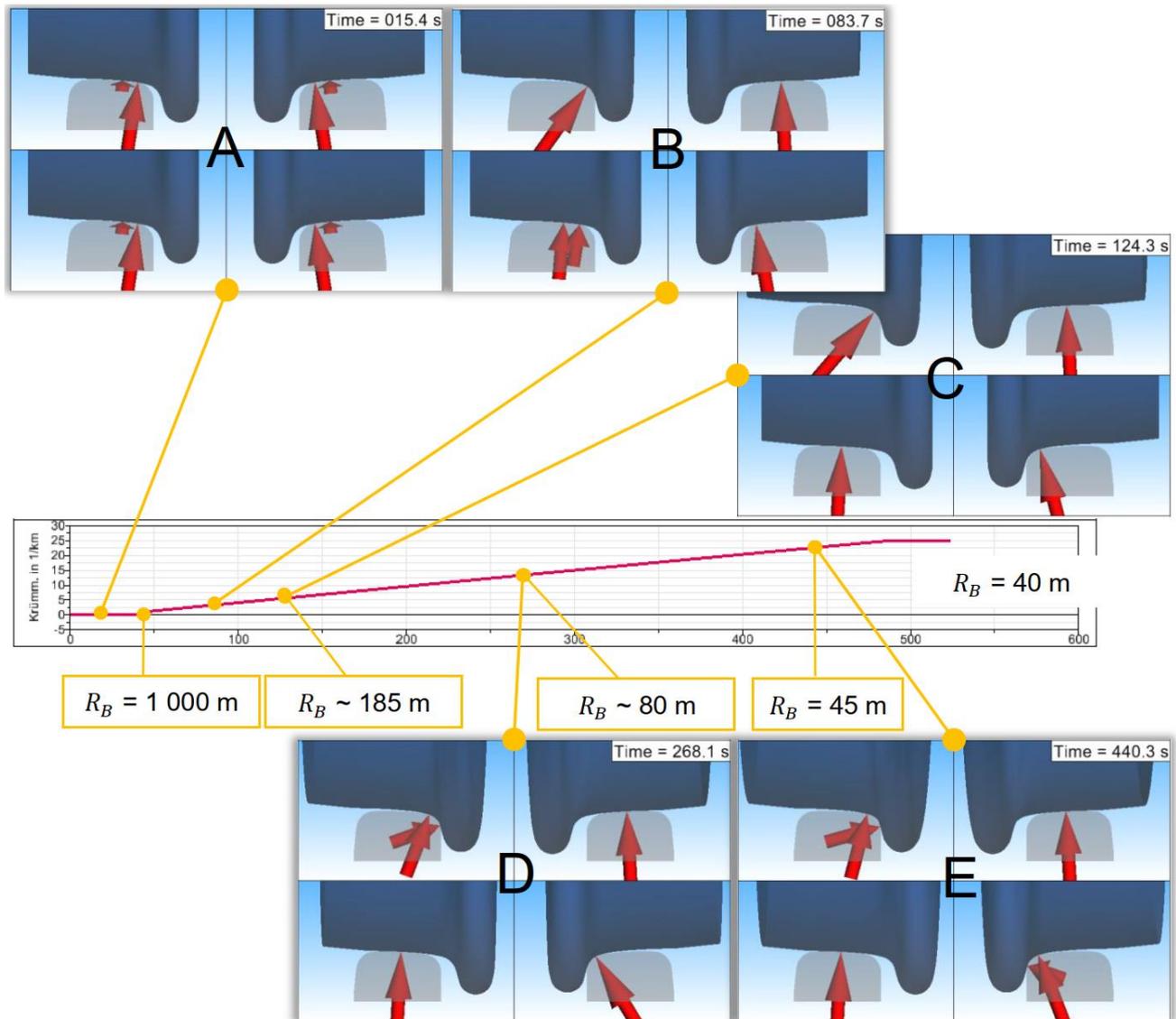


LO 4.5.1

Systemführerschaft Interaktion Fahrzeug – Fahrweg Meterspur
 Projekt: 3 Grundlagen Rad / Schiene
 Modul: 4 Systemische Aspekte Interaktion | BAV-Ziel-2023-P3-08

Grundlagen zu Anforderungen an Fahrsicherheit / Fahrverhalten und deren Nachweismethoden – Meterspur



ID:	RAILplusSF-00047	LO in BAV Detailziel
Datum / Status:	15.11.2024 / Freigegeben	Seitenanzahl 93
Öffentlichkeitsgrad	Öffentlich	
Verfasser:	Johannes Keudel / PROSE	
Geprüft:	Roland Müller / Gleislauftechnik Müller	
Freigegeben:	Friedrich-Christian Walther / Zentralbahn	

Änderungsverzeichnis

Version	Datum	Verantwortlich	Beschreibung
0.1	16.10.2023	Johannes Keudel	Erstentwurf
0.2	02.12.2023	Johannes Keudel	Weiterentwicklung
0.3	08.04.2024	Johannes Keudel	Definitiver Entwurf
0.4	22.07.2024	Johannes Keudel	Einarbeitung Stellungnahmen P5 und STADLER
0.5	13.11.2024	Roland Müller	Einarbeitung Stellungnahmen Swissrail & Geprüft
1.0	15.11.2024	Friedrich-Christian Walther	Schlussbereinigung und Freigabe durch Projektleiter

Freigabe durch die Systemführerschaft

Version	Datum	Verantwortlich
1.0	05.12.2024	Technical Board

Vorwort

Der vorliegende Bericht liefert eine umfassende Beschreibung der Vorschriften und Normenlage sowie der technischen Zusammenhänge zum dynamischen Fahrverhalten und leitet daraus Vorschläge zur Umsetzung bei Meterspuranwendungen ab. Der Bericht bildet damit eine Grundlage für die Entwicklung zukünftiger Spezifikationen und Regelwerke (RTE), insbesondere zu folgenden Aspekten:

- Lauftechnische Auslegungs- und Nachweisrechnung
- Fahrtechnische Prüfung für die fahrtechnische Zulassung
- Prüfung des Fahrverhaltens
- Verifikation des Simulationsmodells
- Lauftechnisches Nachweis-Konzept

Management Summary

Ausgangslage

Für Vollbahnfahrzeuge sind lauftechnische Nachweise insbesondere durch die EN 14363 [14] weitreichend standardisiert. Für Bogenradien kleiner als $R_B = 250$ m besteht für die Vollbahn mit CEN/TS 17843 [16] ein ergänzendes Regelwerk. Die spezifischen Eigenschaften von Meterspuranwendungen wie insbesondere auch kleine Bogenradien, große Vertikalneigung inkl. Zahnrad/Zahnstangen-Anwendungen, Fahrgeschwindigkeit, Spurweite etc. sind in diesen Vorgaben jedoch nicht berücksichtigt. Das Grundlagen-scanning in LO 1.2 des Projekts P1 hat insbesondere in kleinen Bogenradien erhebliche Probleme aufgezeigt.

Für Schweizer Meterspuranwendungen ist mit [3] eine BAV-Richtlinie in Kraft, die aber ausschliesslich auf die Aspekte der Sicherheit gegen Entgleisen im verwundenen Gleisbogen sowie der Fahrstabilität fokussiert. Damit verbleiben für die lauftechnischen Nachweise von Meterspuranwendungen diverse Aspekte offen.

Ziel des vorliegenden Dokuments ist es daher, einen fundierten Vorschlag zu lauftechnischen Nachweisen künftiger Fahrzeuge und Umbauten von Meterspuranwendungen vorzulegen. Gegenstand sind dabei insbesondere die Fahrsicherheit, die Fahrwegbeanspruchung und das Schwingungsverhalten. Die Aspekte der Wirtschaftlichkeit werden im vorliegenden Dokument anteilig berücksichtigt, sind aber insbesondere Gegenstand der Lieferobjekte LO 6.1.2 und 6.2.1 des Projekts P3.

Hauptergebnisse und Fazit

Abschnitt 2.3 des vorliegenden Dokuments bietet zunächst einen systematischen Überblick wesentlicher Schutzziele und zugehöriger fahrzeug- wie gleisseitiger Einflussfaktoren. Dabei stehen verschiedene Aspekte bekanntermassen in Zielkonflikten zueinander: so begünstigt beispielsweise ein niedriger Ausdrehwiderstand der Drehgestelle die Bogengängigkeit, was aber für die Fahrstabilität sensitiv ist, sodass bereits die typischen maximalen Fahrgeschwindigkeiten der Meterspuranwendungen von 100 bzw. 120 km/h anspruchsvoll sein können. Weiterhin besteht hier ein offener Punkt zum Phänomen «Cyclic Top» (Zeile 7 in Tabelle 2), der auch im Vollbahnbereich nicht normativ gefasst ist. Meterspuranwendungen können von diesem Phänomen betroffen sein, da die Gleislage unter anderem auch periodische Längshöhenfehler aufweist [12].

Kapitel 3 enthält eine Zusammenstellung der lauftechnisch relevanten Merkmale von Meterspuranwendungen, wie sie sich insbesondere aus den gleisseitigen Aspekten der Trassierung (Bogenradien, Überhöhung, Längsneigung), aber auch den Gleisbauformen bis hin zu Flachrillen Anwendungen ergeben. Dies schliesst auch eine geeignete Adaption der lauftechnischen Prüfbereiche [14] [16] für die Verhältnisse von Meterspuranwendungen mit ein.

Kapitel 4 enthält zunächst einen Vorschlag zum grundlegenden Vorgehen bei der Erstzulassung oder Änderungen bestehender Fahrzeuge: Aus dargelegten Gründen wird empfohlen, dass sich die Erstzulassung überwiegend auf Simulationsrechnungen abstützt, die durch einen ergänzenden Anteil an messtechnischen Nachweisen flankiert werden. Für die Zulassung bauähnlicher Fahrzeuge oder Änderungen an bestehenden Fahrzeugen ergibt sich nach RTE 49100 [8] die Frage, ob es sich dabei um eine wesentliche Änderung handelt und somit neue Nachweise erforderlich sind. Dazu enthält Kapitel 4 einen Vorschlag zur Adaption des sogenannten λ -Verfahrens nach Anhang U der EN 14363 [14] für Meterspuranwendungen. Bei Bestandsfahrzeugen von Meterspuranwendungen sind jedoch regelmässig keine lauftechnischen Messdaten oder Nachweisrechnungen der Erstzulassung verfügbar (siehe LO 6.1.2 des Projekts P3). In diesem Fall wären mangels Datengrundlage neue Nachweise erforderlich. Um diesem formellen Umstand geeignet zu begegnen, könnte alternativ eine lauftechnisch positive Betriebsbewährung des Referenzfahrzeugs als Voraussetzung für das λ -Verfahren dienen.

Weiterhin sind im Kapitel 4 konkrete Vorschläge zum Umfang lauftechnischer Nachweise künftiger Meterspuranwendungen benannt. Dazu werden die Prinzipien der EN 14363 [14] auf die spezifischen Verhältnisse von Meterspuranwendungen adaptiert. Dies umfasst im vorliegenden Dokument insbesondere die Aspekte der Fahrstabilität, des dynamischen Fahrverhaltens inklusive der Beanspruchung von Fahrweg und Rad sowie der Sicherheit gegen Entgleisen im verwundenen Gleis.

Empfehlungen

Aus den Ergebnissen des vorliegenden Dokuments ergeben sich insbesondere folgende Empfehlungen zum weiteren Vorgehen:

- 1) Das in Kapitel 4 vorgeschlagene Vorgehen sieht für die Erstzulassung überwiegend Simulationsrechnungen vor. Die formulierten Anforderungen basieren dabei insbesondere auf der im Vollbahnbereich bewährten EN 14363 [14], deren Randbedingungen hier auf die spezifischen Merkmale der Meterspuranwendungen aus Kapitel 3 adaptiert sind. Es ist zu empfehlen, die im Kapitel 4 formulierten Szenarien vor der ersten Verwendung geeignet zu erproben. Dazu können Simulationsrechnungen mit Bestandsfahrzeugen von Meterspuranwendungen dienen (siehe Punkt 9) in Abschnitt 6).
- 2) Die im Kapitel 4 auf Basis der spezifischen Merkmale von Meterspuranwendungen erarbeiteten Randbedingungen und Anforderungen an lauftechnische Nachweise sollten in die weiteren Vorhaben der Systemführerschaft wie insbesondere das LO 6.1.2 des Projekts P3 und die entsprechenden Arbeiten des Projekts P5 Eingang finden.
- 3) Die Bewertung der von einem Fahrzeugtyp ausgehenden Fahrwegbeanspruchung könnte wie in Abschnitt 3.8.1 dargelegt anstelle eines grenzwertbasierten KO-Kriteriums alternativ z.B. durch eine Bewertungsziffer in einer mehrstufigen Skala erfolgen. Es ist zu empfehlen, die Erarbeitung und Einführung eines solchen Bewertungssystems zu prüfen.
- 4) Abschnitt 4.1.2 schlägt in Bezug auf nachweisfreie Änderungen oder die Zulassung bauähnlicher Fahrzeuge vor, im Fall fehlender Messdaten des bereits zugelassenen Referenzfahrzeugs alternativ auch eine lauftechnisch positive Betriebsbewährung anzuerkennen. Um diesen pragmatischen Ansatz umsetzen zu können, sollten zunächst einheitliche Kriterien einer lauftechnisch positiven Betriebsbewährung für Meterspuranwendungen ausgearbeitet werden (siehe Punkt 6) in Abschnitt 6). Auf Basis dieser fundierten Kriterien wird dann weiterhin empfohlen, die relevanten Stellen (BAV z.B. im Kontext von [3], ggf. VöV zu RTE 49100 [8] etc.) um die erforderliche Anerkennung des vorgeschlagenen Vorgehens anzufragen.
- 5) Je nach Kombination von Fahrzeug- und Gleiseigenschaften können Meterspuranwendungen sensitiv in Bezug auf Längszug- oder Längsdruckkräfte im Zugverband bzw. zwischen Fahrzeugsektionen sein (z.B. LO 6.1.2 des Projekts P3). Es ist zu empfehlen, das Erfordernis und den Umfang etwaiger Nachweise zur Fahrsicherheit unter Längskräften zu prüfen (siehe Punkt 4) in Abschnitt 6).
- 6) Die frequenzabhängige Nachgiebigkeit des Gleises können einen Einfluss auf das grundlegende Fahrverhalten (z.B. Fahrstabilität) haben und wirken sich auf die höherfrequente Rad/Schiene-Interaktion (Schlupfwellen, Riffelbildung etc.) aus. Damit z.B. lauftechnische Simulationsrechnungen (MKS) die spezifischen Merkmale von Gleisbauformen der Meterspuranwendungen berücksichtigen können, ist die Erarbeitung entsprechender Gleismodelle zu empfehlen (siehe Punkt 8) in Abschnitt 6).

Inhalt

1	Ausgangslage	8
1.1	Problemstellung	8
1.2	Untersuchungsziel und Forschungsfragen	8
1.3	Adressatenkreis	8
1.4	Abgrenzung.....	9
2	Grundlagen	10
2.1	Begriffsdefinitionen.....	10
2.2	Symbolabkürzungen inklusive relevanter Beurteilungsgrößen	15
2.3	Schutzziele, Einflussfaktoren, Beurteilungsgrößen und übliche Nachweismethoden.....	18
2.4	Lauftechnisches Standardprozedere und lauftechnisches Nachweiskonzept	31
3	Lauftechnisch relevante Merkmale der Meterspuranwendungen (vs. «Vollbahn»)	32
3.1	Fahrgeschwindigkeit.....	32
3.2	Überhöhung	32
3.3	Überhöhungsrampe.....	34
3.4	Bogenradien und Überhöhungsfehlbetrag (Prüfbereiche).....	35
3.4.1	<i>Überhöhungsfehlbetrag bzw. unausgeglichene Querbefleunigung a_q</i>	35
3.4.2	<i>Radienbereich von Meterspuranwendungen</i>	36
3.4.3	<i>Radienbereich und Kriterien der Prüfbereiche nach EN 14363 [14]</i>	41
3.4.4	<i>Ergänzender Radienbereich (Prüfbereich 5) nach CEN/TS 17843 [16]</i>	42
3.4.5	<i>Adaption von Prüfbereichen für Meterspuranwendungen</i>	43
3.5	Längsneigung und Helix-Verwindung	54
3.6	Gleislageabweichungen	55
3.7	Zug/Stoss-Einrichtungen bzw. Wagenkastengelenke	55
3.8	Gleisbauformen, Schienenprofile und dynamische Gleisbettung	56
3.8.1	<i>Ertragbare Lasten (Fahrwegbeanspruchung)</i>	56
3.8.2	<i>Dynamische Gleisbettungseigenschaften</i>	57
3.9	Flachrillenbefahrung (soweit tram-ähnliches Spurführungssystem)	58
3.10	Wirksame Verwindung	60
3.11	Bei Meterspuranwendungen bislang üblicher versuchstechnischer Nachweisumfang	61
4	Anforderungen an das Fahrverhalten und deren Nachweismethoden	62
4.1	Grundlegendes Vorgehen	62
4.1.1	<i>Vorschlag zur erstmaligen Zulassung von Fahrzeugtypen</i>	62
4.1.2	<i>Vorschlag zum Vorgehen bei Änderungen oder bauähnlichen Fahrzeugtypen</i>	66
4.2	Fahrstabilität.....	74
4.3	Dynamisches Fahrverhalten in den Prüfbereichen 1, 2 und 4 sowie 5a bis 5e	77
4.4	Simulationsrechnungen zum dynamischen Fahrverhalten auf spezifischen Trassierungen ..	81
4.5	Sicherheit gegen Entgleisen (SgE) in Gleisverwindungen	81
4.6	Sicherheit gegen Entgleisen im Bereich der Interaktion Zahnrad/Zahnstange	83
4.7	Fahrsicherheit unter Längskräften	83
4.8	Eigenschwingverhalten (über das Fahrverhalten in Abschnitt 4.3 hinaus)	83
5	Schlussfolgerungen und Empfehlungen	85

6	Ausblick	86
7	Verzeichnisse	90
7.1	Referenzen	90
7.2	Abbildungen	92
7.3	Tabellen	93

Abkürzungsverzeichnis

AB-EBV	Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung
AVA	Aargau Verkehr AG
BAV	Bundesamt für Verkehr
CEN/TR	Technischer Report des Europäischen Komitees für Normung (Comités Européen de Normalisation)
CEN/TS	Technische Spezifikation des Europäischen Komitees für Normung (Comités Européen de Normalisation)
DAK	Digitale Automatische Kupplung
DB	Deutsche Bahn
EN	Europäische Norm
GTW	Gelenktriebwagen
LCC	Lebenszykluskosten
LO	Lieferobjekt
LOC&PAS	Lokomotiven und Personenwagen
MKS	Mehrkörpersimulation
MOB	Montreux-Berner Oberland-Bahn
ORE	Organisation de recherches et essais
RBS	Regionalverkehr Bern–Solothurn
RCF	Rolling Contact Fatigue (Rollkontaktermüdung)
RhB	Rhätische Bahn
RTE	Regelwerk Technik Eisenbahn
SBB	Schweizerische Bundesbahnen
SES	Soforteingriffsschwelle
SgE	Sicherheit gegen Entgleisen
TPC	Transports Publics du Chablais
TSI	Technische Spezifikationen für die Interoperabilität
TÜV	Technischer Überwachungs-Verein
UIC	Union internationale des chemins de fer (Internationaler Eisenbahnverband)
VDV	Verband Deutscher Verkehrsunternehmen
VöV	Verband öffentlicher Verkehr
WAG	Güterwagen

Glossar

PROSE	Ingenieurdienstleister für Rollmaterial
SIMPACK	Eine Mehrkörpersimulationssoftware
STADLER	Schienenfahrzeughersteller

1 Ausgangslage

1.1 Problemstellung

Die Profilkontur von Rad und Schiene bzw. die resultierende Berührgeometrie können einen wesentlichen Einfluss auf die Fahrsicherheit, die Fahrwegbeanspruchung, das Schwingungsverhalten von Schienenfahrzeugen sowie den Verschleiss und die Schädigung an Rad und Schiene haben.

Für Vollbahnanwendungen¹ im Geltungsbereich der TSI LOC&PAS [28] bzw. TSI WAG [29] sind die Anforderungen zur Rad/Schiene-Interaktion durch die EN 14363 [14] weitreichend standardisiert. Der Anwendungsbereich der EN 14363 [14] wird durch die Spezifikation CEN/TS 17843 [16] um Vorgaben zum Prüfbereich 5 bis hinab zu Bogenradien von 100 m erweitert.

Der Nachweis genügender Fahrsicherheit unter Längsdruckkräften im Zugverband ist im Vollbahnbereich für Güterwagen mit klassischen Seitenpuffern und Schraubenkupplung in EN 15839 [21] standardisiert. Für Mittelpufferkupplungen im Vollbahnbereich sind Standardisierungsarbeiten erst anlässlich der Digitalen Automatischen Kupplung (DAK) [33] wieder aufgenommen worden, jedoch noch nicht vorliegend. Bis anhin ist ein analytischer Rechengang nach ORE B125/Rp5 [25] verfügbar.

Die Anwendungsbereiche der vorgenannten Verordnungen und Normen beziehen sich ausdrücklich auf die Vollbahn. Besonderheiten der Meterspuranwendungen sind dort nicht berücksichtigt.

In Bezug auf die Betriebsbewilligung von Meterspuranwendungen in der Schweiz besteht mit [3] eine Zulassungsrichtlinie des Bundesamtes für Verkehr (BAV), die auf die Aspekte Fahrstabilität und Sicherheit gegen Entgleisen im verwundenen Gleis fokussiert. Bezüglich der Fahrstabilität sieht die Richtlinie [3] wahlweise eine Wiederholung der Fahrversuche mit eingefahrenem Radprofil (Methode 1) oder eine dauerhafte Überwachung (Methode 2) vor. Die sich im Betrieb einstellenden Radprofile von Meterspuranwendungen und die Ableitung entsprechend formstabiler Verschleissprofile sind Gegenstand der laufenden RAILplus-Arbeiten im LO 2.3.4 des Projekts P3.

Darüber hinaus ist kein Regelwerk bekannt, welches die Themengebiete der Fahrsicherheit, Fahrwegbeanspruchung und des Schwingungsverhaltens für Schweizer Meterspuranwendungen gesamthaft regelt. Wirtschaftliche Aspekte sind ohnehin nicht Gegenstand von BAV-Richtlinien oder gängigen Normen, sondern jeweils individuell vertraglich zu vereinbaren.

1.2 Untersuchungsziel und Forschungsfragen

Gegenstand des vorliegenden Berichts sind die Aspekte der Fahrsicherheit, der Rad-/Schiene-Bearbeitung und des Schwingungsverhaltens, die alle drei zusammengefasst nachfolgend als (dynamisches) Fahrverhalten bezeichnet werden. Die Untersuchung bezieht sich dabei auf Meterspuranwendungen, wie sie unter Punkt 1) in Abschnitt 2.1 definiert sind.

Ziel des vorliegenden Berichts ist es, zunächst die relevanten Begrifflichkeiten des Fahrverhaltens sowie die zugehörigen Schutzziele jeweils für die Belange der Meterspuranwendungen aufzustellen, siehe Kapitel 2.

Darauf aufbauend ist es weiterhin das Ziel, die lauftechnisch relevanten Merkmale und Besonderheiten der Meterspuranwendungen zusammenzustellen, siehe Kapitel 3.

Schliesslich gilt es, aus den zuvor genannten Schritten die Anforderungen sowie die Nachweismethoden zum Fahrverhalten künftiger Fahrzeuge von Meterspuranwendungen respektive wesentlicher Umbauten zu erarbeiten, siehe Kapitel 4.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung stellen dann eine Teilgrundlage für die Erstellung eines Lastenhefts dar.

1.3 Adressatenkreis

Das vorliegende Dokument und die darin herausgearbeiteten Grundlagen richten sich einerseits an (angehende) Fachspezialisten der Lauftechnik. Andererseits ist es vorgesehen, ausgewählte Aspekte

¹ Wortwahl «Vollbahn» nach EN 17343 [22] zur Unterscheidung von der hier gegenständlichen Meterspuranwendung

aus dem vorliegenden Dokument in künftige Lastenhefte von Meterspuranwendungen zu extrahieren. Entsprechend kann dieses Dokument auch z.B. im Beschaffungsprozess bei technischen Besonderheiten oder aufkommenden Fragen zur Klärung dienen.

1.4 Abgrenzung

Der vorliegende Bericht fokussiert entsprechend des zugrunde liegenden Projektantrags insbesondere auf sicherheitsrelevante lauftechnische Aspekte. Andere Untersuchungen innerhalb der Systemführerschaft «Fahrzeug/Fahrweg Meterspur» (z.B. Lieferobjekte 6.1.2, 6.2.1, 6.3.1 des Projekts P3) beziehen sich auf weitere lauftechnische Aspekte wie z.B. Verschleiss und Rollkontaktermüdung von Rad und Schiene, Schallemission oder Komfort, die ebenfalls Teilaspekte künftiger Lastenhefte darstellen.

Die geometrische Kompatibilität von Rad und Schiene, die ein zwängungsfreies Passieren von Weichen und Kreuzungen (Quermassuntersuchung), zum Gegenstand hat, ist nicht Teil des vorliegenden Berichts, sondern für die gegenständlichen Meterspuranwendungen beispielsweise in R RTE 29500 [7] geregelt. In Bezug auf eine ggf. führungslose Strecke in Doppelherzstücken sei auf das Lieferobjekt LO 1.1.3 des Projekts P3 verwiesen.

Die vorliegende Untersuchung ist Teil des Projekts P3 «Rad/Schiene», während andere Projekte die Fahrzeugtechnik inklusive der Drehgestelle/Fahrwerke zum Gegenstand haben. Der vorliegende Bericht beinhaltet daher nicht den Fahrkomfort der Fahrgäste, nicht Radsatztorsionsschwingungen, nicht die Standsicherheit und nicht die Seitenwindstabilität, auch wenn diese Aspekte anteilig mit der Lauftechnik zusammenhängen.

2 Grundlagen

2.1 Begriffsdefinitionen

1) Meterspuranwendung

Der Begriff «Meterspuranwendungen» bezieht sich im vorliegenden Dokument auf

- Schweizer Meterspurbahnen
- ohne Tram-Bahnen
- entweder als reine Adhäsionsbahn
- oder gemischte Adhäsions-/Zahnradanwendung jedoch hier nur im Adhäsionsbetrieb (keine reinen Zahnradbahnen)

2) Dynamisches Fahrverhalten

Das dynamische Fahrverhalten bezeichnet im vorliegenden Bericht den Oberbegriff der drei Aspekte Fahrsicherheit inklusive Fahrstabilität, Fahrwegbeanspruchung und Schwingungsverhalten, wie es in ähnlicher Form z.B. in EN 14363 [14], den BAV-Richtlinien [2][3] oder der TSI LOC&PAS [28] genutzt wird.

3) Fahrsicherheit

Der Begriff Fahrsicherheit versteht sich im vorliegenden Bericht als ein Teilaspekt des dynamischen Fahrverhaltens, siehe oben. Die Fahrsicherheit umfasst unmittelbar sicherheitsrelevante Aspekte der Rad/Schiene-Interaktion, die entweder zur Entgleisung des Fahrzeugs durch Aufklettern der Räder führen oder eine Querverschiebung des Gleises bewirken können.

4) Fahrstabilität

Die Fahrstabilität ist ein Teilaspekt der Fahrsicherheit, siehe oben. Die Fahrstabilität hat zum Gegenstand, dass bei konventionellen Radsätzen (zwei Räder auf einer Radsatzwelle) selbst-erregte Querschwingungen auftreten können, mit denen sich der Radsatz durch den Spurkanal bewegt. Die Benennung dieser Schwingungen ist nicht standardisiert. Je nach Ausprägung ist z.B. Instabilität, Grenzykelbewegung oder Drehgestell-Schlingern, oder niederfrequente Wagenkastenschwingung bzw. «low frequency body motion» gebräuchlich. Das Auftreten von instabilem Fahrverhalten meint dabei nicht im mechanischen Sinne ein instabiles System, das sich beschädigt oder zerstört. Charakteristisches Merkmal ist vielmehr ein ausgeprägtes Eigenschwingverhalten mit konstanter Frequenz und ausgeprägter Amplitude. (Details siehe [9])

5) Fahrwegbeanspruchung

Fahrwegbeanspruchung versteht sich im vorliegenden Bericht als ein Teilaspekt des dynamischen Fahrverhaltens, siehe oben. Die Fahrwegbeanspruchung hat dabei nach Tabelle 4 der EN 14363 [14] keine Beanspruchung im Sinne einer mechanischen Spannung (Strukturfestigkeit) zum Gegenstand, sondern beinhaltet Lasten (Kräfte), die dann im Fahrweg wie auch den Rädern eine Beanspruchung bewirken. Die Fahrwegbeanspruchung zielt darauf ab, dass die auftretenden Rad/Schiene-Kräfte durch die Schiene respektive umliegende Gleiskomponenten wie die Schienenbefestigung schadungsfrei ertragen werden. Die Fahrwegbeanspruchung ist damit indirekt sicherheitsrelevant.

6) Schwingungsverhalten

Das Schwingungsverhalten versteht sich im vorliegenden Bericht als ein Teilaspekt des dynamischen Fahrverhaltens, siehe oben. Das Schwingungsverhalten wird durch Beschleunigungen am Wagenkasten bzw. Fahrzeugaufbau charakterisiert. Die Bewertung des Schwingungsverhaltens ist gemäss Abschnitt 7.5.4 der EN 14363 [14] weder sicherheitsrelevant noch verpflichtend. Es dient vielmehr zum informellen Vergleich gegenüber betriebsbewährten Erfahrungswerten sowie dem Vermeiden ausgeprägter Resonanzen. Das Schwingungsverhalten ist nicht mit dem Fahrkomfort der Fahrgäste z.B. nach EN 12299 [17] zu verwechseln, der das frequenzabhängige Wohlempfinden der Fahrgäste zum Gegenstand hat. Zur Bewertung des Schwingungsverhaltens setzt EN 14363 [14] teilweise auf denselben Rohdaten auf, wie sie anteilig auch zur Beurteilung der Fahrsicherheit nach dem vereinfachten Messverfahren genutzt werden. Das Schwingungsverhalten ist dabei nicht mit dem vereinfachten Verfahren (siehe unten) gleichzusetzen bzw. zu verwechseln.

7) Verschleiss und Schädigung von Rad und Schiene

Unter Verschleiss versteht sich im vorliegenden Bericht der Materialabtrag am Radkranz oder Schienenkopf. Der Verschleiss ist Folge der Reibvorgänge im Rad/Schiene-Kontakt.

Der Verschleiss erfolgt bestenfalls gleichmässig über den Radumfang bzw. entlang der Schiene. Je nach Betriebseinsatz kann sich dabei ein formstabiles Rad- bzw. Schienenprofil einstellen, das sich zwar im weiteren Betriebsverlauf fortlaufend in das Material vorarbeitet, dabei aber seine Form beibehält. Zur Berechnung der Verschleissrate bestehen unterschiedliche nichtlineare Modellansätze [41], die z.B. eine Abhängigkeit von der flächenbezogenen Reibleistung etc. formulieren. Die wirksame Rad/Schiene-Reibleistung und damit der Verschleiss hängen von der grundlegenden Rad/Schiene-Interaktion ab. Dabei sind neben der geometrischen Profilkonformität und dem Reibwert bzw. Kraftschluss/Schlupf-Verhalten insbesondere das Antriebs- und Bremsregime, die Radsatzlast und der (bogenabhängige) Anlaufwinkel des Rades relevant. Das Reprofilierungsintervall bzw. die Lebensdauer der Räder kann also bei streckenseitig gegebener Bogenradienverteilung insbesondere durch fahrzeugseitige Eigenschaften wesentlich beeinflusst werden. Der Verschleiss von Rad und Schiene hat über den Reprofilierungsaufwand und die Lebensdauer wesentlichen wirtschaftlichen Einfluss auf das Rad/Schiene-System. Dies ist für die Lebenszykluskosten (LCC) relevant, nicht jedoch sicherheitsrelevant.

Der Rad-/Schiene-Verschleiss kann im ungünstigen Fall z.B. infolge dynamischer Vorgänge oder anfänglicher Imperfektionen auch ungleichmässig über dem Radumfang (z.B. Polygonbildung, Flachstellen etc.) oder entlang der Schiene (z.B. Riffeln, Schlupfwellen etc.) erfolgen (z.B. [42]). Dies erfordert gegenüber den eigentlichen Verschleissgrenzwerten von Rad und Schiene eine vorzeitige Bearbeitung (Reprofilieren, Schleifen), um eine weitere Ausbreitung zu vermeiden und übermässige Dynamik (Überbeanspruchung infolge grosser Kräfte, akustische Belange wie Dröhnen etc.) zu unterbinden.

Schädigung von Rad oder Schiene bedeutet ein örtliches Materialversagen infolge von Überbeanspruchung. Dies kann sich z.B. durch verschiedene Formen von Rollkontaktermüdungsschäden (RCF) am Radumfang (z.B. [43]) oder entlang der Schiene (z.B. [44]) zeigen. Ebenso sind Einzelfehler wie z.B. im Bereich von Schweisstössen der Schienen möglich. Die Schädigung von Rad und Schiene ist dahingehend sicherheitsrelevant, dass ein Materialversagen wie z.B. ein Schienenbruch zum Verlust der Spurführung führen kann. Die rechtzeitige Beseitigung von Schäden stellt einen wirtschaftlichen Einfluss dar.

Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Rollkontaktermüdungsschäden (RCF) steht z.B. nach dem Kriterium von Burstow [45] in einer Wechselwirkung mit dem Verschleiss: sofern die Verschleissrate grösser als die Risswachstumsrate ist, sind demnach keine bleibenden Schädigungen zu erwarten. Burstow [45] definiert dies in Abhängigkeit von der längenbezogenen Rad/Schiene-Reibarbeit T_γ . So basiert beispielsweise das Kriterium T_{qst} der EN 14363 [14] nach den Erläuterungen in Abschnitt 10.3 in TS 17039 [15] auf eben diesem Kriterium.

Die Messgrössen des nachfolgend beschriebenen vereinfachten Verfahrens der EN 14363 [14] ermöglichen keine Aussage zum Verschleiss oder der Schädigung von Rad und Schiene.

8) Normales Messverfahren und vereinfachtes Messverfahren

Abschnitt 7.2.1 der EN 14363 [14] deklariert zum Abprüfen des dynamischen Fahrverhaltens von Vollbahnfahrzeugen ein normales sowie ein vereinfachtes Messverfahren.

- a. Das **normale Messverfahren** beinhaltet die Erfassung von Rad/Schiene-Kräften. Es erfasst die Beurteilungsgrössen also unmittelbar an der Quelle (direktes Verfahren). Das normale Messverfahren dient der Beurteilung der Fahrsicherheit, der Fahrwegbeanspruchung und des Schwingungsverhaltens. Das normale Messverfahren erfordert also den Einsatz von Messradsätzen.
- b. Weil das normale Messverfahren direkt die Rad/Schiene-Kräfte nutzt, kann es auch für Meterspuranwendungen angewandt werden. Voraussetzung dafür ist, dass das Messradsatzsystem für die kleinen Bogenradien, die Radbauformen und ggf. das Zahnradbahnsystem der Meterspuranwendungen geeignet ist.

- c. Das **vereinfachte Messverfahren** beruht insbesondere auf der Messung von Beschleunigungen auf dem Drehgestellrahmen sowie dem Fahrzeugaufbau. Die Rad/Schiene-Interaktion wird also durch Beschleunigungen bewertet, die ein bis zwei Federstufen vom Rad/Schiene-Kontakt entfernt auftreten. Es stellt damit ein indirektes Bewertungsverfahren dar.

Je nach Fahrzeugbeschaffenheit ist in einigen Fällen zusätzlich die Messung von Radatzlagerquerkräften (H-Kräfte) vorgesehen, wobei die H-Kraftmessung heute praktisch nicht mehr angewandt wird.

Das vereinfachte Verfahren dient der Beurteilung der Fahrsicherheit und des Schwingungsverhaltens, nicht aber der Fahrwegbeanspruchung.

Abschnitt 7.2.2 der EN 14363 [14] definiert Bedingungen zur technischen Beschaffenheit des Fahrzeugs, unter denen das vereinfachte Verfahren für Vollbahnfahrzeuge anwendbar ist.

Es ist fraglich, ob die Beschleunigungen am Drehgestellrahmen bzw. dem Fahrzeugaufbau in den kleinen Bogenradien von Meterspuranwendungen dazu geeignet sind, die Rad/Schiene-Interaktion zu bewerten.

9) Quasistatische und dynamische Grössen

EN 14363 [14] unterscheidet in der Art von Fahrzeugprüfungen wie auch in der Auswertung von Beurteilungsgrössen zwischen quasistatischen und dynamischen Betrachtungen.

a. quasistatisch

Quasistatische Betrachtungen beziehen sich dabei einerseits

- i. auf sehr langsame Vorgänge, die nahezu statisch ausgeführt werden (z.B. Verwindeprüfstand),

sowie andererseits

- ii. auf den mittleren (Gleichgewichts-)Zustand dynamischer Vorgänge unter konstanten Randbedingungen z.B. quasistatischer Bogenlauf unter konstanter un- ausgeglichener Querschleunigung im Vollbogen.

So werden nach EN 14363 [14] aus einigen dynamischen Messgrössen durch mehrfache Mittelung (gleitender Mittelwert, 50 %-Perzentil) auch quasistatische Grössen abgeleitet, die mit dem Index «qst» gekennzeichnet sind.

b. dynamisch

Dynamische Betrachtungen beziehen sich beispielsweise auf die zeitliche Änderung der Interaktion von Rad und Schiene, wobei sich die Randbedingungen (Trassierung, Gleis- lagefehler, Oberbauform etc.) ändern können und/oder das Fahrzeug in einer Eigenform schwingen kann (Fahrstabilität).

Beurteilungsgrössen zu dynamischen Aspekten werden in Tabelle 5 der EN 14363 [14] überwiegend durch 0,15 %-Perzentile bzw. 99,85 %-Perzentile je Auswertabschnitt gebildet und mit dem Index «max» gekennzeichnet.

Insbesondere in kleinen Bogenradien kann weiterhin auch die Wechselwirkung zwischen benachbarten Fahrzeugen (Längsdynamik) relevant sein.

10) Sicherheit gegen Entgleisen (SgE)

Sicherheit gegen Entgleisen bezeichnet eine rechnerisch verbleibende Marge bis zum Aufklettern eines Rades an der Schiene. Sie wird typischerweise anhand des Entgleisungsquotienten Y/Q oder anhand der Radanhebung Δz gegenüber dem jeweiligen Grenzwert ausgedrückt. Die Sicherheit gegen Entgleisen ist sowohl Bestandteil der Bewertung des dynamischen Fahrverhaltens (siehe oben) als auch Gegenstand quasistatischer Nachweise nach EN 14363 [14] sowie der BAV-Richtlinie [3].

11) Vollbahn

Der Begriff «Vollbahn» wird in der vorliegenden Untersuchung unter Verweis auf EN 17343 [22] für (interoperable) Eisenbahnanwendungen in Normalspurweite von 1'435 mm zur Unterscheidung von der hier gegenständlichen Meterspuranwendung verwendet.

12) λ -Verfahren (Lambda-Verfahren)

Das λ -Verfahren bezeichnet ein Vorgehen nach Anhang U der EN 14363 [14]. Dieses Verfahren ermöglicht eine vereinfachte Erweiterung der lauftechnischen Zulassung, sofern in den Fahrversuchen eines bauähnlichen Referenzfahrzeugs bestimmte Messergebnisse erzielt wurden. Das λ -Verfahren sieht in Tabelle U.1 der EN 14363 [14] je nach Ausgangslage und technischen Unterschieden für ein bauähnliches Neu- oder Umbaufahrzeug entweder eine Befreiung von weiteren Nachweisen, Nachweise nach dem vereinfachten Verfahren, Versuche mit eingeschränktem Umfang oder ggf. vollständige Fahrversuche vor. Abschnitt 4.1.2 des vorliegenden Dokuments beschreibt dazu ein an die Verhältnisse von Meterspuranwendungen angepasstes Vorgehen.

Für den Umbau bestehender Fahrzeuge besteht regelmässig das Problem, dass für das Ursprungsfahrzeug zeitgemäss keine Messdaten verfügbar sind. Diese Fahrzeuge sind also mangels positiver Messresultate trotz jahrelanger Betriebsbewährung formal nicht zum λ -Verfahren zugelassen. So ist es für den Strassen- und Stadtbahnbereich im deutschsprachigen Raum z.B. auch üblich, anstelle von Messergebnissen eine entsprechend gut dokumentierte positive Betriebsbewährung des Fahrzeugs (keine Entgleisungen, kein merkliches Schlingerverhalten, kein unruhiger Lauf, keine auffälligen Radprofilerscheinungen etc.) als Voraussetzung für das λ -Verfahren anzusetzen.

13) Störverhalten des Fahrzeugs

Das Störverhalten bezeichnet die Neigung eines Fahrzeugs, auf äussere Störgrössen beispielsweise aus der geometrischen Gleislage zu reagieren. Ein gutes («gutmütiges») Störverhalten bezeichnet dabei eine geringe bzw. rasch abklingende Fahrzeugreaktion. Ein schlechtes («empfindliches») Störverhalten bezeichnet eine länger anhaltende, heftige bzw. aufklingende Fahrzeugreaktion infolge eines äusseren Störeinflusses.

14) Statistische Auswertung (Quantilen und maximaler Schätzwert)

Abschnitt 7.6.3 der EN 14363 [14] sieht zur Bewertung des dynamischen Fahrverhaltens vor, dass die Messsignale der verschiedenen Beurteilungsgrössen in Auswertabschnitte (Sektionen) unterteilt werden. Jede Sektion muss dabei Vorgaben hinsichtlich ihrer Länge und der Randbedingungen (Fahrgeschwindigkeit, Bogenradius, unausgeglichene Querbeschleunigung, etc.) erfüllen.

Jede Sektion wird nach Tabelle 5 der EN 14363 [14] in Abhängigkeit der jeweiligen Beurteilungsgrösse entweder durch einen Extremwert (Maximalwert, 0,15 %-Perzentil, 99,85 %-Perzentil, etc.) oder durch den Medianwert (50 %-Perzentil) charakterisiert (Auswertungsparameter).

Für jeden Prüfbereich und jede Beurteilungsgrösse erfolgt eine separate statistische Auswertung über die zugehörigen Auswertungsparameter der gültigen Sektionen (Sektionsstatistik). Anhang R der EN 14363 [14] definiert dazu für unterschiedliche Zwecke drei verschiedene statistische Auswertungen (eindimensionales Verfahren, zweidimensionales Verfahren, multiple Regression).

Das Ergebnis der jeweiligen statistischen Auswertung ist der sogenannte maximale Schätzwert, der dann mit dem Grenzwert der betreffenden Beurteilungsgrösse des gegenständlichen Prüfbereichs verglichen wird.

Das Prozedere je Beurteilungsgrösse und Prüfbereich besteht also knapp zusammengefasst aus nachfolgenden Schritten:

- 1) Rohsignal filtern
- 2) (gültige) Sektionen bilden
- 3) Auswertungsparameter je Sektion bestimmen
- 4) Statistik über alle Auswerteparameter erstellen
- 5) maximalen Schätzwert ermitteln
- 6) Schätzwert mit dem Grenzwert vergleichen

Demgegenüber ist es für die Bewertung von fahrtechnischen Simulationsergebnissen üblich, konservative Randbedingungen (Gleislagefehler, Rad/Schiene-Reibung, Trassierung, Fahrgeschwindigkeit, Radaufstandskräfte bzw. Fahrzeugmasse und unausgeglichene Querbeschleunigung etc.) anzusetzen und dann das Simulationssignal (ohne die vorstehenden Schritte 2 bis 5) direkt mit dem Grenzwert zu vergleichen.

15) Validierung vs. Plausibilitätsprüfung des Simulationsmodells

Eine Modellvalidierung überprüft das Modell bzw. mit ihm erzielte Ergebnisse im Vergleich zum realen System bzw. physikalischen Prüfergebnissen des realen Systems. Stand der Technik für die Validierung eines lauftechnischen Simulationsmodells stellt der Anhang T der EN 14363 [14] dar. Bild T.1 der EN 14363 [14] beschreibt dazu zwei Methoden mit entsprechenden Beurteilungskriterien. Die Modellvalidierung nach EN 14363 [14] setzt umfassende Messdaten eines geeigneten Referenzfahrzeugs inklusive der erforderlichen Randbedingungen wie Rad- und Schienenprofilaten, Trassierung und Gleislagefehler etc. voraus. Die dazu erforderlichen Messungen sind im Geltungsbereich der TSIs [28][29] (Vollbahn) in der Regel durch akkreditierte Prüfstellen (ISO 17025) durchzuführen. Der mit der Erhebung der Messdaten sowie der eigentlichen Validierung verbundene Aufwand ist in der Regel erheblich, aber unter Umständen z.B. für die Zulassung bauähnlicher Fahrzeuge einer Fahrzeugplattform effizient.

Demgegenüber meint eine Plausibilitätsprüfung des Simulationsmodells im vorliegenden Bericht eine gezielte Überprüfung gezielt ausgewählter Eigenschaften. In Bezug auf die regelmäßig geringe Stückzahl von Fahrzeugen der Meterspuranwendungen sind für die Plausibilitätsprüfung solche Beurteilungsgrößen von Interesse, die lauftechnisch relevant und gleichzeitig einer möglichst pragmatischen Messung zugänglich sind, siehe z.B. Abschnitt 4.1.1.

2.2 Symbolabkürzungen inklusive relevanter Beurteilungsgrößen

In der nachfolgenden Tabelle 1 werden Abkürzungen wesentlicher Größen inklusive Beurteilungsgrößen gelistet, so dass diese Größen im weiteren Verlauf des vorliegenden Berichts wie insbesondere in Tabelle 2 ohne weitere Erläuterung platzsparend verwendet werden können.

Spalte 1 der Tabelle 1 nutzt dabei Symbolzeichen, wie sie beispielsweise auch in der EN 14363 [14] Anwendung finden. Spalte 2 der Tabelle 1 enthält für einige Größen alternativ verwendete Symbole, wie sie vereinfacht genutzt werden, wenn die volle Schreibweise nicht verfügbar ist.

Nr.	1 Symbolabkürzung	2 Redaktionelles Synonym	3 Beschreibung	4 Hinweis
1	Y		Radführungskraft (Summe aller lateral wirksamen Kraftanteile je Rad über alle dort aktuell auftretenden Berührflächen)	
2	Y_{qst}		quasistatische Radführungskraft Y	
3	Y_{max}		maximale Radführungskraft Y	
4	Q		Radaufstandskraft (Summe aller vertikal wirksamen Kraftanteile je Rad über aller dort aktuell auftretenden Berührflächen)	
5	Q_0		statische Radaufstandskraft Q	
6	\bar{Q}_0		mittlere statische Radaufstandskraft eines Radsatzes	BAV-Richtlinie [3]
7	ΔQ		Radlaständerung	BAV-Richtlinie [3]
8	Δq_0		relativer Radlastunterschied der Räder eines Radsatzes $\Delta q_0 = (Q_{links} - Q_{rechts}) / (Q_{links} + Q_{rechts})$	AB-EBV [1] BAV-Richtlinie [3]
9	Q_{qst}		quasistatische Radaufstandskraft Q	
10	Q_{max}		maximale Radaufstandskraft Q	
11	$P = 2Q_0$		statische Radsatzaufstandskraft (Summe der statischen Radaufstandskräfte eines Radsatzes)	
12	ΣY	SumY	Summe der Radführungskräfte eines Radsatzes (Gleisquerkraft)	
13	ΣY_{max}	SumY _{max}	maximale Summe der Radführungskräfte	
14	ΣY_{rms}	SumY _{rms}	gleitender quadratischer Mittelwert (gleitender RMS-Wert) der Summe der Führungskräfte ΣY	EN 14363 [14]
15	$\Sigma Y_{rms,lim}$	SumY _{rms,lim}	Grenzwert zu ΣY_{rms}	
16	Y/Q		Entgleisungsquotient, Verhältnis von Radführungskraft Y zu Radaufstandskraft Q	
17	Y/Q _{max}		maximales Verhältnis von Radführungskraft Y zu Radaufstandskraft Q	
18	B_{qst}		Parameter für die quasistatische Schienenbelastung $B_{qst} = Y_{qst} + 0.83 \cdot Q_{qst}$	7.5.3 und J.3 der EN 14363 [14]

	1	2	3	4
Nr.	Symbolabkürzung	Redaktionelles Synonym	Beschreibung	Hinweis
19	B_{max}		Parameter für die maximale Schienenbelastung $B_{max} = (Y + 0.91 \cdot Q)_{max}$	7.5.3 und J.3 der EN 14363 [14]
20	T_{qst}		Grösse der Schienenoberflächenschädigung	Anhang K der EN 14363 [14]
21	T_{γ}	Wear Number	Skalarprodukt aus Kraftschlusskräften (Schlupfkräften) und Schlupf, zumeist zzgl. Produkt aus Bohrmoment und Bohrschlupf entspricht gleichzeitig der Rad-/Schiene-Reibarbeit je laufendem Meter Fahrweg (Fahrwiderstand)	Abschnitt 10.3 in TS 17039 [15]
22	\ddot{y}^+	ypp^+	Querbeschleunigung am Drehgestellrahmen über dem Radsatzlager	BAV-Richtlinie [3] EN 14363 [14]
23	\ddot{y}_{max}^+	ypp^+_{max}	maximale Querbeschleunigung am Drehgestellrahmen über dem Radsatzlager	
24	\ddot{y}_{rms}^+	ypp^+_{rms}	gleitender quadratischer Mittelwert (gleitender RMS-Wert) der Querbeschleunigung am Drehgestellrahmen über dem Radsatzlager	
25	$\ddot{y}_{rms,lim}^+$	$ypp^+_{rms,lim}$	Grenzwert zu \ddot{y}_{rms}^+	
26	\ddot{y}^*	ypp^*	Querbeschleunigung am Wagenkasten über dem Drehgestell bzw. den Drehgestellen	z.B. zusätzlich auch in Wagenkastenmitte
27	$\ddot{y}^*_{s,max}$	$ypp^*_{s,max}$	maximale Querbeschleunigung am Wagenkasten über dem Drehgestell bzw. den Drehgestellen	
28	$\ddot{y}^*_{q,max}$	$ypp^*_{q,max}$	Querbeschleunigung am Wagenkasten über dem Drehgestell in der Filterung zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens	Tabelle 5 EN 14363
29	\ddot{z}^*	zpp^*	Vertikalbeschleunigung am Wagenkasten über dem Drehgestell	
30	$\ddot{z}^*_{s,max}$		maximale Vertikalbeschleunigung am Wagenkasten über dem Drehgestell	
31	$\ddot{z}^*_{q,max}$		Vertikalbeschleunigung am Wagenkasten über dem Drehgestell in der Filterung zur Beurteilung des Schwingungsverhaltens	
32	R_B		Bogenradius (Gleisquerkrümmungsradius)	
33	Δz	dz	Radanhebung Vertikalbewegung eines Rades relativ zur Schiene gegenüber der statischen Ausgangslage	
34	$2a^+$		Radsatzstand im Drehgestell (Längsabstand der Radsätze im Drehgestell)	
35	$2a^*$		Drehgestellmittenabstand	
36	g^+		Verwindung im Drehgestell (primäre Verwindung in [3])	BAV-Richtlinie [3] EN 14363 [14]

	1	2	3	4
Nr.	Symbolabkürzung	Redaktionelles Synonym	Beschreibung	Hinweis
37	g^*		Verwindung im Wagenkasten bzw. zwischen zwei Drehgestellen (sekundäre Verwindung in [3])	BAV-Richtlinie [3] EN 14363 [14]
38	V_{zul}		Fahrzeugseitig grösste zulässige Fahrgeschwindigkeit	
39	\ddot{u}		Überhöhung, gegenseitige Höhenlage von rechter zu linker Schiene eines Gleises über der Stützweite	AB-EBV [1]
40	\ddot{u}_{max}		maximal zulässige Überhöhung (in Abhängigkeit der Gleisart sowie ggf. vom Bogenradius)	AB-EBV [1]
41	$d\ddot{u}/dt$		Änderung der Überhöhung in Funktion der Zeit (Hubgeschwindigkeit bei der Überfahrt)	
42	a_q		unausgeglichene Querschleunigung auf Gleisebene	
43	\ddot{u}_f		Überhöhungsfehlbetrag Schreibweise hier analog zur AB-EBV [1], in EN 14363 [14] stattdessen I abgekürzt	AB-EBV [1]
44	$\ddot{u}_{f,zul}$		Fahrzeugseitig maximal zulässiger Überhöhungsfehlbetrag (ggf. z.B. abhängig vom Bogenradius)	
45	$2b_A = M$		Stützweite (Querabstand von rechter und linker Schiene zum Aufbringen der Überhöhung) für Meterspuranwendungen in der Schweiz 1 050 mm	Abschnitt 3.6.1 der AB-EBV [1] zu Artikel 17
46	$\tan \gamma_e$		Äquivalente Konizität	EN 14363 [14] insbesondere Tabelle 2, Anhang O, Anhang P
47	u_y		Radsatzquerverschiebung, Querweg des Radsatzes gegenüber dem Gleis	
48	\dot{u}_y		Amplitude der Radsatzquerverschiebung u_y	
49	S		Spurweite	
50	s		Spurmass	

Tabelle 1: Symbolabkürzungen

2.3 Schutzziele, Einflussfaktoren, Beurteilungsgrößen und übliche Nachweismethoden

Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der Schutzziele, wesentlicher Einflussgrößen, gängiger Beurteilungsgrößen und üblicher Nachweismethoden zum Fahrverhalten.

Spalte 1 der Tabelle 2 weist dabei die grundlegenden Rubriken des dynamischen Fahrverhaltens aus, die aus Fahrsicherheit, Fahrwegbeanspruchung und Schwingungsverhalten bestehen (siehe Abschnitt 2.1).

Die in Spalte 2 der Tabelle 2 gelisteten Schutzziele verstehen sich grundlegend und gelten unabhängig von einer Norm oder einer Spurweite des betrachteten Eisenbahnsystems.

Spalte 3 der Tabelle 2 listet mögliche technische Effekte der Fahrzeug/Fahrweg-Wechselwirkung, die dem jeweiligen Schutzziel aus Spalte 2 entgegenstehen können. Diese Effekte in Spalte 3 gelten dabei abgesehen vom möglichen Einfluss des Zahnradbahnsystem in Zeile 6 gleichlautend für Vollbahn- und Meterspuranwendungen.

In den Spalten 13 und 14 der Tabelle 2 sind übliche Beurteilungsgrößen zur Bewertung des jeweiligen Effekts aus Spalte 3 gelistet. In den Spalten 13 und 14 sind dabei jeweils Kurzzeichen der Beurteilungsgrösse angedruckt, deren Erläuterungen sich in Tabelle 1 finden. In den Spalten 4 bis 12 der Tabelle 2 sind Einflussgrößen gelistet, die typischerweise Einfluss auf den Effekt in Spalte 3 nehmen können. Die möglichen Einflüsse sind nachfolgend zellenweise beschrieben. Die Erläuterungen zeigen dabei auch die typischen Zielkonflikte wie beispielsweise die Anforderung nach hoher Fahrstabilität in der Geraden aber auch guter Bogengängigkeit auf.

zu Zeile Spalte in Tabelle 2	Beschreibung zum jeweiligen Effekt in Tabelle 2
	<p>Zur Fahrstabilität und dem Störverhalten im geraden Gleis bzw. sehr grossen Bögen</p>
3 4	<p>Eine hohe äquivalente Konizität provoziert bei konventionellen Fahrzeugkonzepten die Drehgestell-Instabilität («Drehgestellschlingern», «instabiler Lauf», siehe [9]).</p>
	<p>Eine niedrige äquivalente Konizität provoziert bei konventionellen Fahrzeugkonzepten niederfrequente Wagenkastenschwingungen («low frequency body motion», siehe [9]).</p>
3 5	<p>Ein grosser Rad-/Schiene-Reibwert begünstigt das Auftreten von Instabilitäten und wirkt sich potenziell negativ auf das Störverhalten des Fahrzeugs aus. Trockene Rad/Schiene-Verhältnisse stellen daher anspruchsvollere Randbedingung dar.</p>
3 6	<p>Konventionelle Radsätze mit zwei Rädern auf einer gemeinsamen steifen Radsatzwelle sind sensitiv für instabilen Lauf. Hier kann eine selbsterregte Schwingung auftreten. Bei der Verwendung von Einzelrädern kann kein instabiler Lauf auftreten, jedoch erfolgt auch keine Zentrierwirkung des Radpaars im Spurkanal des geraden Gleises.</p>
3 7	<p>Geringe (dynamische) Ausdrehwiderstände der Drehgestelle begünstigen das Auftreten einer Instabilität. Ausdrehwiderstände können sich dabei zusammensetzen aus:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Ausdrehwiderstand mit Rückstellwirkung z.B. durch Auslenken der Sekundärfedern insbesondere in ihrer Längsrichtung b) Ausdrehwiderstand ohne Rückstellwirkung z.B. Schlingerdämpfer oder Reibung aus seitlichen Gleitstücken <p>Die Verwendung von (Wälzlager-)Drehkränzen ohne Einsatz von Schlingerdämpfern stellt demnach einen sensiblen Fall dar, der nahezu keinen Ausdrehwiderstand aufweist.</p>

zu Zeile Spalte in Tabelle 2	Beschreibung zum jeweiligen Effekt in Tabelle 2
3 8	<p>Grosse Massenträgheitsmoment der Drehgestelle um ihre Hochachse begünstigen das Auftreten von Drehgestellschlingern.</p> <p>Die Massenverteilung des Fahrzeugs in Kombination mit der (punkt- oder achssymmetrischen) Anordnung von Dämpfern und Lenkern kann einen wesentlichen Einfluss auf das Auftreten von niederfrequenten Wagenkastenschwingungen zeigen.</p> <p>Die Wende-Eigenfrequenz (um die Hochachse) des Wagenkastens (in seinen Beladezuständen) gegenüber den Drehgestellen kann entscheidenden Einfluss auf das Störverhalten des Fahrzeugs im geraden Gleis oder grossen Bögen haben.</p>
3 9	<p>Eine hohe Fahrgeschwindigkeit ist sensitiv in Bezug auf die Fahrstabilität sowie das Störverhalten des Fahrzeugs z.B. beim Passieren von geometrischen Gleislagefehlern.</p> <p>Bei den hier gegenständlichen Meterspuranwendungen können z.B. bedingt durch einen niedrigen Ausdrehwiderstand oder grosse Massenträgheitsmomente der Drehgestelle infolge kombinierter Zahnradanwendung bereits Fahrgeschwindigkeiten von 100 km/h sehr anspruchsvoll sein.</p> <p>Weiterhin werden bei Meterspuranwendungen gegenüber Normalspuranwendungen durch die Unterschiede in der Stützweite und der Raddurchmesser bei gleicher Konizität höhere Frequenzen wirksam. So ergibt sich aus der KLINGEL-Formel (Gleichung 8.14 in [46]) für typische Meterspurbedingungen (Stützweite $2b_A = 1'050$ mm, Raddurchmesser 660 mm) bei einer Fahrgeschwindigkeit von 115 km/h die gleiche Frequenz des «Sinuslaufs», wie sie bei gleicher Konizität bei typischen Normalspuranwendungen (Stützweite $2b_A = 1'500$ mm, Raddurchmesser 920 mm) erst bei 160 km/h auftritt.</p>
3 10	<p>Gerades Gleis bzw. sehr grosse Bogenradien begünstigen ein Aufschwingen der Fahrzeuge.</p>
3 11	<p>Unterschiedliche lauftechnisch relevante Steifigkeiten und Dämpfungen unterhalb der Schiene (Gleisbettungseigenschaften, weich bis hart, siehe z.B. Abschnitt 7.6.2 in [9]) können sich unterschiedlich auf die Fahrstabilität und das Störverhalten auswirken.</p>
3 12	<p>Ausgeprägte Gleislagefehler können das Störverhalten des Fahrzeugs provozieren. Demgegenüber begünstigt eine ideale Gleislage das Aufklingen von Grenzzykelbewegungen (Instabilität).</p>

zu Zeile Spalte in Tabelle 2	Beschreibung zum jeweiligen Effekt in Tabelle 2
	<p>Zum Aufklettern von Rädern infolge von Radentlastung durch Gleisverwindung</p> <p>5 4 Fahrzeugseitig geringe («flache») Spurkranzstirnflankenwinkel oder gleisseitig geringe Fahrflankenwinkel der Schienen begünstigen ein Aufklettern der Räder bzw. reduzieren das übertragbare Verhältnis Y/Q entsprechend der Formel von Nadal [14].</p> <p>5 5 Hohe Reibwerte bzw. trockene Rad/Schiene-Bedingungen begünstigen ein Aufklettern der Räder: Höhere Reibwerte auf der Lauffläche erhöhen dabei die zwischen Rad und Schiene wirksamen Reibkräfte, was über den Reibmomentenhaushalt der Radsätze eines Drehgestells potenziell die Radführungskraft Y erhöht. Höhere Reibwerte an der Spurkranzflanke reduzieren das übertragbare Verhältnis Y/Q entsprechend der Formel von Nadal [14].</p> <p>5 6 Die Verwendung von Einzelrädern oder konventionellen Radsätzen mit Radsatzwelle kann sich über die unterschiedliche Ausbildung von Längs- und Querkraftschlusskräften anteilig auf die wirksame Radführungskraft Y und damit auf den Entgleisungsquotienten Y/Q auswirken. Dies ist in der konkreten Ausführung zu berücksichtigen, bedeutet aber keinen generellen Vor- oder Nachteil.</p> <p>5 7 Grosse quasistatische und/oder dynamische Ausdrehwiderstände der Drehgestelle verursachen eine grössere Radführungskraft Y und begünstigen damit ein Aufklettern. Der Ausdrehwiderstand kann dabei einerseits aus dissipativen Anteilen (z.B. Reibung über seitliche Gleitstücke oder viskose Dämpfung von Schlingerdämpfern) bestehen, die keine Rückstellwirkung ausüben und nur während der Ausdrehbewegung entsprechende Rad/Schiene-Kräfte erfordern. Andererseits bewirkt z.B. das Auslenken von Sekundärfedern einen Ausdrehwiderstand mit Rückstellwirkung, wobei der Ausdrehwiderstand in kleineren Bogenradien zunimmt.</p> <p>5 8 Torsionssteife Fahrzeugkonzepte bewirken im verwundenen Gleis eine grössere Radentlastung als torsionsweiche Fahrzeugkonzepte. Torsionssteife Fahrzeuge begünstigen daher ein Aufklettern im verwundenen Gleis. Dabei kann sich neben der eigentlichen Primär- und Sekundärfederung inklusive Wankstützsystem weiterhin auch die Strukturelastizität bzw. Bauform der Fahrwerkrahmen und Wagenkästen auf die Radentlastung auswirken. Ebenso spielt die gegenseitige Bewegungsmöglichkeit zwischen benachbarten Wagenkästen (wankweich oder wanksteif) von Gliederzügen eine Rolle.</p> <p>Statische Radlastdifferenzen begünstigen ein Aufklettern der entlasteten Räder. Statische Radlastdifferenzen können neben einer exzentrischen Schwerpunktlage weiterhin auch aus Herstelltoleranzen oder ungleichen Setzungen von Gummifedern im Fahrzeug, einseitiger Teilbeladung oder anspruchsvollen Luftfederkonfigurationen (siehe z.B. 3-Punkt- vs. 4-Punkt-Lagerung in EN 14363 [14]) resultieren.</p> <p>Fahrzeugkonzepte mit (tendenziell) radial einstellenden Radsätzen reduzieren den Anlaufwinkel und damit die in Bögen wirksame Radführungskraft Y. Demgegenüber weisen Fahrwerke nach dem Starrachsprinzip tendenziell grössere Radführungskraft Y auf und erreichen entsprechend früher den Grenzwert im Entgleisungsquotient Y/Q.</p> <p>5 9 In der Regel begünstigt eine langsame Fahrgeschwindigkeit das Aufklettern im verwundenen Gleis. Die langsame Fahrt bewirkt im überhöhten Gleis eine Entlastung des bogenaussen führenden Rades. So begrenzt Abschnitt 6.1.5.1.2 der EN 14363 [14] die Prüfgeschwindigkeit auf maximal 10 km/h.</p> <p>5 10 Grundlegende Trassierungselemente beinhalten eine Gleisverwindung und bewirken so eine Radentlastung des passierenden Fahrzeugs:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Die Neigung von Überhöhungsrampen bewirkt über ihre Länge eine Verwindung. 2) Weiterhin bewirkt die Kombination von kleinem Bogenradius mit nennenswerter Längsneigung die in Abschnitt 3.5 beschriebene Helix-Verwindung. 3) Sofern z.B. bei strassenbahnähnlichen Anwendungen Flachrillenschienen befahren werden, kann sich die in Abschnitt 3.9 dargelegte Verwindung im Drehgestell ergeben.

zu Zeile Spalte in Tabelle 2	Beschreibung zum jeweiligen Effekt in Tabelle 2
	Die vorstehenden drei Effekte können auch kombiniert und noch mit Gleislagefehlern überlagert auftreten.
5 11	Den elastischen Eigenschaften der Oberbauelemente (Schiene, Zwischenlage, Schwelle ggf. mit Besohlung, Schotter etc.) ist in ihrem Herstellzustand (Nennzustand) kein nennenswerter Einfluss auf die quasistatische Sicherheit gegen Entgleisen im verwundenen Gleis beizumessen.
5 12	Gleislagefehler können ein Aufklettern begünstigen. Dabei sind neben der geometrischen Gleislage im unbelasteten Zustand weiterhin insbesondere lokale Effekte wie hohl liegende Schwellen (Pumpstelle) (Fehlzustand) zu nennen, die unter der Belastung des Fahrzeugs eine nennenswerte Verwindung im Drehgestell verursachen können. (Dabei ist zu beachten, ob etwaige Messdaten zur Gleislage die Einsenkung unter Last bereits beinhalten oder nicht.)
	Zur Radentlastung infolge periodischer Längshöhenfehler (Cyclic Top)
7 4	Weder die Rad/Schiene-Profilpaarung, noch der Reibwert, noch die Verwendung von Einzelrädern versus Radsätzen oder der Ausdrehwiderstand der Drehgestelle sind bekannt dafür, einen nennenswerten Einfluss auf den Cyclic Top-Effekt zu haben.
7 8	Fahrzeugkonzepte mit ähnlichen Drehzapfenabständen, ähnlichen Eigenfrequenzen und geringer Vertikaldämpfung begünstigen die Ausbreitung und Verstärkung periodischer Längshöhenfehler. Demgegenüber besteht bei Mischverkehr mit diversen unterschiedlichen Fahrzeugen weniger Risiko, dass sich ein lokaler Gleislagefehler zu einem periodischen Gleislagefehler ausbreitet.
7 9	Die Kombination von Fahrgeschwindigkeit, Wellenlänge der periodischen Längshöhenfehler und relevanter Eigenfrequenz (z.B. Tauchen oder Nicken) des passierenden Fahrzeugs ist der anfachende Mechanismus, durch den einerseits die Räder periodisch entlastet werden (Entgleisungsrisiko) und andererseits die Längshöhenfehler in Amplitude und Ausbreitungslänge weiter verstärkt werden.
7 10	Es ist nicht bekannt, dass das Cyclic-Top-Phänomen auf bestimmte Trassierungen beschränkt wäre, siehe z.B. Abschnitt 17.10 in TR 17039 [15].
7 11	Da das Auftreten von Cyclic-Top auf grundlegenden Resonanzen basiert, können die Steifigkeiten und Dämpfungen unterhalb der Schienen (Gleisbettungseigenschaften) je nach konkreten Merkmalen die Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Fahrweg entweder verstärken oder eher vertrimmen und damit abschwächen.
7 12	Die Gleislage ist wesentlicher Bestandteil des Cyclic-Top-Phänomens, bei dem sich beispielsweise ein anfänglicher Einzelfehler im Längshöhenverlauf durch die Wechselwirkung mit dem Fahrzeug einerseits intensiviert und andererseits periodisch ausbreitet (Abschnitt 17.10 in TR 17039 [15]).

zu Zeile Spalte in Tabelle 2	Beschreibung zum jeweiligen Effekt in Tabelle 2
	<p>Zur Fahrsicherheit unter Längszug- oder Längsdruckkräften im Zugverband</p>
8 4	<p>Die Rad/Schiene-Profilpaarung nebst Reibwert, die Ausführung mit Einzelrädern oder Radsätzen sowie der Ausdrehwiderstand der Drehgestelle können die Situation unter Längskräften zwar jeweils verschärfen oder begünstigen, machen aber nicht den dominierenden Effekt aus.</p>
8 8	<p>Im Gegensatz zur Sicherheit gegen Entgleisen im verwundenen Gleis (siehe 5 8), ist in Bezug auf die ertragbaren Längsdruckkräfte ein torsionssteifes Fahrzeug vorteilhaft.</p> <p>Das grundlegende Fahrzeugkonzept (Gliederfahrzeug, Einzelfahrzeug, Überhang etc.) sowie die Kupplungskonfiguration (Seitenpuffer, Mittelpufferkupplung, Kuppelstange, Balancier, Wagenkastengelenk etc.) kann einen entscheidenden Einfluss auf die Fahrsicherheit unter Längskräften ausmachen. So bewirken einige Kupplungskonfigurationen während der Bogenein- und -ausfahrt eine relevante Änderung der effektiven Zuglänge (Ziehharmonika-Effekt), was bereits ohne Anreiben und Bremsen mit Längsdruckkräften verbunden ist. Weiterhin können sich je nach Kupplungskonfiguration unterschiedlich grosse Schwenkwinkel (Stosswinkel) ergeben, die unter Längskraft eine entsprechende Querkraftkomponente auf das Fahrzeug respektive den Rad/Schiene-Kontakt bedeuten.</p> <p>Je nach oben aufgeführter Kupplungskonfiguration ergeben sich durch die Relativbewegung benachbarter Fahrzeuge nennenswerte Querkräfte, wie sie insbesondere durch die Reibung zwischen den Mittelpufferoberflächen hervorgerufen werden können.</p> <p>Je nach Fahrzeugkonzept (Triebwagen un-/gleichmässig verteiltem Antrieb, lokbespannter Wagenzug) treten insbesondere auf Steigungs-/Gefällestrecken ggf. in Kombination mit Anfahr- oder Bremsszenarien unterschiedliche Längskräfte im Zug auf, deren Querkraftanteil bei der Bogenfahrt über den Rad/Schiene-Kontakt sicher abzutragen sind.</p>
8 9	<p>Die Fahrgeschwindigkeit ist eine indirekte Einflussgrösse auf die Fahrsicherheit unter Längsdruckkräften. So vollzieht sich die Änderung der effektiven Zuglänge (Ziehharmonika) je nach Fahrgeschwindigkeit schneller oder langsamer, was entsprechend grössere oder kleinere Längskräfte bedeutet. Weiterhin überlagert sich je nach Fahrgeschwindigkeit die Radlaständerung infolge der unausgeglichene Querbesehleunigung sowie ein dynamischer Ausdrehwiderstand etc.</p>
8 10	<p>Die Horizontaltrassierung beeinflusst in der Wechselwirkung mit dem Fahrzeug einerseits den vorstehend genannten Ziehharmonikaeffekt sowie andererseits die auftretenden Kupplungswinkel. So sind kurze Trassierungselemente mit kleinen Bogenradien und kurzen Zwischengeraden in S- oder C-Bogen-Anordnung in der Regel sensibler als Trassierungen mit langen Übergangsbögen und/oder langen Vollbögen.</p>
8 11	<p>Die Steifigkeiten und Dämpfungen unterhalb der Schiene (Gleisbettung) haben keinen dominanten Einfluss auf die ertragbaren Längsdruckkräfte.</p>
8 12	<p>Gleislagefehler können einen Zusatzeffekt beispielsweise über eine lokale Radentlastung ausmachen.</p>

zu Zeile Spalte in Tabelle 2	Beschreibung zum jeweiligen Effekt in Tabelle 2
	<p>Grosse Radführungskräfte Y infolge von Ausdrehwiderstand und/oder Anlaufwinkel</p> <p>9 4 Die Berührgeometrie der Rad-/Schiene-Profilpaarung beeinflusst die Stellung der Räder im Spurkanal respektive den Anlaufwinkel. Dabei ist eine grosse Rollradiendifferenz hilfreich für ein tendenzielles Einlenken in den Bogen (siehe auch LO 2.4.2 zu Projekt P3).</p> <p>9 5 Ein grosser Rad-/Schiene-Reibwert am Spurkranz begünstigt einerseits das Aufklettern, da die übertragbare Radführungskraft Y bei unveränderter Radaufstandskraft Q entsprechend der Formel von Nadal [14] reduziert wird. Ein grosser Rad-/Schiene-Reibwert ermöglicht aber auch eine grosse Längskraftschlusskraft, die je nach Fahrwerkkonzept tendenziell ein Einlenken in den Bogen und damit eine Reduktion des Anlaufwinkels bewirken kann.</p> <p>9 6 Die Verwendung klassischer Radsätze mit steifer Radsatzwelle ermöglicht bei geeigneter Rad/Schiene-Profilpaarung sowohl den Zentriereffekt in der Geraden (Doppelkonus) als auch ein tendenzielles Einlenken im Bogen respektive Reduktion des Anlaufwinkels. Bei Einzelrädern hingegen entfallen beide vorgenannten Wirkungen prinzipbedingt.</p> <p>9 7 Fahrzeugkonzepte mit starrer Radsatzführung verursachen mit abnehmendem Bogenradius überproportional steigende Anlaufwinkel (siehe auch LO 2.4.2 zu Projekt P3). Für den kaum erreichbaren Fall einer vollradialen Einlenkbewegung träte kein Anlaufwinkel mehr auf und die Radführungskraft Y ergäbe sich allein aus der Zentripetalkraft. Über eine vorteilhafte Profilpaarung (siehe 9 4) hinaus kann eine Radsatzkopplung (z.B. Querkopplung, Kreuzanker, etc.) bei günstiger Profilpaarung den Anlaufwinkel nennenswert reduzieren und für eine gleichmässiger Verteilung der Radführungskräfte Y bzw. Gleisverschiebekräfte ΣY auf die beteiligten Radsätze sorgen.</p> <p>Grosse quasistatische und/oder dynamische Ausdrehwiderstände der Drehgestelle verursachen, je nach Ausführung auch nur kurzzeitig, eine grössere Radführungskraft Y und begünstigen damit ein Aufklettern.</p> <p>Der Ausdrehwiderstand kann dabei einerseits aus dissipativen Anteilen (z.B. Reibung über seitliche Gleitstücke oder viskose Dämpfung von Schlingerdämpfern) bestehen, die keine Rückstellwirkung ausüben und nur während der Ausdrehbewegung entsprechende Rad/Schiene-Kräfte erfordern. Andererseits bewirkt z.B. das Auslenken von Sekundärfedern insbesondere in ihrer Längsrichtung einen Ausdrehwiderstand mit Rückstellwirkung, wobei der Ausdrehwiderstand dann in kleineren Bogenradien zunimmt.</p> <p>Weiterhin bewirkt das Massenträgheitsmoment des Drehgestells einen dynamischen Ausdrehwiderstand. Ein rasches Ein-/Ausdrehen der Fahrwerke z.B. infolge kurzer oder ausbleibender Übergangsbögen erfordert ein Drehmoment, das über die Querkräfte im Rad/Schiene-Kontakt abgetragen werden muss.</p> <p>9 8 Das wirksame Massenträgheitsmoment und damit der dynamische Ausdrehwiderstand hängen vom Fahrwerkkonzept ab. Dabei spielt einerseits die Masse selbst (z.B. Trieb- oder Laufdrehgestell, etc.) sowie andererseits die Verteilung der Masse (z.B. Aussen/Innenlagerung, drehgestell-aussen am Kopfträger oder drehgestellinnen am Querträger angeordnete Bremszangeneinheiten etc.) eine Rolle.</p> <p>Sofern das Fahrwerk wie z.B. bei Multigelenkfahrzeugen von Tram-Anwendungen oder beim Mittelmodul der Fahrzeuge vom Typ STADLER GTW das Wagenkastenmodul unmittelbar mitdrehen muss (z.B. unterste Darstellung in Bild 18 der EN 17343 [22]), erhöht sich das wirksame Massenträgheitsmoment respektive der dynamische Ausdrehwiderstand entsprechend.</p> <p>9 9 Eine grössere Fahrgeschwindigkeit bewirkt je nach Fahrzeugkonzept einen grösseren dynamischen Ausdrehwiderstand, wie er sich z.B. je nach Dämpferkennlinie aus Schlingerdämpfern, Zwischenwagendämpfern und dem Massenträgheitsmoment ergibt. Eine grössere Fahrgeschwindigkeit verursacht hier entsprechend grössere Radführungskräfte Y.</p> <p>(Sofern die vorgenannten Dämpfer z.B. über eine reibähnliche Kennlinie verfügen, deren Kraft bereits bei kleinen Dämpfergeschwindigkeiten ansteigt, bei grösseren Dämpfergeschwindigkeiten aber nicht wesentlich zunimmt (Plateau), verbleibt der Ausdrehwiderstand auch bei grosser Fahrgeschwindigkeit nahezu konstant.)</p>

zu Zeile Spalte in Tabelle 2	Beschreibung zum jeweiligen Effekt in Tabelle 2
9 10	Die horizontale Linienführung hat einen wesentlichen Einfluss. So verursachen kurze Trassierungselemente (Übergangsbögen oder Kreisbögen) mit kleinen Bogenradien über die damit verbundenen grossen Ausdrehbewegungen der Fahrwerke innert kurzer Zeit grössere Radführungs-kräfte Y, als dies bei langen Übergangsbögen oder langen Vollbögen mit grossen Radien der Fall ist.
9 11	Die Steifigkeiten und Dämpfungen unterhalb der Schiene (Gleisbettung) haben keinen dominanten Einfluss auf die Ausdrehbewegung der Drehgestelle oder den Anlaufwinkel.
9 12	Gleislagefehler können einen Zusatzeffekt beispielsweise über eine lokale Radentlastung ausmachen.
	Entstehung grosser Vertikal- und/oder Kraftschlusskräfte
11 4	Je nach Berührgeometrie der Rad-/Schiene-Profilpaarung können sich im konstanten Bogen unterschiedliche Kraftschlusskräfte zwischen Rad und Schiene ausbilden. Am rechten und linken Rad gegensinnig wirkende Längskraftschlusskräfte können je nach Drehgestellkonzept eine Lenkbewegung der Radsätze bewirken und sind von daher vorteilhaft. Eine ausbleibende Lenkbewegung bewirkt über den resultierenden Anlaufwinkel entsprechende Querkraftschlusskräfte. Grundlegend sind Kraftschlusskräfte mit einer Schubbeanspruchung sowie Verschleiss von Rad und Schiene verbunden. Eine übermässige Schubbeanspruchung geht mit Materialschädigung (Rollkontaktermüdung) einher. Rad/Schiene-Verschleiss verursacht Kosten und beeinflusst die Verfügbarkeit der Fahrzeuge negativ, ist aber ungefährlich und kann Risswachstum unterbinden («Verschleissrate grösser als Risswachstum»).
11 5	<p>Ein niedriger Reibwert reduziert die Kraftschlusskräfte sowie die Reibleistung (Verschleiss) im Rad/Schiene-Kontakt und ist von daher vorteilhaft.</p> <p>Zum Antreiben und Bremsen von Adhäsionsbahnen ist jedoch ein Mindest-Reibwert erforderlich. Weiterhin erfordern passiv radial einstellende Radsätze einen gewissen Rad-/Schiene-Reibwert, um radial einstellende Längskraftschlusskräfte aufbauen zu können.</p> <p>Auch ist bekannt, dass eine Spurkranzschmierung neben verschiedenen Vorteilen durch den Reibmomentenhaushalt des Drehgestells auch eine ungünstigere Fahrwerkstellung im Bogen und entsprechend grössere Querkräfte verursachen kann.</p> <p>Weiterhin kann die Kraftschluss/Schlupf-Kennlinie beispielsweise über einen abfallenden Verlauf («instabilen Ast») Einfluss auf die Kraftschlusskräfte nehmen (z.B. Radsatztorsionsschwingungen).</p>
11 6	Die Verwendung klassischer Radsätze mit steifer Radsatzwelle ermöglicht bei geeigneter Rad/Schiene-Profilpaarung sowohl den Zentriereffekt in der Geraden (Doppelkonus) als auch ein tendenzielles Einlenken im Bogen respektive Reduktion des Anlaufwinkels. Bei Einzelrädern hingegen entfallen beide vorgenannten Wirkungen prinzipbedingt.
11 7	Ein grösserer Drehgestell-Ausdrehwiderstand verursacht wie z.B. in 9 7 dargelegt grössere Querkräfte zwischen Rad und Schiene, woraus sich in der Folge auch grössere Kraftschlusskräfte ergeben können. Ein unmittelbarer Zusammenhang zu Vertikal- oder Kraftschlusskräften besteht aber nicht.
11 8	<p>Vom grundlegenden Fahrzeugkonzept hängt einerseits bereits die statische Radaufstandskraft ab (Fahrzeugmasse, Schwerpunktlagen, Anzahl Räder). Andererseits beeinflusst das Fahrzeugkonzept die quasistatisch (Schwerpunkthöhe, Wankpol) und dynamisch (Anzahl und Beschaffenheit der Federstufen, ungefederte Massen, ggf. inkl. Zahnradsystem) wirksamen Vertikalkräfte.</p> <p>Kraftschlusskräfte beim Antreiben von Adhäsionsbahnen hängen neben dem mechanischen Antriebssystem wesentlich von der eingesetzten Regelung ab («zart oder aggressiv»).</p> <p>Weiterhin beeinflusst das Drehgestellkonzept bzw. die Anlenkung der Radsätze über die damit verbundene Stellung im Bogen die auftretenden Kraftschlusskräfte.</p>

zu Zeile Spalte in Tabelle 2	Beschreibung zum jeweiligen Effekt in Tabelle 2
11 9	<p>Die Fahrgeschwindigkeit hat einen nennenswerten Einfluss auf die Vertikalkräfte. Bei der Bogenfahrt ändern sich die Radaufstandskräfte entsprechend der resultierenden unausgeglichenen Querbeschleunigung. Aus der Interaktion mit Gleislagefehlern ergeben sich dynamische Änderungen der Rad-/Schiene-Kräfte. Bei grösseren Radaufstandskräften können sich grössere Kraftschlusskräfte aufbauen, bei kleineren Radaufstandskräften sind entsprechend kleinere Kraftschlusskräfte möglich.</p> <p>Weiterhin erfordert die Änderung der Fahrgeschwindigkeit (Antreiben, Bremsen) entsprechende Kraftschlusskräfte.</p>
11 10	<p>Die Trassierung zeigt dahingehend Einfluss, dass in kleinen Bogenradien tendenziell grössere Kraftschlusskräfte auftreten (jedoch limitiert durch die Reibsättigung) und in Bögen durch das Wankmoment infolge der unausgeglichenen Querbeschleunigung grössere Vertikalkräfte als im geraden Gleis auftreten.</p>
11 11	<p>Die Steifigkeiten und Dämpfungen unterhalb der Schienen (Gleisbettungseigenschaften) können je nach konkreten Merkmalen die Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Fahrweg entweder verstärken oder eher vertrimmen und damit abschwächen.</p>
11 12	<p>Gleislagefehler können je nach Ausprägung nennenswerten Einfluss auf die Vertikal- und Kraftschlusskräfte aufweisen.</p>
<p>Anregung wenig gedämpfter Eigenformen und empfindliches Störverhalten</p>	
12 4	<p>Die Rad/Schiene-Profilpaarung kann durch ungeeignete Konizitäten Eigenformen (Grenzykelbewegung, Drehgestellschlingern, niederfrequente Wagenkastenschwingungen) anregen. Dieser Einfluss ist in 3 4 im Zusammenhang der Fahrstabilität beschrieben.</p>
12 5	<p>Ein grosser Rad-/Schiene-Reibwert begünstigt das Auftreten von Instabilitäten und wirkt sich potenziell negativ auf das Störverhalten des Fahrzeugs aus. Trockene Rad/Schiene-Verhältnisse stellen daher anspruchsvollere Randbedingung dar.</p>
12 6	<p>siehe 3 6</p>
12 7	<p>siehe 3 7</p>
12 8	<p>Einflüsse auf Eigenformen im Sinne Grenzykelbewegungen (Fahrstabilität) sind in 3 8 dargelegt. Einflüsse auf Eigenformen zum Cyclic-Top-Effekt sind in 7 8 dargelegt.</p> <p>Über die vorgenannten Effekte hinaus können durch die Fahrzeug/Fahrweg-Wechselwirkung weitere Eigenformen angefacht werden. So stellt je nach Fahrzeugkonzept beispielsweise das Hochpolwanken (Rollen) eine unter Umständen schwer zu dämpfende Eigenform dar.</p> <p>Weiterhin kann beispielsweise die Wendeeigenfrequenz des Fahrzeugaufbaus gegenüber der Sekundärfederstufe einen wesentlichen Einfluss auf die Störempfindlichkeit ausmachen.</p>
12 9	<p>Die Fahrgeschwindigkeit hat den indirekten Einfluss, dass aus der Kombination z.B. mit Gleislagefehlern genau solche Frequenzen resultieren können, die eine Eigenform des Fahrzeugs anfachen.</p>
12 10	<p>Es besteht kein dominierender Einfluss konkreter Trassierungen auf das Stör- oder Schwingungsverhalten von Fahrzeugen.</p>
12 11	<p>Die Steifigkeiten und Dämpfungen unterhalb der Schienen (Gleisbettungseigenschaften) können je nach konkreten Merkmalen die Wechselwirkung zwischen Fahrzeug und Fahrweg entweder verstärken oder eher vertrimmen und damit abschwächen.</p>
12 12	<p>Regellose Gleislagefehler fordern das Störverhalten von Fahrzeugen heraus. Periodische Gleislagefehler können je nach Kombination mit der Fahrgeschwindigkeit Eigenformen anregen.</p>

Spalte 15 der Tabelle 2 listet übliche Nachweismethoden. Dabei sind in blauer Schrift solche Nachweise gekennzeichnet, die nach der BAV-Richtlinie [3] für Meterspuranwendungen obligatorisch sind.

Spalte 15 der Tabelle 2 verweist weiterhin in einigen Zeilen auf Streckenfahrversuche nach Kapitel 7 der EN 14363 [14]. Die Beurteilungsgrößen können dabei nach Abschnitt 7.5.1 der EN 14363 [14] je nach Voraussetzung entweder am Fahrzeug gemessen, von anderen Messungen abgeleitet oder durch Simulation erzeugt werden. Je nach Fahrzeugmerkmalen können dazu das vereinfachte oder das normale Messverfahren (siehe Abschnitt 2.1) zur Anwendung kommen. Auf die Anwendbarkeit dieser Verfahren auf Meterspuranwendungen wird in Abschnitt 3.11 eingegangen.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	Rubrik	Schutzziel	Effekt	Typische Einflussgrößen auf den Effekt aus Spalte 3									übliche Beurteilungsgrößen		übliche Nachweismethoden (Vollbahnanwendungen) für Meterspuranwendungen obligatorische Anforderungen in blauer Schrift
1				Rad/Schiene-Kontakt	Fahrzeugkonzept			Be-trieb	Infrastruktur			normales Verfahren	vereinfach. Verfahren		
2				Rad/Schiene-Profilpaarung	Rad/Schiene-Reibwert	Radsätze oder Einzelräder	Drehgestell-Ausdrehwiderstand	übergeordnetes Fahrzeugkonzept	Fahrgeschwindigkeit	Trassierung	Gleisbettung			Gleislagefehler	
3	Fahrsicherheit inkl. Fahrstabilität	keine Querverschiebung des Gleises	Grosse Querkräfte										ΣY ΣY_r ms	\ddot{y}_{rms}^+	Streckenversuch in Prüfbereich 1 nach Kap. 7 EN 14363 [14] ab 100 km/h versuchstechnischer Nachweis nach BAV-Richtlinie [3] vorab simulationstechnisch: «Konizitätskarte» bei linearisierbarem System, oder «nichtlineare Methode» im Zeitbereich bei nichtlinearem System (Reibelemente etc.)
4		kein Aufklettern der Räder (Entgleisung)	entweder durch Grenzykelbewegung («Instabilität») oder durch Störverhalten des Fahrzeugs	3 4	3 5	3 6	3 7	3 8	3 9	3 10	3 11	3 12	Y/Q	\ddot{y}_{max}^+ \ddot{y}^* \ddot{z}^*	
5	Fahrsicherheit	kein Aufklettern der Räder (Entgleisung)	Radentlastung durch Gleisverwindung	5 4	5 5	5 6	5 7	5 8	5 9	5 10	5 11	5 12	Y/Q Δz		dynamisch: als Teil der Streckenversuche nach Kap. 7 EN 14363 [14] quasi-statisch: 3 Methoden nach EN 14363 [14], davon für Meterspur Methode 1 und Anhang B beim BAV [3] akzeptiert

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	1	Rubrik	Schutzziel	Effekt	Typische Einflussgrößen auf den Effekt aus Spalte 3								übliche Beurteilungsgrößen		übliche Nachweismethoden (Vollbahnanwendungen) für Meterspuranwendungen obligatorische Anforderungen in blauer Schrift	
					Rad/Schiene-Kontakt		Fahrzeugkonzept			Be-trieb	Infrastruktur			normales Verfahren		vereinfach. Verfahren
					Rad/Schiene-Profilpaarung	Rad/Schiene-Reibwert	Radsätze oder Einzelräder	Drehgestell-Ausdrehwiderstand	übergeordnetes Fahrzeugkonzept	Fahrgeschwindigkeit	Trassierung	Gleisbettung	Gleislagefehler			
6	Fahrsicherheit	kein Aufklettern der Räder (Entgleisung)	Radentlastung durch Interaktion Zahnrad/Zahnstange	siehe [10]								siehe [10]		Benchmark-Berechnung nach BAV-Richtlinie [3], siehe auch [10]		
7			Radentlastung durch periodische Längshöhenfehler (Cyclic Top)	7 4	7 8	7 9	7 10	7 11	7 12	(offen)		Phänomen ist bekannt, aber Nachweis derzeit ein offener Punkt, siehe CEN/TR 17039 [15]				
8			Grosse Querkräfte und/oder Radentlastung durch „Aushebeln“ infolge von Längskräften (Zug- oder Druckkräften) im Zugverband	8 4	8 8	8 9	8 10	8 11	8 12	Y/Q Q Δz	nicht	zu Längsdruckkräften: Vollbahn, klassische Seitenpuffer: Kriterien der EN 15839 [21] (Schiebeversuche oder Befreiung) Vollbahn, Mittelpufferkupplung: Berechnung nach ORE B125/RP5 [25]				

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
	1	Rubrik	Schutzziel	Effekt	Typische Einflussgrössen auf den Effekt aus Spalte 3								übliche Beurteilungsgrössen		übliche Nachweismethoden (Vollbahnanwendungen) für Meterspuranwendungen obligatorische Anforderungen in blauer Schrift	
					Rad/Schiene-Kontakt		Fahrzeugkonzept			Be-trieb	Infrastruktur			normales Verfahren		vereinfach. Verfahren
					Rad/Schiene-Profilpaarung	Rad/Schiene-Reibwert	Radsätze oder Einzelräder	Drehgestell-Ausdrehwiderstand	übergeordnetes Fahrzeugkonzept	Fahrgeschwindigkeit	Trassierung	Gleisbettung	Gleislagefehler			
9		kein Aufklettern der Räder (Entgleisung)	Grosse Querkräfte infolge (dynamischen) Ausdrehwiderstands respektive Anlaufwinkel										Y/Q		als Teil der Streckenversuche nach Kap. 7 EN 14363 [14]	
10	Fahrgewegbeanspruchung	kein schädigender Lasteintrag in den Fahrweg oder Rad		9 4	9 5	9 6	9 7	9 8	9 9	9 10	9 11	9 12	Yqst Yma x Bqst Bma x	nicht	als Teil der Streckenversuche nach Kap. 7 EN 14363 [14]	
11			Grosse Vertikal- und/oder Kraftschlusskräfte	11 4	11 5	11 6	11 7	11 8	11 9	11 10	11 11	11 12	Bqst Bma x Qqst Qm ax Tqst	nicht	als Teil der Streckenversuche nach Kap. 7 EN 14363 [14]	

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	1 Rubrik	Schutzziel	Effekt	Typische Einflussgrößen auf den Effekt aus Spalte 3									übliche Beurteilungsgrößen		übliche Nachweismethoden (Vollbahnanwendungen) für Meterspuranwendungen obligatorische Anforderungen in blauer Schrift
				Rad/Schiene-Kontakt		Fahrzeugkonzept			Be-trieb	Infrastruktur			normales Verfahren	vereinfach. Verfahren	
				Rad/Schiene-Profilpaarung	Rad/Schiene-Reibwert	Radsätze oder Einzelräder	Drehgestell-Ausdrehwiderstand	übergeordnetes Fahrzeugkonzept	Fahrgeschwindigkeit	Trassierung	Gleisbettung	Gleislagefehler			
12	Schwingungsverhalten	keine ausgeprägten Resonanzen, keine übermässige Beanspruchung des Fahrzeugs nebst Einbauten	Anregung (wenig gedämpfter) Eigenformen bzw. empfindliches Störverhalten des Fahrzeugs	12 4	12 5	12 6	12 7	12 8	12 9	12 10	12 11	12 12	ÿ* z*		als Teil der Streckenversuche nach Kap. 7 EN 14363 [14]

Tabelle 2: Übersicht der Schutzziele, typischer Einflussgrößen, gängiger Beurteilungsgrößen und (im Vollbahnbereich) üblicher Nachweismethoden zum Fahrverhalten

2.4 Lauftechnisches Standardprozedere und lauftechnisches Nachweiskonzept

Für Meterspuranwendungen ist die Etablierung eines Standardprozederes für die Beschaffung oder Umbauten von Fahrzeugen vorgesehen. In Bezug auf lauftechnische Aspekte wird dies im LO 6.1.2 des Projekts P3 ausgearbeitet und umfasst sowohl sicherheitsrelevante Merkmale als auch Komfort und wirtschaftliche Aspekte.

Mit der Angebotslegung sind dabei (vorläufige) Auslegungsrechnungen zu lauftechnischen Aspekten vorgesehen, um vor der Auftragsvergabe eine Beurteilung der Machbarkeit und eine Entscheidungsgrundlage für die Wahl des Produktes bzw. von Ausstattungsmerkmalen (z.B. radiale Einstellbarkeit) zu erhalten.

In Bezug auf die gegenseitige Planungssicherheit sowie eine effiziente System-Beherrschung wird vorgeschlagen, dass ein Fahrzeuglieferant künftig in der Pflichtenheftphase neu zu erstellender oder wesentlich umzubauender Fahrzeuge ein lauftechnisches Nachweiskonzept erarbeitet. Das lauftechnische Nachweiskonzept versteht sich dabei als Teil des ohnehin obligatorischen Zulassungskonzepts entsprechend Abschnitt 5.6 der BAV-Richtlinie [2]. Das lauftechnische Nachweiskonzept wird mit der bestellenden Bahn bzw. dem Auftraggeber inhaltlich abgestimmt und anschliessend gemeinsam verabschiedet. Die Ergebnisse können dann aufgrund der Fahrzeugauslegung auch bei Änderungen nach dem Vorgehen der RTE 49100 [8] genutzt werden.

Das lauftechnische Nachweiskonzept enthält zu diesem frühen Projektzeitpunkt noch nicht die eigentlichen Nachweise, sondern legt begründet dar,

- auf welcher Grundlage (Gesetze, Normen etc.)
- für welche lauftechnischen Aspekte (Fahrsicherheit, Fahrkomfort etc.)
- nach welchen Methoden (Berechnung, Messung etc.) und
- in welchem Umfang (Beladungszustände, Ausfallzustände etc.)

Nachweise zur Lauftechnik erfolgen werden (analog Abschnitt 5.6 der BAV-Richtlinie [2]).

In Bezug auf die zeitliche Abfolge in den Projektphasen des Neufahrzeugs sind insbesondere folgende Aspekte für das lauftechnische Nachweiskonzept vorgesehen:

- a) Durchführen und Darlegen von Auslegungsrechnungen zur grundlegenden Fahrzeugbemessung in der Angebots-, Konzept- bzw. frühen Engineering-Phase
- b) Nachführen und Übermitteln der Dokumentation lauftechnisch relevanter Fahrzeugeigenschaften in einer Parameterliste
- c) Durchführen und Darlegen von lauftechnischen Nachweisrechnungen (numerisch und/oder analytisch) zu den verschiedenen Lauftechnikaspekten. Dies umfasst über das Einhalten von Grenzwerten hinaus auch, die lauftechnischen Eigenarten des Fahrzeugs (Sensitivitäten, Störverhalten) geeignet darzulegen.
- d) Versuchstechnische Nachweise und Plausibilitätsprüfung eines unter c) genutzten Simulationsmodells

Das lauftechnische Nachweiskonzept mit entsprechenden Erläuterungen ist auch Gegenstand der Lieferobjekte 6.1.2, 6.2.1 und 6.3.1 des hier gegenständlichen Projekts P3.

3 Lauftechnisch relevante Merkmale der Meterspuranwendungen (vs. «Vollbahn»)

Ausgehend von den in Abschnitt 2.3 genannten grundlegenden Schutzziele und Einflüssen werden im hier vorliegenden Kapitel 3 die lauftechnisch relevanten Randbedingungen der RAILplus-Anwendungen zusammengestellt, um daraus anschliessend im Kapitel 4 die entsprechenden Anforderungen und Nachweismethoden zum Fahrverhalten abzuleiten.

3.1 Fahrgeschwindigkeit

Es sind keine bestehenden oder geplanten Meterspuranwendungen mit Fahrgeschwindigkeiten von mehr als 120 km/h bekannt. Die Vorgaben zu AB17 AB-EBV [1] beziehen sich auf Geschwindigkeiten bis zu $V_{zul} = 120$ km/h.

R RTE 22570 [6] staffelt die Fahrgeschwindigkeiten für den Einbau und den Unterhalt von Gleisen in die folgenden drei Gruppen:

- a) Fahrgeschwindigkeit $V \leq 40$ km/h
- b) $40 < V \leq 80$ km/h
- c) $80 < V \leq 120$ km/h

Die örtlich zulässige Fahrgeschwindigkeit hängt gemäss AB-EBV [1] insbesondere

- von der Art des Gleises (Zugleis, Rangier- und Aufstellgleis, Anschlussgleis etc.),
- vom Bogenradius nebst Überhöhung,
- von der Längsneigung (berg- und talwärts, nach 7 AB76.1.a AB-EBV [1])
- sowie vom Zahnstangengleis (max. 40 km/h nach 2.2 AB17 AB-EBV [1]) vs. Adhäsionsbetrieb ab.

3.2 Überhöhung

Abschnitt 5.4.1 der R RTE 22546 [5] gibt die planerische Regelüberhöhung mit 55 % der ausgeglichenen Überhöhung an.

In Bezug auf das hier gegenständliche Abprüfen der lauftechnischen Eignung von Fahrzeugen sind anstelle des planerischen Regelwerts die im Extremfall anzutreffenden Verhältnisse ausschlaggebend. So sind in Ziffer 3.4.1 AB17 AB-EBV [1] sowie Kapitel 5 der R RTE 22546 [5] folgende Grenzwerte zur Überhöhung definiert:

- a) im Kreisbogen ohne Zwangspunkte $\ddot{u} \leq 105$ mm
- b) bei Rollbock- oder Rollschemelbetrieb $\ddot{u} \leq 90$ mm
- c) in Zahnstangengleisen $\ddot{u} \leq 35$ mm

Bei Gleisabschnitten mit Zwangspunkten oder Perronkanten gelten davon abweichende kleinere Grenzwerte.

Die kleinste auszuführende Überhöhung beträgt nach Abschnitt 5.5.1 der R RTE 22546 [5] $\ddot{u} = 10$ mm.

Gemäss Ziffer 3.4.2.1 der AB-EBV [1] zu Artikel 17 ist insbesondere bei Bogenradien $R_B < 100$ m bei der Wahl der Überhöhung die Entgleisungssicherheit zu beachten. Dazu ergehen keine konkreten Vorgaben. Diese Anforderung kann je Bahn individuell umgesetzt werden.

Von Schweizer Strassenbahnanwendungen (Tram) in Meterspur sind radienabhängige Staffelungen der zulässigen Überhöhung bekannt, die beispielsweise ähnlich wie folgt definiert sein können:

$R_B > 140$ m	mit $\ddot{u}_{max} = 105$ mm
$90 < R_B \leq 140$ m	mit $\ddot{u}_{max} = 80$ mm
$50 < R_B \leq 90$ m	mit $\ddot{u}_{max} = 60$ mm

Tabelle 3: Beispiel einer radienabhängigen Staffelung der zulässigen Überhöhung \ddot{u} einer Tram-Anwendung

Dem hier gegenständlichen Projektteam P3 sind keine entsprechenden Vorgaben für Meterspuranwendungen bekannt. Vielmehr ergibt sich die Überhöhung bei kleinen Bogenradien trassierungstechnisch aus den umliegenden Randbedingungen wie der Entwurfsgeschwindigkeit, den baulich verfügbaren Längen für Überhöhungsrampen bzw. Übergangsbögen etc.

Die Kenntnis der radienabhängigen Überhöhung ist mindestens für die Definition zutreffender Randbedingungen bei lauftechnischen Simulationsrechnungen (siehe Abschnitt 4.3) relevant.

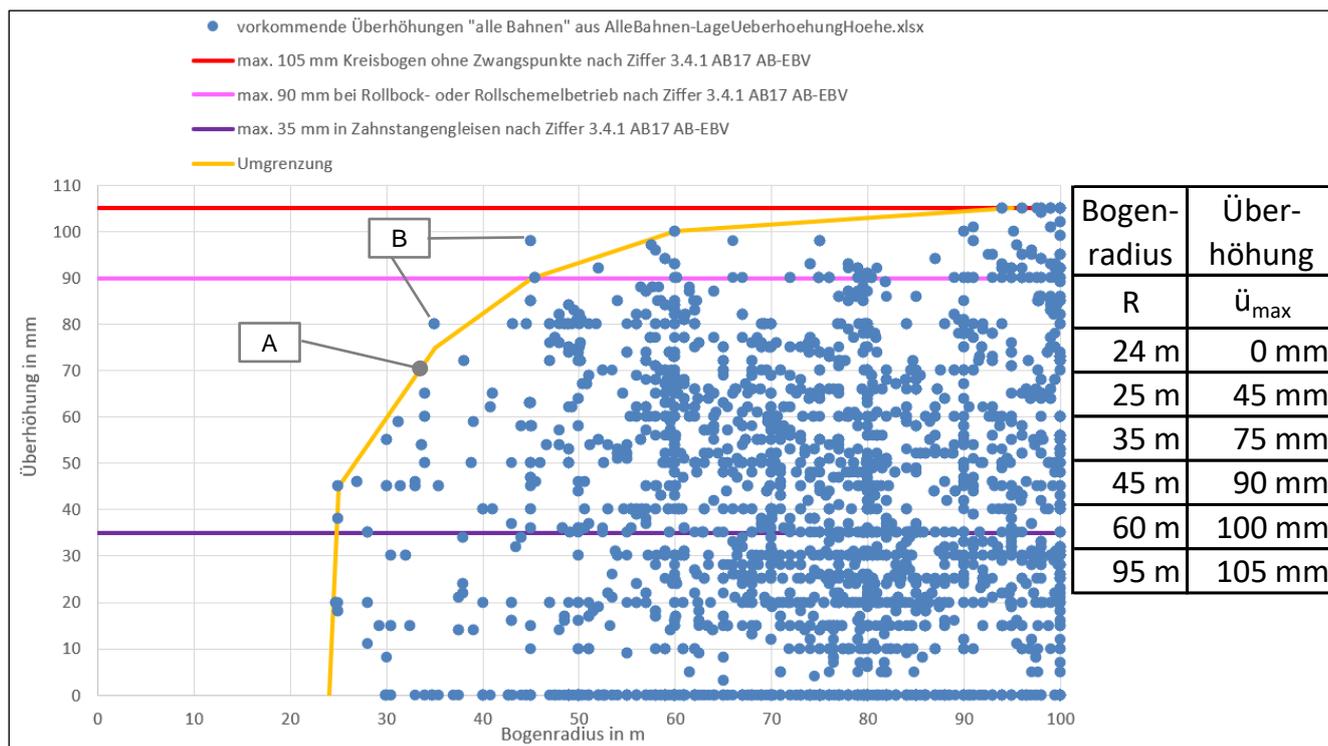


Abbildung 1: Überhöhung \ddot{u} in Abhängigkeit vom Bogenradius (auf Basis der Daten in «AlleBahnen-LageUeberhoehungHoehe.xlsx» per März 2024)

Die blau dargestellten Datenpunkte in Abbildung 1 zeigen eine Auswertung von Überhöhungen \ddot{u} in Abhängigkeit vom Bogenradius R_B . Diese Auswertung umfasst ca. 45'000 Trassierungselemente (inkl. geradem Gleis und grossen Bogenradien) und beinhaltet 55 Strecken (Linie ID) von 18 Bahnen. Diese Angaben beziehen sich auf planerische Daten und nicht auf Messdaten. Die blau dargestellten Datenpunkte in Abbildung 1 zeigen, dass insbesondere bei Bogenradien unterhalb von 60 m abweichend von der theoretisch zulässigen Überhöhung von $\ddot{u}_{max} = 105$ mm durchwegs kleinere Überhöhungen ausgeführt werden. Der in Abbildung 1 mit A gekennzeichnete gelbe Verlauf zeigt eine Umgrenzung des Grossteils der auftretenden Datenpunkte. Die Wertetabelle im rechten Teil der Abbildung 1 listet synchron zur gelb dargestellten Umgrenzung die maximal vorkommende Überhöhung je Bogenradius. Zwischenwerte können wie im gelben Verlauf in Abbildung 1 ersichtlich linear interpoliert werden.

Die beiden in Abbildung 1 mit B gekennzeichneten Datenpunkte liegen als Ausreisser ausserhalb der gelb dargestellten Umgrenzungslinie. Die mit B markierten Datenpunkte beziehen sich mit $R_B = 35$ m und $\ddot{u} = 80$ mm sowie $R_B = 45$ m und $\ddot{u} = 98$ mm jeweils auf die Linie Nr. 656 der Aargauer Verkehr AG (AVA). Derartige Einzelfälle können im jeweiligen Nachweiskonzept (siehe Abschnitt 2.4) individuell abgedeckt werden.

Abschnitt 11.2.2.1 der D RTE 22540 [4] sieht als Einbaukontrolle zur definitiven Streckenfreigabe von Adhäsionsgleisen eine maximale Toleranz der ausgeführten Überhöhung von ± 3 mm vor.

Abschnitt 11.3.4.2 der D RTE 22540 [4] sieht einen Platzhalter für die Definition von Soforteingriffsschwellen (SES) vor, in dem unter anderem auch die Überhöhung sowie die Verwindung gelistet sind. Konkrete Werte liegen hier mit dem Verweis «Werte pendent» noch nicht vor.

In Bezug auf diesen noch zu definierenden Grenzwert der Überhöhung besteht die Frage, wie stark die Setzung der bogenäusseren Schiene infolge der Wanklast aus der unausgeglichene Querbeschleunigung ausfällt. Mit einer Setzung der bogenäusseren Schiene reduziert sich die tatsächliche Überhöhung, so dass sich die unausgeglichene Querbeschleunigung bei unveränderter Fahrgeschwindigkeit entsprechend erhöht. In der Konsequenz nimmt die Wanklast und damit die Belastung auf die gesetzte bogenäussere Schiene weiter zu.

Die Überhöhung ist bei den hier gegenständlichen Meterspuranwendungen um die Gleismittelachse durch Anheben der bogenäusseren Schiene und gleichzeitiges Absenken der bogeninneren Schiene aufzubringen, wie es übereinstimmend in AB-EBV [1], Abschnitt 6.1 der R RTE 22546 [5] sowie Abschnitt 3.2.4 der D RTE 22540 [4] festgelegt ist. Im Unterschied dazu ist es bei anderen Eisenbahnanwendungen auch üblich, die Überhöhung durch Anheben der äusseren Schiene, um die bogeninnere Schiene aufzubringen.

3.3 Überhöhungsrampe

Nach Abschnitt 4 der AB-EBV [1] zu Artikel 17 sind Überhöhungsrampen im Regelfall synchron zum horizontalen Übergangsbogen in gleicher Länge anzuordnen. Entsprechend baut sich auch die Querbeschleunigung a_q synchron zum Übergangsbogen auf. Für den Fall längerer Überhöhungsrampen als Übergangsbögen (z.B. Klothoiden) ergeben sich zu Beginn und Ende des Bogens jeweils erhöhte Querbeschleunigungen a_q , bis die Überhöhung ihren vollen Wert erreicht hat, siehe z.B. Abbildungen 2-6 und 2-7 in SBB [23]. Diese Trassierung wird wegen ihrer Ausprägung der Querbeschleunigung a_q im Wegsignal «Katzenohren» genannt. Gemäss Abschnitt 6.6.3.2 in CEN/TS 17843 [16] führen Katzenohrtrassierungen im Vollbahnbereich nicht zu wesentlich anderen Höchstwerten von Beurteilungsgrößen.

Im Bestand von Meterspuranwendungen findet sich gemäss Projektteam P3 kein nennenswerter Anteil an «Katzenohr»-Trassierungen, so dass ungleiche Längen von Übergangsbögen und Überhöhungsrampen hier nicht zu berücksichtigen sind.

Die grösste planerische Neigung von Überhöhungsrampen (Rampenverwindung) in Zuggleisen von Meterspuranwendungen im Adhäsionsbetrieb beträgt nach Ziffer 4.2 AB17 AB-EBV [1] 2.5 ‰ sowie 3 ‰ als maximaler Grenzwert.

Nach Ziffer 4.2 AB17 AB-EBV [1] ist im Betriebszustand (unter Verschleiss und Setzung etc.) über eine Basislänge von 6 m (Differenz der Überhöhungen im Abstand von 6 m) eine grösste Verwindung von 3.5 ‰ bei einer Geschwindigkeit $V \leq 80$ km/h einzuhalten, sowie maximal 3 ‰ bei $V \leq 120$ km/h.

Abschnitt 11.2.2.1 der D RTE 22540 [4] sieht als Einbaukontrolle zur definitiven Streckenfreigabe von Adhäsionsgleisen über eine Basislänge von 3 m einen Maximalwert von 3 ‰ bei $V \leq 40$ km/h, 2.5 ‰ bei $V \leq 80$ km/h und 2 ‰ bei $V \leq 100$ km/h vor.

Abschnitt 11.3.4.2 der D RTE 22540 [4] sieht unter anderem zur Verwindung einen Platzhalter für die Definition von Soforteingriffsschwellen (SES) vor, zu dem aber noch keine Werte festgeschrieben sind.

Die Änderungsrate der Überhöhung (Hubgeschwindigkeit) ist nach Ziffer 4.2 AB17 AB-EBV [1] auf maximal $d\ddot{u}/dt = 40$ mm/s begrenzt und darf in Ausnahmefällen bis zu $d\ddot{u}/dt = 50$ mm/s betragen.

Der Planungsgrenzwert der Hubgeschwindigkeit beträgt nach Abschnitt 6.3.2 der R RTE 22546 [5] $d\ddot{u}/dt = 35 \text{ mm/s}$ bei $V < 50 \text{ km/h}$ sowie sonst $d\ddot{u}/dt = 32 \text{ mm/s}$.

3.4 Bogenradien und Überhöhungsfehlbetrag (Prüfbereiche)

Es ist üblich und bewährt, das Zusammenwirken von Bogenradius und Überhöhungsfehlbetrag (respektive unausgeglichener Querbeschleunigung a_q) zum Abprüfen des Fahrverhalten nach verschiedenen Merkmalen in unterschiedliche Prüfbereiche zu gruppieren.

So sind in EN 14363 [14] und CEN/TS 17843 [16] verschiedene Prüfbereich für Normalspuranwendungen definiert. Um für die hier gegenständlichen Meterspuranwendungen geeignete Prüfbereiche zu definieren, werden in den folgenden Abschnitten 3.4.1 bis 3.4.4 zunächst die erforderlichen Eingangsdaten zusammengetragen, um dann in Abschnitt 3.4.5 spezifische Prüfbereiche für Meterspuranwendungen vorzuschlagen.

3.4.1 Überhöhungsfehlbetrag bzw. unausgeglichene Querbeschleunigung a_q

Der Grenzwert des Überhöhungsfehlbetrags in Meterspur-Zuggleisen ohne Zwangspunkten beträgt nach 3.6.2 AB17 AB-EBV [1] im Normalfall $\ddot{u}_f = 86 \text{ mm}$ (entsprechend 0.8 m/s^2), der maximale Grenzwert $\ddot{u}_f = 107 \text{ mm}$ (entsprechend 1.0 m/s^2).

Es ist dem gegenständlichen Projektteam P3 nicht bekannt, dass Meterspuranwendungen den zulässigen Überhöhungsfehlbetrag in Abhängigkeit vom Bogenradius reduzieren.

Der Überhöhungsfehlbetrag hängt dabei, wie die Überhöhung, von der Stützweite des jeweiligen Bahnsystems ab, während die Angabe der freien Seitenbeschleunigung eine von der Stützweite unabhängige Grösse ist. Tabelle 4 gibt die Umrechnung von Normalspur- und Meterspuranwendung für exemplarische unausgeglichene Querbeschleunigungen a_q an. So berücksichtigt Zeile 5 der Tabelle 4 den oben genannten maximalen Überhöhungsfehlbetrag sowie Zeile 8 den maximalen Grenzwert. Die Gleichung zur Berechnung des jeweiligen Überhöhungsfehlbetrags ist in Zeile 2 der Tabelle 4 angegeben. Spalte 4 macht deutlich, dass die Überhöhungsfehlbeträge beider Bahnsysteme sich jeweils im Verhältnis der Stützweiten von $1\ 050 / 1\ 500 = 70\ %$ unterscheiden.

	1	2	3	4
		Normalspur	Meterspur	
1	Stützweite	1'500 mm	1'050 mm 3.6.1 AB-EBV zu Artikel 17	
	freie Seitenbeschleunigung	Überhöhungsfehlbetrag	Überhöhungsfehlbetrag	Verhältnis \ddot{u}_f
	a_q	\ddot{u}_{f1435}	\ddot{u}_{f1000}	$\ddot{u}_{f1000} / \ddot{u}_{f1435}$
2		= $a_q \cdot \text{Stützweite} / g$	= $a_q \cdot \text{Stützweite} / g$	
3	0.50 m/s^2	76 mm	54 mm	70%
4	0.65 m/s^2	99 mm	70 mm	70%
5	0.80 m/s^2	122 mm	86 mm	70%
6	0.85 m/s^2	130 mm	91 mm	70%
7	0.98 m/s^2	150 mm	105 mm	70%
8	1.00 m/s^2	153 mm	107 mm	70%

Tabelle 4: Exemplarische Überhöhungsfehlbeträge in Normal- und Meterspur sowie zugehörige unausgeglichener Querbeschleunigung a_q

Abbildung 2 legt dar, dass die unausgeglichene Querbeschleunigung a_q bei konstanter Fahrgeschwindigkeit in kleineren Bogenradien überproportional zunimmt. Dazu zeigt Abbildung 2 die unausgeglichene Querbeschleunigung a_q für fünf exemplarische Fahrgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Bogenradius im nicht-überhöhten Bogen.

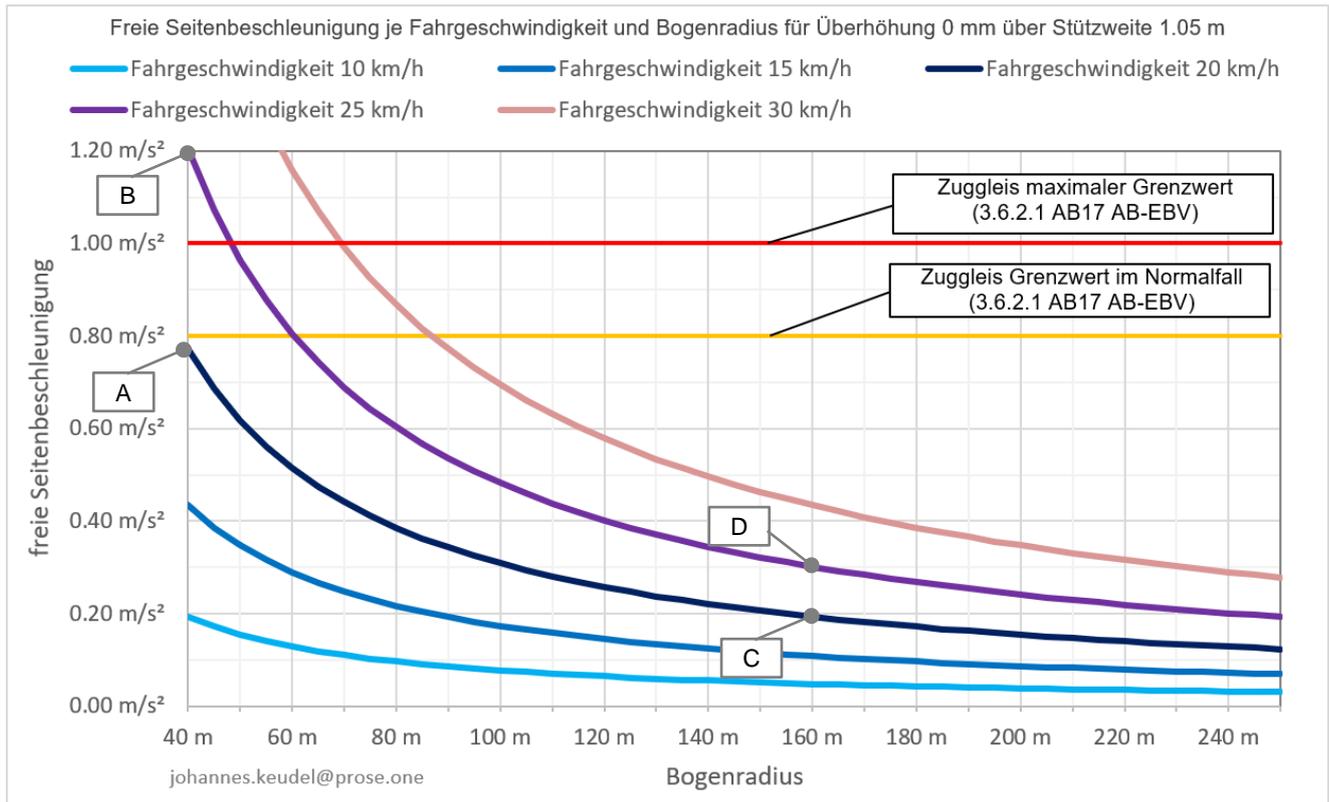


Abbildung 2: Unausgeglichene Querbeschleunigung a_q in Abhängigkeit vom Bogenradius im nicht-überhöhten Bogen für fünf exemplarische Fahrgeschwindigkeiten

Wie Abbildung 2 verdeutlicht, bedeutet eine vermeintlich niedrige Geschwindigkeitserhöhung um 5 km/h bei kleineren Bogenradien bereits einen erheblichen Zuwachs an unausgeglichener Querbeschleunigung a_q . So ändert beispielsweise im Bogenradius $R = 40$ m die unausgeglichene Querbeschleunigung von $a_q = 0.8$ m/s² bei 20 km/h (Punkt A in Abbildung 2) zu unzulässig grossen $a_q = 1.2$ m/s² bei 25 km/h (Punkt B in Abbildung 2). Demgegenüber entsteht bei einer Geschwindigkeitserhöhung um 5 km/h bei grösseren Bogenradien ein wesentlich kleinerer Zuwachs an unausgeglichener Querbeschleunigung; z.B. von Punkt C zu D Abbildung 2 im Bogenradius von $R = 160$ m von $a_q = 0.2$ auf $a_q = 0.3$ m/s² beim Wechsel von 20 auf 25 km/h.

3.4.2 Radienbereich von Meterspuranwendungen

Die Infrastrukturen der hier gegenständlichen Meterspuranwendungen weisen in nennenswerter Anzahl und Länge auch Bogenradien auf, die bis hinab zu $R = 75$ m und zum Teil (insbesondere RhB, MOB, TPC) noch kleineren Radien reichen [11].

Je nach Überhang und Kupplungslängen der Fahrzeuge ändert sich bei der Bogenein- und -ausfahrt die wirksame Fahrzeuglänge («Ziehharmonika-Effekt»), was in Abhängigkeit vom Bogenradius Längskräfte im Zug bzw. Gliederfahrzeug bewirkt. Weiterhin treten bei kleineren Bogenradien grössere Stosswinkel der Kupplungen bzw. Kuppelstangen zwischen benachbarten Fahrzeugen oder Gliederfahrzeug-Modulen auf. Die beiden vorgenannten Effekte wirken sich auf den Kräftehaushalt zwischen Rad und Schiene aus.

Mit dem Bogenradius ändert sich bei konventionellen Drehgestellen mit nahezu starrer Radsatzführung der Anlaufwinkel, unter dem die Radsätze gegen die Schiene anlaufen. Abbildung 3 zeigt einen exemplarischen Verlauf des Anlaufwinkels, wie er sich in der Mehrkörpersystem (MKS)-Simulation einer einzeln fahrenden Lok mit der Achsfolge Bo'Bo' in einem 1 200 m langen rechtsgekrümmten Übergangsbogen von Bogenradius $R_B = 1\,000$ m bis $R_B = 40$ m ergibt. Die Simulation erfolgt dabei in Kriechfahrt von 10 km/h, so dass nahezu keine unausgeglichene Querbeschleunigung a_q wirkt. Die gezeigten Ergebnisse sind dahingehend exemplarisch, dass sie sich bei anderen Fahrzeugmerkmalen aber auch

anderen Schienenprofilen, Spurweite und Rad/Schiene-Reibwert entsprechend anders ergeben werden. Der in Abbildung 3 dargestellte Anlaufwinkel der beiden vorlaufenden Radsätze 1 und 3 steigt mit abnehmendem Bogenradius. Abbildung 4 zeigt für denselben Rechenlauf die Radführungskräfte Y , wobei die mittlere Grafikzeile die Signale der linken Räder zum bogenäusseren Schienenstrang gehört. Abbildung 4 zeigt, dass die bogenäusseren und bogeninneren Führungskräfte der vorlaufenden Radsätze 1 und 3 in diesem Beispiel bis hinab zu einem Bogenradius von ca. 250 m ansteigen. Bei der weiteren Reduktion des Bogenradius bis hinab zu 40 m verbleiben die Führungskräfte der vorlaufenden Radsätze nahezu konstant, was eine Ursache im Erreichen der Reibsättigung (Gleiten) zwischen Rad und Schiene hat. Die Führungskräfte der beiden nachlaufenden Radsätze 2 und 4 hingegen nehmen kontinuierlich weiter zu. Abbildung 5 zeigt zum identischen Rechenlauf einerseits den zeitlichen Verlauf der Rad/Schiene-Reibarbeit je Meter (Wear Number T_γ) sowie andererseits zu verschiedenen Bogenradien die Stellung der Radsätze des vorlaufenden Drehgestells im Spurkanal. Die roten Pfeile in Abbildung 5 kennzeichnen die Normalkraft der jeweiligen Berührlage. So zeigt die Markierung A in Abbildung 5 für die Ausgangslage im geraden Gleis bei den gewählten Randbedingungen zwei Berührflächen je Rad. Markierung B in Abbildung 5 gehört zu einem örtlichen Bogenradius von $R_B \sim 300$ m und ist durch einen hinteren Freilauf gekennzeichnet, während der vorlaufende Radsatz erwartungsgemäss bogenaussen (links) anläuft. Bei einem Bogenradius von etwa $R_B = 185$ m an der Markierung C in Abbildung 5 erreicht das Drehgestell die Spiessgangstellung. Das Erreichen der Spiessgangstellung wirkt sich im Verlauf des Anlaufwinkels in Abbildung 3 in einem Knick aus, der dort ebenfalls mit einem C gekennzeichnet ist. Die Markierung D in Abbildung 5 bezieht sich etwa auf einen Bogenradius von $R_B \sim 80$ m. Hier nimmt die Reibarbeit der bogenaussen führenden Räder im gezeigten Beispiel sprunghaft zu, was auf das Ausbilden einer zweiten Berührfläche zurückzuführen ist (Markierung D oben links in Abbildung 5). Analog dazu bildet sich bei einem Bogenradius von etwa $R_B \sim 45$ m ein Sprung in der Reibarbeit bei den bogeninneren im Spiessgang führenden Rädern der nachlaufenden Radsätze aus (siehe Markierung E in Abbildung 5).

Als Ergebnis von Abbildung 3 bis Abbildung 5 ist für den querbeschleunigungsfreien Fall der reinen Spurführung festzuhalten, dass zwar der Anlaufwinkel und damit die Rad/Schiene-Reibung mit abnehmendem Bogenradius immer weiter zunehmen, während die Radführungskräfte Y der bogenaussen führenden Räder nur bis hinab zu einem Grenz-Bogenradius (im gezeigten Beispiel $R_B \sim 250$ m) ansteigen und bei kleineren Bogenradien nahezu konstant verbleiben.

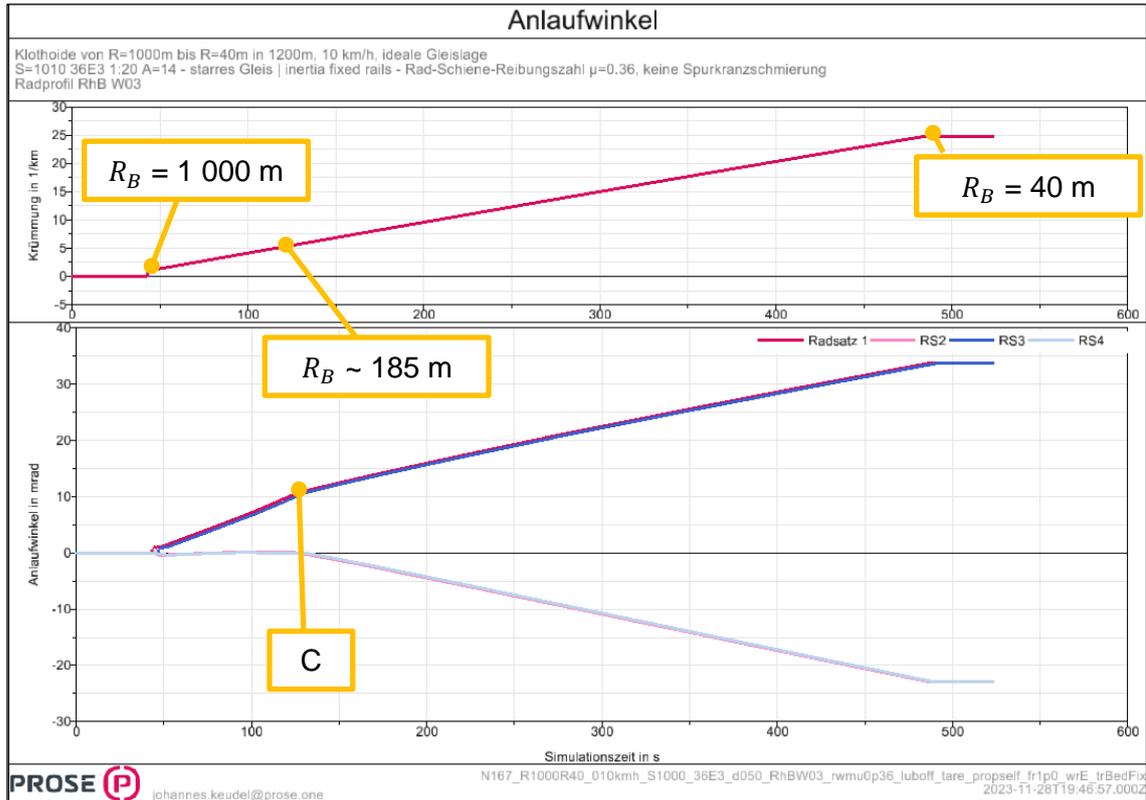


Abbildung 3: Anlaufwinkel aus MKS-Simulation (SIMPACK) einer Bo'Bo'-Lok bei Kriechfahrt mit 10 km/h durch Klothoide mit 1200 m Länge von Bogenradius $R_B = 1000\text{ m}$ bis 40 m

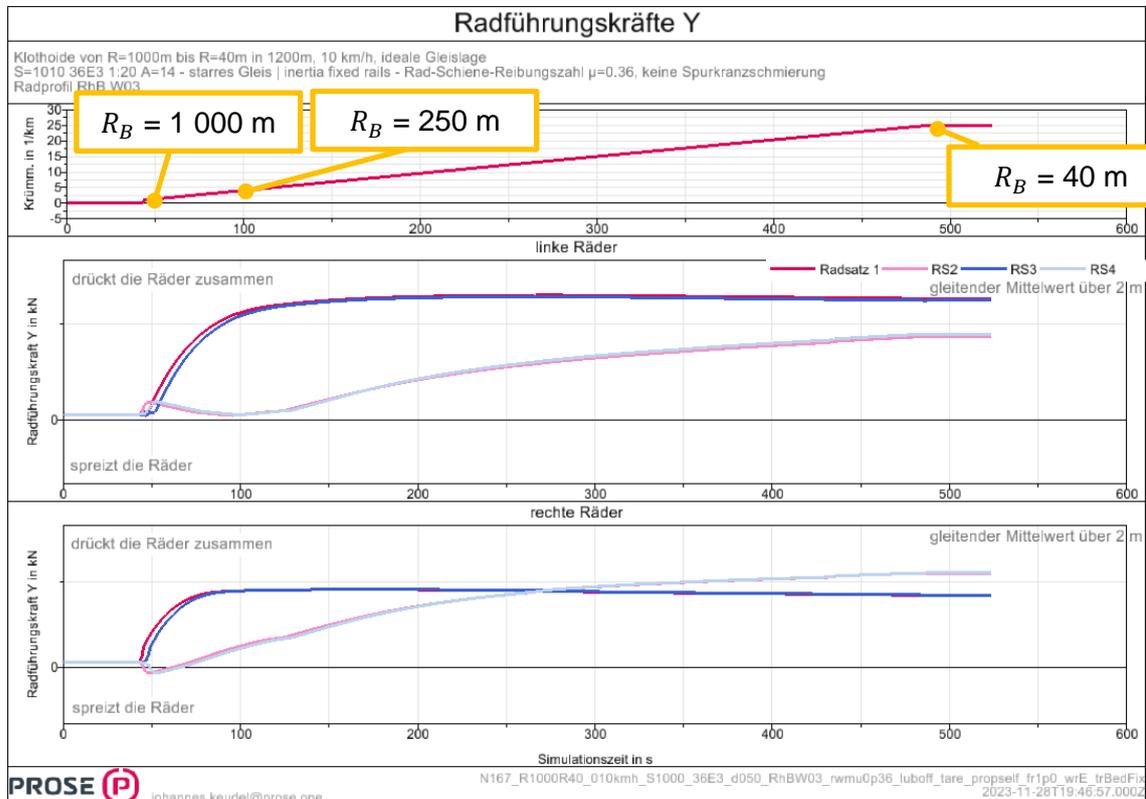


Abbildung 4: Radführungskräfte Y aus MKS-Simulation (SIMPACK) einer Bo'Bo'-Lok bei Kriechfahrt mit 10 km/h durch Klothoide mit 1200 m Länge von Bogenradius $R_B = 1000\text{ m}$ bis 40 m

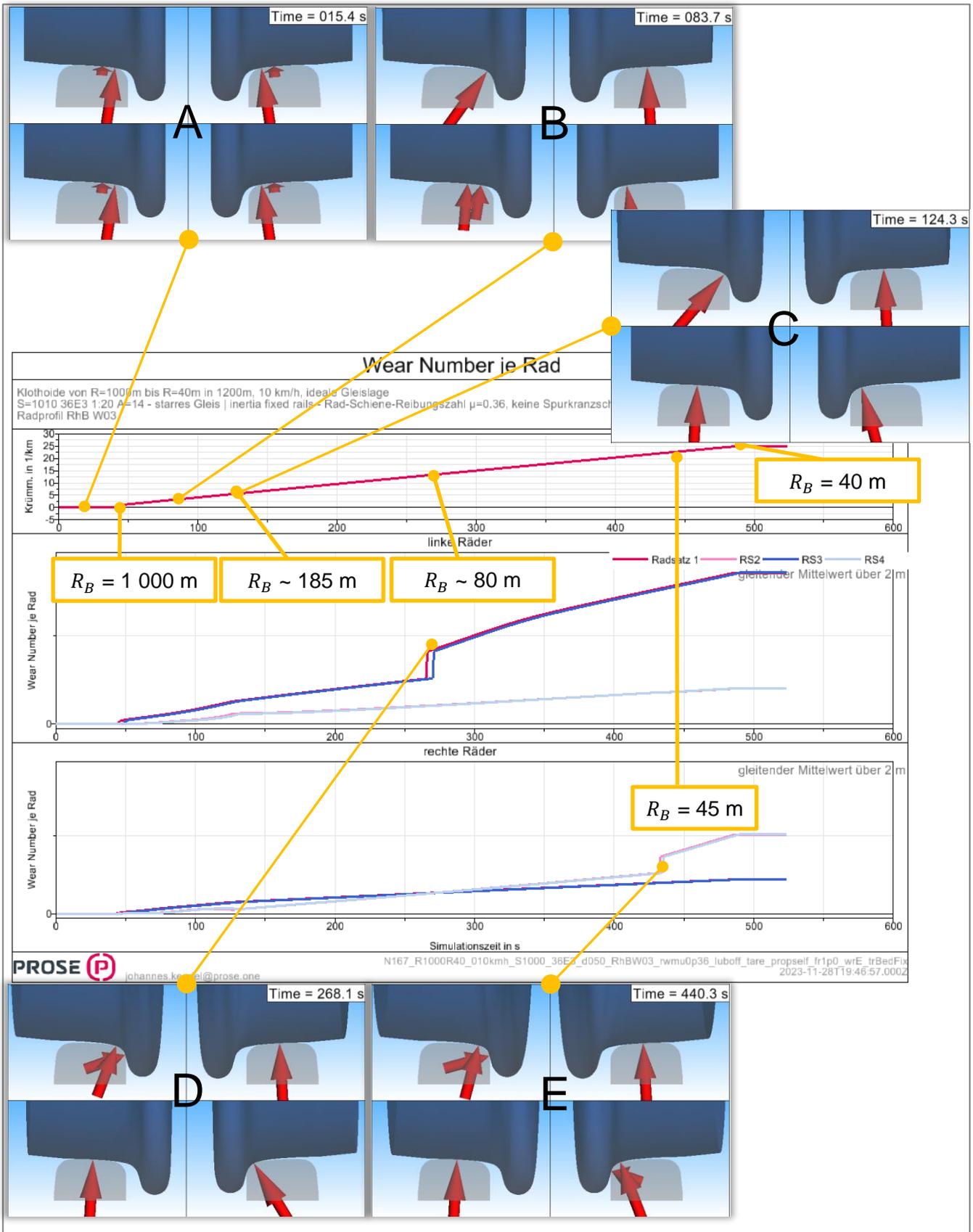


Abbildung 5: Reibarbeit je Rad je Meter aus MKS-Simulation (SIMPACT) einer Bo'Bo'-Lok bei Kriechfahrt mit 10 km/h durch Klothoide mit 1200 m Länge von Bogenradius $R_B = 1000\text{ m}$ bis 40 m

In Abbildung 6 ist der Anlaufwinkel in Abhängigkeit vom Bogenradius für zwei typische Radsatzstände im Drehgestell von $2a^+ = 1.8 \text{ m}$ und $2a^+ = 2.5 \text{ m}$ dargestellt. Dabei zeigt Abbildung 6, dass der Anlaufwinkel bei kleineren Bogenradien überproportional zunimmt. Die Bogenradien von vier Prüfbereichen der Vollbahn in EN 14363 [14] reichen bis hinab zu $R_B = 300 \text{ m}$; mit Toleranzfeld bis $R_B = 250 \text{ m}$, siehe Tabelle 5 des vorliegenden Berichts.

Demgegenüber nimmt der Anlaufwinkel in Abbildung 6 bei den für Meterspuranwendungen relevanten Bogenradien bis hinab zu $R_B = 75 \text{ m}$ bzw. 40 m um ein Mehrfaches zu. So zeigen beispielsweise die Radsatzstellungen in Abbildung 5, dass sich die Rad/Schiene-Bedingungen im verbleibenden Radienbereich von $R_B = 300 \text{ m}$ bis 75 bzw. 40 m gegenüber den grösseren Bogenradien deutlich ändern. Die lauftechnisch abzuprüfenden Bogenradien der Vollbahn nach Tabelle 2 der EN 14363 [14] reichen also für die hier gegenständlichen Meterspuranwendungen nicht aus, so dass nachfolgend in Abschnitt 3.4.5 eine entsprechende Adaption vorgeschlagen wird.

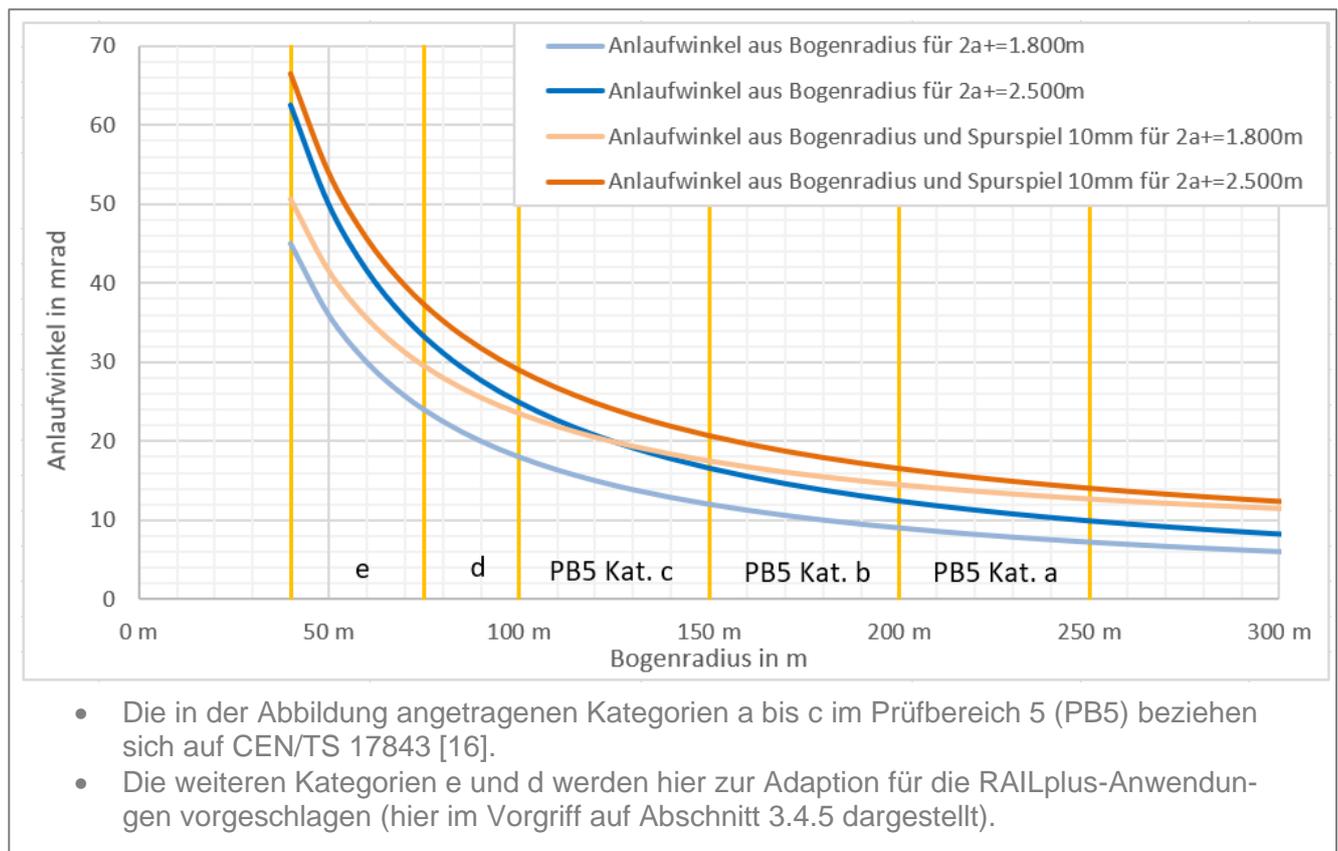


Abbildung 6: Anlaufwinkel in Abhängigkeit vom Bogenradius für zwei übliche Radsatzstände $2a^+$

3.4.3 Radienbereich und Kriterien der Prüfbereiche nach EN 14363 [14]

Tabelle 5 listet die vier Prüfbereiche, wie sie nach Tabelle 2 der EN 14363 [14] für die fahrtechnische Prüfung von Vollbahnanwendungen vorgeschrieben und etabliert sind. Zeile 3 der Tabelle 5 benennt den Prüfzweck des jeweiligen Prüfbereichs, der unabhängig von der Spurweite sowie dem relevanten Bogenradienbereich allgemeingültig formuliert ist und also analog auf die hier gegenständlichen Meterspuranwendungen übertragen werden kann. Die Randbedingungen von Bogenradius, Fahrgeschwindigkeit, Überhöhung und Überhöhungsfehlbetrag hängen physikalisch miteinander zusammen und lassen sich also nicht unabhängig voneinander vorgeben. Entsprechend sind in den Zeilen 4 und 5 der Tabelle 5 Felder grau hinterlegt, in denen sich der Bogenradius bzw. die Fahrgeschwindigkeit aus der Vorgabe der jeweils anderen Parameter ergibt. Entsprechend des in Zeile 3 genannten Zwecks weisen die Zeilen 5 und 6 der Tabelle 5 die nach EN 14363 [14] anzusetzenden Prüfbedingungen zur Versuchsgeschwindigkeit und dem Überhöhungsfehlbetrag aus.

1	Prüfbereich Nr.	1	2	3	4
2	Beschreibung	Gerades Gleis und sehr grosse Bogenradien	Grosse Bogenradien	Kleine Bogenradien	Sehr kleine Bogenradien
3	Zweck	Prüfung im Bereich der zulässigen Geschwindigkeit V_{zul} des Fahrzeugs	Prüfung der Kombination von zulässiger Geschwindigkeit V_{zul} und Überhöhungsfehlbetrag $\ddot{u}f_{zul}$	Prüfung im Bereich des fahrzeugseitig zulässigen Überhöhungsfehlbetrags $\ddot{u}f_{zul}$	
4	Bogenradius	Gerade oder sehr grosser Radius	ergibt sich aus V_{zul} und $\ddot{u}f_{zul}$ sowie der örtlichen Überhöhung	$400 \leq R \leq 600$ m für Vollbahn	$250 \leq R \leq 400$ m für Vollbahn
5	Versuchsgeschwindigkeit	Übergeschwindigkeit +10 km/h bzw. +10%	Übergeschwindigkeit bis zu +10 km/h bzw. +10%	ergibt sich aus Bogenradius, örtlicher Überhöhung und $\ddot{u}f_{zul}$	
6	Überhöhungsfehlbetrag im Versuch	wenig, ≤ 40 mm	70 bis 115% von $\ddot{u}f_{zul}$		

Tabelle 5: Prüfbereiche und zugrundeliegende Prinzipien in redaktioneller Anlehnung an Tabelle 2 der EN 14363 [14] für Vollbahnanwendungen

Abschnitt 7.3.2 der EN 14363 [14] legt dar, dass sich die Bogenradien der Prüfbereiche 2 und 3 insbesondere bei zulässigen Fahrgeschwindigkeiten von $V_{zul} = 100$ bis 120 km/h weitreichend überlappen, so dass eine Auswertung zum Prüfbereich 3 dann nicht notwendig ist. Der vorgenannte Geschwindigkeitsbereich deckt sich mit der in Abschnitt 3.1 genannten grössten zulässigen Fahrgeschwindigkeit von Meterspuranwendungen, so dass der Hinweis aus Abschnitt 7.3.2 der EN 14363 [14] hier zutrifft.

3.4.4 Ergänzender Radienbereich (Prüfbereich 5) nach CEN/TS 17843 [16]

Die technische Spezifikation CEN/TS 17843 [16] erweitert den in Tabelle 5 genannten Radienbereich der EN 14363 [14] um Bogenradien zwischen 100 und 250 m. Dieser Radienbereich wird als Prüfbereich 5 bezeichnet und stellt damit die Fortsetzung der vier Prüfbereiche der EN 14363 [14] dar. CEN/TS 17843 [16] bezieht sich gemäss seines Anwendungsbereichs analog zur EN 14363 [14] auf Vollbahnfahrzeuge und ist also nicht unmittelbar auf die hier gegenständlichen Meterspuranwendungen übertragbar. CEN/TS 17843 [16] teilt den Prüfbereich 5 wie in Tabelle 6 gezeigt in 3 Kategorien ein, die nicht sequenziell aufeinander folgen, sondern jeweils von $R = 250$ m entweder bis hinab zu 200 m (Kategorie a) oder bis zu 150 m (Kategorie b) oder bis zu 100 m (Kategorie c) reichen.

1	Prüfbereich Nr.	5		
2	Kategorie	a	b	c
3	Radienbereich	$200 \text{ m} \leq R < 250 \text{ m}$	$150 \text{ m} \leq R < 250 \text{ m}$	$100 \text{ m} \leq R < 250 \text{ m}$
4	angestrebter zulässiger Überhöhungsfehlbetrag $\ddot{u}f_{zul}$	130 mm (Normalspur) (entspricht 91 mm bei Meterspur, s. Abschnitt 3.4.1)	130 mm (Normalspur) (entspricht 91 mm bei Meterspur)	110 mm (Normalspur) (entspricht 77 mm bei Meterspur)

Tabelle 6: Prüfbereich 5 mit den Kategorien a bis c nach Tabelle 1 der CEN/TS 17843 [16]

3.4.5 Adaption von Prüfbereichen für Meterspuranwendungen

Ausgehend von den relevanten Bogenradien der Meterspuranwendungen gemäss Abschnitt 3.4.2 sowie den bei Vollbahnanwendungen etablierten Prüfbereichen 1 bis 5 gemäss Abschnitten 3.4.3 und 3.4.4 werden die in Tabelle 7 gelisteten Prüfbereiche zum Abprüfen des dynamischen Fahrverhaltens von Meterspuranwendungen vorgeschlagen.

Die Nomenklatur der Prüfbereiche in Spalte 1 der Tabelle 7 orientiert sich dabei in Bezug auf die Praxistauglichkeit bei Lieferanten und Prüfstellen absichtlich an der üblichen Benennung aus EN 14363 [14] sowie CEN/TS 17843 [16].

In Tabelle 7 grau hinterlegte Felder stellen keine führende Grösse dar, sondern ergeben sich wie im jeweiligen Feld deklariert rechnerisch aus jeweils anderen Vorgaben.

	1	2	3	4	5
	Prüf- bereich	Zweck	Bogenradius	Versuchsge- schwindigkeit	Überhöhungsfehlbe- trag im Versuch
1	1	Prüfung im Bereich der zulässigen Geschwindigkeit V_{zul} des Fahrzeugs (Fahrstabilität und Störverhalten)	gerades Gleis oder sehr grosser Radius	Übergeschwindigkeit +10 km/h bzw. +10 % bei $V_{zul} > 100$ km/h	≤ 28 mm (Meterspur) (entspricht ≤ 40 mm bei Normalspur)
2	2	Prüfung der Kombination von zulässiger Geschwindigkeit V_{zul} und Überhöhungsfehlbetrag $\ddot{u}f_{zul}$	ergibt sich aus V_{zul} und $\ddot{u}f_{zul}$ sowie der örtlichen Überhöhung, für $V_{zul} = 100$ km/h $360 < R < 1\ 300$ m siehe Tabelle 8 für $V_{zul} = 120$ km/h $520 < R < 1\ 900$ m siehe Tabelle 9	Übergeschwindigkeit bis zu +10 km/h bzw. +10 % bei $V_{zul} > 100$ km/h	70 bis 115 % von $\ddot{u}f_{zul}$
3	3	entfällt wegen Überlappung der Randbedingungen mit Prüfbereich 2, siehe Abschnitt 3.4.3			
4	4	Prüfung im Bereich des zulässigen Überhöhungsfehlbetrags	$250 \leq R < 400$ m	resultiert aus Bogenradius in Spalte 3, örtlicher Überhöhung und Überhöhungsfehlbetrag in Spalte 5	70 bis 115 % von $\ddot{u}f_{zul}$
5	5a		$200 \leq R < 250$ m		0 bis 115 % von $\ddot{u}f_{zul}$,
6	5b		$150 \leq R < 200$ m		in Simulation sowie min. 3 Abschnitte in Messfahrt bei 105 bis 115 % $\ddot{u}f_{zul}$,
7	5c		$100 \leq R < 150$ m		
8	5d		$75 \leq R < 100$ m		
9	5e		$(40 \leq) R < 75$ m		$\ddot{u}f_{zul}$ ggf. bahnspezifisch radienabhängig reduziert

Tabelle 7: Vorgeschlagene Prüfbereiche für Meterspuranwendungen

Der Zweck sowie die Prüfbedingungen der Prüfbereiche 1 bis 4 der EN 14363 [14] sind dabei wie in Abschnitt 3.4.3 dargelegt unabhängig von der Spurweite des Bahnsystems definiert und hier entsprechend unverändert in Tabelle 7 übernommen. Im Prüfbereich 2 ergeben sich für typische Höchstgeschwindigkeiten der Meterspuranwendungen die in Tabelle 7 ausgewiesenen Bogenradien bis hinab zu $R_B = 360$ m bzw. 520 m. Entsprechend schliesst der Prüfbereich 4 der EN 14363 [14] (s. Tabelle 5) mit Bogenradien von $250 \leq R_B < 400$ m recht gut an den Prüfbereich 2 an, so dass die Bogenradien des Prüfbereichs 4 der EN 14363 [14] hier unverändert für Meterspuranwendungen vorgeschlagen werden. Der Prüfbereich 3 entfällt wie in Abschnitt 3.4.3 dargelegt aufgrund der Überlappung der Bogenradien des Prüfbereichs 2. Die Bogenradien der Prüfbereiche 5a bis 5c der Tabelle 7 stimmen mit den Radien der CEN/TS 17843 [16] aus Tabelle 6 überein. Im Unterschied zu den überlappenden Kategorien a bis c der CEN/TS 17843 [16] (siehe Abschnitt 3.4.4) gelten die Prüfbereiche 5a bis 5c der Tabelle 7 jeweils zwischen den Bogenradien in der ausgewiesenen sequenziellen Radienfolge. Die Prüfbereiche 5d und

5e der Tabelle 7 sind Ergänzungen für die hier gegenständlichen Meterspuranwendungen. Da der Anlaufwinkel in kleinen Bogenradien überproportional ansteigt (s. Abbildung 6) und weil einige Bahnen kaum (oder keine) Bögen mit Radien unter 75 m aufweisen (siehe Abschnitt 3.4.2), erfolgt mit 5d und 5e eine Aufteilung in zwei Prüfbereiche. So kann je Bahn der jeweils zutreffende Radienbereich abgeprüft werden. Der Prüfbereich 5e aus Tabelle 7 ist nur anwendbar, wenn die betreffende Bahn auch eine nennenswerte Anzahl oder Länge an Bogenradien < 75 m aufweist, siehe Abschnitt 3.4.

Es wird vorgeschlagen, die bewährten Vorgaben zu den Prüfgeschwindigkeiten sowie zu den Überhöhungsfehlbeträgen der EN 14363 [14] sowie CEN/TS 17843 [16] für die hier gegenständlichen Meterspuranwendungen zu übernehmen. Dies ist möglich, da diese Vorgaben nicht als absolute Wertangaben formuliert sind, sondern unabhängig vom Bahnsystem als Relativangaben zur jeweils zulässigen Fahrgeschwindigkeit bzw. Überhöhungsfehlbetrag vorliegen. Entsprechend sind in den Spalten 4 und 5 der Tabelle 7 die Prüfvorgaben der EN 14363 [14] in den Zeilen 1 bis 4 angedruckt; sowie weiterhin die Vorgaben der CEN/TS 17843 [16] in den Zeilen 5 bis 9 enthalten.

Die Angaben in Tabelle 7 gelten dabei im Grundsatz gleichermassen für messtechnische und rechnerische (simulationstechnische) Nachweise.

Für **versuchstechnische Nachweise** sind in den Spalten 4 und 5 der Tabelle 7 jeweils Toleranzbereiche angegeben, da die Bedingungen hier von den verfügbaren örtlichen Gegebenheiten abhängen und die Fahrgeschwindigkeit Schwankungen unterliegen kann. Im Prüfbereich 2 werden die Bogenradien entsprechend dem in Tabelle 7 deklarierten Zweck nicht direkt vorgegeben, sondern resultieren aus den Vorgaben zu Fahrgeschwindigkeit und Überhöhungsfehlbetrag sowie der örtlichen Überhöhung. Der Bereich versuchstechnisch möglicher Bogenradien und Betriebsbedingungen im Prüfbereich 2 ist für eine fahrzeugseitige Höchstgeschwindigkeit von $V_{zul} = 100$ km/h in Tabelle 8 sowie für $V_{zul} = 120$ km/h in Tabelle 9 dargelegt. (In Abschnitt 3.11 sowie Kapitel 4 wird darauf aufbauend ein versuchstechnischer Umfang vorgeschlagen.)

Für **rechnerische Nachweise** hingegen können die Randbedingungen im Unterschied zu Messfahrten exakt vorgegeben und reproduzierbar eingehalten werden. Weiterhin ist es für rechnerische Nachweise (MKS-Simulationen) üblich, keine Sektionsstatistik (siehe Abschnitt 2.1) nach Abschnitt 7.6.3 der EN 14363 [14] durchzuführen, sondern die Extremwerte der Simulation direkt mit den Grenzwerten zu vergleichen. Dazu ist es weiterhin üblich, zur Kompensation der wegfallenden Sektionsstatistik stattdessen jeweils ungünstige Randbedingungen in der Simulation anzusetzen. Entsprechend finden sich in Tabelle 10 bis Tabelle 17 zu den Versuchsbedingungen der Prüfbereiche aus Tabelle 7 jeweils Angaben zu den extremal zulässigen Trassierungen, wie sie sich aus den Grenzwerten der AB-EBV [1] respektive R RTE 22546 [5] ergeben.

für Stützweite		1.050 m	AB-EBV AB 17 3.6.1.1			
fahrzeugseitige Höchstgeschwindigkeit		100 km/h	fahrzeugseitig grösstes üf		107 mm AB-EBV AB 17 3.6.2	
kleinste Versuchsgeschwindigkeit		100%	kleinstes üf im Versuch		70%	
grösste Versuchsgeschwindigkeit		110%	grösstes üf im Versuch		115%	
	1	2	3	4	5	6
Bezeichnung	Fahr- geschwindigkeit v	Bogenradius R	Überhöhung u _h = ü	Überhöhungs- fehlbetrag üf	freie Seiten- beschleunigung a _q	
1	nominell: fahrzeugseitige Höchstgeschwindigkeit, fahrzeugseitig grösstes üf, ohne Überhöhung	100 km/h	772 m	0 mm	107 mm	1.00 m/s ²
2	nominell: fahrzeugseitige Höchstgeschwindigkeit, fahrzeugseitig grösstes üf, grösste Überhöhung	100 km/h	390 m	105 mm	107 mm	1.00 m/s ²
3	grösste Versuchsgeschwindigkeit und grösster Überhöhungsfehlbetrag ohne Überhöhung	110 km/h	812 m	0 mm	123 mm	1.15 m/s ²
4	grösste Versuchsgeschwindigkeit und grösster Überhöhungsfehlbetrag, grösste Überhöhung	110 km/h	438 m	105 mm	123 mm	1.15 m/s ²
5	grösste Versuchsgeschwindigkeit und kleinster Überhöhungsfehlbetrag ohne Überhöhung	110 km/h	1'334 m	0 mm	75 mm	0.70 m/s ²
6	grösste Versuchsgeschwindigkeit und kleinster Überhöhungsfehlbetrag, grösste Überhöhung	110 km/h	555 m	105 mm	75 mm	0.70 m/s ²
7	kleinste Versuchsgeschwindigkeit und grösster Überhöhungsfehlbetrag ohne Überhöhung	100 km/h	671 m	0 mm	123 mm	1.15 m/s ²
8	kleinste Versuchsgeschwindigkeit und grösster Überhöhungsfehlbetrag, grösste Überhöhung	100 km/h	362 m	105 mm	123 mm	1.15 m/s ²
9	kleinste Versuchsgeschwindigkeit und kleinster Überhöhungsfehlbetrag ohne Überhöhung	100 km/h	1'103 m	0 mm	75 mm	0.70 m/s ²
10	kleinste Versuchsgeschwindigkeit und kleinster Überhöhungsfehlbetrag, grösste Überhöhung	100 km/h	459 m	105 mm	75 mm	0.70 m/s ²
11	kleinster Bogenradius aus vorstehenden Zeilen		362 m			
12	grösster Bogenradius aus vorstehenden Zeilen		1'334 m			

Tabelle 8: Mögliche Versuchsbedingungen zum Prüfbereich 2 aus Tabelle 7 für eine fahrzeugseitig zulässige Höchstgeschwindigkeit von $V_{zul} = 100$ km/h

für Stützweite		1.050 m	AB-EBV AB 17 3.6.1.1			
fahrzeugseitige Höchstgeschwindigkeit		120 km/h	fahrzeugseitig grösstes üf		107 mm AB-EBV AB 17 3.6.2	
kleinste Versuchsgeschwindigkeit		100%	kleinstes üf im Versuch		70%	
grösste Versuchsgeschwindigkeit		110%	grösstes üf im Versuch		115%	
	1	2	3	4	5	6
Bezeichnung	Fahr- geschwindigkeit v	Bogenradius R	Überhöhung u _h = ü	Überhöhungs- fehlbetrag üf	freie Seiten- beschleunigung a _q	
1	nominell: fahrzeugseitige Höchstgeschwindigkeit, fahrzeugseitig grösstes üf, ohne Überhöhung	120 km/h	1'111 m	0 mm	107 mm	1.00 m/s ²
2	nominell: fahrzeugseitige Höchstgeschwindigkeit, fahrzeugseitig grösstes üf, grösste Überhöhung	120 km/h	561 m	105 mm	107 mm	1.00 m/s ²
3	grösste Versuchsgeschwindigkeit und grösster Überhöhungsfehlbetrag ohne Überhöhung	132 km/h	1'169 m	0 mm	123 mm	1.15 m/s ²
4	grösste Versuchsgeschwindigkeit und grösster Überhöhungsfehlbetrag, grösste Überhöhung	132 km/h	631 m	105 mm	123 mm	1.15 m/s ²
5	grösste Versuchsgeschwindigkeit und kleinster Überhöhungsfehlbetrag ohne Überhöhung	132 km/h	1'921 m	0 mm	75 mm	0.70 m/s ²
6	grösste Versuchsgeschwindigkeit und kleinster Überhöhungsfehlbetrag, grösste Überhöhung	132 km/h	800 m	105 mm	75 mm	0.70 m/s ²
7	kleinste Versuchsgeschwindigkeit und grösster Überhöhungsfehlbetrag ohne Überhöhung	120 km/h	966 m	0 mm	123 mm	1.15 m/s ²
8	kleinste Versuchsgeschwindigkeit und grösster Überhöhungsfehlbetrag, grösste Überhöhung	120 km/h	521 m	105 mm	123 mm	1.15 m/s ²
9	kleinste Versuchsgeschwindigkeit und kleinster Überhöhungsfehlbetrag ohne Überhöhung	120 km/h	1'588 m	0 mm	75 mm	0.70 m/s ²
10	kleinste Versuchsgeschwindigkeit und kleinster Überhöhungsfehlbetrag, grösste Überhöhung	120 km/h	661 m	105 mm	75 mm	0.70 m/s ²
11	kleinster Bogenradius aus vorstehenden Zeilen		521 m			
12	grösster Bogenradius aus vorstehenden Zeilen		1'921 m			

Tabelle 9: Mögliche Versuchsbedingungen zum Prüfbereich 2 aus Tabelle 7 für eine fahrzeugseitig zulässige Höchstgeschwindigkeit von $V_{zul} = 120$ km/h

1		2		3		4		5		6		7		8		
				extremal zulässige Werte				Prüfbereich 2								
				Wert		Referenz		betrieblich zulässig				Prüfbedingungen				
Nr.	Bezeichnung	Kürzel							Wert	Nutzungsgrad des zul. Werts			Wert	Nutzungsgrad des zul. Werts		
1	Stützweite	sw	1.050 m		Rückrechnung aus 3.6.1.1 zu AB 17 AB-EBV 11/2020		1.050 m		--		1.050 m		--			
2	zulässige Fahrgeschwindigkeit des gegenständlichen Fahrzeugs	v	100.00 km/h		RAILplus-Anwendungen max. 100 bzw. 120 km/h		100.00 km/h		100.0%		110.00 km/h		110.0%			
3			27.78 m/s				27.78 m/s				30.56 m/s					
4	Bogenradius	R	--		Prüfbereich 2: resultiert aus v und aq Prüfbereiche >2 direkte Eingabe AB 17 3.3.1 AB-EBV R<200 (Tram <50m) zu vermeiden		390 m		--		438 m		--			
5	Überhöhung	h	0.105 m		AB 17 3.4.1 AB-EBV: Grenzwert Normalfall 105 mm Rollbock 90 mm, Zahnst. 35 mm		0.105 m		100.0%		0.105 m		100.0%			
6		h _{lim}	je nach R		radienabhängig nach RAILplus-Statistik		0.105 m				0.105 m					
7	Überhöhungsfehlbetrag	l = üf	0.107 m		AB 17 3.6.2 AB-EBV: Zuggleis Normalfall 86 mm Zuggleis Ausnahme 107 mm Zwangspunkt 70, Ausnahme 86 mm		0.107 m		100.0%		0.123 m		115.0%			
8	freie Seitenbeschleunigung	aq	1.00 m/s²				1.00 m/s²				1.15 m/s²					
9	Länge Übergangsbogen	L _u	--		kürzest möglich unter Einhaltung der Kriterien aus Zeilen 10, 12, 13		58 m		--		58 m		--			
9a	aus Zeilen 10 und 11	L _u			erforderliche Länge aus Überhöhungsrampe		35 m				35 m		ohne Berücksichtigung der Übergeschwindigkeit			
9b	aus Zeile 12	L _u			erforderliche Länge aus Änderungsrate der Überhöhung		58 m				58 m					
9c	aus Zeile 13	L _u			erforderliche Länge aus Änderungsrate des Überh.Fehlbetrags		41 m				41 m					
9c	zur Information	L _u	=V³/(31*R)		Grenzwert im Normalfall bei Regelüberh. nach A 2.2 RTE 22546		83 m				98 m					
10	Neigung der Überhöhungsrampe	1:m	1 : 333		AB 17 4.2 AB-EBV: Zuggleis max. 2.5‰, Ausnahme 3‰ Betriebszustand: ≤80km/h 3.5‰, ≤120km/h 3‰		1 : 552		60.3%		1 : 552		60.3%			
11		dD/ds	3.00 ‰				1.81 ‰		1.81 ‰							
12	Änderungsrate der Überhöhung	h / t	0.050 m/s		AB 17 4.3 AB-EBV: max. 40mm/s Ausnahme 50mm/s		0.050 m/s		100.0%		0.055 m/s		110.0%			
13	Änderungsrate des Überhöhungsfehlbetrags	üf / t	0.072 m/s		AB 17 4.3 AB-EBV: max. 55mm/s Ausnahme 72mm/s		0.051 m/s		70.8%		0.065 m/s		90.3%			

Legende:

- Ausschlaggebendes Kriterium für die Länge des Übergangsbogens
- Prüfbedingungen, die über den normalbetrieblich zulässigen Wert hinausgehen

Tabelle 10: Extremal zulässige Trassierung im Prüfbereich 2 aus Tabelle 7 für Meterspuranwendungen mit $V_{zul} = 100 \text{ km/h}$ (in Zuggleisen ohne Zwangspunkte, AB 17 AB-EBV [1])

1		2		3		4		5		6		7		8		
				extremal zulässige Werte				Prüfbereich 2								
				Wert		Referenz		betriebl. zulässig				Prüfbedingungen				
Nr.	Bezeichnung	Kürzel							Wert	Nutzungsgrad des zul. Werts			Wert	Nutzungsgrad des zul. Werts		
1	Stützweite	sw	1.050 m		Rückrechnung aus 3.6.1.1 zu AB 17 AB-EBV 11/2020		1.050 m		--		1.050 m		--			
2	zulässige Fahrgeschwindigkeit des gegenständlichen Fahrzeugs	v	120.00 km/h		RAILplus-Anwendungen max. 100 bzw. 120 km/h		120.00 km/h		100.0%		132.00 km/h		110.0%			
3			33.33 m/s				33.33 m/s				36.67 m/s					
4	Bogenradius	R	--		Prüfbereich 2: resultiert aus v und aq Prüfbereiche >2 direkte Eingabe AB 17 3.3.1 AB-EBV R<200 (Tram <50m) zu vermeiden		561 m		--		631 m		--			
5	Überhöhung	h	0.105 m		AB 17 3.4.1 AB-EBV: Grenzwert Normalfall 105 mm Rollbock 90 mm, Zahnst. 35 mm		0.105 m		100.0%		0.105 m		100.0%			
6		h _{lim}	je nach R		radienabhängig nach RAILplus-Statistik		0.105 m				0.105 m					
7	Überhöhungsfehlbetrag	l = üf	0.107 m		AB 17 3.6.2 AB-EBV: Zuggleis Normalfall 86 mm Zuggleis Ausnahme 107 mm Zwangspunkt 70, Ausnahme 86 mm		0.107 m		100.0%		0.123 m		115.0%			
8	freie Seitenbeschleunigung	aq	1.00 m/s ²				1.00 m/s ²				1.15 m/s ²					
9	Länge Übergangsbogen	L _u	--		kürzest möglich unter Einhaltung der Kriterien aus Zeilen 10, 12, 13		70 m		--		70 m		--			
9a	aus Zeilen 10 und 11	L _u			erforderliche Länge aus Überhöhungsrampe		35 m				35 m		ohne Berücksichtigung der Übergeschwindigkeit			
9b	aus Zeile 12	L _u			erforderliche Länge aus Änderungsrate der Überhöhung		70 m				70 m					
9c	aus Zeile 13	L _u			erforderliche Länge aus Änderungsrate des Überh.Fehlbetrags		50 m				50 m					
9c	zur Information	L _u	=V ³ /(31*R)		Grenzwert im Normalfall bei Regelüberh. nach A 2.2 RTE 22546		99 m				118 m					
10	Neigung der Überhöhungsrampe	1:m	1 : 333		AB 17 4.2 AB-EBV: Zuggleis max. 2.5‰, Ausnahme 3‰ Betriebszustand: ≤80km/h 3.5‰, ≤120km/h 3‰		1 : 667		50.0%		1 : 667		50.0%			
11		dD/ds	3.00 ‰				1.50 ‰		1.50 ‰							
12	Änderungsrate der Überhöhung	h / t	0.050 m/s		AB 17 4.3 AB-EBV: max. 40mm/s Ausnahme 50mm/s		0.050 m/s		100.0%		0.055 m/s		110.0%			
13	Änderungsrate des Überhöhungsfehlbetrags	üf / t	0.072 m/s		AB 17 4.3 AB-EBV: max. 55mm/s Ausnahme 72mm/s		0.051 m/s		70.8%		0.064 m/s		88.9%			

Legende:

- Ausschlaggebendes Kriterium für die Länge des Übergangsbogens
- Prüfbedingungen, die über den normalbetrieblich zulässigen Wert hinausgehen

Tabelle 11: Extremal zulässige Trassierung im Prüfbereich 2 aus Tabelle 7 für Meterspuranwendungen mit $V_{zul} = 120 \text{ km/h}$ (in Zuggleisen ohne Zwangspunkte, AB 17 AB-EBV [1])

1		2		3		4		5		6		7		8	
Nr. Bezeichnung Kürzel			extremal zulässige Werte				Prüfbereich 4								
			Wert		Referenz		betrieblich zulässig				Prüfbedingungen				
			Wert		Nutzungsgrad des zul. Werts		Wert		Nutzungsgrad des zul. Werts						
1	Stützweite	sw	1.050 m	Rückrechnung aus 3.6.1.1 zu AB 17 AB-EBV 11/2020		1.050 m	--	1.050 m	--						
2	zulässige Fahrgeschwindigkeit des gegenständlichen Fahrzeugs	v	100.00 km/h	RAILplus-Anwendungen max. 100 bzw. 120 km/h		80.11 km/h	80.1%	82.11 km/h	82.1%						
3			27.78 m/s			22.25 m/s		22.81 m/s							
4	Bogenradius	R	--	Prüfbereich 2: resultiert aus v und aq Prüfbereiche >2 direkte Eingabe AB 17 3.3.1 AB-EBV R<200 (Tram <50m) zu vermeiden		250 m	--	250 m	--						
5	Überhöhung	h	0.105 m	AB 17 3.4.1 AB-EBV: Grenzwert Normalfall 105 mm Rollbock 90 mm, Zahnst. 35 mm		0.105 m	100.0%	0.105 m	100.0%						
6		h _{lim}	je nach R	radienabhängig nach RAILplus-Statistik		0.105 m		0.105 m							
7	Überhöhungsfehlbetrag	l = üf	0.107 m	AB 17 3.6.2 AB-EBV: Zuggleis Normalfall 86 mm Zuggleis Ausnahme 107 mm Zwangspunkt 70, Ausnahme 86 mm		0.107 m	100.0%	0.118 m	110.0%						
8	freie Seitenbeschleunigung	aq	1.00 m/s ²			1.00 m/s ²		1.10 m/s ²							
9	Länge Übergangsbogen	L _u	--	kürzest möglich unter Einhaltung der Kriterien aus Zeilen 10, 12, 13		47 m	--	47 m	--						
9a	aus Zeilen 10 und 11	L _u		erforderliche Länge aus Überhöhungsrampe		35 m		35 m							
9b	aus Zeile 12	L _u		erforderliche Länge aus Änderungsrate der Überhöhung		47 m		47 m							
9c	aus Zeile 13	L _u		erforderliche Länge aus Änderungsrate des Überh.Fehlbetrags		33 m		33 m							ohne Berücksichtigung der Übergeschwindigkeit
9c	zur Information	L _u	=V ³ /(31*R)	Grenzwert im Normalfall bei Regelüberh. nach A 2.2 RTE 22546		66 m		71 m							
10	Neigung der Überhöhungsrampe	1:m	1 : 333	AB 17 4.2 AB-EBV: Zuggleis max. 2.5‰, Ausnahme 3‰ Betriebszustand: ≤80km/h 3.5‰, ≤120km/h 3‰		1 : 448	74.5%	1 : 448	74.5%						
11		dD/ds	3.00 ‰			2.23 ‰	2.23 ‰								
12	Änderungsrate der Überhöhung	h / t	0.050 m/s	AB 17 4.3 AB-EBV: max. 40mm/s Ausnahme 50mm/s		0.050 m/s	100.0%	0.051 m/s	102.0%						
13	Änderungsrate des Überhöhungsfehlbetrags	üf / t	0.072 m/s	AB 17 4.3 AB-EBV: max. 55mm/s Ausnahme 72mm/s		0.051 m/s	70.8%	0.057 m/s	79.2%						

Legende:

- Ausschlaggebendes Kriterium für die Länge des Übergangsbogens
- Prüfbedingungen, die über den normalbetrieblich zulässigen Wert hinausgehen

Tabelle 12: Extremal zulässige Trassierung im **Prüfbereich 4** aus Tabelle 7 für Meterspuranwendungen (in Zuggleisen ohne Zwangspunkte, AB 17 AB-EBV [1])

1		2		3		4		5		6		7		8	
			extremal zulässige Werte				Prüfbereich 5a								
			Wert		Referenz		betrieblich zulässig			Prüfbedingungen					
Nr.	Bezeichnung	Kürzel	Wert	Referenz	Wert	Nutzungsgrad des zul. Werts	Wert	Nutzungsgrad des zul. Werts	Wert	Nutzungsgrad des zul. Werts	Wert	Nutzungsgrad des zul. Werts	Wert	Nutzungsgrad des zul. Werts	
1	Stützweite	sw	1.050 m	Rückrechnung aus 3.6.1.1 zu AB 17 AB-EBV 11/2020	1.050 m	--	1.050 m	--	1.050 m	--	1.050 m	--	1.050 m	--	
2	zulässige Fahrgeschwindigkeit des gegenständlichen Fahrzeugs	v	100.00 km/h	RAILplus-Anwendungen max. 100 bzw. 120 km/h	71.66 km/h	71.7%	73.44 km/h	73.4%	73.44 km/h	73.4%	73.44 km/h	73.4%	73.44 km/h	73.4%	
3			27.78 m/s		19.90 m/s		20.40 m/s		20.40 m/s						
4	Bogenradius	R	--	Prüfbereich 2: resultiert aus v und aq Prüfbereiche >2 direkte Eingabe AB 17 3.3.1 AB-EBV R<200 (Tram <50m) zu vermeiden	200 m	--	200 m	--	200 m	--	200 m	--	200 m	--	
5	Überhöhung	h	0.105 m	AB 17 3.4.1 AB-EBV: Grenzwert Normalfall 105 mm Rollbock 90 mm, Zahnst. 35 mm	0.105 m	100.0%	0.105 m	100.0%	0.105 m	100.0%	0.105 m	100.0%	0.105 m	100.0%	
6		h _{lim}	je nach R	radienabhängig nach RAILplus-Statistik	0.105 m		0.105 m		0.105 m		0.105 m		0.105 m		
7	Überhöhungsfehlbetrag	l = üf	0.107 m	AB 17 3.6.2 AB-EBV: Zuggleis Normalfall 86 mm Zuggleis Ausnahme 107 mm Zwangspunkt 70, Ausnahme 86 mm	0.107 m	100.0%	0.118 m	110.0%	0.118 m	110.0%	0.118 m	110.0%	0.118 m	110.0%	
8	freie Seitenbeschleunigung	aq	1.00 m/s ²		1.00 m/s ²		1.10 m/s ²								
9	Länge Übergangsbogen	L _u	--	kürzest möglich unter Einhaltung der Kriterien aus Zeilen 10, 12, 13	42 m	--	42 m	--	42 m	--	42 m	--	42 m	--	
9a	aus Zeilen 10 und 11	L _u		erforderliche Länge aus Überhöhungsrampe	35 m		35 m		35 m		35 m		35 m	ohne Berücksichtigung der Übergeschwindigkeit	
9b	aus Zeile 12	L _u		erforderliche Länge aus Änderungsrate der Überhöhung	42 m		42 m		42 m		42 m		42 m		
9c	aus Zeile 13	L _u		erforderliche Länge aus Änderungsrate des Überh.Fehlbetrags	30 m		30 m		30 m		30 m		30 m		
9c	zur Information	L _u	=V ³ /(31*R)	Grenzwert im Normalfall bei Regelüberh. nach A 2.2 RTE 22546	59 m		59 m		59 m		59 m		59 m		
10	Neigung der Überhöhungsrampe	1:m	1 : 333	AB 17 4.2 AB-EBV: Zuggleis max. 2.5‰, Ausnahme 3‰ Betriebszustand: ≤80km/h 3.5‰, ≤120km/h 3‰	1 : 400	83.3%	1 : 400	83.3%	1 : 400	83.3%	1 : 400	83.3%	1 : 400	83.3%	
11		dD/ds	3.00 ‰		2.50 ‰	2.50 ‰									
12	Änderungsrate der Überhöhung	h / t	0.050 m/s	AB 17 4.3 AB-EBV: max. 40mm/s Ausnahme 50mm/s	0.050 m/s	100.0%	0.051 m/s	102.0%	0.051 m/s	102.0%	0.051 m/s	102.0%	0.051 m/s	102.0%	
13	Änderungsrate des Überhöhungsfehlbetrags	üf / t	0.072 m/s	AB 17 4.3 AB-EBV: max. 55mm/s Ausnahme 72mm/s	0.051 m/s	70.8%	0.057 m/s	79.2%	0.057 m/s	79.2%	0.057 m/s	79.2%	0.057 m/s	79.2%	

Legende:

- Ausschlaggebendes Kriterium für die Länge des Übergangsbogens
- Prüfbedingungen, die über den normalbetrieblich zulässigen Wert hinausgehen

Tabelle 13: Extremal zulässige Trassierung im **Prüfbereich 5a** aus Tabelle 7 für Meterspuranwendungen (in Zuggleisen ohne Zwangspunkte, AB 17 AB-EBV [1])

1		2		3		4		5		6		7		8	
			extremal zulässige Werte				Prüfbereich 5b								
			Wert		Referenz		betrieblich zulässig			Prüfbedingungen					
Nr.	Bezeichnung	Kürzel					Wert	Nutzungsgrad des zul. Werts		Wert	Nutzungsgrad des zul. Werts				
1	Stützweite	sw	1.050 m		Rückrechnung aus 3.6.1.1 zu AB 17 AB-EBV 11/2020		1.050 m	--		1.050 m	--				
2	zulässige Fahrgeschwindigkeit des gegenständlichen Fahrzeugs	v	100.00 km/h		RAILplus-Anwendungen max. 100 bzw. 120 km/h		62.06 km/h		62.1%	63.60 km/h		63.6%			
3			27.78 m/s				17.24 m/s			17.67 m/s					
4	Bogenradius	R	--		Prüfbereich 2: resultiert aus v und aq Prüfbereiche >2 direkte Eingabe AB 17 3.3.1 AB-EBV R<200 (Tram <50m) zu vermeiden		150 m		--	150 m		--			
5	Überhöhung	h	0.105 m		AB 17 3.4.1 AB-EBV: Grenzwert Normalfall 105 mm Rollbock 90 mm, Zahnst. 35 mm		0.105 m		100.0%	0.105 m		100.0%			
6		h _{lim}	je nach R		radienabhängig nach RAILplus-Statistik		0.105 m		0.105 m						
7	Überhöhungsfehlbetrag	l = üf	0.107 m		AB 17 3.6.2 AB-EBV: Zuggleis Normalfall 86 mm Zuggleis Ausnahme 107 mm Zwangspunkt 70, Ausnahme 86 mm		0.107 m		100.0%	0.118 m		110.0%			
8	freie Seitenbeschleunigung	aq	1.00 m/s²				1.00 m/s²			1.10 m/s²					
9	Länge Übergangsbogen	L _u	--		kürzest möglich unter Einhaltung der Kriterien aus Zeilen 10, 12, 13		36 m		--	36 m		--			
9a	aus Zeilen 10 und 11	L _u			erforderliche Länge aus Überhöhungsrampe		35 m		35 m		ohne Berücksichtigung der Übergeschwindigkeit				
9b	aus Zeile 12	L _u			erforderliche Länge aus Änderungsrate der Überhöhung		36 m		36 m						
9c	aus Zeile 13	L _u			erforderliche Länge aus Änderungsrate des Überh.Fehlbetrags		26 m		26 m						
9c	zur Information	L _u	=V³/(31*R)		Grenzwert im Normalfall bei Regelüberh. nach A 2.2 RTE 22546		51 m		51 m						
10	Neigung der Überhöhungsrampe	1:m	1 : 333		AB 17 4.2 AB-EBV: Zuggleis max. 2.5‰, Ausnahme 3‰ Betriebszustand: ≤80km/h 3.5‰, ≤120km/h 3‰		1 : 343		97.2%	1 : 343		97.2%			
11		dD/ds	3.00 ‰				2.92 ‰		2.92 ‰						
12	Änderungsrate der Überhöhung	h / t	0.050 m/s		AB 17 4.3 AB-EBV: max. 40mm/s Ausnahme 50mm/s		0.050 m/s		100.0%	0.052 m/s		104.0%			
13	Änderungsrate des Überhöhungsfehlbetrags	üf / t	0.072 m/s		AB 17 4.3 AB-EBV: max. 55mm/s Ausnahme 72mm/s		0.051 m/s		70.8%	0.058 m/s		80.6%			

Legende:

- Ausschlaggebendes Kriterium für die Länge des Übergangsbogens
- Prüfbedingungen, die über den normalbetrieblich zulässigen Wert hinausgehen

Tabelle 14: Extremal zulässige Trassierung im **Prüfbereich 5b** aus Tabelle 7 für Meterspuranwendungen (in Zuggleisen ohne Zwangspunkte, AB 17 AB-EBV [1])
(zur radienabhängigen Überhöhung in Zeile 6 siehe Abbildung 1 und Abschnitt 3.2)

1		2		3		4		5		6		7		8	
			extremal zulässige Werte				Prüfbereich 5c								
			Wert		Referenz		betrieblich zulässig			Prüfbedingungen					
Nr.	Bezeichnung	Kürzel	Wert	Referenz	Wert	Nutzungsgrad des zul. Werts	Wert	Nutzungsgrad des zul. Werts	Wert	Nutzungsgrad des zul. Werts	Wert	Nutzungsgrad des zul. Werts	Wert	Nutzungsgrad des zul. Werts	
1	Stützweite	sw	1.050 m	Rückrechnung aus 3.6.1.1 zu AB 17 AB-EBV 11/2020	1.050 m	--	1.050 m	--	1.050 m	--	1.050 m	--	1.050 m	--	
2	zulässige Fahrgeschwindigkeit des gegenständlichen Fahrzeugs	v	100.00 km/h	RAILplus-Anwendungen max. 100 bzw. 120 km/h	50.67 km/h	50.7%	51.93 km/h	51.9%	14.43 m/s	14.43 m/s	14.43 m/s	14.43 m/s	14.43 m/s	14.43 m/s	
3			27.78 m/s		14.07 m/s		14.43 m/s		14.43 m/s						
4	Bogenradius	R	--	Prüfbereich 2: resultiert aus v und aq Prüfbereiche >2 direkte Eingabe AB 17 3.3.1 AB-EBV R<200 (Tram <50m) zu vermeiden	100 m	--	100 m	--	100 m	--	100 m	--	100 m	--	
5	Überhöhung	h	0.105 m	AB 17 3.4.1 AB-EBV: Grenzwert Normalfall 105 mm Rollbock 90 mm, Zahnst. 35 mm	0.105 m	100.0%	0.105 m	100.0%	0.105 m	100.0%	0.105 m	100.0%	0.105 m	100.0%	
6		h _{lim}	je nach R	radienabhängig nach RAILplus-Statistik	0.105 m		0.105 m		0.105 m		0.105 m		0.105 m		
7	Überhöhungsfehlbetrag	l = üf	0.107 m	AB 17 3.6.2 AB-EBV: Zuggleis Normalfall 86 mm Zuggleis Ausnahme 107 mm Zwangspunkt 70, Ausnahme 86 mm	0.107 m	100.0%	0.118 m	110.0%	0.118 m	110.0%	0.118 m	110.0%	0.118 m	110.0%	
8	freie Seitenbeschleunigung	aq	1.00 m/s ²		1.00 m/s ²		1.10 m/s ²								
9	Länge Übergangsbogen	L _u	--	kürzest möglich unter Einhaltung der Kriterien aus Zeilen 10, 12, 13	35 m	--	35 m	--	35 m	--	35 m	--	35 m	--	
9a	aus Zeilen 10 und 11	L _u		erforderliche Länge aus Überhöhungsrampe	35 m		35 m		35 m		35 m		35 m	ohne Berücksichtigung der Übergeschwindigkeit	
9b	aus Zeile 12	L _u		erforderliche Länge aus Änderungsrate der Überhöhung	30 m		30 m		30 m		30 m		30 m		
9c	aus Zeile 13	L _u		erforderliche Länge aus Änderungsrate des Überh.Fehlbetrags	21 m		21 m		21 m		21 m		21 m		
9c	zur Information	L _u	=V ³ /(31*R)	Grenzwert im Normalfall bei Regelüberh. nach A 2.2 RTE 22546	42 m		42 m		42 m		42 m		42 m		
10	Neigung der Überhöhungsrampe	1:m	1 : 333	AB 17 4.2 AB-EBV: Zuggleis max. 2.5‰, Ausnahme 3‰ Betriebszustand: ≤80km/h 3.5‰, ≤120km/h 3‰	1 : 333	100.0%	1 : 333	100.0%	1 : 333	100.0%	1 : 333	100.0%	1 : 333	100.0%	
11		dD/ds	3.00 ‰		3.00 ‰	3.00 ‰	3.00 ‰								
12	Änderungsrate der Überhöhung	h / t	0.050 m/s	AB 17 4.3 AB-EBV: max. 40mm/s Ausnahme 50mm/s	0.042 m/s	84.0%	0.043 m/s	86.0%	0.043 m/s	86.0%	0.043 m/s	86.0%	0.043 m/s	86.0%	
13	Änderungsrate des Überhöhungsfehlbetrags	üf / t	0.072 m/s	AB 17 4.3 AB-EBV: max. 55mm/s Ausnahme 72mm/s	0.043 m/s	59.7%	0.049 m/s	68.1%	0.049 m/s	68.1%	0.049 m/s	68.1%	0.049 m/s	68.1%	

Legende:
Ausschlaggebendes Kriterium für die Länge des Übergangsbogens
Prüfbedingungen, die über den normalbetrieblich zulässigen Wert hinausgehen

Tabelle 15: Extremal zulässige Trassierung im **Prüfbereich 5c** aus Tabelle 7 für Meterspuranwendungen (in Zuggleisen ohne Zwangspunkte, AB 17 AB-EBV [1])
 (zur radienabhängigen Überhöhung in Zeile 6 siehe Abbildung 1 und Abschnitt 3.2)

1		2		3		4		5		6		7		8	
Nr. Bezeichnung Kürzel			extremal zulässige Werte				Prüfbereich 5d								
			Wert		Referenz		betrieblich zulässig			Prüfbedingungen					
			Wert		Referenz		Wert		Nutzungsgrad des zul. Werts		Wert		Nutzungsgrad des zul. Werts		
1	Stützweite	sw	1.050 m	Rückrechnung aus 3.6.1.1 zu AB 17 AB-EBV 11/2020		1.050 m	--		1.050 m	--					
2	zulässige Fahrgeschwindigkeit des gegenständlichen Fahrzeugs	v	100.00 km/h	RAILplus-Anwendungen max. 100 bzw. 120 km/h		43.58 km/h	43.6%		44.69 km/h	44.7%					
3			27.78 m/s			12.11 m/s			12.41 m/s						
4	Bogenradius	R	--	Prüfbereich 2: resultiert aus v und aq Prüfbereiche >2 direkte Eingabe AB 17 3.3.1 AB-EBV R<200 (Tram <50m) zu vermeiden		75 m	--		75 m	--					
5	Überhöhung	h	0.105 m	AB 17 3.4.1 AB-EBV: Grenzwert Normalfall 105 mm Rollbock 90 mm, Zahnst. 35 mm		0.102 m	100.0%		0.102 m	100.0%					
6		h _{lim}	je nach R	radienabhängig nach RAILplus-Statistik		0.102 m			0.102 m						
7	Überhöhungsfehlbetrag	l = üf	0.107 m	AB 17 3.6.2 AB-EBV: Zuggleis Normalfall 86 mm Zuggleis Ausnahme 107 mm Zwangspunkt 70, Ausnahme 86 mm		0.107 m	100.0%		0.118 m	110.0%					
8	freie Seitenbeschleunigung	aq	1.00 m/s ²			1.00 m/s ²			1.10 m/s ²						
9	Länge Übergangsbogen	L _u	--	kürzest möglich unter Einhaltung der Kriterien aus Zeilen 10, 12, 13		34 m	--		34 m	--					
9a	aus Zeilen 10 und 11	L _u		erforderliche Länge aus Überhöhungsrampe		34 m			34 m						
9b	aus Zeile 12	L _u		erforderliche Länge aus Änderungsrate der Überhöhung		25 m			25 m						
9c	aus Zeile 13	L _u		erforderliche Länge aus Änderungsrate des Überh.Fehlbetrags		18 m			18 m					ohne Berücksichtigung der Übergeschwindigkeit	
9c	zur Information	L _u	=V ³ /(31*R)	Grenzwert im Normalfall bei Regelüberh. nach A 2.2 RTE 22546		36 m			36 m						
10	Neigung der Überhöhungsrampe	1:m	1 : 333	AB 17 4.2 AB-EBV: Zuggleis max. 2.5‰, Ausnahme 3‰ Betriebszustand: ≤80km/h 3.5‰, ≤120km/h 3‰		1 : 333	100.1%		1 : 333	100.1%					
11		dD/ds	3.00 ‰			3.00 ‰	3.00 ‰								
12	Änderungsrate der Überhöhung	h / t	0.050 m/s	AB 17 4.3 AB-EBV: max. 40mm/s Ausnahme 50mm/s		0.036 m/s	72.0%		0.037 m/s	74.0%					
13	Änderungsrate des Überhöhungsfehlbetrags	üf / t	0.072 m/s	AB 17 4.3 AB-EBV: max. 55mm/s Ausnahme 72mm/s		0.038 m/s	52.8%		0.043 m/s	59.7%					

Legende:
Ausschlaggebendes Kriterium für die Länge des Übergangsbogens
Prüfbedingungen, die über den normalbetrieblich zulässigen Wert hinausgehen

Tabelle 16: Extremal zulässige Trassierung im **Prüfbereich 5d** aus Tabelle 7 für Meterspuranwendungen (in Zuggleisen ohne Zwangspunkte, AB 17 AB-EBV [1])
 (zur radienabhängigen Überhöhung in Zeile 6 siehe Abbildung 1 und Abschnitt 3.2)

1		2		3		4		5		6		7		8			
Nr.			Bezeichnung			Kürzel			extremal zulässige Werte				Prüfbereich 5e				
									Wert		Referenz		betrieblich zulässig		Prüfbedingungen		
						Wert		Referenz		Wert		Nutzungsgrad des zul. Werts		Wert		Nutzungsgrad des zul. Werts	
1	Stützweite	sw	1.050 m	Rückrechnung aus 3.6.1.1 zu AB 17 AB-EBV 11/2020		1.050 m	--	1.050 m	--								
2	zulässige Fahrgeschwindigkeit des gegenständlichen Fahrzeugs	v	100.00 km/h	RAILplus-Anwendungen max. 100 bzw. 120 km/h		30.30 km/h	30.3%	31.14 km/h	31.1%								
3			27.78 m/s			8.42 m/s		8.65 m/s									
4	Bogenradius	R	--	Prüfbereich 2: resultiert aus v und aq Prüfbereiche >2 direkte Eingabe AB 17 3.3.1 AB-EBV R<200 (Tram <50m) zu vermeiden		40 m	--	40 m	--								
5	Überhöhung	h	0.105 m	AB 17 3.4.1 AB-EBV: Grenzwert Normalfall 105 mm Rollbock 90 mm, Zahnst. 35 mm		0.083 m	100.0%	0.083 m	100.0%								
6		h _{lim}	je nach R	radienabhängig nach RAILplus-Statistik		0.083 m		0.083 m									
7	Überhöhungsfehlbetrag	l = üf	0.107 m	AB 17 3.6.2 AB-EBV: Zuggleis Normalfall 86 mm Zuggleis Ausnahme 107 mm Zwangspunkt 70, Ausnahme 86 mm		0.107 m	100.0%	0.118 m	110.0%								
8	freie Seitenbeschleunigung	aq	1.00 m/s ²			1.00 m/s ²		1.10 m/s ²									
9	Länge Übergangsbogen	L _u	--	kürzest möglich unter Einhaltung der Kriterien aus Zeilen 10, 12, 13		28 m	--	28 m	--								
9a	aus Zeilen 10 und 11	L _u		erforderliche Länge aus Überhöhungsrampe		28 m		28 m									
9b	aus Zeile 12	L _u		erforderliche Länge aus Änderungsrate der Überhöhung		14 m		14 m									
9c	aus Zeile 13	L _u		erforderliche Länge aus Änderungsrate des Überh.Fehlbetrags		13 m		13 m							ohne Berücksichtigung der Übergeschwindigkeit		
9c	zur Information	L _u	=V ³ /(31*R)	Grenzwert im Normalfall bei Regelüberh. nach A 2.2 RTE 22546		22 m		22 m									
10	Neigung der Überhöhungsrampe	1:m	1 : 333	AB 17 4.2 AB-EBV: Zuggleis max. 2.5‰, Ausnahme 3‰ Betriebszustand: ≤80km/h 3.5‰, ≤120km/h 3‰		1 : 339	98.2%	1 : 339	98.2%								
11		dD/ds	3.00 ‰			2.95 ‰	2.95 ‰										
12	Änderungsrate der Überhöhung	h / t	0.050 m/s	AB 17 4.3 AB-EBV: max. 40mm/s Ausnahme 50mm/s		0.025 m/s	50.0%	0.025 m/s	50.0%								
13	Änderungsrate des Überhöhungsfehlbetrags	üf / t	0.072 m/s	AB 17 4.3 AB-EBV: max. 55mm/s Ausnahme 72mm/s		0.032 m/s	44.4%	0.036 m/s	50.0%								

Tabelle 17: Extremal zulässige Trassierung im **Prüfbereich 5e** aus Tabelle 7 für Meterspuranwendungen (in Zuggleisen ohne Zwangspunkte, AB 17 AB-EBV [1])
(zur radienabhängigen Überhöhung in Zeile 6 siehe Abbildung 1 und Abschnitt 3.2)

3.5 Längsneigung und Helix-Verwindung

Ziffer 7.2 AB17 AB-EBV [1] limitiert die Längsneigung neu zu planender Strecken von Meterspuranwendungen im Adhäsionsbetrieb (nicht Tram) auf 40 ‰. Darüber hinaus sind bestehende Streckenabschnitte von Meterspuranwendungen mit bis zu 70 ‰ (z.B. RhB Bernina-Strecke) in reinem Adhäsionsbetrieb bekannt (in Ausnahmen wie Martigny-Chamonix abschnittsweise 90 ‰). Diese Längsneigungen sind im Vergleich zu üblichen Normalspuranwendungen deutlich grösser. Entsprechend sind etwaige Auswirkungen der Längsneigungen von Meterspuranwendungen nicht von etablierten Regelwerken der Normalspuranwendungen abgedeckt.

Eine grosse Längsneigung führt in Kombination mit kleinen Bogenradien durch die gekrümmte Raumkurve zu einer Verwindung des Fahrzeugs, die Helix-Verwindung genannt wird. Details dazu sind in [10] erläutert.

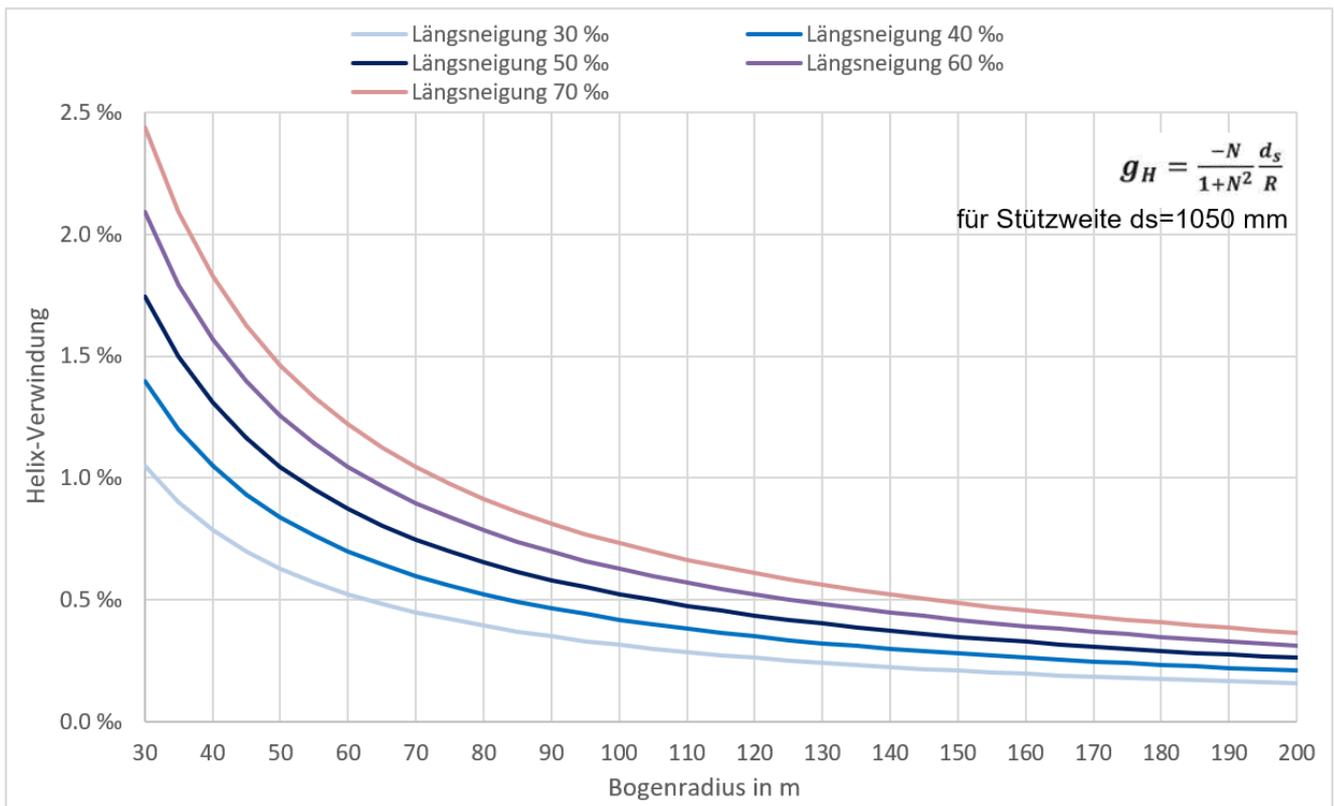


Abbildung 7: Helix-Verwindung für verschiedene Längsneigungen in Abhängigkeit vom Bogenradius bei Meterspuranwendung nach dem Gleichungssatz aus [10]

Abbildung 7 zeigt die resultierende Helix-Verwindung für verschiedene Längsneigungen von 30 bis 70 ‰ in Abhängigkeit vom Bogenradius. Aus Abbildung 7 ist ersichtlich, dass die nach AB 17 AB -EBV [1] grösste Längsneigung von 40 ‰ in Kombination mit einem Bogenradius von 40 m eine Helixverwindung von gut 1 ‰ ausmacht. Für Bestandsstrecken mit grösserer Längsneigung ergeben sich jeweils deutlich grössere Helixverwindungen. (Unter strassenbahntypischen Bedingungen wächst die Helixverwindung ebenfalls rasch an.)

Dabei ist zu bedenken, dass auf das Fahrzeug die Summe an Verwindungen wirkt, wie sie sich am jeweiligen Ort aus der Kombination von Helixverwindung, Überhöhungsrampe, Gleislagefehler und ggf. Flach/Tief-Rillenanlage zusammensetzt. So ist die oben genannte Helixverwindung von 1 ‰ in Relation zu dem in Abschnitt 3.2 genannten Betriebsgrenzmass der Überhöhungsrampe von 3 ‰ bei $V \leq 120$ km/h nach Ziffer 4.2 AB17 AB-EBV [1] bereits eine nennenswerte Grössenordnung.

Bei Bogenradien $R_B > 90$ m liegt die bei 40 ‰ Neigung resultierende Helixverwindung in Abbildung 7 unter 0.5 ‰ und hat daher im Vergleich zur möglichen Überhöhungsrampe keinen dominierenden Einfluss auf das Fahrzeug. Dahingehend passt der Hinweis nach Ziffer 3.4.2.1 der AB-EBV [1] zu Artikel 17, bei Bogenradien $R_B < 100$ m die Überhöhung in Bezug auf die Entgleisungssicherheit zu überlegen.

3.6 Gleislageabweichungen

Geometrische Gleislageabweichungen können einen nennenswerten Einfluss auf das Fahrverhalten haben. So begünstigt eine gute Gleislage eher das ungestörte Anfachen von Eigenschwingformen hinsichtlich der Fahrstabilität, während grosse Fehleramplituden in verschiedenen Wellenlängen eher das Störverhalten der Fahrzeuge herausfordern. In Abschnitt 2.3 sind verschiedene potentielle Einflüsse der Gleislage auf die jeweiligen Schutzziele beschrieben.

Regelwerke zur Gleisinstandhaltung wie z.B. R RTE 22570 [6] definieren als Grenzwerte der Gleislage Einzahl-Werte (wie z.B. Abschnitt 5.3.1.1 der R RTE 22570 [6]). In Bezug auf das dynamische Fahrverhalten ist anstelle eines Einzahlwerts die Ausprägung der geometrischen Abweichung entlang der Strecke relevant. Dies können z.B. eine regellose Störung («Grundrauschen»), ein periodisch auftretender Fehler, ein lokales Einzelereignis oder eine Kombination daraus sein.

Die Gleislage von Meterspuranwendungen wird zunehmend und in regelmässigen Abständen durch einen Messwagen erfasst [12]. Somit können die Merkmale der örtlichen Gleislage in die Auswahl von Versuchsstrecken einbezogen werden. So können beispielsweise die Fahrstabilität gezielt auf guter Gleislage und das Störverhalten bewusst auf anspruchsvoller Gleislage getestet werden etc.

In Bezug auf MKS-Simulationen enthält [12] Vorschläge zu Gleislagedatensätzen, die sowohl regellose Gleislagefehler (RAILplus-Spektren), als auch repräsentative periodische Längshöhenfehler sowie Einzelereignisse zum Gegenstand haben. Diese Datensätze basieren auf Gleismessdaten von Meterspuranwendungen. Sie enthalten gemäss der in Abschnitt 2.1 deklarierten Zielsetzung von Simulationsrechnungen eine anspruchsvolle Gleislage zum direkten Vergleich mit dem Grenzwert (ohne Sektionsstatistik, siehe Punkt 14) in Abschnitt 2.1).

In Bezug auf die Sicherheit gegen Entgleisen ist dabei die Verwindung relevant, wie sie aus der Änderung der Überhöhung über einen Längsabstand (Basis) resultiert. Zugehörige Grenzwerte sind in Abschnitt 3.2 thematisiert. Dabei unterscheiden diese Grenzwerte nicht zwischen geplanter Verwindung aus Überhöhrungsrampe und ungewollter Verwindung aus Gleislagefehler, sondern begrenzen die insgesamt aus der Überhöhrungsdifferenz über einer Basis resultierende Verwindung.

3.7 Zug/Stoss-Einrichtungen bzw. Wagenkastengelenke

Die mechanische Verbindung zwischen benachbarten Wagenkästen bzw. benachbarten Fahrzeugen beeinflusst die auftretenden wie auch die ertragbaren Längskräfte im Zugverband.

So ändert sich je nach Fahrzeuggeometrie (Drehgestellmittenabstand, Überhang) und Merkmalen der Fahrzeugkupplung bei der Bogenein- und -ausfahrt wie in Effekt Nr. 8|8 in Abschnitt 2.3 beschrieben die wirksame Länge des Zuges (Ziehharmonika-Effekt) sowie der wirksame Stosswinkel der Kupplung, was die auftretende Radführungskraft Y potenziell erhöht.

Bei vielen Meterspuranwendungen werden für den Personenverkehr zunehmend Gliederzüge eingesetzt, bei denen der Ziehharmonika-Effekt sowie die Stosswinkel durch Wagenkastengelenke (unterhalb des Fussbodens) sowie geringe Überhänge bzw. Jakobs-Drehgestelle minimiert wird.

Beim Einsatz von Mittelpufferkupplungen z.B. bei Mehrfachtraktion von Gliederfahrzeugen oder kurzen Zug/Druck-Stangen (Doppelbalg) ist der vorbeschriebene Effekt jedoch je nach Längenabmessungen relevant.

Insbesondere im Güterverkehr werden bei Meterspuranwendungen regelmässig Balancierhebelkupplungen (Mittelpuffer mit zwei Schraubekupplungen) eingesetzt. Diese Anordnung vermeidet gegenüber den konventionellen Seitenpuffern der Vollbahn ein Verspannen gegenüber der Schraubekupplung im Bogen.

Es ist nicht bekannt, dass Meterspuranwendungen Seitenpuffer mit zentrischer Schraubekupplung einsetzen.

3.8 Gleisbauformen, Schienenprofile und dynamische Gleisbettung

Von den eingesetzten Oberbauformen inklusive der Schienen hängen einerseits die gleisseitig ertragbaren Rad/Schiene-Kräfte (Fahrsicherheit und Fahrwegbeanspruchung) sowie andererseits die zu berücksichtigenden dynamischen Bettungseigenschaften (Steifigkeiten und Dämpfungen unterhalb des Rad/Schiene-Kontakts) ab.

Bei den gegenständlichen Meterspuranwendungen kommen überwiegend Bauformen im Schotteroberbau (Querschwellengleis mit Beton-, Holz- sowie Stahl- bzw. Y-Schwellen) sowie auch abschnittsweise Feste Fahrbahn (FF) zum Einsatz (siehe LO 2.2 aus Projekt P4).

Wesentliche Streckenabschnitte von Meterspuranwendungen sind durch Vignolschienen der Walzprofile 36E1, 46E1 und 54E1 nach EN 13674 [18][19] geprägt (siehe z.B. LO 2.2.1 im Projekt P3). Diese Profile unterscheiden sich nicht nur in der Querkontur ihrer Fahrköpfe, sondern auch in ihrer Höhe und der Schienenfussbreite bzw. ihrer Querschnittsfläche. Entsprechend weisen diese Schienenprofile unterschiedliche Biegegewiderstandsmomente auf.

Einige Gleisabschnitte von Meterspuranwendungen weisen zudem Zahnstangen auf, die in unterschiedlichen Bauformen zum Einsatz kommen. Weiterführende Ausarbeitungen zu Zahnradanwendungen sind abstimmungsgemäss nicht Gegenstand des vorliegenden Dokuments.

3.8.1 Ertragbare Lasten (Fahrwegbeanspruchung)

In Bezug auf die ertragbaren Lasten eines Querschwellengleises im Schotteroberbau ist insbesondere der Querverschiebewiderstand relevant. Die Untersuchung der ertragbaren Gleisquerkraft im Schottergleis ist massgeblich durch die Arbeiten von Prud'Homme [36] geprägt. Die Gleisquerkraft wird für Vollbahnanwendungen durch die Beurteilungsgrösse ΣY (Summe der Führungskräfte je Radsatz, Tabelle 4 der EN 14363 [14]) in der Rubrik der Fahrsicherheit bewertet. Für die hier gegenständlichen Meterspuranwendungen ist die Summe der Führungskräfte ΣY in der AB-EBV [1] Art. 31 Blatt 1 M (Meterspur) Ziffer 2 durch einen Grenzwert limitiert (siehe Tabelle 23 des vorliegenden Dokuments). Wenn gleich eine Feste Fahrbahn eine grössere Gleisquerkraft ohne seitliche Verschiebung ertragen kann, ist hier die Gleisverschiebekraft des Schottergleises für die lauftechnische Prüfung eines Fahrzeugs massgeblich.

Für die eingesetzten Schienen ist je nach Einbausituation (Schienenprofil respektive Biegegewiderstandsmoment, Schwellenabstand, Zwischenlage, Schienenbefestigung etc.) ein Unterschied in der dauerhaft schädigungsfrei ertragbaren Belastung zu erwarten. Die schädigungsfrei ertragbaren Lasten des Fahrwegs von Meterspuranwendungen können von denen der Vollbahn abweichen, bei denen regelmässig «stärkere» Schienenprofile mit längenbezogener Masse von z.B. 54 bis 60 kg/m eingesetzt werden.

AB-EBV [1] Art. 31, Blatt 2 N Ziffer 2.1 definiert für Normalspur-Anwendungen Grenzwerte zu Y_{qst} , Q_{qst} und Q_{max} . Für Meterspur-Anwendungen hingegen benennt AB-EBV [1] Art. 31 Blatt 1 M (Meterspur) Ziffer 2 den Umstand, dass hier bislang keine allgemein gültigen Grenzwerte festgelegt seien. In der BAV-Richtlinie [3] finden sich dahingehend keine Vorgaben.

Abschnitt 7.5 der EN 14363 [14] definiert für Vollbahnanwendungen Grenzwerte für Y_{qst} , Q_{qst} und Q_{max} (siehe Spalte 2 in Tabelle 18), während weitere Grössen der Fahrwegbeanspruchung (B_{qst} , Y_{max} , B_{max} , T_{qst}) ohne den Vergleich mit einem Grenzwert rein informativ zu dokumentieren sind. Die direkte Übertragbarkeit auf Meterspuranwendungen ist wegen der oben genannten Unterschiede fraglich.

Die Netzzugangsbedingungen R-I-50127 [23] der SBB (Vollbahn) legen für den Prüfbereich 5 ($R_B \leq 250$ m) in Abschnitt 3 unter Verweis auf Ergebnisse der UIC 57B/-2 auf Basis von Schienenprofilen mit 46 kg/m Grenzwerte für Q_{qst} , Q_{max} , Y_{qst} , Y_{max} und B_{qst} fest (siehe Spalte 3 in Tabelle 18). Die Tragfähigkeit der zugrundeliegenden Schiene (46 kg/m) deckt also anteilig den oben genannten Wertebereich von 36...46...54 kg/m typischer Schienen der Meterspuranwendungen ab.

Anhang C von CEN/TS 17843 [16] sieht für den Prüfbereich 5 ($100 \text{ m} \leq R_B \leq 250 \text{ m}$) für Normalspuranwendungen vor, dass die Grenzwerte der Fahrwegbeanspruchung gleisspezifisch durch den Infrastrukturmanager festgelegt werden. Tabelle C1 von [16] benennt dazu beispielhaft Grenzwerte für die Grössen Y_{qst} , Q_{qst} und Q_{max} (siehe Spalte 4 in Tabelle 18).

Für Meterspuranwendungen sind bislang keine spezifischen Grenzwerte der Fahrwegbeanspruchung bekannt. Es kann Gegenstand weiterführender Untersuchungen z.B. im Teilvorhaben P4 sein, solche Grenzwerte für die konkreten Schienen und Oberbauformen von Meterspuranwendungen auszuarbeiten (siehe Punkt 2) in Abschnitt 6).

	1	2	3	4	5
Nr.	Grösse	EN 14363 [14] Tabelle 4	SBB R-I-50127 [23] zum Prüfbereich 5 für Schienen 46 kg/m	CEN/TS 17843 [16] Beispiele aus Anhang C	vorläufig für RAILplus- Anwendungen vorgeschlagen (künftig z.B. durch Werte aus Teilprojekt P4 zu ersetzen)
1	Yqst	60 kN	60 kN Wagen 70 kN Lok.+Triebz. (Abschnitt 3.1.6)	60 kN Wagen 70 kN Lok.+Triebzüge	60 kN Wagen 70 kN Lok.+Triebzüge
2	Ymax		110 kN (3.1.4)		110 kN
3	Qqst	145 kN für $P \leq 225$ kN	145 kN (3.1.5)	145 kN	145 kN
4	Qmax	min(90 kN + Q_0 , 200 kN) für $V_{zul} \leq 160$ km/h	180 kN (3.1.5)	min(90 kN + Q_0 , 180 kN)	min(90 kN +Q_0, 180 kN)
5	Bqst		175 kN (3.2.3)		175 kN
6	Bmax				
7	Tqst				

Tabelle 18: Übersicht zu Grenzwerten der Fahrwegbeanspruchung (Spalte 5 enthält vorläufige Werte für Meterspuranwendungen, bis z.B. aus dem Teilprojekt P4 spezifische Vorgaben vorliegen, siehe dazu Punkt 2) in Abschnitt 6)

Tabelle 18 zeigt eine Gegenüberstellung der vorstehend referenzierten Grenzwerte. Spalte 5 der Tabelle 18 enthält auf Basis der gegenwärtigen Datengrundlage einen Vorschlag für vorläufige Grenzwerte von Meterspuranwendungen.

Die in Tabelle 18 bzw. [14] [23] angegebenen Grenzwerte stellen jeweils KO-Kriterien dar, die im Ergebnis die beiden Zustände «eingehalten» oder «nicht eingehalten» ermöglichen. In Bezug auf den tatsächlichen Schädigungseintrag wäre für die Bewertung der Fahrwegbeanspruchung stattdessen auch eine Beanspruchungsziffer denkbar, die z.B. ähnlich einer Komfortbewertung die Einordnung in einem mehrstufigen System erlaubt. Anstelle eines KO-Kriteriums würde dies je Fahrzeugtyp ein entsprechendes Prädikat zur Fahrwegbeanspruchung wie z.B. «gleisfreundlich» oder «nennenswert gleisschädigend» ergeben. Für solch ein Bewertungssystem der Meterspuranwendungen wäre zunächst eine entsprechende Grundlage zu schaffen, siehe Punkt 3) in Abschnitt 6.

3.8.2 Dynamische Gleisbettungseigenschaften

Schiene, Oberbau und Unterbau weisen unter der Lasteinwirkung des Fahrzeugs eine Nachgiebigkeit auf. Dabei sind hier insbesondere die vertikale und laterale Bewegungsrichtung sowie ein «Kippen» der Schiene um ihre Längsachse (wirksame Einbauneigung) relevant. Diese Nachgiebigkeiten (Rezeptanzen) setzen sich aus den frequenzabhängigen Eigenschaften von Schiene, Zwischenlage, Schwellen/Schotter-konfiguration bzw. Fester Fahrbahn und Untergrund etc. zusammen.

Je nach Bauform von Schiene, Ober- und Unterbau können sich deutlich unterschiedliche dynamische Bettungseigenschaften ergeben, siehe z.B. [39],[40] sowie Abschnitt 7.6.2.2 in [9]. Insbesondere für erschütterungstechnische Belange (Frequenzbereich z.B. > 100 Hz) werden die dynamischen Gleiseigenschaften z.B. durch Unterschottermatten, Masse/Feder-Systeme etc. zum Teil gezielt abgestimmt. Sofern die Gleisbettung im lauftechnisch relevanten Frequenzbereich (z.B. bis ca. 20 Hz) keine nennenswerte Nachgiebigkeit aufweist, kann das Gleis für das Abprüfen der Fahrsicherheit im vorliegenden Dokument in guter Näherung als starr angenommen werden. Anderenfalls sind die elastischen

Gleiseigenschaften relevant und können beispielsweise Einfluss auf die Fahrstabilität (verschärfend oder entspannend) zeigen oder im Zusammenwirken mit geometrischen Gleislagefehlern (siehe Abschnitt 3.6, z.B. vertikale Einzelfehler oder «Cyclic Top» [15]) eine anspruchsvolle Fahrzeug/Fahrweg-Interaktion verursachen.

Für lauftechnische Streckenversuche wie auch für lauftechnische Simulationsrechnungen von Meterspuranwendungen ist daher der mögliche Einfluss der Gleisbettung geeignet zu berücksichtigen, wie es beispielweise in Abschnitt 7.6.2.2 in [9] dargelegt ist. Weil die eingesetzten Oberbauformen zwischen den Meterspuranwendungen variieren können, sollten die jeweils anzusetzenden Gleiseigenschaften für die Planung von Fahrversuchen wie auch die Simulationsrechnungen durch die betreffende Bahn z.B. als Eingangsdaten zum Nachweiskonzept benannt werden.

Für die spezifischen Gleisbauarten von Meterspuranwendungen liegen dem gegenständlichen Projektteam P3 keine Mess- oder Rechenergebnisse zu frequenzabhängigen Rezeptanzen oder Übertragungsfunktionen vor. Aus dem Projekt P4 besteht mit [37] ein Bericht der TU München, der jedoch nicht auf ein Gleismodell für lauftechnische Simulationen oder Streckenversuche, sondern Verschleissfaktoren fokussiert. Mit [40] liegen Untersuchungsergebnisse im Gleisnetz der Rhätischen Bahn (RhB) vor, die sich insbesondere auf Einsenkungsmessungen beziehen, aber nicht den Frequenzbereich und die beteiligten Massen des Gleiskörpers ausweisen. Es kann Gegenstand weiterführender Arbeiten sein, die dynamischen Gleiseigenschaften für die Zwecke der Lauftechnik geeignet zu erheben, siehe Punkt 8) in Abschnitt 6.

3.9 Flachrillenbefahrung (soweit tram-ähnliches Spurführungssystem)

Die meisten Meterspuranwendungen verkehren nicht über Flachrillenschienen. Die Flachrillenbefahrung betrifft nur die tram-ähnlichen Bahnen der Systemführerschaft wie gegenwärtig insbesondere die RBS und die Forchbahn.

Flachrillen werden in Herzstückbereichen von Kreuzungen oder Weichen insbesondere dann eingesetzt, wenn die Herzstückwinkel in Kombination mit den Rillenweiten zu gross werden, um bei der Überfahrt genügend Aufstandsweite zwischen Rad und Herzstück zu realisieren, ohne plastische Verformungen der Herzstückspitze zu riskieren.

In der Flachrillenschiene fährt das Rad wie in Tabelle 19 oben links dargestellt mit seiner Spurkranzkuppe auf dem Rillengrund.

Die Flachrillen werden mit Rampen an die Tiefrillenbereiche angeschlossen. Abbildung 8 zeigt einen typischen Verlauf einer Flachrillenrampe, wie er grundlegend in der VDV 600 [34] vorgesehen ist. Punkt A in Abbildung 8 kennzeichnet den Bereich, bis zu dem das Schienenprofil mit der Tiefe der regulären Tiefrillenprofils von z.B. $T_T = 47$ mm ausgeführt ist. Die Rillentiefe T_2 in Punkt B der Abbildung 8 orientiert sich in der Regel an der grössten zulässigen Spurkranzhöhe des betreffenden Verkehrsbetriebs zuzüglich eines Aufschlags von z.B. 2 mm. Damit ist sichergestellt, dass kein Rad auf den Knick an Punkt B auffährt. Vielmehr setzen auch Räder mit dem grösstmöglichen Spurkranz erst zum späteren Punkt C auf den Rillengrund auf. Zwischen den Punkten B und D in Abbildung 8 erstreckt sich die Flachrillenrampe. Die Räder fahren dabei je nach individuellem Verschleisszustand (Spurkranzhöhe) an unterschiedlicher Position mit dem Spurkranz auf den Rillengrund auf (Punkt C in Abbildung 8). Die wirksame (tatsächlich befahrene) Rampenlänge beschränkt sich also auf den Abstand vom Aufsetzpunkt C bis zum Flachrillenprofil in Punkt D. Die wirksame Flachrillenrampe ist also kürzer als der in Abbildung 8 angetragene Abstand der Punkte B und D. In Punkt D der Abbildung 8 ist der Übergang auf die Flachrille mit Rillentiefen von beispielsweise $T_F = 14$ mm abgeschlossen.

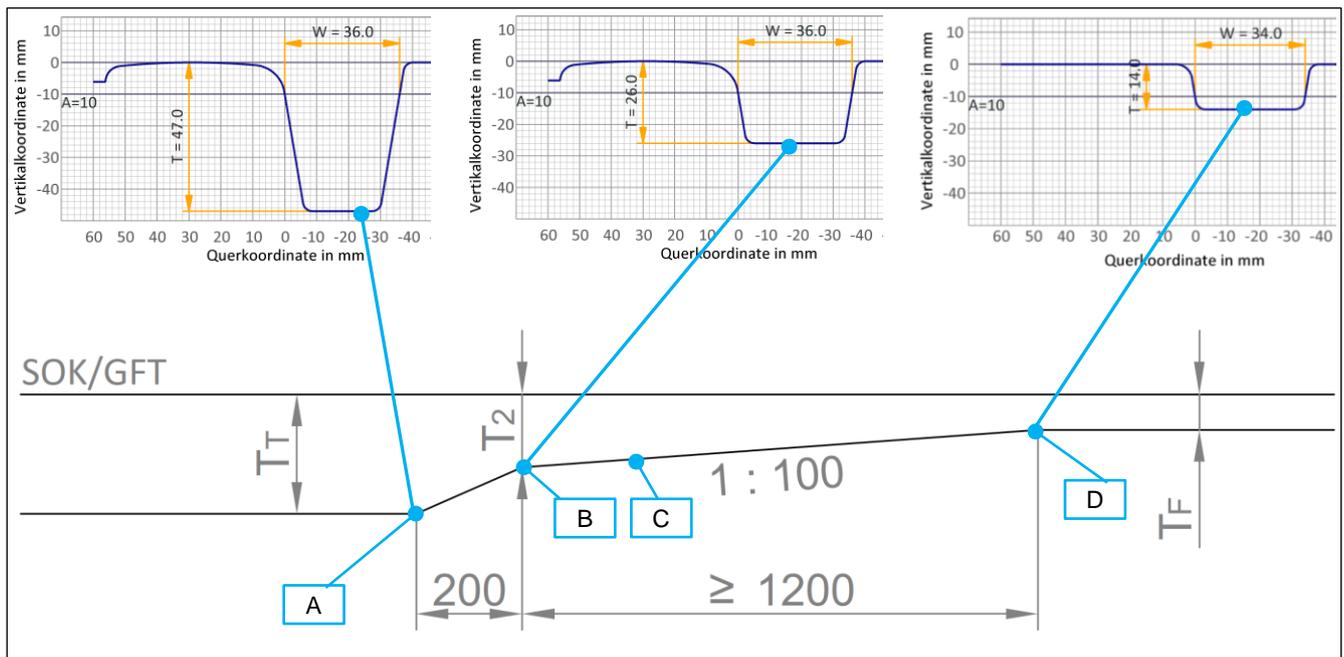
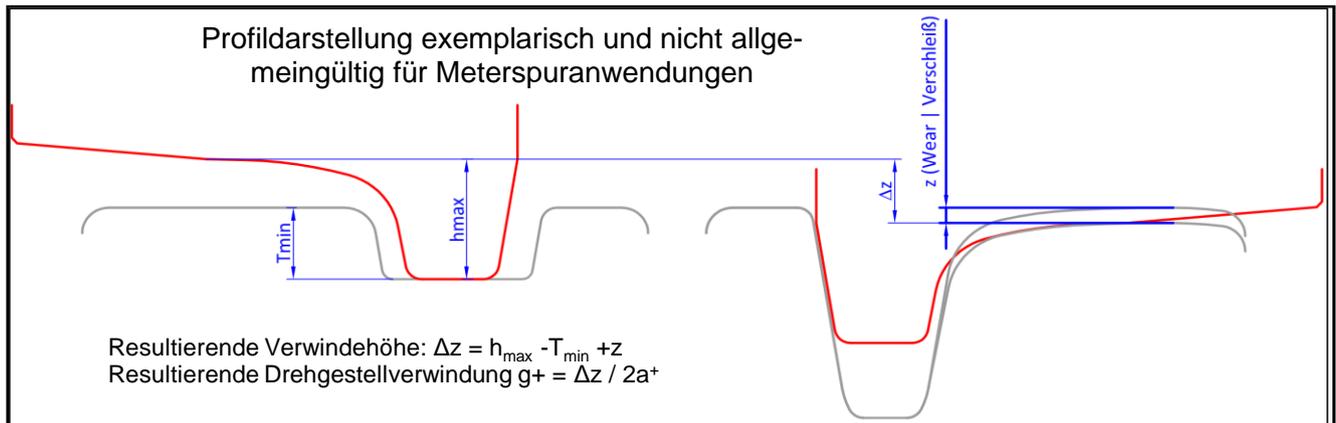


Abbildung 8 – unten: Typischer Verlauf der Anrumpung des Rillenbodens im Längsschnitt beim Übergang von Tief- auf Flachrillen («Flachrillenrampe») – oben: beispielhafte Schienenprofile zu markanten Punkten der Flachrillenrampe

Die in Abbildung 8 mit 1:100 angetragene Neigung der Flachrillenrampe ist dabei entgegen häufiger Missverständnisse nicht ausschlaggebend für die Verwindung im Drehgestell, weil die wirksame Länge der Flachrillenrampe (Punkt C bis D in Abbildung 8) deutlich kürzer als übliche Radsatzstände $2a^+$ im Drehgestell von z.B. $2a^+ = 1.8$ bis 2.5 m ist. Vielmehr ist der nachfolgend thematisierte Höhenunterschied (Verwindehöhe) der Räder für die Verwindung im Drehgestell relevant.

Sofern die Flachrillenrampen von rechter und linker Schiene in Längsrichtung versetzt angeordnet sind oder der eine Schienenstrang in Tief- (Flach-/Tief-Rillenanlage) ausgeführt ist, ergibt sich beim Auf- und Abfahren des Drehgestells jeweils eine Verwindung bzw. diagonal wirksame Radentlastung im Drehgestell.



Nr.	Bezeichnung	Kürzel	Wert	Quelle / Formel	Kommentar
1	Spurkranzhöhe, größte	h_{\max}	24 mm	direkte Eingabe	Beispiel
2	Radsatzstand im Fahrwerk	$2a^+$	1'800 mm	direkte Eingabe	Beispiel
3	Flachrillentiefe, kleinste	T_{\min}	13 mm	direkte Eingabe	Beispiel
4	Vertikalverschleiß umliegender Fahrköpfe	z	7 mm	direkte Eingabe	Beispiel
5	Resultierende Verwindehöhe	Δz	18 mm	$= h_{\max} - T_{\min} + z$ $= 24 - 13 + 7$	Ergebnis aus vorstehenden Zeilen
6	Resultierende Drehgestellverwindung	g^+	10.00 ‰	$= \Delta z / 2a^+ * 1000$ $= 18 / 1800 * 1000$	Ergebnis aus vorstehenden Zeilen

Tabelle 19: Rechengang mit exemplarischen Daten zur Verwindung im Drehgestell bei der Befahrung von Flach/Tief-Rillen-anlagen

Bei der gewöhnlichen Spurführung an der Stirnseite des Rades (Fahrflankenführung) besteht die sensibelste Situation beim Abfahren aus der Flach/Tief-Rillenanlage, wenn ein Rad des zweiten Radsatzes noch angehoben in der Flachrille steht, wodurch das führende bogenäussere Rad des vorlaufenden Radsatzes in der Tiefrille entlastet wird. Für den Fall der Radrückenführung (Leitflankenführung) ergibt sich die vergleichbare Situation beim Auffahren am vorlaufenden bogeninnen führenden Rad.

Tabelle 19 zeigt die Einflussgrößen und den Rechengang zur Ermittlung der Drehgestellverwindung auf. In Tabelle 19 sind weiterhin Beispielwerte angeführt, die aber nicht allgemeingültig sind. Für ein Lastenheft sind dabei die konkreten Grenzwerte der betreffenden Bahn z.B. aus einem bahninternen Spurführungshandbuch und/oder der zugehörigen Quermasstabelle anzuführen.

Wie die Beispielwerte in Tabelle 19 zeigen, können bereits moderate Eingangsdaten eine erhebliche Verwindung g^+ im Drehgestell bewirken, die über gewöhnliche Anforderungen (z.B. $g^+ = 7 \text{ ‰}$ nach EN 14363 [14] oder $g^+ = 6 \text{ ‰}$ nach Abschnitt 3.1.1.1 in BAV [3]) hinausgehen.

3.10 Wirksame Verwindung

In den vorstehenden Abschnitten sind folgende Effekte benannt, die jeder für sich eine Verwindung auf das Fahrzeug bewirken:

- Verwindung aus Überhöhungsrampe, siehe Abschnitt 3.2
- Helixverwindung aus Kombination von kleinem Bogenradius und grosser Längsneigung, siehe Abschnitt 3.5
- Verwindung aus geometrischem Gleislagefehler, siehe Abschnitt 3.6
- bei tram-ähnlicher Anwendung:
Verwindung aus Flach/Tief-Rillenanlage, siehe Abschnitt 3.9

Dabei überlagern sich die am selben Ort auftretenden Verwindungen der vorgenannten Effekte. In ihrer Summe können die Einzelverwindungen sich entweder (teil)kompensieren oder aber verstärken.

In Bezug auf einen Nachweis zur Sicherheit gegen Entgleisen sind die ungünstigsten Kombinationen von Gleisverwindungen relevant. Diese ergibt sich aus den individuellen Fahrwegmerkmalen der jeweiligen Bahn und den grundlegenden Abmessungen des Fahrzeugs (Drehgestellmittenabstand und Radsatzstand).

3.11 Bei Meterspuranwendungen bislang üblicher versuchstechnischer Nachweisumfang

Für Vollbahnanwendungen sind gewisse standardisierte Versuchsumgebungen wie z.B. instrumentierte Messgleisbögen in ebener oder verwundener Ausführung, Anlagen für Nachschiebeversuche etc. bei verschiedenen Prüfstellen verfügbar. Weiterhin sind für den Vollbahnbereich verschiedene Messradsatz-Technologien (z.B. Radscheiben und/oder Wellenmethode der DB-Systemtechnik, IWT 5 TÜV Süd (vormals Interfleet)) für das normale Messverfahren der EN 14363 [14] etabliert. Zudem ist international ein grosses Streckennetz verfügbar, auf dem sich in teils angestammten Streckenabschnitten eine umfangreiche Datenbasis für die statistische Auswertung nach EN 14363 [14] einfahren lässt.

Für die hier gegenständlichen Meterspuranwendungen (zumeist Inselbetriebe) besteht dagegen bei Prüfstellen oder Fahrzeuglieferanten nur wenig Test-Infrastruktur. So ist beispielsweise kein instrumentierter verwundener Messgleisbogen in Meterspurausführung bekannt. Die Infrastruktur der jeweiligen Meterspuranwendungen kann nicht die gleiche Vielfalt, Länge und Anzahl an Messsektionen anbieten, wie dies im europäischen Vollbahnbereich der Fall ist. Messradsätze werden bei Meterspur-Anwendungen unter anderem auch deshalb selten genutzt, weil die verfügbaren Messtechnologien bei den speziell kleinen Bogenradien messtechnisch an ihre Grenzen stossen. Hier wirken sich insbesondere der grosse Anlaufwinkel respektive die Berührvorverlagerung (siehe Lieferobjekt 4.1.3 aus P3) auf die vom Messsystem ermittelten Rad/Schiene-Kräfte aus. So kommt nach Kenntnis des Projektteams P3 in der überwiegenden Anzahl von Fahrversuchen bei Meterspuranwendungen bislang das vereinfachte Verfahren (Beschleunigungsaufnehmer) anstelle des normalen Messverfahrens (Messradsätze) zum Einsatz. Eine mögliche Abklärung künftiger Möglichkeiten von Messradsatzsystemen ist unter Punkt 1) in Abschnitt 6 aufgenommen.

Formal werden Fahrzeuge von Meterspuranwendungen regelmässig die Kriterien zur Anwendung des vereinfachten Verfahrens gemäss Abschnitt 7.2 der EN 14363 [14] erfüllen. Es scheint aber fraglich, ob und wie das vereinfachte Verfahren in Bezug auf die Einflüsse in den kleinen Bogenradien von Meterspuranwendungen (siehe Abschnitt 3.4.2) abgesichert ist. Diese Frage besteht insbesondere vor dem Hintergrund, dass die Rad/Schiene-Interaktion beim vereinfachten Verfahren nicht direkt anhand der Rad/Schiene-Kräfte, sondern anhand von ein bis zwei Federstufen entfernten Beschleunigungen beurteilt wird (siehe Erläuterung in Abschnitt 2.1).

4 Anforderungen an das Fahrverhalten und deren Nachweismethoden

Ausgehend von den in Kapitel 2 aufgeführten Grundlagen und unter Berücksichtigung der lauftechnisch relevanten Merkmale der Meterspuranwendungen aus Kapitel 3 wird nachfolgende Spezifikation technischer Anforderungen an das Laufverhalten und deren Nachweismethoden vorgeschlagen.

4.1 Grundlegendes Vorgehen

4.1.1 Vorschlag zur erstmaligen Zulassung von Fahrzeugtypen

Das normale Messverfahren der EN 14363 [14] bedingt den Einsatz von Messradsätzen zur Erfassung der Rad/Schiene-Kräfte. Messradsätze sind bei lauftechnischen Nachweisen von Meterspuranwendungen wie in Abschnitt 3.11 dargelegt wenig üblich. Stattdessen kommt in den von der BAV-Richtlinie [3] geforderten Fällen das vereinfachte Messverfahren auf Basis von Beschleunigungsmessungen zum Einsatz. Die Beschleunigungssignale des vereinfachten Verfahrens bieten eine effiziente Methode, um insbesondere die Fahrstabilität im geraden Gleis zu bewerten. In den kleinen Bogenradien von Meterspuranwendungen ist der Rückschluss von Beschleunigungen am Drehgestellrahmen und Wagenkasten auf die Rad/Schiene-Geschehnisse jedoch wie in Abschnitt 3.11 dargelegt fraglich.

Daher wird für die erstmalige Zulassung künftiger Fahrzeuge von Meterspuranwendungen das nachfolgend in den Schritten 1 bis 4 dargelegte Vorgehen vorgeschlagen.

Tabelle 20 ordnet dieses schrittweise Vorgehen auf Basis von Bild 1 der EN 14363:2005 (vorherige Fassung zu [14]) in den Prüfablauf ein, wie er grundlegend in Abschnitt 2.4 dargelegt ist.

	1 Zweck nach EN 14363	2 Prüfverfahren nach Bild 1 der EN 14363:2005	3 Einordnung in das vorliegende Dokument
1	Prüfen fahrtechnisch relevanter Fahrzeugparameter	Grobbeurteilung auf Grundlage konstruktiver Baumerkmale	Auslegungsrechnungen zur grundlegenden Fahrzeugbemessung gemäss Punkt a) in Abschnitt 2.4 Dokumentation lauftechnisch relevanter Fahrzeugeigenschaften gemäss Punkt b) in Abschnitt 2.4
2	Prüfen der Fahrfähigkeit		lauftechnische Nachweisrechnungen gemäss Punkt c) in Abschnitt 2.4 und nachfolgend in Schritt 1) detailliert sowie versuchstechnische Nachweise und Plausibilitätsprüfung des MKS-Modells gemäss Punkt d) in Abschnitt 2.4 wie nachfolgend in den Schritten 2) bis 4) detailliert
3	Prüfen des Fahrverhaltens		normales Messverfahren vereinfachtes Messverfahren

Tabelle 20: Einordnung in den Prüfablauf (auf Basis von Bild 1 der EN 14363:2005)

1) Grundlegende lauftechnische Simulationsrechnungen (MKS)

Mehrkörpersystem-Simulationen ermöglichen eine grundlegende Einschätzung des Fahrverhaltens inklusive der Rad-/Schiene-Vorgänge. MKS-Simulationen sind seit geraumer Zeit Stand der Technik insbesondere für die Auslegung neuer Fahrzeuge. Lieferanten von Meterspuranwendungen werden also ohnehin und auch bislang schon derartige Simulationsmodelle ihrer Fahrzeuge aufbauen. In den Simulationen lassen sich die grundlegenden Lauftechnik-Aspekte untersuchen, wie sie in den nachfolgenden Abschnitten 4.2 bis 4.8 gelistet sind. Der konkrete Variationsumfang muss die Besonderheiten des gegenständlichen Fahrzeugs berücksichtigen (z.B. Luft- vs. Stahlfeder, mehrstufige Federung, Fahrzeugkupplungen etc.). Der erforderliche Simulationsumfang ist daher im jeweiligen Nachweiskonzept zu begründen bzw. zu vereinbaren (zum Nachweiskonzept siehe Punkt c) in Abschnitt 2.4).

Das Ergebnis der lauftechnischen Simulationen dient dann einerseits der Verifikation der ursprünglichen Auslegungsrechnungen (siehe Abschnitt 2.4 bzw. LO 6.1.2 zum Projekt P3), durch welche die lauftechnischen Fahrzeugparameter festgelegt wurden. Die Simulationsergebnisse dienen andererseits der vorläufigen Einschätzung des Fahrverhaltens z.B. als Grundlage einer Fahrfähigkeitsbescheinigung bzw. Unbedenklichkeitserklärung, um beispielsweise Streckenfahrversuche durchführen zu dürfen.

Sobald das Simulationsmodell im weiteren Verlauf entsprechend dem nachfolgenden Punkt 4) erfolgreich plausibilisiert ist, dienen die erzielten Simulationsergebnisse weiterhin auch unmittelbar als Nachweis für die Zulassung bzw. die Betriebsbewilligung.

Für die grundlegende Einschätzung des Fahrverhaltens ist dabei wichtig, dass die Simulationsergebnisse nicht ausschliesslich tabellarisch verdichtet in Form von Extremwerten dargelegt werden. Grafische Darstellungen typischer Zeitverläufe (siehe auch Abschnitt 7.7.7.1 der EN 14363 [14]) können hier einen wesentlichen Beitrag zur Beurteilung leisten.

2) Versuchstechnische Nachweise

Versuchstechnische Nachweise erfolgen in einem technisch sinnvollen Umfang und erfüllen die Vorgaben der BAV-Richtlinie [3]:

Es erfolgen Streckenfahrversuche zur Fahrstabilität nach dem vereinfachten Verfahren der EN 14363 [14] im geraden Gleis unter Berücksichtigung der BAV-Richtlinie [3] (Radprofile im auch im eingefahrenen Zustand nach Methode 1 oder 2 aus [3]), siehe Abschnitt 4.2.

Das Störverhalten wird in den Prüfbereichen 1 und 2 nach dem vereinfachten Verfahren der EN 14363 [14] abgeprüft, siehe Abschnitt 4.3.

Der konkrete Versuchsumfang muss die Besonderheiten des gegenständlichen Fahrzeugs berücksichtigen (z.B. Luft- und Notfeder vs. Stahlfeder etc.). Der Umfang ist im jeweiligen Nachweiskonzept (s. Abschnitt 2.4) zu begründen bzw. zu vereinbaren.

Sofern ausgeprägte Schwingungen bei dominanten Frequenzen (Instabilität oder Störverhalten) auftreten, sollten dazu repräsentative Randbedingungen wie insbesondere Spurweite und Schienenprofilkontur erfasst werden, um in Schritt 4 einen Abgleich mit dem Simulationsmodell zu ermöglichen.

3) Messtechnische Grundlagen zur Plausibilitätsprüfung des Simulationsmodells

Die zuvor in Schritt 1) dargelegten Simulationsergebnisse hängen unmittelbar von den Eingangsdaten und dem Detaillierungsgrad der Simulation ab. Um sicherzustellen und darzulegen, dass das Simulationsmodell die lauftechnisch relevanten Fahrzeugeigenschaften hinreichend gut wiedergibt oder ggf. zur sicheren Seite berücksichtigt, wird eine Plausibilitätsprüfung des Modells (siehe Punkt 15) in Abschnitt 2.1) gegenüber Messergebnissen vorgeschlagen.

Für eine vollständige Validierung des Modells (siehe Punkt 15) in Abschnitt 2.1), wie sie in Anhang T der EN 14363 [14] spezifiziert ist, fehlt bei Meterspuranwendungen wie zu Beginn dieses Abschnitts dargelegt in der Regel die Datenbasis (begrenzt auf vereinfachtes Verfahren sowie Fahrstabilität nach BAV-Richtlinie [3]). Daher wird für künftige Fahrzeuge von Meterspuranwendungen anstelle einer Validierung eine gezielte Plausibilitätsprüfung des Simulationsmodells vorgeschlagen.

Für eine Plausibilitätsprüfung stehen einerseits die Messergebnisse zur Fahrstabilität und dem Störverhalten aus dem vorstehenden Schritt 2) zur Verfügung.

Weiterhin werden nachfolgende Messungen in Anlehnung an Anhang T (Tab. T.1) der EN 14363 [14] als grundlegende Datenbasis für die Plausibilitätsprüfung des Modells vorgeschlagen. Diese Messungen erfordern nicht den Einsatz einer dafür akkreditierten Prüfstelle, sondern können z.B. durch eigene Messmittel des (Fahrzeug-)Lieferanten erhoben werden. In Relation zu gängigen Herstellertoleranzen von Federelementen oder Masseeigenschaften sind dabei auch sehr pragmatische Mittel wie der Einsatz von Smartphones beispielsweise zur Ermittlung von Eigenfrequenzen denkbar.

Der tatsächliche Umfang an Messungen muss die Besonderheiten des jeweiligen Fahrzeugtyps berücksichtigen und ist im Nachweiskonzept (s. Abschnitt 2.4) entsprechend zu vereinbaren. Analog zu Fahrversuchen nach EN 14363 [14] wird dabei von Messungen an einem repräsentativen Fahrzeug (Typentest) ausgegangen.

- a) Messung aller statischen Radaufstandskräfte im ebenen, geraden Gleis
(Dies sollte unabhängig von der hier gegenständlichen Plausibilitätsprüfung ohnehin Teil der Serientests sein)
- b) Messung der statischen Aufstandskräfte unter gezielt aufgebrauchten Verwindungen (Variation von Verwindungen im Drehgestell sowie zwischen den Wagenteilen etc.)
 - z.B. sofern keine Reibhysteresen beteiligt sind, stufenweise durch Beilagen
 - z.B. auf dem Drehgestell-Abdruckprüfstand, ggf. unter Blockierung der Federstufen zur Ermittlung der Torsionssteifigkeit der vollausgerüsteten Fahrwerkrahmen, und/oder am Gesamtfahrzeug (auf der Radlastwaage oder unter den Lagergehäusen), in relevanten Beladezuständen (Leerzustand, ggf. Teilbeladung z.B. bei mehrstufiger Federkennlinie)
- c) Messung grundlegender Eigenfrequenzen im Wagenkasten z.B. Tauchen, Wanken, Nicken (Starrkörperfrequenzen),
 - ggf. zugehörige Abklingraten bzw. Dämpfung,
 - ggf. auch elastische Wagenkastenmoden in Torsion oder Biegung z.B. ≤ 10 Hz, sowie Messung des Neigungskoeffizienten (z.B. Anhang D der EN 14363 [14], 2.3 in [3])
 - ggf. inklusive Federwegen, jeweils für relevante Beladungszustände
- d) ggf. Messung des Drehgestell-Ausdrehwiderstands
(z.B., wenn nicht ausschliesslich Kugeldrehverbindung (Drehkranz) sondern Reibelemente oder Schlingerdämpfer bzw. Gleitplatten der Noffedern von Luftfedersystemen am Ausdrehvorgang beteiligt sind)
- e) ggf. Messung relevanter Eigenschaften einzelner Komponenten oder Subsysteme und Verwendung der gemessenen Kenngrößen im Simulationsmodell

Die durchgeführten Messungen sind als integraler Bestandteil der Nachweiskette geeignet zu dokumentieren (z.B. Verwiegeprotokoll, Messbericht etc.).

4) Plausibilitätsprüfung des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell aus Schritt 1 wird durch einen Abgleich mit Messdaten des realen Fahrzeugs (Schritte 2 und 3) verifiziert, sofern eine vollständige Validierung nach Anhang T der EN 14363 [14] mangels verfügbarer Daten wie eingangs beschrieben nicht möglich ist. Der Umfang der Plausibilitätsprüfung orientiert sich an den individuellen Fahrzeugmerkmalen bzw. den daraus bereits zuvor abgeleiteten Messungen in Schritt 3.

Folgende Vergleiche werden grundlegend vorgeschlagen:

- I. Vergleich statischer Radlasten Q_0 in relevanten Beladungszuständen (z.B. Leerzustand, Teilbeladung bei mehrstufiger Federstufe, max. Beladung) sowie davon abgeleitet
 - die statische Radsatzlast P, Summe Q je Drehgestell, Summe Q je Fahrzeugseite, jeweils unter Einhaltung der Vergleichskriterien nach Tabelle T.1 der EN 14363 [14],
 - sowie für die statische Radlast Q_0 nach Abschnitt T.3.3.3.1 die qualitative Vorgabe einer möglichst geringen Abweichung, Orientierung z.B. entsprechend der Vorgabe zu Q_{qst} von max. 8 %, für Reibungsdämpfung bis zu 15 % maximale Abweichung je Rad
- II. Vergleich der Radentlastung unter Verwindung (zu 3b oben)

Für die Zwecke der Sicherheit gegen Entgleisen sollte das Simulationsmodell einen Ansatz zur sicheren Seite verfolgen. Gegenüber Messergebnissen sollte sich in der Simulation bei ansonsten identischen Randbedingungen (Fahrzeugmasse, Verwindung etc.) jeweils eine grössere Radlaständerung (steiferes System im Modell) ergeben. Dazu werden die verschiedenen Messungen unter aufgebrachtener Verwindung jeweils in der Simulation nachgebildet und die resultierende Radentlastung verglichen.
- III. Vergleich grundlegender Eigenfrequenzen (zu Schritt 3c oben)

Aus den Messergebnissen etwaiger Torsions- und Biegemoden resultiert das Erfordernis oder die Bestätigung, ob und inwieweit elastische Moden des Fahrzeugaufbaus im lauftechnischen Simulationsmodell berücksichtigt werden müssen (ggf. unterschiedlich je nach Lauftechnik-Disziplin wie Fahrstabilität und Entgleisungssicherheit etc.).

Der Vergleich der grundlegenden Starrkörperfrequenzen aus Messung und Simulation ermöglicht eine grundlegende Plausibilitätsprüfung des Zusammenspiels beteiligter Massen, Massenträgheitsmomente, Federkennlinien und Schwerpunktlagen.

Der Abgleich der Abklingraten aus Messung und Simulation erlaubt die Plausibilitätsprüfung der effektiven Dämpfung, wie sie z.B. bei hydraulischen Dämpfern neben der eigentlichen Dämpfungskennlinie auch von der mechanischen Serienschaltung der elastischen Befestigung «Dämpferaugen» beeinflusst wird.

Für den Abgleich der Frequenzen in Modell und Messung werden analog zu Tabelle T.1 der EN 14363 [14] keine konkreten Vorgaben formuliert. Ziel ist ein Abbild des grundlegenden Charakters.
- IV. Vergleich des Neigungskoeffizienten (zu Schritt 3c oben)

Der Abgleich des Neigungskoeffizienten ermöglicht einerseits eine grundlegende Plausibilitätsprüfung des Zusammenspiels beteiligter Massen, Massenträgheitsmomente, Federkennlinien und Schwerpunktlagen. Der Abgleich sichert andererseits eine wesentliche Eingangsgrösse des Lichtraumnachweises (Einschränkungsrechnung) ab, siehe auch Abschnitt 2.3 in [3].
- V. ggf. Vergleich des Ausdrehwiderstands (zu Schritt 3d oben)

Der Abgleich des Ausdrehwiderstands stellt sicher, dass grundlegende Einflussgrössen wie beispielsweise die Reibungszahl eines seitlichen Gleitstücks oder der Luftfedertraverse (z.B. Noffeder mit Gleitplatten) im Modell richtig wiedergegeben werden.

Für den Abgleich der Ausdrehwiderstands in Modell und Messung werden analog zu Tabelle T.1 der EN 14363 [14] keine konkreten Vorgaben formuliert. Relevant ist die

Übereinstimmung des grundlegenden Musters, wie es sich z.B. aus Haft- und Gleitreibung, etwaigem Spiel oder elastischen Anteilen im Ausdrehdiagramm ergeben kann.

VI. Abgleich zur Fahrstabilität und zum Störverhalten (zu Schritt 2 oben)

Sofern in den Fahrversuchen in Schritt 2 charakteristische Schwingungen aufgetreten sind, sollten diese in Frequenz und Amplitude unter vergleichbaren Randbedingungen in ähnlicher Weise auch im Simulationsergebnis auftreten.

Dies kann gleichermassen eine Drehgestellinstabilität, niederfrequente Wagenkastenschwingungen oder auch das Störverhalten des Fahrzeugs (z.B. Eigenschwingung um die Hochachse) betreffen.

Dieser Abgleich ist nur möglich, wenn geeignete Daten zu Rad- und Schienenprofilen sowie Trassierung und ggf. Gleislage vorliegen. Diese Voraussetzung ist durch den Einsatz eines Meterspur-Gleismesswagens (MWMS) zunehmend gegeben.

Für diesen Abgleich zwischen Modell und Messung eignet sich analog zu Tabelle T.1 der EN 14363 [14] eine Kombination aus Zeitverlauf und Amplitudenspektrum (FFT). Dabei muss das grundlegende Schwingungsbild von Modell und Messung übereinstimmen.

Die Plausibilitätsprüfung des Simulationsmodells inklusive daraus abgeleiteter Modelländerungen ist geeignet zu dokumentieren und als Teil der Zulassungsunterlagen dem Besteller zu übermitteln.

Aus dem vorstehenden Vergleich von Simulations- und Messergebnissen kann sich das Erfordernis von Änderungen am Simulationsmodell ergeben. In dem Fall müssen die ursprünglich in Schritt 1 durchgeführten Simulationsrechnungen geeignet überarbeitet werden (z.B. Deklaration von Änderungen zur sicheren Seite oder Wiederholung von Rechenläufen nebst Auswertung mit dem verifizierten Simulationsmodell).

Es ist bekannt, dass Abschnitt T.3.3.3.3.1 der EN 14363 [14] eine Beurteilung von Rad/Schiene-Kräften nur für solche Simulationsmodelle vorsieht, die erfolgreich gegenüber gemessenen Rad/Schiene-Kräften validiert wurden. Dies ist für Meterspuranwendungen aus den oben genannten Gründen (keine Messradsätze) in der Regel nicht möglich. Die vorstehend beschriebene Plausibilitätsprüfung stellt unter diesen Umständen einen grundlegenden und bestmöglichen Modellabgleich sicher. Von daher scheint eine Bewertung der Rad-/Schiene-Kräfte von Meterspuranwendungen mit dem so verifizierten Simulationsmodell trotzdem sinnvoll, obwohl dies dem Abschnitt T.3.3.3.3.1 der EN 14363 [14] widerspricht.

4.1.2 Vorschlag zum Vorgehen bei Änderungen oder bauähnlichen Fahrzeugtypen

Bei Änderungen an einem bereits zugelassenen Fahrzeug oder für die Zulassung bauähnlicher Fahrzeuge sieht Anhang U der EN 14363 [14] für Vollbahnfahrzeuge das in Abschnitt 2.1 beschriebene λ -Verfahren vor. In Abhängigkeit technischer Unterschiede zum bereits zugelassenen Referenzfahrzeug kann sich aus dem λ -Verfahren gegenüber dem vollen Nachweisumfang z.B. eine Befreiung von weiteren lauftechnischen Nachweisen oder ein reduzierter Nachweisumfang zum dynamischen Fahrverhalten ergeben.

Hinweis: Das λ -Verfahren schliesst nicht den Nachweis zur Sicherheit gegen Entgleisen (SgE) im verwundenen Gleis (siehe Abschnitt 4.5) mit ein.

Anhang U der EN 14363 [14] setzt für das λ -Verfahren erfolgreiche Lauftechnikmessungen des Referenzfahrzeugs voraus. Für Bestandsfahrzeuge der hier gegenständlichen Meterspuranwendungen stehen wie in Abschnitt 3.11 geschildert in der Regel keine oder nur anteilige Versuchsergebnisse zur Verfügung. Diese Fahrzeuge sind daher mangels positiver Messresultate auch bei jahrelanger Betriebsbewährung formal nicht zum λ -Verfahren zugelassen.

Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, wird für Meterspuranwendungen vorgeschlagen, bei fehlenden lauftechnischen Messergebnissen von Bestandsfahrzeugen auch eine entsprechend gut dokumentierte positive Betriebsbewährung des Fahrzeugs als Voraussetzung für das λ -Verfahren zu akzeptie-

ren. Eine laufftechnisch positive Betriebsbewährung setzt dabei einen nennenswerten Einsatz des Referenzfahrzeugs im Regelverkehr ohne fahrzeugseitige Auffälligkeiten wie beispielsweise vom Fahrpersonal rapportiertes merkliches Schlingerverhalten, unruhiger Lauf, abnorme Änderungen der Radprofile oder gar Entgleisungsvorgänge voraus. Es kann Gegenstand weiterführender Arbeiten sein, dahingehend einheitliche Kriterien zu erarbeiten (siehe Punkt 6) in Abschnitt 6). Es wird vorgeschlagen, eine solche positive Betriebsbewährung mit dem Erreichen eines kleinsten Sicherheitsfaktors von $\lambda = 110\%$ für den Anhang U der EN 14363 [14] gleichzusetzen, so dass der volle Wertebereich von Parameteränderungen anwendbar ist.

Das λ -Verfahren darf entsprechend diesem Vorschlag angewandt werden, wenn mindestens eines der folgenden Kriterien für das zugrundeliegende Referenzfahrzeug erfüllt ist:

- a) Bei fehlenden Messdaten eines Bestandsfahrzeugs, sofern eine laufftechnisch positive Betriebsbewährung dieses Fahrzeugtyps gegeben ist (siehe auch Punkt 6)
- b) Bei Vorliegen laufftechnischer Nachweise entsprechend Tabelle 22 und Tabelle 23 (sofern der kleinste Sicherheitsfaktor kleiner als $\lambda = 1.1$ ist, erfolgt eine Skalierung des nachweisfrei änderbaren Wertebereichs entsprechend der Vorgaben in Anhang U der EN 14363 [14])

Die nachfolgende Tabelle 21 basiert auf der Tabelle U.1 der EN 14363 [14]. Tabelle 21 ist anwendbar, sofern die vorstehende Voraussetzung zum λ -Verfahren erfüllt ist. Die Spaltennummerierung in Tabelle 21 ist von der Tabelle U.1 der EN 14363 [14] übernommen. Die Parameter in Spalte 1 der Tabelle 21 sind aus Tabelle U.1 der EN 14363 [14] übertragen.

Die Spalten 2a und 2c der Tabelle 21 enthalten einen Vorschlag für Parameteränderungen von Meterspuranwendungen, innerhalb derer keine weiteren Nachweise zum dynamischen Fahrverhalten erforderlich sind. Die Wertebereiche in Tabelle 21 stimmen zunächst mit denen der Tabelle U.1 der EN 14363 [14] überein, wie er auf langjährigen Erfahrungen aus dem Vollbahnbereich beruht. Es liegen derzeit keine Untersuchungen vor, nach denen dieser Wertebereich für Meterspuranwendungen weiter eingeschränkt werden müsste oder erweitert werden dürfte. Es kann Gegenstand weiterführender Untersuchungen sein, den Wertebereich des λ -Verfahrens in Tabelle 21 für Meterspuranwendungen anzupassen (siehe Punkt 7) in Abschnitt 6).

In den Geltungsbereichen in Zeile 1 der Spalten 2a und 2c von Tabelle 21 sind selbstfahrende und gezogene Sondermaschinen ergänzt, wie es der Anhang S der EN 14363 [14] darlegt.

Sofern alle Parameteränderungen innerhalb der Wertebereiche der Spalten 2a bzw. 2c der Tabelle 21 verbleiben, sind für diesen Umbau oder dieses bauähnliche Fahrzeug keine weiteren Nachweise zum dynamischen Fahrverhalten erforderlich. Entsprechend kann dieses Vorhaben im Kontext der RTE 49100 [8] in Bezug auf das dynamische Fahrverhalten als unwesentliche Änderung eingestuft werden.

Die Spalten 2b und 2d der Tabelle U.1 der EN 14363 [14] beziehen sich auf Parameteränderungen, in denen Versuche nach dem vereinfachten Messverfahren vorgesehen sind. Da im vorliegenden Dokument ohnehin Fahrversuche nach dem vereinfachten Messverfahren in Kombination mit Simulationsrechnungen vorgeschlagen werden (siehe Abschnitt 4.1.1), entfallen die Spalten 2b und 2d in der Tabelle 21.

Die Spalten 3a bis 3d der Tabelle 21 korrespondieren zu den gleichnamigen Spalten der Tabelle U.1 der EN 14363 [14]. Sofern die Änderungen bzw. Unterschiede zum Referenzfahrzeug die Wertebereiche der Spalten 2a bzw. 2c der Tabelle 21 verlassen, sind die in den Spalten 3a bis 3d der Tabelle 21 deklarierten Nachweise vorgeschlagen.

Die Prüfbereiche in Spalte 3c der Tabelle 21 sind gegenüber der EN 14363 [14] um den hier gegenständlichen Prüfbereich 5 (siehe Abschnitt 3.4) erweitert. Die Inhalte der Spalten 3a bis 3d der Tabelle 21 orientieren sich dabei an den Vorgaben aus der Tabelle U.1 der EN 14363 [14], referenzieren aber jeweils die im vorliegenden Bericht in den Abschnitten 4.2 und 4.3 spezifisch für Meterspuranwendungen vorgeschlagenen Nachweise.

	1	2a	2c	3a	3b	3c	3d
Nr.	Parameter nach Tabelle U.1 der EN 14363 [14]	Bereich der Parameteränderung (bezogen auf die Nominalwerte)		Erforderlicher Nachweisumfang (für Änderungen ausserhalb der Parameter in Spalten 2a und 2c)			
1		Lokomotiven, Triebzüge, Reisezugwagen (auch selbstfahrende Sonderfahrzeuge)	Güterwagen (auch gezogene Sonderfahrzeuge)				
2		für Befreiung von weiteren Nachweisen	für Befreiung von weiteren Nachweisen	Prüfbereich 1	Prüfbereich 2	Prüfbereiche 3 bis 5	zu prüfender Konizitätsbereich
3	Betriebliche Parameter						
4	Erhöhung der zulässigen Fahrgeschwindigkeit	keine Befreiung	keine Befreiung	Nachweise zur Stabilität entsprechend Tabelle 22 sowie zum Prüfbereich 1 entsprechend Tabelle 23	Nachweise zum Prüfbereich 2 entsprechend Tabelle 23	--	Fahrwerkstabilität und niederfrequente Wagenkastenschwingungen
5	Erhöhung des zulässigen Überhöhungsfehlbetrags	keine Befreiung	keine Befreiung	Nachweise entsprechend Tabelle 22 und Tabelle 23			
6	Fahrzeugparameter						
7	Drehgestellmittenabstand $2a^*$	-5 % bis +20 %	wenn $2a^* \geq 9$ m: -15 % bis ∞ wenn $2a^* < 9$ m: -5 % bis ∞	Nachweise zur Stabilität entsprechend Tabelle 22 sowie zum Prüfbereich 1 entsprechend Tabelle 23 im Leerzustand	--	--	niederfrequente Wagenkastenschwingungen
8	Radsatzstand 2achsiger Fahrzeuge $2a^*$	nicht anwendbar	wenn $2a^* \geq 8$ m: -15 % bis ∞ wenn $2a^* < 8$ m: -5 % bis ∞	Nachweise zur Stabilität entsprechend Tabelle 22 sowie zum Prüfbereich 1 entsprechend Tabelle 23 im Leerzustand	--	--	Fahrwerkstabilität und niederfrequente Wagenkastenschwingungen

	1	2a	2c	3a	3b	3c	3d
Nr.	Parameter nach Tabelle U.1 der EN 14363 [14]	Bereich der Parameteränderung (bezogen auf die Nominalwerte)		Erforderlicher Nachweisumfang (für Änderungen ausserhalb der Parameter in Spalten 2a und 2c)			
1		Lokomotiven, Triebzüge, Reisezugwagen (auch selbstfahrende Sonderfahrzeuge)	Güterwagen (auch gezogene Sonderfahrzeuge)				
2		für Befreiung von weiteren Nachweisen	für Befreiung von weiteren Nachweisen	Prüfbereich 1	Prüfbereich 2	Prüfbereiche 3 bis 5	zu prüfender Konizitätsbereich
9	Virtuelle Schwerpunktlage	trifft auf Meterspuranwendungen nicht zu, gilt gemäss Fussnote i der Tabelle U.1 der EN 14363 [14] für Überhöhungsfehlbeträge der Normalspur von $üf_{zul} > 165$ mm (entspricht $üf_{zul} > 116$ mm bei Meterspur, siehe Umrechnung in Abschnitt 3.4.1)					
10	Schwerpunkthöhe leeres Fahrzeug h_g	-20 % bis +10 %	-100 % bis +20 %	Nachweise zur Stabilität entsprechend Tabelle 22 sowie zum Leerfahrzeug in Prüfbereich 1 entsprechend Tabelle 23	Nachweise zum Prüfbereich 2 entsprechend Tabelle 23 für das Leerfahrzeug	--	niederfrequente Wagenkastenschwingungen
11	Schwerpunkthöhe beladenes Fahrzeug h_g	-20 % bis +10 %	-100 % bis +50 %	Nachweise zur Stabilität entsprechend Tabelle 22 sowie zum beladenen Fahrzeug in Prüfbereich 1 entsprechend Tabelle 23	Nachweise zum Prüfbereich 2 entsprechend Tabelle 23 für das beladene Fahrzeug	--	niederfrequente Wagenkastenschwingungen
12	Schwerpunkthöhe beladenes Fahrzeug χ $\chi = Q_0(1+2.3 h_g üf/(2b_A)^2)$	trifft auf Meterspuranwendungen nicht zu, gilt für statische Radsatzlasten >22.5 t bzw. statische Radsatzaufstandskräfte $P > 225$ kN (hängt vom Fahrwegbeanspruchungsfaktor λ' ab, siehe Abschnitt 7.7.7.1 bzw. U.1 der EN 14363 [14])					
13	Massenträgheitsmoment des Fahrzeugaufbaus um die z-Achse (Drehgestellfahrzeuge)	-10 % bis +10 %	-10 % bis +10 %	Nachweise entsprechend Tabelle 22 und Tabelle 23			

	1	2a	2c	3a	3b	3c	3d
Nr.	Parameter nach Tabelle U.1 der EN 14363 [14]	Bereich der Parameteränderung (bezogen auf die Nominalwerte)		Erforderlicher Nachweisumfang (für Änderungen ausserhalb der Parameter in Spalten 2a und 2c)			
1		Lokomotiven, Triebzüge, Reisezugwagen (auch selbstfahrende Sonderfahrzeuge)	Güterwagen (auch gezogene Sonderfahrzeuge)				
2		für Befreiung von weiteren Nachweisen	für Befreiung von weiteren Nachweisen	Prüfbereich 1	Prüfbereich 2	Prüfbereiche 3 bis 5	zu prüfender Konizitätsbereich
14	Massenträgheitsmoment des Fahrzeugaufbaus um die z-Achse (Fahrzeug ohne Drehgestell)	nicht anwendbar	-100 % bis +10 %	Nachweise zur Stabilität entsprechend Tabelle 22 sowie zum Prüfbereich 1 entsprechend Tabelle 23	--	--	Fahrwerkstabilität und niederfrequente Wagenkastenschwingungen
15	Fahrzeugleermasse für Fahrzeuge mit Leermasse ≥ 12 t (Fahrzeuge ohne Drehgestell) oder ≥ 16 t (Drehgestellfahrzeuge)	nicht anwendbar	-15 % bis ∞	Nachweise zur Stabilität entsprechend Tabelle 22 sowie zum Prüfbereich 1 entsprechend Tabelle 23 für das Leerfahrzeug	--	--	Fahrwerkstabilität und niederfrequente Wagenkastenschwingungen
16	Maximale nominale statische Radsatzaufstandskraft P	nicht anwendbar	-100 % bis +5 %	--	Nachweise entsprechend Tabelle 23		--
17	Verwindekoeffizient bei Ausgangswert $ct^* \leq 3 \cdot 10^{10}$ kN mm ² /rad	nicht anwendbar	-66 % bis 200 %	--	--	--	--
18	Verwindekoeffizient bei Ausgangswert $ct^* > 3 \cdot 10^{10}$ kN mm ² /rad	nicht anwendbar	-50 % bis ∞	--	--	--	--
19	Fahrwerksparameter						

	1	2a	2c	3a	3b	3c	3d
Nr.	Parameter nach Tabelle U.1 der EN 14363 [14]	Bereich der Parameteränderung (bezogen auf die Nominalwerte)		Erforderlicher Nachweisumfang (für Änderungen ausserhalb der Parameter in Spalten 2a und 2c)			
1		Lokomotiven, Triebzüge, Reisezugwagen (auch selbstfahrende Sonderfahrzeuge)	Güterwagen (auch gezogene Sonderfahrzeuge)				
2		für Befreiung von weiteren Nachweisen	für Befreiung von weiteren Nachweisen	Prüfbereich 1	Prüfbereich 2	Prüfbereiche 3 bis 5	zu prüfender Konizitätsbereich
20	Radsatzstand im Drehgestell 2a ⁺ (Drehgestellfahrzeuge)	0 % bis +5 %	0 % bis +10 %	--	--	Nachweise entsprechend Tabelle 23 zu den Prüfbereichen 3 bis 5	--
21	Radnenndurchmesser	-10 % bis +15 %	-10 % bis +15 %	Nachweise entsprechend Tabelle 22 und Tabelle 23			
22	ungefederte Masse	-100 % bis +5 %	nicht anwendbar	Nachweise zur Stabilität entsprechend Tabelle 22 sowie zum Prüfbereich 1 entsprechend Tabelle 23 für das Leerfahrzeug	Nachweise zum Prüfbereich 2 entsprechend Tabelle 23 für das Leerfahrzeug	--	Fahrwerkstabilität
23	rein primär gefederte Masse (bei Fahrzeugen mit mehr als einer Federstufe)	-5 % bis +5 %	nicht anwendbar	Nachweise zur Stabilität entsprechend Tabelle 22 sowie zum Prüfbereich 1 entsprechend Tabelle 23 für das Leerfahrzeug	Nachweise zum Prüfbereich 2 entsprechend Tabelle 23 für das Leerfahrzeug	--	Fahrwerkstabilität
24	sekundär gefederte Masse	-10 % bis +10 %	nicht anwendbar	Nachweise entsprechend Tabelle 22 und Tabelle 23			

	1	2a	2c	3a	3b	3c	3d
Nr.	Parameter nach Tabelle U.1 der EN 14363 [14]	Bereich der Parameteränderung (bezogen auf die Nominalwerte)		Erforderlicher Nachweisumfang (für Änderungen ausserhalb der Parameter in Spalten 2a und 2c)			
1		Lokomotiven, Triebzüge, Reisezugwagen (auch selbstfahrende Sonderfahrzeuge)	Güterwagen (auch gezogene Sonderfahrzeuge)				
2		für Befreiung von weiteren Nachweisen	für Befreiung von weiteren Nachweisen	Prüfbereich 1	Prüfbereich 2	Prüfbereiche 3 bis 5	zu prüfender Konizitätsbereich
25	Summe der nominalen statischen Radsatzaufstandskräfte je Fahrwerk, wenn das Fahrzeug keine zweite Federstufe hat	-5 % bis +5 %	nicht anwendbar	Nachweise zur Stabilität entsprechend Tabelle 22 sowie zum Prüfbereich 1 entsprechend Tabelle 23 für das Leerfahrzeug	Nachweise zum Prüfbereich 2 entsprechend Tabelle 23 für das Leerfahrzeug	--	Fahrwerkstabilität
26	Massenträgheitsmoment des gesamten Fahrwerks (vsl. um seine z-Achse)	-100 % bis +5 %	-100 % bis +10 %	Nachweise zur Stabilität entsprechend Tabelle 22 sowie zum Prüfbereich 1 entsprechend Tabelle 23 für das Leerfahrzeug	Nachweise zum Prüfbereich 2 entsprechend Tabelle 23 für das Leerfahrzeug	--	Fahrwerkstabilität wenn > 5 %
27	Verhältnis zwischen der Steifigkeit der primären vertikalen Federung und deren Auflast (Fahrzeuge mit zwei Federstufen) (c_{z+}/F_{z+}) über dem gesamten Lastbereich	-20 % bis +20 %	-20 % bis +25 %	Nachweise zur Stabilität entsprechend Tabelle 22 sowie zum Prüfbereich 1 entsprechend Tabelle 23 für das Leerfahrzeug	Nachweise zum Prüfbereich 2 entsprechend Tabelle 23 für das Leerfahrzeug	--	niederfrequente Wagenkastenschwingungen wenn < -20 %

	1	2a	2c	3a	3b	3c	3d
Nr.	Parameter nach Tabelle U.1 der EN 14363 [14]	Bereich der Parameteränderung (bezogen auf die Nominalwerte)		Erforderlicher Nachweisumfang (für Änderungen ausserhalb der Parameter in Spalten 2a und 2c)			
1		Lokomotiven, Triebzüge, Reisezugwagen (auch selbstfahrende Sonderfahrzeuge)	Güterwagen (auch gezogene Sonderfahrzeuge)				
2		für Befreiung von weiteren Nachweisen	für Befreiung von weiteren Nachweisen	Prüfbereich 1	Prüfbereich 2	Prüfbereiche 3 bis 5	zu prüfender Konizitätsbereich
28	Verhältnis zwischen der Steifigkeit der sekundären vertikalen Federung und deren Auflast (gesamte Steifigkeit bei Fahrzeugen mit einer Federstufe) (c_z^*/F_z^*) über dem gesamten Lastbereich	-10 % bis +10 %	-10 % bis +25 %	Nachweise zur Stabilität entsprechend Tabelle 22 sowie zum Prüfbereich 1 entsprechend Tabelle 23 für das Leerfahrzeug	Nachweise zum Prüfbereich 2 entsprechend Tabelle 23 für das Leerfahrzeug	--	niederfrequente Wagenkastenschwingungen wenn < -10 %
29	Radsatzführung (Steifigkeit)	0 % bis +10 %	keine Befreiung	Nachweise zur Stabilität entsprechend Tabelle 22 sowie zum Prüfbereich 1 entsprechend Tabelle 23 für das Leerfahrzeug	Nachweise zum Prüfbereich 2 entsprechend Tabelle 23 für das Leerfahrzeug	--	Fahrwerkstabilität wenn < 0 %
30	Ausdrehwiderstand des Drehgestells	-10 % bis +10 %	-20 % bis +20 %	Nachweise entsprechend Tabelle 22 und Tabelle 23			
31	Steifigkeit der sekundären Querfederung, Spiele (unter Berücksichtigung von Anschlägen)	-10 % bis +10 %	keine Befreiung	Nachweise entsprechend Tabelle 22 und Tabelle 23			
32	Sekundäre Querdämpfung	-30 % bis +30 %	keine Befreiung	Nachweise entsprechend Tabelle 22 und Tabelle 23			

Tabelle 21: Vorschlag zur Anwendung der Tabelle U.1 der EN 14363 [14] zum dynamischen Fahrverhalten von Meterspuranwendungen (unbenommen davon können andere Nachweise z.B. zur Sicherheit gegen Entgleisen im verwundenen Gleis erforderlich sein)

4.2 Fahrstabilität

In den nachfolgenden Tabellen sind **in blauer Schrift obligatorische Vorgaben aus AB-EBV [1] und BAV [3]** gekennzeichnet.

Das in den Spalten 2 und 3 der Tabelle 22 vorgesehene Vorgehen zum rechnerischen und versuchstechnischen Nachweis versteht sich nicht alternativ. Wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben, dient der rechnerische Nachweis (Spalte 2) zunächst der Absicherung und der anschliessende versuchstechnische Nachweis (Spalte 3) als formaler Nachweis sowie Teilgrundlage der nachfolgenden Plausibilitätsprüfung des Modells.

Nr.	Gegenstand	erforderlicher Umfang		Verweis, Kommentar		
		1	2		3	4
		rechnerisch	versuchstechnisch			
1	Schutzziel	a) keine Querverschiebung des Gleises b) kein Aufklettern der Räder (Entgleisung) sowie über die Fahrsicherheit hinaus weiterhin auch: c) Vermeidung von Komforteinbussen durch Schwingung d) Vermeidung von Überbeanspruchung und Ermüdung von Komponenten des Fahrzeugs oder des Gleises e) Vermeidung von unnötigem Rad/Schiene-Verschleiss			siehe auch Tabelle 2	
2	Norm- oder Regelwerksvorgabe	in Anlehnung an EN 14363 [14]	Kapitel 2 der BAV-Richtlinie [3] (unter Referenz auf EN 14363 [14])		zu Spalte 3: gemäss Kap. 2 in [3] in der Regel bei > 100 km/h gefordert; (siehe auch Punkt 5) in Abschnitt 6) dazu fahrzeugspezifisches Vorgehen durch Fahrzeuglieferanten im Nachweiskonzept zu argumentieren	
3	Methode	MKS-Simulationen nach der „nicht-linearen Methode“ im Zeitbereich (siehe 7.6.3.3 in [9]) oder wenn begründet möglich in linearer Untersuchung (Stabilitätskarte) (siehe 7.6.3.3 in [9])	Streckenversuche in Anlehnung an EN 14363 [14], gemäss [3] vereinfachtes Verfahren nach EN 14363 [14], gemäss 2.2.1 der BAV-Richtlinie [3]: entweder Methode 1: «Verschleissprofile» oder Methode 2: «permanente Überwachung»			
4	Beurteilungsgrössen	a) Radsatzquer-verschiebung u_y b) \ddot{y}_{rms}^+ c) ΣY_{rms}	gemäss [3]: \ddot{y}_{rms}^+ Querbeschleunigung am Fahrwerkrahmen über den Radsätzen		2.1 in [3] empfiehlt weiterhin \ddot{y}^* und \ddot{z}^* für Betrachtung des Wankverhaltens	

	1	2	3	4
Nr.	Gegenstand	erforderlicher Umfang		Verweis, Kommentar
		rechnerisch	versuchstechnisch	
5	Grenzwerte	a) keine nennenswerte Restamplitude bei Prüfgeschwindigkeit b) $\ddot{y}_{rms,lim}^+ = [12 \text{ m/s}^2 - (m^+/5 \text{ t}) \text{ m/s}^2]/2$ c) $\Sigma Y_{rms,lim} = k_1 (10 \text{ kN} + P / 3) / 2$ mit $k_1 = 0.85$ nach AB-EBV [1] zu Art. 47 AB 47.1 sowie Art. 31, AB 31 Meterspur	gemäss [3]: $\ddot{y}_{rms,lim}^+ = [12 \text{ m/s}^2 - (m^+/5 \text{ t}) \text{ m/s}^2]/2$	Tabelle 4 EN 14363 [14]
6	Auswertung	je nach Methode in Zeile 3: nicht-lineares Verfahren: Verlauf im Zeitbereich (in der Darstellung über die Zeit, den Weg oder die Fahrgeschwindigkeit) linearisiertes Verfahren: Stabilitätskarte (siehe z.B. 7.6.3.3 in [9])	EN 14363 [14]: eindimensionale statistische Auswertung, Abschnittslängen etc. wie in EN 14363 [14] definiert	
7	Randbedingungen			
7a	Beladezustand	bei konventionellen Fahrzeugkonzepten ist der leichtest mögliche Zustand relevant	2.1 in [3]: Tarazustand	je Fahrzeugbeschaffenheit im Nachweiskonzept zu begründen, ggf. weitere Beladezustände nachzuweisen
7b	Fahrtrichtung	je Fahrzeugbeschaffenheit im Nachweiskonzept zu begründen		
7c	Fahrgeschwindigkeit	je nach Methode in Zeile 3: nicht-lineares Verfahren: Start der Simulation bei deutlicher Übergeschwindigkeit z.B. 160 km/h für $V_{zul} = 120 \text{ km/h}$ linearisiertes Verfahren: je Konizität: Ausweisen der kritischen Geschwindigkeit in der Stabilitätskarte	2.1 in [3]: bis 110 % der Fahrzeughöchstgeschwindigkeit	
7d	Trassierung	gerades Gleis, ggf. z.B. S-Bögen zur lokalen Anregung	Prüfbereich 1 nach EN 14363 [14]	

Nr.	1 Gegenstand	2 erforderlicher Umfang		4 Verweis, Kommentar
		3		
		rechnerisch	versuchstechnisch	
7e	Gleisbettung (Steifigkeit und Dämpfung unterhalb der Schiene)	Variation: 1) starre Gleislage 2) vorläufig Modell A aus 7.6.2 in [9] mit Werten nach [32]	wenn möglich Messabschnitte mit unterschiedlichen Eigenschaften aus Oberbau, Unterbau und Untergrund berücksichtigen	Unterschiedliche Gleiseigenschaften können je nach Fahrzeugmerkmalen einen unterschiedlichen Einfluss auf die Fahrstabilität haben, s. Punkt 8) in Abschnitt 6
7f	Gleislagefehler	keine Gleislagefehler (sensibler Fall)	Streckenauswahl: Messabschnitte mit guter Gleislage	
7g	Rad/Schiene-Reibung	Reibwert $\mu=0.4$ (keine Spurkranzschmierung)	trockene Schienen	
7h	Äquivalente Konizität $\tan \gamma_e$	Variation der Konizität (jeweils ohne Zwängung im Spurkanal) a) «niedrig» $\tan \gamma_e \leq 0.05$ b) «mittlere» Konizität c) «hoch» $\tan \gamma_e \geq 0.5$ jeweils mindestens 5 mm Spurspiel verbleibend ($u_y \geq \pm 2.5$ mm möglich), Ausschlaggebende Radsatzquerverschiebungsamplitude in Anlehnung an Anhang P EN 14363 [14] bei $\hat{u}_y = ((S-s)-1)/2$	Streckenauswahl: wenn verfügbar, Messabschnitte mit hoher und mit niedriger Konizität 2.2.1 in [3]: Methode 1: Konizitätsauswertung Methode 2: keine Konizitätsauswertung	zu Spalte 3: Tabelle 2 der EN 14363 [14] listet die Untersuchung auf niedriger Konizität bzw. niederfrequente Wagenkastenschwingungen im Prüfbereich 1 und damit ausserhalb der Spalte der Stabilitätsprüfung. Es wird vorgeschlagen und ist gängige Praxis, die Stabilitätsauswertung sowohl für die niedrige als auch die hohe Konizität durchzuführen.
8	Ausfallzustände	fahrzeugspezifisch im Nachweiskonzept zu vereinbaren, z.B. Ausfall eines Schlingerdämpfers, Ausfall einer passiven Radsatzkopplung oder einer aktiven Radsatzsteuerung, Ausfall von Federungskomponenten (z.B. Ölverlust in hydraulischen Achslenkerlagern etc.)		

Tabelle 22: Vorgehen zum Nachweis der Fahrstabilität

4.3 Dynamisches Fahrverhalten in den Prüfbereichen 1, 2 und 4 sowie 5a bis 5e

Das Abprüfen des dynamischen Fahrverhaltens beinhaltet die Rubriken Fahrsicherheit, (je nach Messverfahren) Fahrwegbeanspruchung sowie Schwingungsverhalten (siehe Abschnitt 2.1).

Das in den Spalten 2 und 3 der Tabelle 23 vorgesehene Vorgehen zum rechnerischen und versuchstechnischen Nachweis versteht sich nicht alternativ. Wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben, dient der rechnerische Nachweis (Spalte 2) zunächst der Absicherung und nach erfolgreicher Plausibilitätsprüfung als Nachweis. Der versuchstechnische Nachweis (Spalte 3) deckt nur einen Teil des Simulationsumfangs aus Spalte 2 ab und dient einerseits als Nachweis sowie andererseits als Teilgrundlage der Plausibilitätsprüfung des Modells.

Die nachfolgend in Spalte 3 deklarierten Versuche beziehen sich entsprechend den Ausführungen in Abschnitt 4.1.1 auf Messfahrten nach dem vereinfachten Messverfahren in den Prüfbereichen 1 und 2 (siehe Abschnitt 3.4.5). Versuchstechnische Nachweise in den weiteren Prüfbereichen sind dann anerkennbar, wenn sie nach dem normalen Messverfahren (mit dafür geeignetem Messradsatzsystem) erfolgen.

Nr.	Gegenstand	2		3	4	
		erforderlicher Umfang				Verweis, Kommentar
		rechnerisch	versuchstechnisch			
1	Schutzziel	a) kein Aufklettern der Räder (Entgleisen) b) keine Querverschiebung des Gleises c) keine Schädigung des Fahrwegs d) keine Resonanzen oder ausgeprägten Schwingungen (Störverhalten)			siehe auch Tabelle 2	
2	Norm- oder Regelwerksvorgabe	in Anlehnung an EN 14363 [14]		in Anlehnung an EN 14363 [14]		
3	Methode	MKS-Simulationen in Anlehnung an EN 14363 [14]		Streckenversuche in Anlehnung an EN 14363 [14], nach dem vereinfachten Messverfahren, in Prüfbereichen 1 und 2	Fahrversuche nach dem normalen Messverfahren (Messradsätze) in allen Prüfbereichen wären grundsätzlich erwünscht, sofern geeignete Messradsätze verfügbar sind, siehe Abschnitte 3.11, 4.1.1	
4	Beurteilungsgrößen	normales Verfahren	vereinfachtes Verfahren	vereinfachtes Verfahren (sofern keine Messradsätze verfügbar sind)	siehe Tabelle 4 der EN 14363 [14]	
		Fahrsicherheit				
		ΣY_{\max} Y/Q_{\max}	\ddot{y}_{\max}^+ $\dot{y}_{S,\max}^*$ $\ddot{z}_{S,\max}^*$	\ddot{y}_{\max}^+ $\dot{y}_{S,\max}^*$ $\ddot{z}_{S,\max}^*$		(Die Messung von Radsatzlagerquerkräften H ist heute nicht mehr gebräuchlich und hier daher nicht aufgeführt)

	1	2	3	4
Nr.	Gegenstand	erforderlicher Umfang		Verweis, Kommentar
		rechnerisch	versuchstechnisch	
(4)	(Beurteilungsgrößen Fortsetzung)	Fahrwegbeanspruchung		
		Y_{qst} Y_{max} B_{qst} (Bmax) Q_{qst} Q_{max} (Tqst)		
		Schwingungsverhalten		
		$\ddot{y}^*_{q,max}$ $\ddot{z}^*_{q,max}$	$\ddot{y}^*_{q,max}$ $\ddot{z}^*_{q,max}$	
5	Grenzwerte	normales Verfahren (Simulation)	vereinfachtes Verfahren (Simulation und Messung)	Tabelle 4 EN 14363 [14]
		Fahrsicherheit		
		$\Sigma Y_{max,lim} = k_1 (10 \text{ kN} + P / 3)$ mit $k_1 = 0.85$ nach AB-EBV [1] zu Art. 47 AB 47.1 sowie Art. 31, AB 31 Meterspur $Y/Q_{max,lim} = 0.8$	$\ddot{y}^*_{max,lim} = 12 \text{ m/s}^2 - (m^+ / 5 \text{ t}) \text{ m/s}^2$ $\ddot{y}^*_{s,max,lim}$ sowie $\ddot{z}^*_{s,max,lim}$ je nach Fahrzeugmerkmalen nach Tabelle 4 der EN 14363 [14]	
		Fahrwegbeanspruchung		
		$Y_{qst,lim} = 60 \text{ kN}$ in Bogenradien <250 m Lok. u. Triebzüge 70 kN Wagen 60 kN $Y_{max,lim} = 110 \text{ kN}$ (3.1.6 [23]) $B_{qst,lim} = 175 \text{ kN}$ (3.2.3 [23]) (Bmax,lim kein Grenzwert) $Q_{qst,lim} = 145 \text{ kN}$ für $P_{F0} \leq 225 \text{ kN}$ $Q_{max,lim} = \min(90 \text{ kN} + Q_0, 180 \text{ kN})$ (Tqst,lim kein Grenzwert)	siehe Abschnitt 3.8 sowie Tabelle 18 (bei einer Aktualisierung von Tabelle 18 z.B. nach Punkt 2) in Abschnitt 6 entsprechend zu aktualisieren)	

	1	2	3	4
Nr.	Gegenstand	erforderlicher Umfang		Verweis, Kommentar
		rechnerisch	versuchstechnisch	
(5)	(Grenzwerte Fortsetzung)	Schwingungsverhalten $\ddot{y}^*_{q,max}, \ddot{z}^*_{q,max}$		Anhang L der EN 14363 [14] enthält je nach Fahrzeugart typische maximale Schätzwerte des Schwingungsverhaltens
		rechnerisch	versuchstechnisch	
6	Auswertung	Filterung nach Tab. 5 EN 14363, direkter Vergleich von Extremwerten mit dem jeweiligen Grenzwert (siehe Punkt 14) in Abschnitt 2.1), entlang der kompletten Trassierung gleichermassen in Übergangsbögen und Vollbogen	betrifft hier Prüfbereiche 1 und 2 nach dem vereinfachten Verfahren: Auswertung nach EN 14363 [14]	
7	Randbedingungen			
7a	Beladezustand	In Anlehnung an 7.3.3 der EN 14363 a) leichtest möglicher Zustand (konservativ) b) ggf. teilbeladener Zustand (z.B. 2. Federstufe) c)schwerst möglicher Zustand	betrifft hier Prüfbereiche 1 und 2 nach dem vereinfachten Verfahren: In Anlehnung an 7.3.3 der EN 14363 a) leer in der Definition nach 5.3.2 der EN 14363 [14] b) beladen, bei Personenfahrzeugen in Anlehnung an 5.3.2 der EN 14363 [14] Auslegungsmasse mit normaler Zuladung (EN 15663) sowie Belegung der Stehplatzflächen (Vorgaben AB-EBV, Art. 47, Blatt 2)	je Fahrzeugbeschaffenheit im Nachweiskonzept zu begründen
7b	Fahrtrichtung und Position im Zugverband	je Fahrzeugbeschaffenheit im Nachweiskonzept zu begründen (7.3.4. der EN 14363 [14] sieht eine betriebsübliche Position im Zugverband vor)		

	1	2	3	4
Nr.	Gegenstand	erforderlicher Umfang		Verweis, Kommentar
		rechnerisch	versuchstechnisch	
7c	Fahrgeschwindigkeit	je Prüfbereich nach Tabelle 10 bis Tabelle 17	betrifft hier Prüfbereiche 1 und 2 aus Tabelle 7 nach dem vereinfachten Verfahren, siehe mögliche Versuchsbedingungen in Tabelle 8 und Tabelle 9	
7d	Trassierung			
7e	Gleisbettung (Steifigkeit und Dämpfung unterhalb der Schiene)	Variation: 1) starre Gleislage 2) vorläufig Modell A aus 7.6.2 in [9] mit Werten nach [32]	wenn möglich Messabschnitte mit unterschiedlichen Eigenschaften aus Oberbau, Unterbau und Untergrund berücksichtigen (im Prüfbericht zu dokumentieren)	s. Punkt 8) in Abschnitt 6
7f	Gleislagefehler	Variation: 1) regellose Gleislagefehler nach [12] 2) periodische Gleislagefehler nach [12] 3) Einzelereignisse nach [12]	bestehende Gleislagedaten bei der Auswahl von Versuchsstrecken einbeziehen, repräsentative und anspruchsvolle Gleislagen anzustreben, (im Prüfbericht zu dokumentieren)	
7g	Rad/Schiene-Reibung	Reibwert auf dem Schienenkopf: $\mu = 0.36$ für Prüfbereiche 1 und 2 $\mu = 0.5$ für alle weiteren Prüfbereiche (auf Basis [35],[3],[14]) Spurkranzschmierung $\mu = 0.2$ (auf Basis [27])	betrifft hier Prüfbereiche 1 und 2: trockene Schienen, Einsatz oder Deaktivierung der Spurkranzschmierung im Prüfbericht zu dokumentieren	Hinweis: Abschnitt 5.3 in TS 17843 [16] sieht eine Aktivierung der Spurkranzschmierung vor Abschnitt 3.12 in SBB R-I-50127 [23] sieht eine Deaktivierung der Spurkranzschmierung vor
7h	Rad/Schiene-Profilpaarung	Variation: 1) Nennprofile 2) repräsentative Verschleissprofile [13]	betrifft hier Prüfbereiche 1 und 2 nach dem vereinfachten Verfahren: Messfahrten mit nominellem Radprofil, Radprofile und Radrückenabstände sowie repräsentative Schienenprofile und Spurweiten für Plausibilitätsprüfung des Modells zu erfassen (Teil der Dokumentation)	
8	Ausfallzustände	fahrzeugspezifisch im Nachweiskonzept zu vereinbaren, z.B. Luftfeder im luftlosen Nottfederbetrieb, Ausfall Dämpfer etc.		

Tabelle 23: Vorgehen zum Nachweis des dynamischen Fahrverhaltens

4.4 Simulationsrechnungen zum dynamischen Fahrverhalten auf spezifischen Trassierungen

Das im vorstehenden Abschnitt 4.3 vorgeschlagene Vorgehen prüft das dynamische Fahrverhalten auf generischen Trassierungen (kürzester Übergangsbogen, kleinster Bogenradius etc.) ab, wie sie in Abschnitt 3.4 hergeleitet sind.

Über diese generischen Trassierungen hinaus kann es sinnvoll sein, das dynamische Fahrverhalten zusätzlich auch auf ausgewählten spezifischen Trassierungen zu prüfen. So können beispielsweise Streckenabschnitte mit nachfolgenden Merkmalen lauffechnisch anspruchsvoll für spezifische Fahrzeugkonzepte sein (beispielhaft, nicht abschliessend).

- 1) Abfolge kurzer Bögen unterschiedlicher Radien und Bogenrichtungen (z.B. S-Bögen) sowie auch Bögen ohne Übergangsbögen (z.B. auch Gleisverbindungen)
- 2) Kombination aus kleinen Bogenradien mit grosser Neigung oder vertikaler Ausrundung (Wanne/Kuppe z.B. Brückenbefahrung), beispielsweise in Überlagerung mit abnehmender Überhöhung im Vollbogen (Kombination von «Helix-Verwindung» und Überhöhungsrampe, siehe Abschnitt 3.10)
- 3) Trassierungsabschnitte, deren Merkmale über gewöhnliche Trassierungsvorgaben hinaus gehen und entsprechend mit einer Sonderbewilligung betrieben werden

Daher wird vorgeschlagen, dass die ausschreibende Bahn lauffechnisch anspruchsvolle Streckenabschnitte identifiziert und die entsprechenden Trassierungen mit dem geforderten Geschwindigkeitsprofil bereits dem Lastenheft beilegt.

Es wird weiterhin vorgeschlagen, dass diese spezifischen Trassierungen nach dem identischen Schema wie in Tabelle 23 mittels lauffechnischer Simulationsrechnungen untersucht und nachgewiesen werden.

4.5 Sicherheit gegen Entgleisen (SgE) in Gleisverwindungen

Der Nachweis genügender Sicherheit gegen Entgleisen im verwundenen Gleis ist für Schweizer Meterspurbahnen in der BAV-Richtlinie [3] weitreichend vorgeschrieben. Entsprechende Vorgaben sind in der nachfolgenden Tabelle **in blauer Schrift** gekennzeichnet.

Von den vier verschiedenen Möglichkeiten (Verfahren 1 bis 3 sowie Verfahren 3 in Kombination mit Anhang B) der EN 14363 [14] lässt die BAV-Richtlinie [3] nur zwei zu: «Methode 1 Verwindegleisbogen» sowie «Methode B Simulation einer Bogenausfahrt».

Das nachfolgend in Tabelle 24 vorgesehene Vorgehen geht entsprechend Abschnitt 4.1.1 von Simulationsrechnungen aus, die zunächst zur Absicherung (Unbedenklichkeit) und nach erfolgreicher Plausibilitätsprüfung des Modells als Nachweis durchgeführt werden.

	1	2	3
Nr.	Gegenstand	erforderlicher Umfang	Verweis, Kommentar
1	Schutzziel	kein Aufklettern der Räder (Entgleisen)	siehe auch Tabelle 2
2	Norm- oder Regelwerksvorgabe	entsprechend BAV-Richtlinie [3] in Anlehnung an EN 14363 [14]	
3	Methode	MKS-Simulationen (Berechnungen), entweder nach Methode 1 der EN 14363 [14] im Verwindegleisbogen oder nach Anhang B der EN 14363 [14] einer betriebsnah trassierten Bogenausfahrt mit zusätzlicher Senke	Abschnitte 3.1.1 und 3.1.4 in [3]
4	Beurteilungsgrössen	für beide Methoden 1 und B aus [3] identisch: Y/Q Δz $\Delta Q/\bar{Q}_0$ (ohne Grenzwert, nur zur Information)	Abschnitte 3.1.1 und 3.1.4 in [3]

	1	2	3
Nr.	Gegenstand	erforderlicher Umfang	Verweis, Kommentar
5	Grenzwerte	<p>Y/Q_{lim} entsprechend Formel von NADAL (siehe 3.1.1 in [3]) mit gegenständlichem Spurkranzstirnflankenwinkel und (Spurkranz-)Reibwert $\mu=0.36$</p> <p>$\Delta z_{lim} = 5 \text{ mm}$ (bei Überschreitung von Y/Q_{lim})</p>	Abschnitte 3.1.1 und 3.1.4 in [3]
6	Auswertung	in Anlehnung an EN 14363 [14]	(keine konkreten Vorgaben in [3])
7	Randbedingungen		
7a	Beladezustand	leichtest möglicher Fahrzeugzustand, ggf. Teilbeladung z.B. bei mehrstufiger Federung	(keine konkreten Vorgaben in [3]), je Fahrzeugbeschaffenheit im Nachweiskonzept zu begründen (z.B. Umschaltpunkt einer mehrstufigen Federkennlinie etc.)
7b	Fahrtrichtung und Position im Zugverband	Fahrt- und Bogenrichtung je nach Fahrzeugbeschaffenheit im Nachweiskonzept zu begründen	
7c	Fahrgeschwindigkeit	1 m/s, für beide Methoden 1 und B aus [3] identisch	Abschnitte 3.1.1 und 3.1.4 in [3]
7d	Trassierung und Prüfverwindung	<p>jeweils Variation Prüfgleisradien: $R_B = 100 \text{ m}$ sowie kleinster Bogenradius R_{Bmin} netzspezifische Prüfverwindungen g^+ und g^* (Verwindeeinflüsse gemäss Abschnitt 3.10 berücksichtigen) nach Abschnitt 3.1 in [3] zusätzlich auch 10 % erhöhte Verwindung abzutüpfen</p> <p>zu Methode 1 aus [3]: geringer Wankeinfluss durch $\ddot{u} = \pm 45 \text{ mm}$ (Verwindung ggf. durch Beilagen nach EN 14363)</p> <p>zu Methode B aus [3]: voller Wankeinfluss durch $\ddot{u} = 105 \text{ mm}$ bzw. $\ddot{u}(R_B)$ Verwindung g^+ durch dreieckige Senke</p>	Abschnitte 3.1.1 und 3.1.4 in [3], in Verbindung mit den Erläuterungen in Abschnitt 3.10, angesetzte Prüfverwindungen und kleinsten Bogenradius im Nachweiskonzept zu begründen
7e	Gleisbettung (Steifigkeit und Dämpfung unterhalb der Schiene)	starres Gleismodell	(keine konkreten Vorgaben in [3])
7f	Gleislagefehler	keine weiteren Gleislagefehler als durch die Prüfverwindung bereits beinhaltet	
7g	Rad/Schiene-Reibung	<p>zu Methode 1 aus [3]: Reibwert Spurkranzflanke $\mu=0.40$, Reibwert Lauffläche nach Kriterium «trockene Schiene» z.B. 0.42...0.52</p> <p>zu Methode B aus [3]: Reibwert Spurkranzflanke und Lauffläche $\mu=0.32$</p>	Abschnitte 3.1.1 und 3.1.4 in [3]
7h	Rad/Schiene-Profilpaarung	Repräsentative Radprofile und netzspezifische Schienenprofile in nomineller Spurweite und Schieneneinbauneigung	Abschnitt 3.1 in [3], angesetzte Rad/Schiene-Profile im Nachweiskonzept zu begründen

	1	2	3
Nr.	Gegenstand	erforderlicher Umfang	Verweis, Kommentar
7i	Fahrzeugzustand	Berücksichtigung der maximal zulässigen Radlastdifferenz von $\Delta q_0 = 5\%$ (Methode 1 sowie Methode B) an ungünstiger Position im Fahrzeug, Berücksichtigung einer potenziellen Versteifung relevanter Gummifedern im Fahrzeugmodell insbesondere infolge Temperatur	Abschnitte 3.1.1 und 3.1.4 in [3], Versteifungsfaktor im Nachweiskonzept zu begründen
8	Ausfallzustände	fahrzeugspezifisch im Nachweiskonzept zu vereinbaren, z.B. Luftfeder im luftlosen Notfederbetrieb, Bruch einer Feder etc.	Stand der Technik ist die Berücksichtigung von Einzelfehlern, keine Kombination von Ausfällen

Tabelle 24: Vorgehen zum Nachweis der Sicherheit gegen Entgleisen (SgE)

4.6 Sicherheit gegen Entgleisen im Bereich der Interaktion Zahnrad/Zahnstange

Der Nachweis der Sicherheit gegen Entgleisen im Bereich der Interaktion von Zahnrad und Zahnstange ist in der BAV-Richtlinie [3] festgeschrieben. Grundlegende Zusammenhänge sind in [10] beschrieben.

Weiterführende Ausarbeitungen zu Zahnradanwendungen sind abstimmungsgemäss nicht Gegenstand des vorliegenden Dokuments.

4.7 Fahrsicherheit unter Längskräften

Der Aspekt der Fahrsicherheit unter Längskräften ist im Kontext von Zeile 8 der Tabelle 2 beschrieben. Nach Kenntnis des hier gegenständlichen Projektteams P3 ist die Fahrsicherheit unter Längszug- oder Längsdruckkräften gegenwärtig kein systematischer Prüfgegenstand von Fahrzeugen der Meterspuranwendungen. Anteilig sind Simulationsrechnungen zum Einfluss von Traktionskräften in Kombination mit Längsneigung und Bogenradien bekannt.

Die Sensitivität gegen Längszug- und Längsdruckkräfte hängt wie in Abschnitt 3.7 dargelegt grundlegend vom Fahrzeugkonzept (Gliederfahrzeug vs. Einzelwagen bzw. Überhang etc.) und dem eingesetzten Kupplungssystem ab.

Es bleibt ein offener Punkt, ob und in welchem Umfang künftig Anforderungen und Nachweise zur Fahrsicherheit unter Längsdruckkräften zu spezifizieren sind, siehe Punkt 4) in Abschnitt 6.

4.8 Eigenschwingverhalten (über das Fahrverhalten in Abschnitt 4.3 hinaus)

Die Untersuchung des Eigenschwingverhaltens dient einerseits der Vermeidung von Resonanzen. Die Ermittlung des Eigenschwingverhaltens stellt andererseits eine wesentliche Grundlage für die Plausibilitätsprüfung des MKS-Modells dar, wie sie in Schritt 4) von Abschnitt 4.1.1 beschrieben ist.

Tabelle 25 enthält einen Vorschlag zum rechnerischen und versuchstechnischen Umfang der Untersuchung des Eigenschwingverhaltens.

Davon unbenommen besteht ein Einfluss des Eigenschwingverhaltens auf den Fahrkomfort, der gemäss Abschnitt 1.4 nicht Gegenstand des vorliegenden Berichts ist.

	1	2	3	4
Nr.	Gegenstand	erforderlicher Umfang		Verweis, Kommentar
		rechnerisch	versuchstechnisch	
1	Schutzziel	Vermeidung von Resonanzen (gleichzeitig Grundlage für Plausibilitätsprüfung des MKS-Modells)		siehe auch Tabelle 2
2	Norm- oder Regelwerksvorgabe	in Anlehnung an z.B. Tabelle T.1 der EN 14363 [14]		
3	Methode	MKS-Simulationen (insbesondere Modal-Analyse)	fahrzeugindividuell im Nachweiskonzept zu vereinbaren, z.B. Keilversuche etc.	siehe auch Plausibilitätsprüfung des Modells in Abschnitt 4.1.1
4	Beurteilungsgrößen	grundlegende Eigenfrequenzen (Tauchen, Wanken, Nicken) zugehörige Abklingraten bzw. Dämpfungsmass ggf. elastische Wagenkastenmoden (Torsion und Biegung) ggf. Neigungskoeffizient (Anhang D EN 14363 [14], [3])		im lauftechnisch relevanten Frequenzbereich z.B. ≤ 10 Hz
5	Grenzwerte	genügende Dämpfung jeder Eigenform (z.B. min. 5 %) genügende Vertrimmung zwischen Starrkörperfrequenz (starrer Wagenkasten auf Fahrwerksfederung) und elastischer Eigenfrequenz insbesondere des Wagenkastens genügende Vertrimmung zwischen mechanischen Eigenfrequenzen und z.B. elektrischen Regelfrequenzen (Antrieb, Bremse)		quantitative Grenzwerte können Teil des Nachweiskonzepts sein
6	Auswertung	z.B. tabellarische Darlegung der Eigenformen in Zahl und Bild	je nach Versuch	zugleich Input für die Plausibilitätsprüfung des Modells gemäss Abschnitt 4.1.1
7	Randbedingungen			
7a	Beladezustand	in der Regel für das Leerfahrzeug sowie das (teil)beladene Fahrzeug		je Fahrzeugbeschaffenheit im Nachweiskonzept zu begründen (z.B. Umschaltpunkt einer mehrstufigen Federkennlinie etc.)
7b	Rad/Schiene-Kontakt	z.B. grob vereinfacht (siehe Kommentar in Spalte 4)	Zustand im Versuchsbericht zu dokumentieren	Einfluss des Rad/Schiene-Kontakts auf geschwindigkeitsabhängige Eigenformen ist Teil der Fahrstabilität in Tabelle 22
8	Ausfallzustände	fahrzeugspezifisch im Nachweiskonzept zu vereinbaren, z.B. Luftfeder im luftlosen Notfederbetrieb		

Tabelle 25: Vorgehen zum Abprüfen des grundlegenden Eigenschwingverhaltens

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Ausgehend von der Fragestellung des Nachweisumfangs zur Entgleisungssicherheit und dem dynamischen Fahrverhalten inklusive der Rad-/Schiene-Beanspruchung künftiger Meterspuranwendungen oder Umbauten kommt die vorliegende Untersuchung insbesondere zu folgenden Ergebnissen:

Die in Abschnitt 2.3 herausgestellten lauftechnischen Systemzusammenhänge zeigen unter anderem den Zielkonflikt zwischen guter Bogengängigkeit und grosser Fahrstabilität auf. Es stellt also eine besondere technische Herausforderung dar, die kleinen Bogenradien von Meterspuranwendungen mit einem wirtschaftlich vertretbaren Rad/Schiene-Verhalten zu passieren und zugleich maximale Fahrgeschwindigkeiten von 100 km/h bzw. künftig 120 km/h sicher zu beherrschen.

Die Trassierungen von Meterspuranwendungen unterscheiden sich neben der Spurweite insbesondere in Bezug auf die vorkommenden Bogenradien und die Längsneigung wesentlich von Vollbahnanwendungen. Daher werden die lauftechnischen Prüfbereiche der EN 14363 [14] für die deutlich kleineren Bogenradien der Meterspuranwendungen geeignet erweitert. Dazu wird in Abschnitt 3.4.5 auf Basis der CEN/TS 17843 [16] ein Prüfbereich 5 in einer Untergliederung von bis zu 5 Kategorien vorgeschlagen.

Für die Erstzulassung von Fahrzeugen ist in Abschnitt 4.1.1 ein Vorgehen dargelegt, das überwiegend auf Simulationsrechnungen basiert und ergänzend einen gezielten Anteil messtechnischer Nachweise nach dem vereinfachten Verfahren (Beschleunigungssignale) vorsieht. Um den grossen Anteil an Simulationsrechnungen zu rechtfertigen, wird eine pragmatische Plausibilitätsprüfung des Simulationsmodells vorgeschlagen, aber ausdrücklich keine volle Validierung im Sinne des Anhangs T der EN 14363 [14] vorgesehen.

Für einen Umbau von Fahrzeugen oder die Zulassung bauähnlicher Fahrzeuge besteht mit Abschnitt 4.1.2 ein Vorschlag, um das λ -Verfahren nach Anhang U der EN 14363 [14] auf Meterspuranwendungen anzuwenden. Dies umfasst auch einen Vorschlag für den regelmässig auftretenden Fall, dass keine lauftechnischen Messdaten der Erstzulassung verfügbar sind.

Das vorliegende Dokument fokussiert dabei auf das dynamische Fahrverhalten, während die Lieferobjekte LO 6.1.2, 6.2.1 und 6.3.1 auch weitere Aspekte wie die Wirtschaftlichkeit und des Fahrkomforts beinhalten.

6 Ausblick

Folgende weiterführende Fragestellungen haben sich während der Bearbeitung ergeben. Diese Aspekte sind nicht Gegenstand des hier vorliegenden Projektvorhabens, sondern können Gegenstand weiterführender Vorhaben sein.

1) Marktverfügbarkeit, Potenzial und Grenzen von Messradsatztechnologien

In Europa sind verschiedene Messradsatzsysteme verfügbar, siehe z.B. Abschnitt 3.11. Diese fokussieren bislang auf Vollbahnanwendungen und beruhen zum Teil auf unterschiedlichen Messprinzipien. Es ist bekannt, dass insbesondere kleine Bogenradien, wie sie für Meterspuranwendungen ein alltägliches Merkmal sind, eine Herausforderung in Bezug auf die Messgenauigkeit der Rad/Schiene-Kräfte darstellen. Für gummigefederte Radbandagen der tramähnlichen Anwendungen ist bislang kein etabliertes System zur Messung von Rad/Schiene-Kräften bekannt. Weiterhin sind die Anforderungen und die Rückwirkungsfreiheit von Messradsatzsystemen beim Einsatz von Zahnradbahnen fragliche Aspekte.

Von daher bestünde ein weiterführendes Vorhaben darin, mit potenziellen Lieferanten von Messradsatzsystemen die Möglichkeiten und Grenzen für künftige Meterspuranwendungen auszuloten.

Dies kann auch das Potential eines «indirekten Messradsatzes» enthalten, bei dem durch die Messung umliegender Größen z.B. in der Radsatzführung auf die wirksamen Rad/Schiene-Kräfte geschlossen wird.

2) Grenzwerte der Fahrwegbeanspruchung für Gleisbauformen der Meterspuranwendungen

Es ist zu erwarten, dass die schädigungsfrei ertragbare Belastung der Schiene von der konkreten Gleisbauform (Schiennenprofil, Schwellenabstand, etc.) abhängt, siehe Abschnitt 3.8. Dieser Umstand muss in den Grenzwerten der Fahrwegbeanspruchung (Beurteilungsgrößen Y_{qst} , Y_{max} , Q_{qst} , Q_{max} , T_{qst} , B_{qst} , B_{max}) geeignet berücksichtigt werden. Das vorliegende Dokument orientiert sich dazu in Tabelle 18 vorläufig an verfügbaren Grenzwerten anderer Anwendungen.

Ein weiterführendes Vorhaben beispielsweise des Projektteams P4 könnte zum Ziel haben, die hier vorgeschlagenen Grenzwerte für die relevanten Gleisbauformen von Meterspuranwendungen zu überprüfen und nötigenfalls geeignet anzupassen.

3) Beurteilung der Fahrwegbeanspruchung durch mehrstufige Bewertungsziffer anstatt KO-Kriterium

Die in Abschnitt 3.8.1 auf Basis von [14] [16] [23] vorgeschlagenen Grenzwerte der Fahrwegbeanspruchung stellen KO-Kriterien dar. Sie ermöglichen im Ergebnis der Bewertung nur die beiden Zustände «eingehalten» oder «nicht eingehalten». Diese digitale Bewertung entspricht nicht der tatsächlichen Schädigungswirkung am Fahrweg.

Von daher bestünde ein weiterführendes Vorhaben in der Erarbeitung einer geeigneten Bewertungsziffer für Meterspuranwendungen, die eine Einordnung der Fahrwegbeanspruchung auf einer z.B. dreistufigen Skala erlaubt.

4) Frage von Kriterien und Nachweisen zu ertragbaren Längskräften

Zwischen benachbarten Fahrzeugen bzw. Fahrzeugteilen können sich wie in Zeile 8 der Tabelle 2 sowie in Abschnitt 3.7 beschrieben Längskräfte aufbauen. Dies kann gleichermassen Druck- wie Zugkräfte betreffen, die z.B. unter einem Schwenkwinkel auf die Fahrzeugkupplungen wirken. Diese Kräfte müssen anteilig über den Rad/Schiene-Kontakt abgetragen werden und wirken sich somit auf die Entgleisungssicherheit aus.

Die Fahrsicherheit unter Längsdruckkräften wird im Vollbahnbereich für Güterwagen und Baumaschinen mit konventionellen Seitenpuffern nach EN 15839 [21] abgeprüft. In ähnlichem Kontext sind die Netzzugangsbedingungen SBB I-50007 [24] bekannt.

Für Fahrzeuge der hier gegenständlichen Meterspuranwendungen sind keine Anforderungen zu ertragbaren Längszug- oder Längsdruckkräften bekannt. Es sind aber bei Meterspuranwendungen Begrenzungen der Traktionskraft aus eben diesem Wirkzusammenhang bekannt.

Von daher bestünde ein mögliches weiterführendes Vorhaben in einer Untersuchung, ob und in welchem Umfang z.B. für bestimmte Fahrzeugtypen (z.B. Gliederfahrzeug mit verteiltem Antrieb vs. Einzelwagen) Nachweise zur Fahrsicherheit unter Längszug- und Längsdruckkräften notwendig sind.

5) Frage zum Nachweis der Fahrstabilität nach der BAV-Richtlinie [3]

Kapitel 2 der Richtlinie [3] führt zur Anforderung von Nachweisen der Fahrstabilität wie folgt aus:

« [...] Liegt die zulässige Fahrzeughöchstgeschwindigkeit unter 100 km/h, so sind in der Regel hinsichtlich der Fahrstabilität keine Nachweise vorzulegen.

[...]

2.2 Nachweispflicht

Gestützt auf die Ergebnisse bisheriger Prüfungen wird die Nachweispflicht wie folgt festgelegt:

- Für Triebdrehgestelle (potenzielle Hohlaufbildung durch Traktion) und unkonventionelle Fahrwerke (Spurwechsel- oder Jakobs-Drehgestelle) für eine zulässige Fahrzeughöchstgeschwindigkeit von ≥ 100 km/h ist die Fahrstabilität nachzuweisen.*
- Für Laufdrehgestelle (geringes Massenträgheitsmoment) für eine zulässige Fahrzeughöchstgeschwindigkeit von ≥ 120 km/h ist die Fahrstabilität nachzuweisen.*

[...] »

Die Drehgestelle von Meterspuranwendungen zeichnen sich in Bezug auf die Bogengängigkeit häufig durch sehr niedrige Ausdrehwiderstände aus, siehe Einflüsse in Tabelle 2. Mit dem niedrigen Ausdrehwiderstand ist potenziell eine besondere Sensitivität in Bezug auf Drehgestellinstabilitäten verbunden. Weiterhin sind dem Projektteam P3 Beispiele von niederfrequenten Wagenkastenschwingungen («low frequency body motions») bei Meterspuranwendungen bekannt, wie sie insbesondere bei niedriger äquivalenter Konizität zu erwarten ist.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob die Grundlage zu oben zitierter Anforderung noch Bestand hat oder ob ein Nachweis bereits bei niedrigeren Fahrgeschwindigkeiten angebracht erscheint.

6) Kriterien der Betriebsbewährung als Voraussetzung zum λ -Verfahren

Für Bestandsfahrzeuge sind altersgemäss regelmässig keine Messdaten zum dynamischen Fahrverhalten verfügbar. Für Änderungen oder bauähnliche Nachbauten dieser Fahrzeuge besteht daher formal keine Möglichkeit, das λ -Verfahren nach Anhang U der EN 14363 [14] anzuwenden. Somit wären in jedem Fall neue fahrtechnische Nachweise zu erbringen, auch wenn dies technisch aufgrund der geringen Unterschiede unter Umständen nicht erforderlich wäre.

Abschnitt 4.1.2 des vorliegenden Dokuments schlägt als Lösungsvorschlag vor, alternativ auch eine positive Betriebsbewährung des betreffenden Fahrzeugs als Voraussetzung zum λ -Verfahren zu akzeptieren.

Dazu bestünde ein mögliches weiterführendes Vorhaben in der Definition von einheitlichen Beurteilungskriterien, um eine positive Betriebsbewährung zu identifizieren und geeignet nachzuweisen. Dies kann beispielsweise eine bestimmte Laufleistung im Regelbetrieb beinhalten, die ohne rapportierte lauftechnische Auffälligkeiten wie z.B. Schlingern, abnorme Radprofiländerungen etc. absolviert wurde.

7) Anpassung des Wertebereichs für Meterspuranwendungen zur Befreiung von fahrtechnischen Nachweisen nach Anhang U der EN 14363 [14]

Abschnitt 4.1.2 bzw. Tabelle 21 sieht zunächst den Wertebereich nach Tabelle U.1 der EN 14363 [14] unverändert auch für Meterspuranwendungen vor. Diese Werte basieren auf jahrelanger Erfahrung von Vollbahnanwendungen. Es liegen derzeit keine Untersuchungen vor, ob diese Werte für Meterspuranwendungen weiter eingeschränkt werden müssen oder sogar erweitert werden können.

Ein mögliches weiterführendes Vorgehen bestünde beispielsweise in einer gezielten Parametervariation mittels lauftechnischer Simulationsrechnungen (MKS-Simulationen) repräsentativer Meterspuranwendungen. Diese können ggf. in ausgewählten Konfigurationen durch Fahrversuche flankiert und verifiziert werden. Auf Basis der so erzielten Ergebnisse kann der Wertebereich der Tabelle 21 geeignet angepasst werden.

8) Gleismodell von Gleisbauformen der Meterspuranwendungen für lauftechnische Simulationsrechnungen (MKS-Simulationen)

Die elastischen Eigenschaften des Gleises können einen Einfluss auf die Rad/Schiene-Interaktion aufweisen, siehe Abschnitt 3.8.2. Für die Gleisbauformen von Meterspuranwendungen sind dem hier gegenständlichen Projektteam P3 keine frequenzabhängigen Gleiseigenschaften bekannt, wie sie für die Auswahl von Versuchsstrecken oder die Gleismodellierung in lauftechnischen Simulationsrechnungen erforderlich sind.

Um ein Gleismodell für die Zwecke der lauftechnischen Simulation aufzubauen, ist es Stand der Technik, in einem ersten Schritt die frequenzabhängigen Eigenschaften des jeweiligen Gleisaufbaus unter dynamischer Krafteinwirkung zu ermitteln (z.B. [39]). Dies kann mess- und/oder rechentechnisch erfolgen und berücksichtigt die tatsächliche Längs-Ausbreitung des Gleises (z.B. «unendlich lange Schiene» [39], Halbraumannahme). In einem zweiten Schritt wird daraus ein vereinfachtes Ersatzmodell generiert, wie es in der MKS-Simulation standardmässig ratsatzfest mitgeführt wird. Die grundlegende Modellstruktur üblicher Ersatz-Gleismodelle ist beispielsweise in Abschnitt 7.6.2.2 in [9] dargelegt. Ein mögliches Vorgehen zur Generierung eines Ersatzmodells anhand der Übertragungsfunktion ist z.B. in [39] beschrieben.

Insbesondere die in den Abschnitten 4.2 und 4.3 spezifizierten Simulationsrechnungen sehen ersatzweise vorläufig ein Gleismodell [32] vor, welches im Vollbahnbereich gängig ist.

Ein mögliches weiteres Vorgehen besteht also darin, die dynamischen Eigenschaften wesentlicher Gleisbauformen von Meterspuranwendungen mess- oder rechentechnisch zu ermitteln. Als Ergebnisse wären insbesondere die Übertragungsfunktionen in vertikaler und lateraler Richtung sowie ein «Kippen» der Schienen um ihre Längsachse relevant. Daraus ergibt sich, ob das

Gleis für die hier gegenständlichen Zwecke in guter Näherung starr angenommen werden kann bzw. sich die Eigenschaften verschiedener Gleisbauformen von Meterspuranwendungen wesentlich unterscheiden oder ähneln. Für den Fall der Notwendigkeit einer elastischen Modellierung sollten geeignete Ersatzmodelle für lauftechnische Simulationsrechnungen abgeleitet werden.

9) Erprobung der hier vorgeschlagenen Kriterien der MKS-Simulation

Die im Kapitel 4 vorgeschlagenen lauftechnischen Simulationen beruhen im Wesentlichen auf den Prinzipien der EN 14363 [14], deren Kriterien für den Vollbahnbereich auf langjährigen Erfahrungen basieren.

Vor der ersten Anwendung der in Kapitel 4 spezifizierten Simulationsrechnungen z.B. in einem lauftechnischen Lastenheft, ist die Erprobung beispielsweise mit Simulationsmodellen von repräsentativen Bestandsfahrzeugen von Meterspuranwendungen zu empfehlen. Daraus können sich allenfalls gezielte Änderungen von Anforderungen im Kapitel 4 ergeben.

7 Verzeichnisse

7.1 Referenzen

- [1] «Ausführungsbestimmungen zur Eisenbahnverordnung (AB-EBV)», Stand am 01.07.2024 (gültig per Abruf 13.09.2023), 742.141.11
- [2] Bundesamt für Verkehr BAV
«Richtlinie – Zulassung Eisenbahnfahrzeuge (Typenzulassung/Betriebsbewilligung)»
Richtlinie, Version 2.4, 01. Juli 2024
- [3] Bundesamt für Verkehr BAV
«Nachweis sicheres Fahrverhalten Meterspur-, Spezialspur- und Zahnradbahnen»
Richtlinie, (RL FV-MSZ), Version 1.3, in Kraft per 01. Januar 2021
- [4] D RTE 22540
«Fahrbahnpraxis Meterspur und Spezialspur – Handbuch»
VöV, Ausgabe 15.01.2011
- [5] R RTE 22546
«Geometrische Gestaltung der Fahrbahn – Meterspur»
VöV, Ausgabe 15.01.2012
- [6] R RTE 22570
«Einbau, Kontrollen und Unterhalt von Gleisen – Meterspur»
VöV, Ausgabe 31.07.2012
- [7] R RTE 29500
«Standardisierung Radsätze und Weichen – Meterspur»
VöV, Ausgabe 24.08.2006
- [8] D RTE 49100
«Nachweisführung bei Änderungen an Eisenbahnfahrzeugen»
VöV, Ausgabe 19.01.2016
- [9] RAILplus Wissensmanagement «Lehrbuch Grundlagenwissen Interaktion Fahrzeug/Fahrweg Meterspur», Abschnitt 7.6 «Fahrzeugsimulation» Oldrich Polach Stand per 08.02.2023
- [10] RAILplus Wissensmanagement «Lehrbuch Grundlagenwissen Interaktion Fahrzeug/Fahrweg Meterspur», Abschnitt 7.3.3 «Sicherheit gegen Entgleisen von Zahnradbahnen» Karl Tillmetz Stand per 16.06.2023
- [11] RAILplus «Auswertung Bogenverteilung 17.06.2023»
- [12] RAILplus «Identifikation repräsentativer Gleislagefehler für lauftechnische Nachweisrechnungen der Meterspur», Technischer Bericht, ID RAILPlusSF-00019
- [13] RAILplus «Festlegung von Rad- und Schienenprofilen für die lauftechnischen Nachweisrechnungen», Projekt P3, Modul 2.4, LO 2.4.2 (in Erstellung)
- [14] EN 14363
«Bahnanwendungen – Versuche und Simulationen für die Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften von Eisenbahnfahrzeugen – Fahrverhalten und stationäre Versuche»
SN EN 14363+A2:2022, ICS-Code 45.060.01
- [15] CEN/TR 17039
«Railway applications – Technical Report about the revision of EN 14363»
Technischer Bericht, CEN/TR 17039 Februar 2017, ICS-Code 45.060.01
- [16] CEN/TS 17843
«Bahnanwendungen – Untersuchungen an Fahrzeugen zur Quantifizierung der Fahrwegbeanspruchung in Bogenradien unter 250 m»
Technische Spezifikation, CEN/TS 17843, September 2022, ICS-Code 45.060.01

-
- [17] EN 12299
«Bahnanwendungen – Fahrkomfort für Fahrgäste – Messung und Auswertung»
EN 12299:2009, ICS-Code 45.060.20
- [18] EN 13674-1
«Bahnanwendungen – Oberbau – Schienen – Teil 1: Vignolschienen ab 46 kg/m»
EN 13674-1:2011+A1:2017, ICS-Code 93.100, Mai 2017
- [19] EN 13674-4
«Bahnanwendungen – Oberbau – Schienen – Teil 4: Vignolschienen mit einer längenbezogenen Masse zwischen 27 kg/m und unter 46 kg/m»
EN 13674-4:2019, ICS-Code 93.100, April 2019
- [20] EN 15827
«Bahnanwendungen – Anforderungen für Drehgestelle und Fahrwerke»
EN 15827:2011, ICS-Code 45.040
- [21] EN 15839
«Bahnanwendungen – Prüfung für die fahrtechnische Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen – Güterwagen – Prüfung der Fahrsicherheit unter Längsdruckkräften»
EN 15839:2012+A1, Oktober 2015, ICS-Code 45.060.20
- [22] EN 17343 «Bahnanwendungen – Allgemeine Begriffe»
EN 17343:2021, Dezember 2020, ICS 01.040.45; 45.060.01
- [23] SBB I-50127
«Technischer Netzzugang: Regelung Strecken mit Radien $R < 250$ m (Prüfbereich 5)»
Regelwerk SBB, Version 2-0, gültig ab 19.03.2018
- [24] SBB I-50007
«Technischer Netzzugang: Regelung Weichenfahrten»
Regelwerk SBB, Version 2-0, gültig ab 15.03.2020
- [25] ORE B 125/RP 5
«Running safety of vehicles fitted with the automatic coupler – Methods for calculating permissible longitudinal compressive forces for wagons»
Question B 125, Report 5, Utrecht, Oktober 1977
- [26] ORE B 176 «Drehgestelle mit radial einstellbaren Radsätzen»
Frage B 176, Bericht Nr. 1, Band 2
- [27] ORE B 176 «Einfluss der Berührgeometrie und der Kraftschlussverhältnisse auf das Bogenlaufverhalten von radial einstellbaren Radsätzen – Untersuchungen des Schmierzustandes und Kraftschlusses in Bögen der Netze der ÖBB und SBB»
Frage B 176, DT 292, Band 4
- [28] TSI LOC&PAS
Verordnung (EU) Nr. 1302/2014 der Kommission vom 18.11.2014 über eine technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Lokomotiven und Personenwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union“
geändert durch M1 bis M4 zuletzt vom 10.3.2020
berichtigt durch C1 bis C5 zuletzt vom 25.05.2023
- [29] TSI WAG
Verordnung (EU) Nr. 321/2013 der Kommission vom 13.03.2013 über eine technische Spezifikation für die Interoperabilität des Teilsystems „Fahrzeuge – Güterwagen“ des Eisenbahnsystems in der Europäischen Union“
geändert durch M1 bis M4 zuletzt vom 10.3.2020
- [30] GM/RC 2641 Issue 2
«Recommendations for Vehicle Static Testing», RSSB, London, June 2009
- [31] Kohler, Michael: «Der Bettungsmodul für den Schotteroberbau von Meterspurbahnen»
Dissertation Nr. 14580 der ETH Zürich, 2002

- [32] Manchester Metropolitan University: »The Manchester Benchmarks for Rail Vehicle Simulation«, Rail Technology Unit, March 1998
- [33] Bogdan, Niko: «Digitalization in Rail Freight Traffic: Research Project in “Digital Automatic Coupling”», DAC4EU Interim Presentation, November 30, 2022, www.dac4eu.de
- [34] VDV-Schrift 600 “Oberbau-Richtlinien und -Zusatzrichtlinien für Bahnen im Geltungsbereich der BOStrab“, Ausgabe 08/2018
- [35] Weber, H. H.: «Zur Ermittlung der Kräfte zwischen Rad und Schiene», Dissertation Nr. 4117 der ETH Zürich, 1968
- [36] Prud’Homme, M. A.: «La Résistance de la voie aux efforts transversaux exercés par le matériel roulant» in Revue Générale des Chemins de Fer, Januar 1967
- [37] Freudenstein, S. und W. Stahl: «Sichtung und Analyse Verschleissfaktor Schmalspur», TU München, 19.12.2023
- [38] Fingberg, U.: «Ein Modell für das Kurvenquietschen von Schienenfahrzeugen », VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 11, Nr. 140, VDI-Verlag 1990, ISBN 3-18-144011-6
- [39] Ripke, B. und K. Knothe: «Die unendlich lange Schiene auf diskreten Schwellen bei harmonischer Einzellasterregung», VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 11, Nr. 155, VDI-Verlag 1991, ISBN 3-18-145511-3
- [40] Kohler, M.: «Der Bettungsmodul für den Schotteroberbau von Meterspurbahnen», Dissertation Nr. 14580 ETH Zürich, 2002
- [41] Bosso, N., M. Magelli, N. Zampieri: «Simulation of wheel and rail profile wear: a review of numerical models», Rail. Eng. Science (2022), 30 (4), Seiten 403 – 436
- [42] Böhm, F. und K. Knothe: «Hochfrequenter Rollkontakt der Fahrzeugräder», (Sonderforschungsbereich der DFG), Wiley-VCH, ISBN 9783527277230, 1998
- [43] Deuce, R.: «Wheel Tread Damage – An Elementary Guide», Bombardier, 2007
- [44] Heyder, R.: «Die wichtigsten Schienenfehler», EIK 2022, Seite 177. ff.
- [45] Evans, J.R. und M.C. Burstow: «Vehicle/track interaction and rolling contact fatigue in rails in the UK», Vehicle System Dynamics, Vol. 44, 2006, Seiten 708-717
- [46] Knothe, K. und S. Stichel: «Schienenfahrzeugdynamik», Springer-Verlag, 2003

7.2 Abbildungen

Abbildung 1: Überhöhung $ü$ in Abhängigkeit vom Bogenradius (auf Basis der Daten in «AlleBahnen-LageUeberhoehungHoehe.xlsx» per März 2024)	33
Abbildung 2: Unausgeglichene Querbeschleunigung a_q in Abhängigkeit vom Bogenradius im nicht-überhöhten Bogen für fünf exemplarische Fahrgeschwindigkeiten	36
Abbildung 3: Anlaufwinkel aus MKS-Simulation (SIMPACK) einer Bo’Bo’-Lok bei Kriechfahrt mit 10 km/h durch Klothoide mit 1200 m Länge von Bogenradius $RB = 1000$ m bis 40 m	38
Abbildung 4: Radführungskräfte Y aus MKS-Simulation (SIMPACK) einer Bo’Bo’-Lok bei Kriechfahrt mit 10 km/h durch Klothoide mit 1200 m Länge von Bogenradius $RB = 1000$ m bis 40 m	38
Abbildung 5: Reibarbeit je Rad je Meter aus MKS-Simulation (SIMPACK) einer Bo’Bo’-Lok bei Kriechfahrt mit 10 km/h durch Klothoide mit 1200 m Länge von Bogenradius $RB = 1000$ m bis 40 m	39
Abbildung 6: Anlaufwinkel in Abhängigkeit vom Bogenradius für zwei übliche Radsatzstände $2a + ..$	40
Abbildung 7: Helix-Verwindung für verschiedene Längsneigungen in Abhängigkeit vom Bogenradius bei Meterspuranwendung nach dem Gleichungssatz aus [10]	54
Abbildung 8 – unten: Typischer Verlauf der Anrampung des Rillenbodens im Längsschnitt beim Übergang von Tief- auf Flachrillen («Flachrillenrampe») – oben: beispielhafte Schienenprofile zu markanten Punkten der Flachrillenrampe	59

7.3 Tabellen

Tabelle 1: Symbolabkürzungen.....	17
Tabelle 2: Übersicht der Schutzziele, typischer Einflussgrößen, gängiger Beurteilungsgrößen und (im Vollbahnbereich) üblicher Nachweismethoden zum Fahrverhalten	30
Tabelle 3: Beispiel einer radienabhängigen Staffelung der zulässigen Überhöhung ü einer Tram-Anwendung.....	33
Tabelle 4: Exemplarische Überhöhungsfehlbeträge in Normal- und Meterspur sowie zugehörige unausgeglichener Querbesehleunigung a_q	35
Tabelle 5: Prüfbereiche und zugrundeliegende Prinzipien in redaktioneller Anlehnung an Tabelle 2 der EN 14363 [14] für Vollbahnanwendungen.....	41
Tabelle 6: Prüfbereich 5 mit den Kategorien a bis c nach Tabelle 1 der CEN/TS 17843 [16]	42
Tabelle 7: Vorgeschlagene Prüfbereiche für Meterspuranwendungen	43
Tabelle 8: Mögliche Versuchsbedingungen zum Prüfbereich 2 aus Tabelle 7 für eine fahrzeugseitig zulässige Höchstgeschwindigkeit von $V_{zul} = 100$ km/h.....	45
Tabelle 9: Mögliche Versuchsbedingungen zum Prüfbereich 2 aus Tabelle 7 für eine fahrzeugseitig zulässige Höchstgeschwindigkeit von $V_{zul} = 120$ km/h.....	45
Tabelle 10: Extremal zulässige Trassierung im Prüfbereich 2 aus Tabelle 7 für Meterspuranwendungen mit $V_{zul} = 100$ km/h (in Zuggleisen ohne Zwangspunkte, AB 17 AB-EBV [1])	46
Tabelle 11: Extremal zulässige Trassierung im Prüfbereich 2 aus Tabelle 7 für Meterspuranwendungen mit $V_{zul} = 120$ km/h (in Zuggleisen ohne Zwangspunkte, AB 17 AB-EBV [1])	47
Tabelle 12: Extremal zulässige Trassierung im Prüfbereich 4 aus Tabelle 7 für Meterspuranwendungen (in Zuggleisen ohne Zwangspunkte, AB 17 AB-EBV [1])	48
Tabelle 13: Extremal zulässige Trassierung im Prüfbereich 5a aus Tabelle 7 für Meterspuranwendungen (in Zuggleisen ohne Zwangspunkte, AB 17 AB-EBV [1])	49
Tabelle 14: Extremal zulässige Trassierung im Prüfbereich 5b aus Tabelle 7 für Meterspuranwendungen (in Zuggleisen ohne Zwangspunkte, AB 17 AB-EBV [1]) (zur radienabhängigen Überhöhung in Zeile 6 siehe Abbildung 1 und Abschnitt 3.2)	50
Tabelle 15: Extremal zulässige Trassierung im Prüfbereich 5c aus Tabelle 7 für Meterspuranwendungen (in Zuggleisen ohne Zwangspunkte, AB 17 AB-EBV [1]) (zur radienabhängigen Überhöhung in Zeile 6 siehe Abbildung 1 und Abschnitt 3.2)	51
Tabelle 16: Extremal zulässige Trassierung im Prüfbereich 5d aus Tabelle 7 für Meterspuranwendungen (in Zuggleisen ohne Zwangspunkte, AB 17 AB-EBV [1]) (zur radienabhängigen Überhöhung in Zeile 6 siehe Abbildung 1 und Abschnitt 3.2)	52
Tabelle 17: Extremal zulässige Trassierung im Prüfbereich 5e aus Tabelle 7 für Meterspuranwendungen (in Zuggleisen ohne Zwangspunkte, AB 17 AB-EBV [1]) (zur radienabhängigen Überhöhung in Zeile 6 siehe Abbildung 1 und Abschnitt 3.2)	53
Tabelle 18: Übersicht zu Grenzwerten der Fahrwegbeanspruchung (Spalte 5 enthält vorläufige Werte für Meterspuranwendungen, bis z.B. aus dem Teilprojekt P4 spezifische Vorgaben vorliegen, siehe dazu Punkt 2) in Abschnitt 6)	57
Tabelle 19: Rechengang mit exemplarischen Daten zur Verwindung im Drehgestell bei der Befahrung von Flach/Tief-Rillenanlagen.....	60
Tabelle 20: Einordnung in den Prüfablauf (auf Basis von Bild 1 der EN 14363:2005)	62
Tabelle 21: Vorschlag zur Anwendung der Tabelle U.1 der EN 14363 [14] zum dynamischen Fahrverhalten von Meterspuranwendungen (unbenommen davon können andere Nachweise z.B. zur Sicherheit gegen Entgleisen im verwundenen Gleis erforderlich sein)	73
Tabelle 22: Vorgehen zum Nachweis der Fahrstabilität.....	76
Tabelle 23: Vorgehen zum Nachweis des dynamischen Fahrverhaltens.....	80
Tabelle 24: Vorgehen zum Nachweis der Sicherheit gegen Entgleisen (SgE).....	83
Tabelle 25: Vorgehen zum Abprüfen des grundlegenden Eigenschwingverhaltens.....	84