral

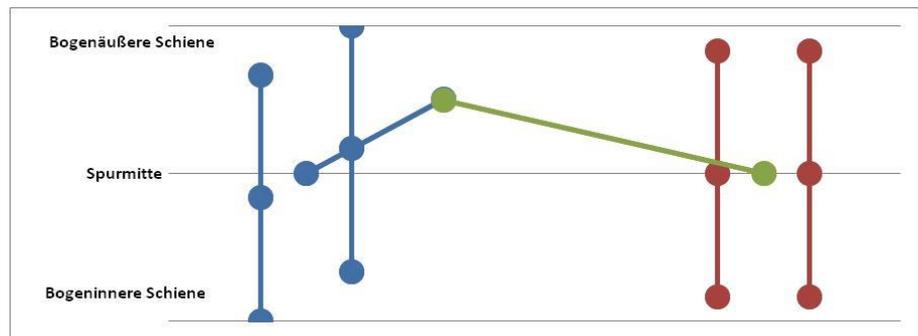
St1 = 0

St2 = 0

TG = 0

LG = 1

LG = 1



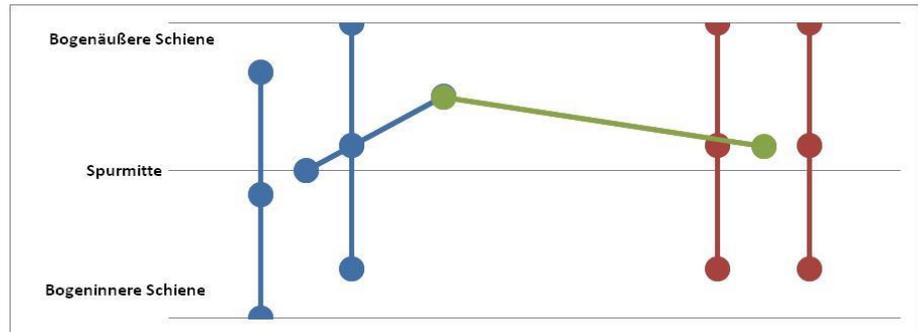
Spießgang (+)

St1 = 1

St2 = -1

TG = 0

LG = 1



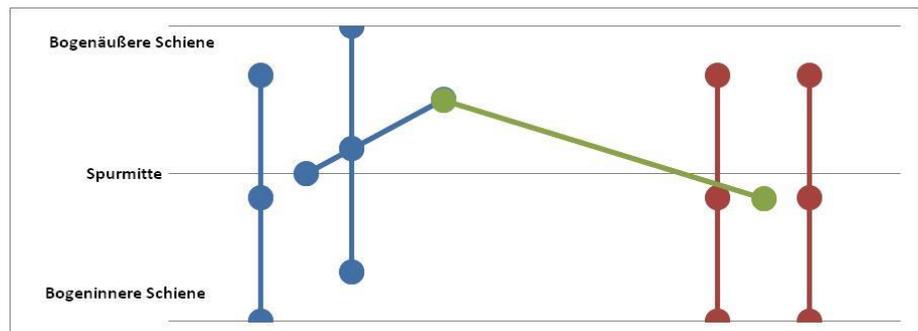
Spießgang (-)

St1 = -1

St2 = 1

TG = 0

LG = 1



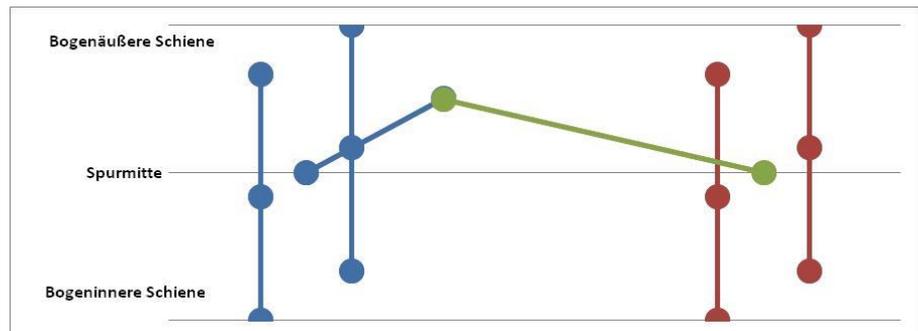
Spießgang (+)

St1 = 1

St2 = 1

TG = 1

LG = 1



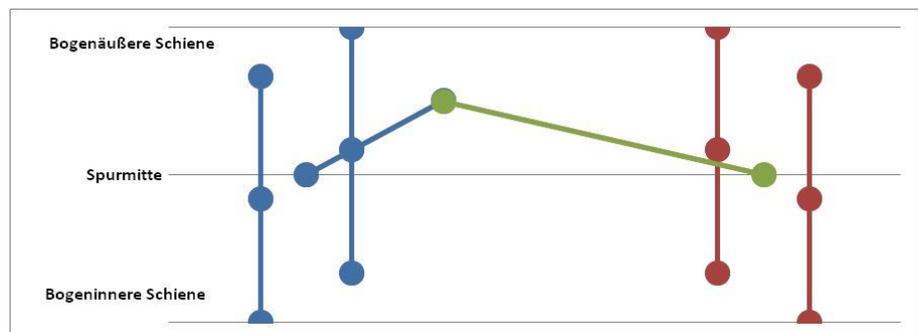
Spießgang (-)

St1 = -1

St2 = -1

TG = -1

LG = 1



Wagen 1

Neutral

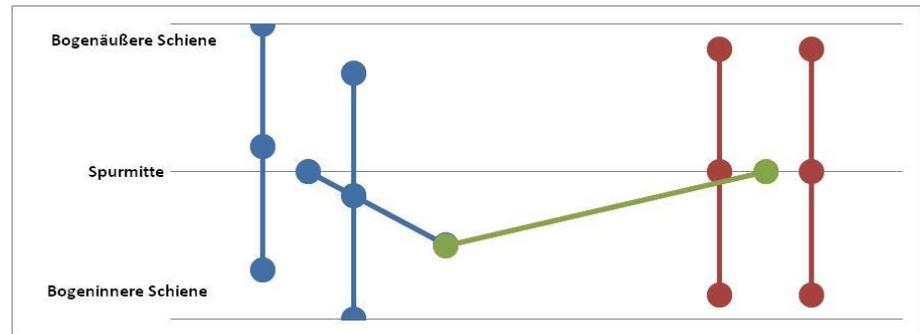
St1 = 0

St2 = 0

TG = 0

LG = -1

LG = -1



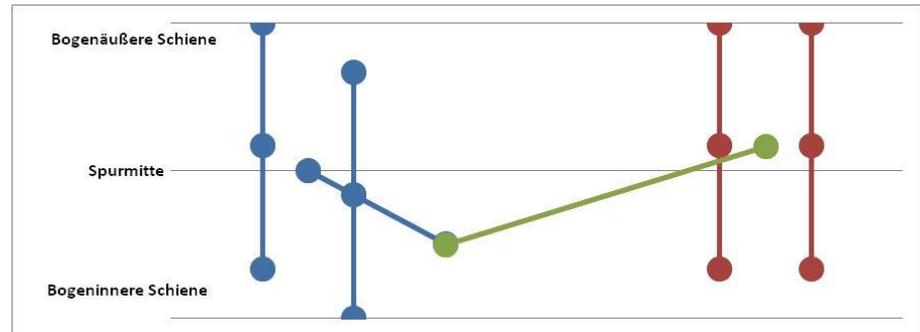
Spießgang (+)

St1 = 1

St2 = -1

TG = 0

LG = -1



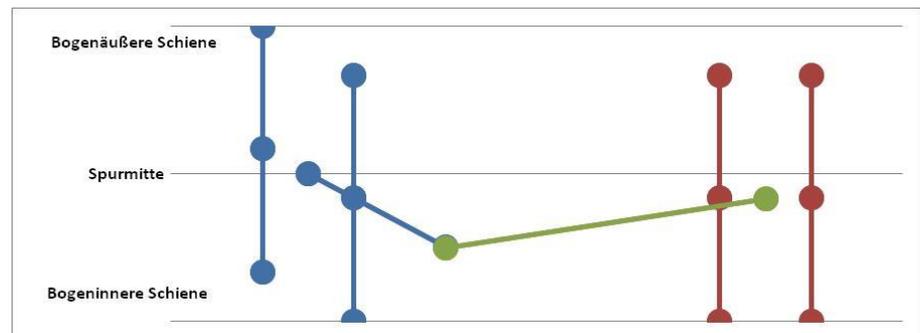
Spießgang (-)

St1 = -1

St2 = 1

TG = 0

LG = -1



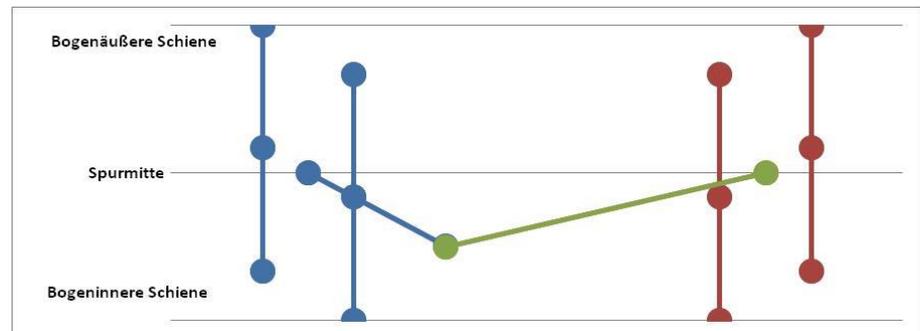
Spießgang (+)

St1 = 1

St2 = 1

TG = 1

LG = -1



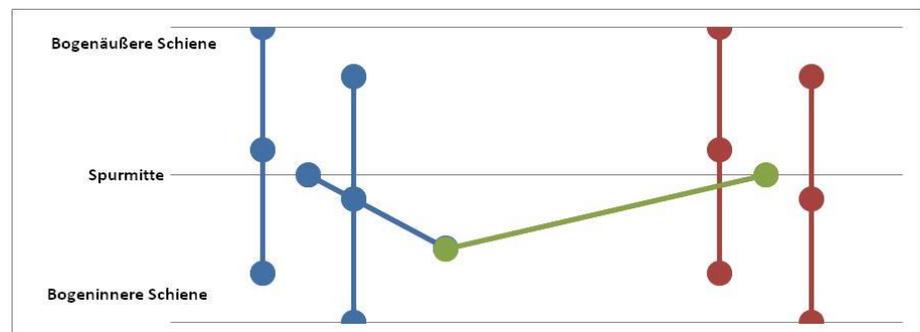
Spießgang (-)

St1 = -1

St2 = -1

TG = -1

LG = -1



Wagen 2

Neutral

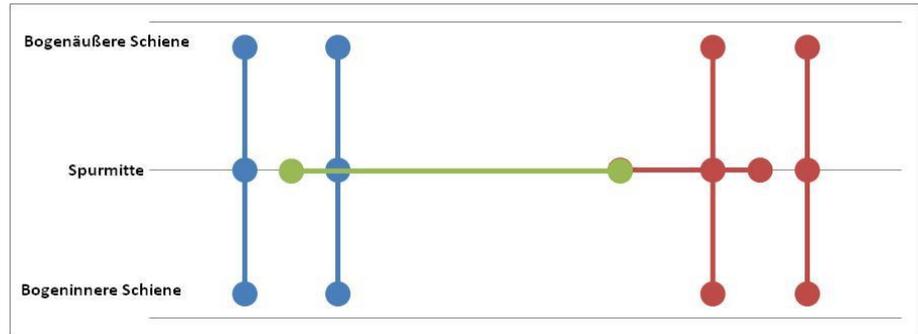
St1 = 0

St2 = 0

TG = 0

LG = 0

LG = 0



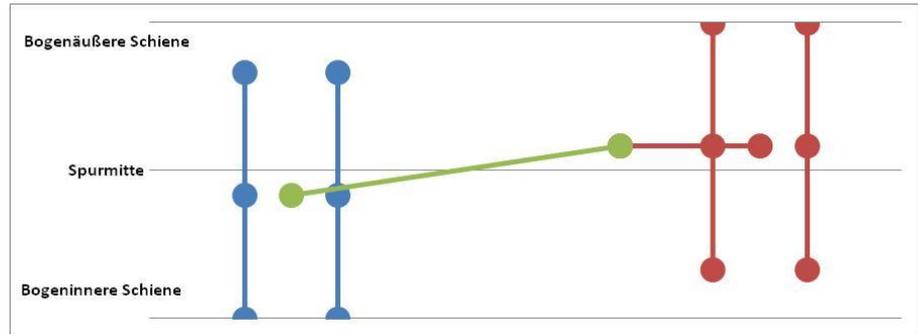
Spießgang (+)

St1 = 1

St2 = -1

TG = 0

LG = 0



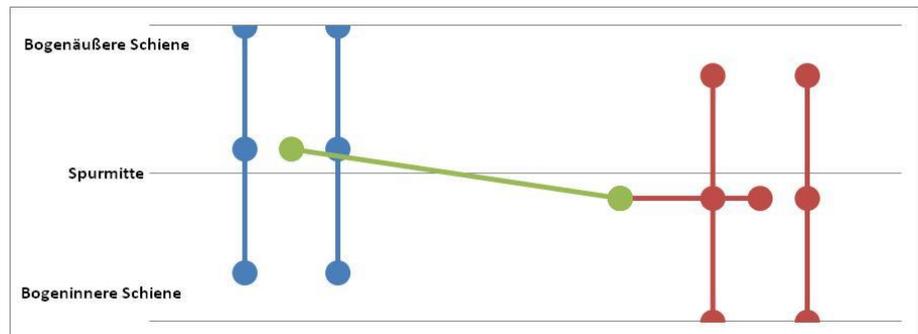
Spießgang (-)

St1 = -1

St2 = 1

TG = 0

LG = 0



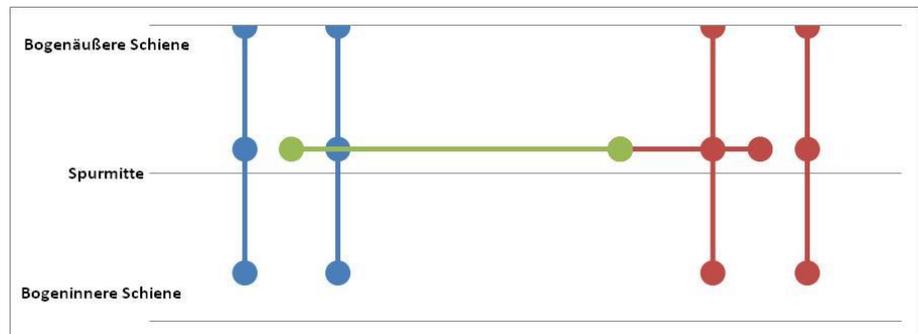
Sehnenstellung (+)

St1 = 1

St2 = 1

TG = 0

LG = 0



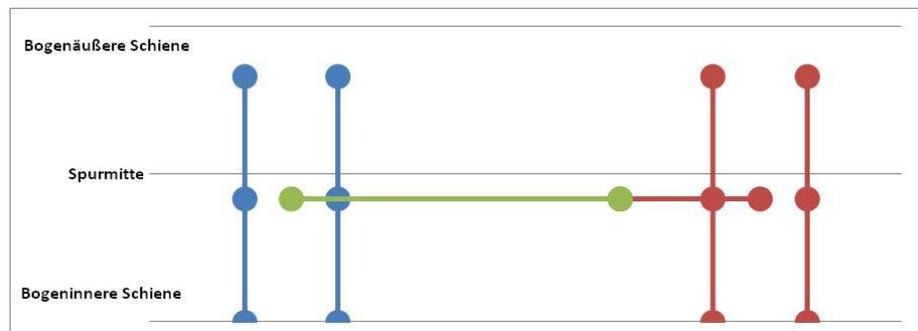
Sehnenstellung (-)

St1 = -1

St2 = -1

TG = 0

LG = 0



Wagen 2

Neutral

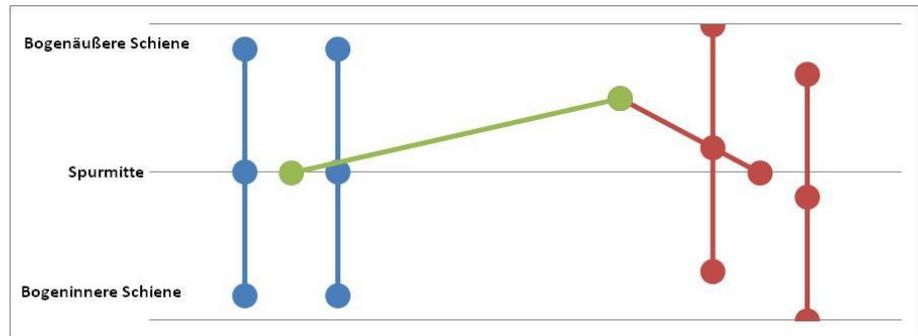
St1 = 0

St2 = 0

TG = 0

LG = 1

LG = 1



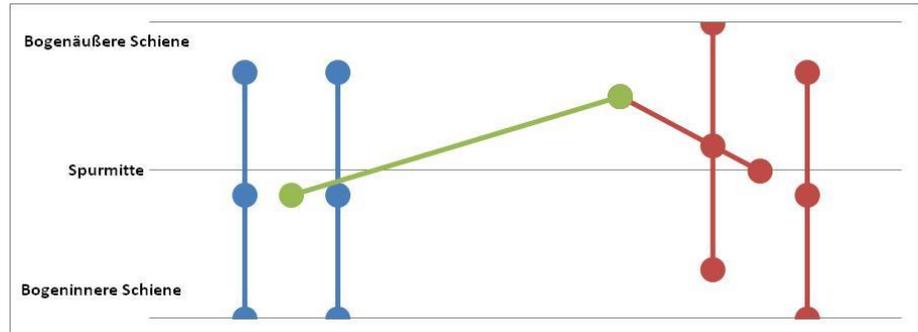
Spießgang (+)

St1 = 1

St2 = -1

TG = 0

LG = 1



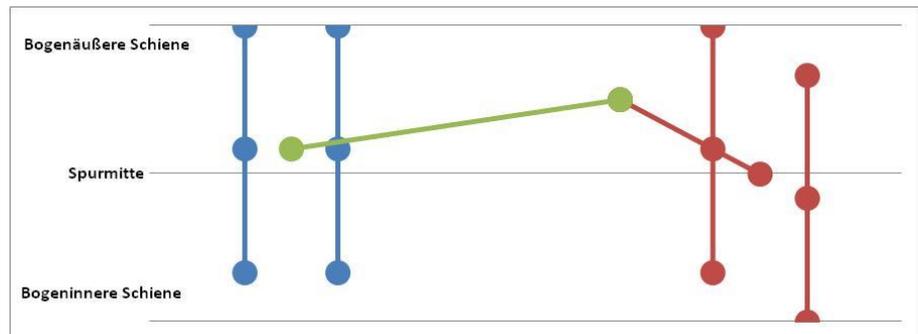
Spießgang (-)

St1 = -1

St2 = 1

TG = 0

LG = 1



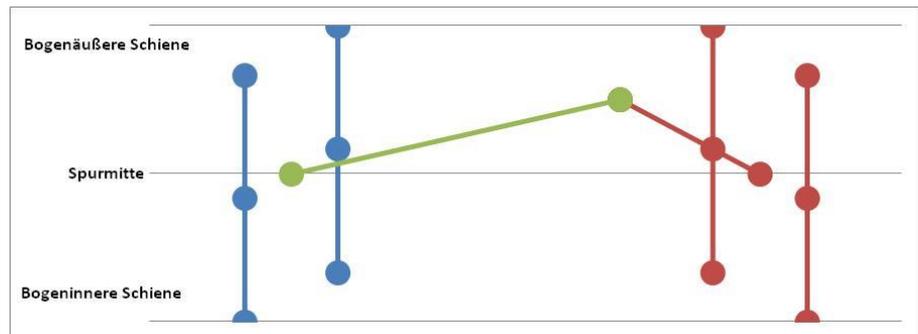
Spießgang (+)

St1 = 1

St2 = 1

TG = 1

LG = 1



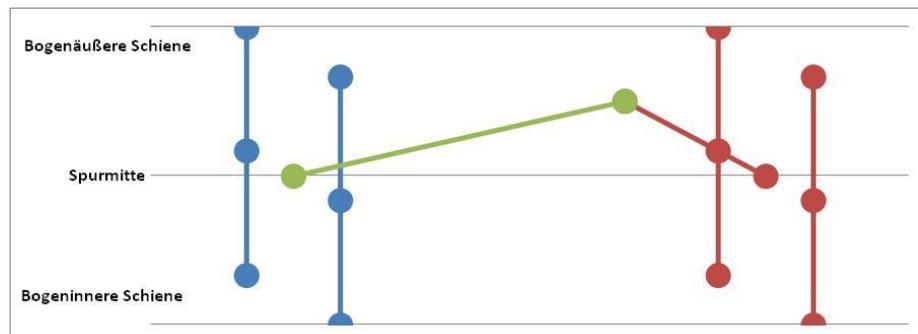
Spießgang (-)

St1 = -1

St2 = -1

TG = -1

LG = 1



Wagen 2

Neutral

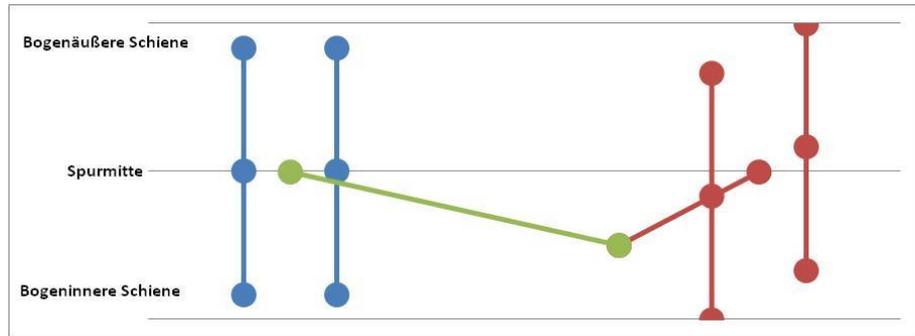
St1 = 0

St2 = 0

TG = 0

LG = -1

LG = -1



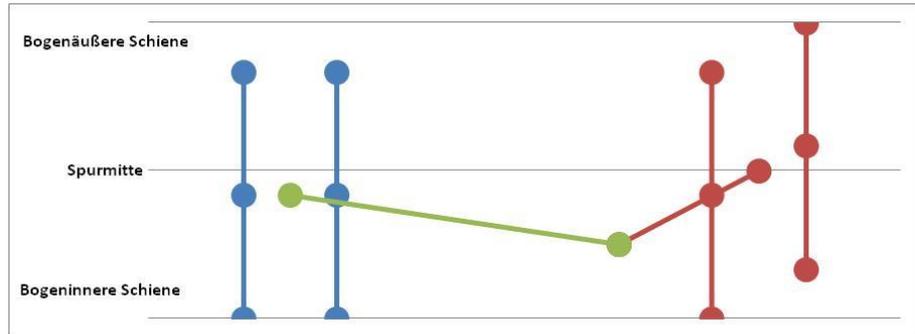
Spießgang (+)

St1 = 1

St2 = -1

TG = 0

LG = -1



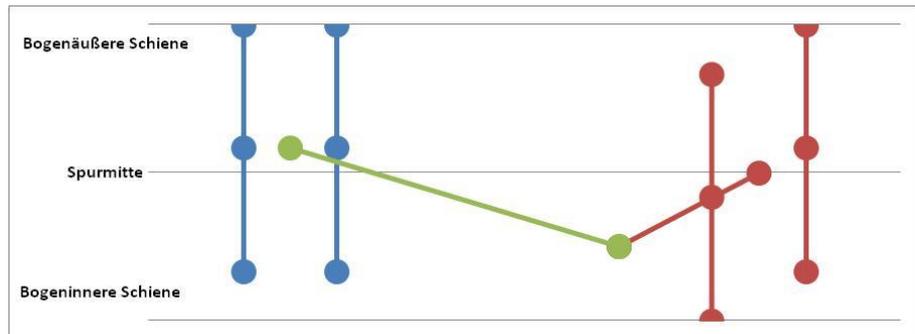
Spießgang (-)

St1 = -1

St2 = 1

TG = 0

LG = -1



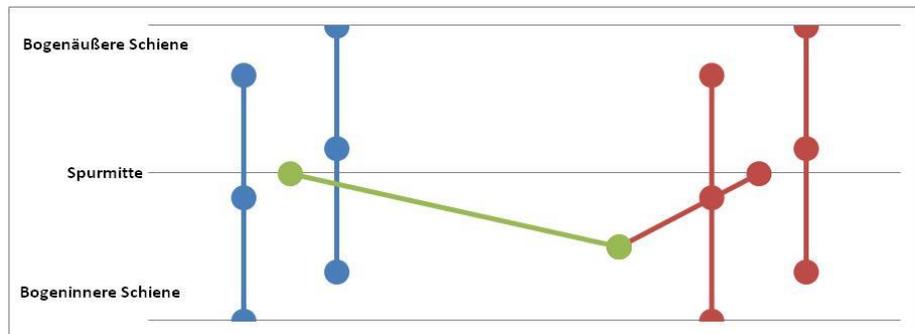
Spießgang (+)

St1 = 1

St2 = 1

TG = 1

LG = -1



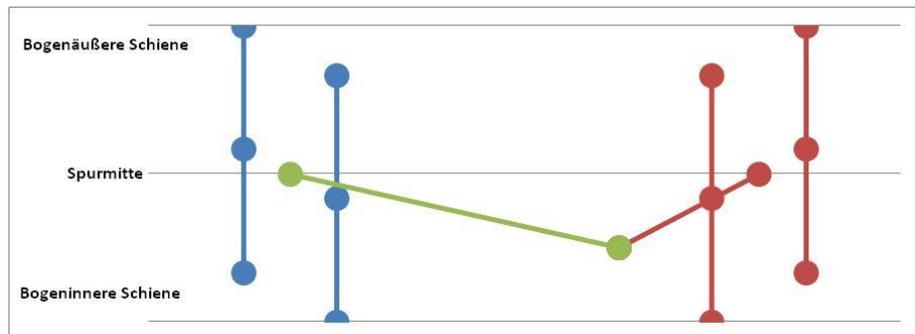
Spießgang (-)

St1 = -1

St2 = -1

TG = -1

LG = -1

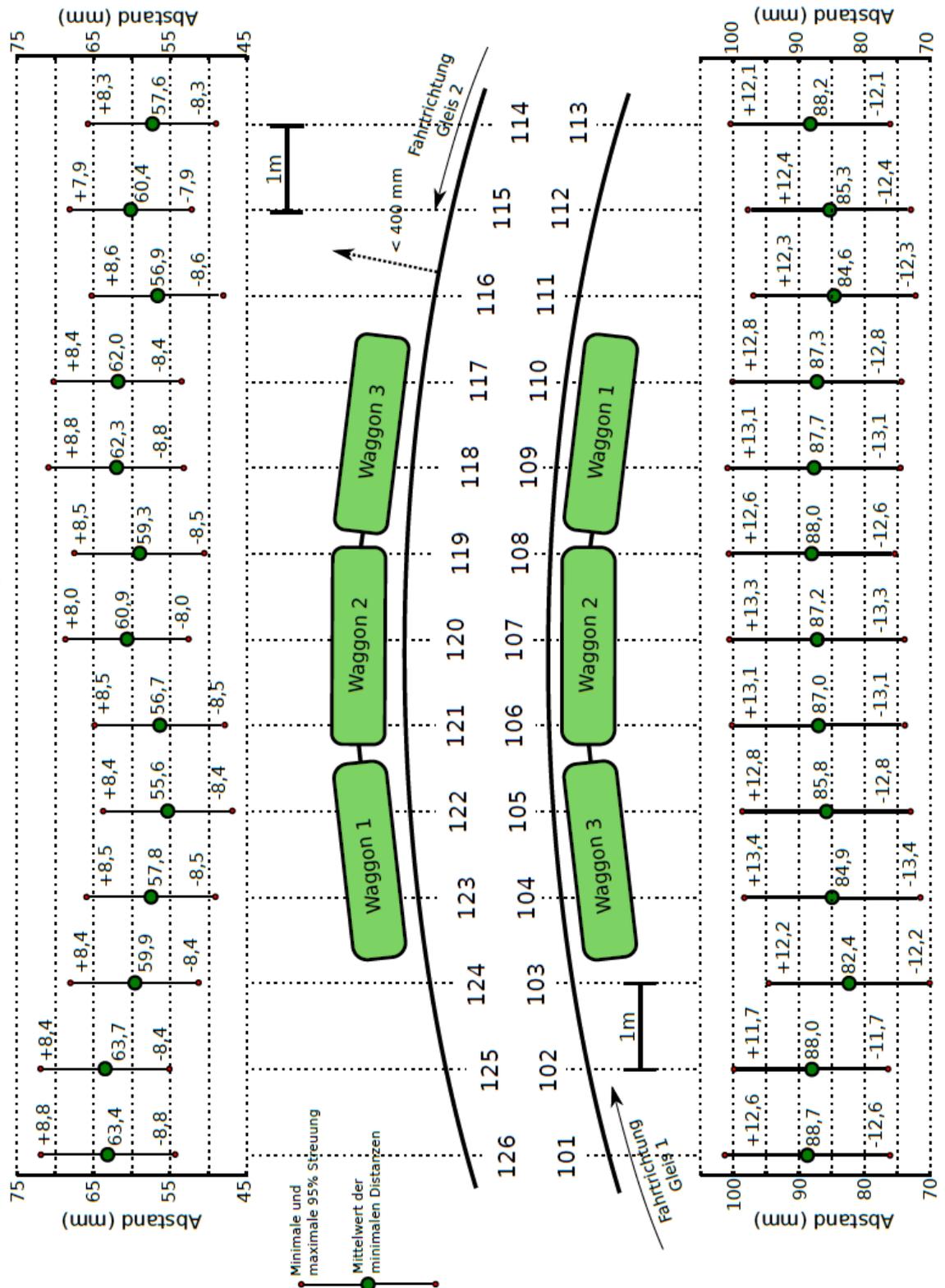


Anhang A11 – Parameterliste der Variationen

	Variation 1		Variation 2		Variation 3		
	Gleis 1	Gleis 2	Gleis 1	Gleis 2	Gleis 1	Gleis 2	
Spurspiel (Nennspurspiel plus Spurerweiterung)	16,1	14,1	16,1	14,1	16,1	14,1	mm
Lichtraumgrenzung	1352,5	1353,5	1352,5	1353,5	1352,5	1353,5	mm
Spurkranzverschleiß	1	1	1	1	1	1	mm
Fahrzeugbetriebszustand							
Geschwindigkeit	0/40		0/40		0/40		km/h
Fahrzeugbesetzung nach BOStrab	50		50		50		%
Wagenkastenmasse	17350		17350		17350		kg
Vertikale Steifigkeit der Primärfeder	1025		1025		1025		N/mm
Schwerpunkthöhe	1339,5		1339,5		1339,5		mm
Wankpolhöhe primär	442		442		442		mm
Wankpolhöhe sekundär	772		772		772		mm
Freie Verschiebungen							
Freier Weg Kuppelstange	0		1		1		mm
Freier Weg Drehzapfen	0		1		1		mm
Achslagerspiel	0		1		1		mm
Querfederwege							
Kuppelstange Querpuffer	0		0		8		mm
Drehzapfen Querpuffer	0		0		7		mm
Primärfederung	0		0		0,5		mm
Fahrzeugtoleranzen (Gleis 1 Bogenaußen/ Gleis 2 Bogeninnen)							
Radsatz-Bautoleranz	0		0		0		mm
Achslager-Bautoleranz	0		0		0		mm
Einbautoleranz Drehzapfen/Drehkranz	0		0		0		mm
Einbautoleranz Primärfederung	0		0		0		mm
Bautoleranz Wagenkasten	0		0		0		mm
Bautoleranz Anbauteile	0		0		0		mm
Gleistechnische Einflussfaktoren							
Quererlastizität Bogenaußen	0		0		0		mm
Quererlastizität Bogeninnen	0		0		0		mm
Änderung gegenseitiger Höhenlage bleibend	0		0		0		mm
Änderung gegenseitiger Höhenlage elastisch	0		0		0		mm

	Variation 4		Variation 5		Variation 6		
	Gleis 1	Gleis 2	Gleis 1	Gleis 2	Gleis 1	Gleis 2	
Spurspiel (Nennspurspiel plus Spurerweiterung)	16,1	14,1	16,1	14,1	19,1	19,1	mm
Lichtraumumgrenzung	1352,5	1353,5	1352,5	1353,5	1351	1352	mm
Spurkranzverschleiß	3	3	5,2	5,2	5,2	5,2	mm
Fahrzeugbetriebszustand							
Geschwindigkeit	0/40		0/40		0/40		km/h
Fahrzeugbesetzung nach BOStrab	80		100		100		%
Wagenkastenmasse	20560		22700		22700		kg
Vertikale Steifigkeit der Primärfeder	1106		1160		1160		N/mm
Schwerpunkthöhe	1423,2		1479		1479		mm
Wankpolhöhe primär	437,2		434		434		mm
Wankpolhöhe sekundär	767,2		764		764		mm
Freie Verschiebungen							
Freier Weg Kuppelstange	1		1		1		mm
Freier Weg Drehzapfen	1		1		1		mm
Achslagerspiel	1		1		1		mm
Querfederwege							
Kuppelstange Querpuffer	9		19		19		mm
Drehzapfen Querpuffer	8		19		19		mm
Primärfederung	0,5		4		4		mm
Fahrzeugtoleranzen							
(Gleis 1 Bogenaußen/ Gleis 2 Bogeninnen)							
Radsatz-Bautoleranz	1		1		1		mm
Achslager-Bautoleranz	1		1		1		mm
Einbautoleranz Drehzapfen/Drehkranz	1		1		1		mm
Einbautoleranz Primärfederung	1		1		1		mm
Bautoleranz Wagenkasten	2		2		2		mm
Bautoleranz Anbauteile	5		5		5		mm
Gleistechnische Einflussfaktoren							
Quererlastizität Bogenaußen	0		0		2		mm
Quererlastizität Bogeninnen	0		0		1		mm
Änderung gegenseitiger Höhenlage bleibend	0		0		8		mm
Änderung gegenseitiger Höhenlage elastisch	0		0		1		mm

Gesamtüberblick der Messergebnisse aller Sensoren





Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Gülzow

Vorname: Hendrik

dass ich die vorliegende Masterarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Untersuchungen zur Sicherheitsreserve bei der Lichtraum-Berechnung von U-Bahn-Fahrzeugen

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der –bitte auswählen– ist erfolgt durch:

Hamburg

21.11.2019

Ort

Datum

Unterschrift im Original