

DIN EN 14067-4



ICS 45.060.01

Einsprüche bis 2023-01-04
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 14067-4:2019-06

Entwurf**Bahnanwendungen –****Aerodynamik –****Teil 4: Anforderungen und Bewertungsverfahren für Aerodynamik auf offener Strecke;****Deutsche und Englische Fassung prEN 14067-4:2022**

Railway applications –

Aerodynamics –

Part 4: Requirements and assessment procedures for aerodynamics on open track;
German and English version prEN 14067-4:2022

Applications ferroviaires –

Aérodynamique –

Partie 4: Exigences et procédures d'évaluation pour l'aérodynamique à l'air libre;
Version allemande et anglaise prEN 14067-4:2022

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2022-11-04 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und Stellungnahme vorgelegt.

Weil die beabsichtigte Norm von der vorliegenden Fassung abweichen kann, ist die Anwendung dieses Entwurfs besonders zu vereinbaren.

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal von DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an fsf@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF), Rolandstr. 4, 34131 Kassel.

Die Empfänger dieses Norm-Entwurfs werden gebeten, mit ihren Kommentaren jegliche relevanten Patentrechte, die sie kennen, mitzuteilen und unterstützende Dokumentationen zur Verfügung zu stellen.

Gesamtumfang 122 Seiten

DIN-Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 14067-4:2022) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

Das zuständige deutsche Normungsgremium ist der Arbeitsausschuss NA 087-00-05 AA „Aerodynamik und aerodynamische Sondereffekte“ im DIN-Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF).

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Für die in diesem Dokument zitierten Dokumente wird im Folgenden auf die entsprechenden deutschen Dokumente hingewiesen:

ISO 8756 siehe DIN ISO 8756

Aktuelle Informationen zu diesem Dokument können über die Internetseiten von DIN (www.din.de) durch eine Suche nach der Dokumentennummer aufgerufen werden.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 14067-4:2019-06 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Anwendungsbereich geändert, um andere Spurweiten als 1 435 mm abzudecken;
- b) Prüf- und Nachweisverfahren für den Fahrwiderstand und die zugverursachten aerodynamischen Lasten im Gleisbett aktualisiert;
- c) geringfügige Änderungen und Verbesserungen im gesamten Dokument;
- d) Norm redaktionell überarbeitet.

Nationaler Anhang NA
(informativ)

Literaturhinweise

DIN ISO 8756, *Luftbeschaffenheit — Handhabung von Temperatur-, Druck- und Feuchtedaten (ISO 8756)*

– *Entwurf* –

E DIN EN 14067-4:2022-12

– Leerseite –

**Bahnanwendungen – Aerodynamik – Teil 4: Anforderungen und
Bewertungsverfahren für Aerodynamik auf offener Strecke**

Railway applications – Aerodynamics – Part 4: Requirements and assessment procedures for aerodynamics on open track

Applications ferroviaires – Aérodynamique – Partie 4: Exigences et procédures d'évaluation pour l'aérodynamique à l'air libre

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	4
Einleitung	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Symbole	7
5 Anforderungen an Lokomotiven und Personenzüge	12
5.1 Begrenzung von Druckänderungen neben dem Gleis	12
5.1.1 Allgemeines	12
5.1.2 Anforderungen	13
5.1.3 Voller Konformitätsnachweis	14
5.1.4 Vereinfachter Konformitätsnachweis	14
5.2 Begrenzung von Strömungseffekten neben dem Gleis	16
5.2.1 Allgemeines	16
5.2.2 Anforderungen	16
5.2.3 Voller Konformitätsnachweis	19
5.2.4 Vereinfachter Konformitätsnachweis	19
5.3 Aerodynamische Belastungen im Gleisbett	21
5.4 Aerodynamisch bedingter Schotterflug	21
5.5 Fahrwiderstand	22
6 Anforderungen an die Infrastruktur	22
6.1 Zugverursachte Drucklasten auf Bauwerke parallel zum Gleis	22
6.1.1 Allgemeines	22
6.1.2 Anforderungen	22
6.1.3 Konformitätsnachweis	22
6.2 Zugverursachte Strömungsgeschwindigkeiten, die auf Infrastruktur-Komponenten neben dem Gleis wirken	22
6.3 Zugverursachte aerodynamische Belastungen am Gleisbett	23
6.4 Zugverursachte Strömungsgeschwindigkeiten, die auf Personen neben dem Gleis wirken	23
6.5 Aerodynamisch bedingter Schotterflug	23
7 Prüf- und Nachweisverfahren	24
7.1 Bewertung von zugverursachten Druckänderungen neben dem Gleis	24
7.1.1 Allgemeines	24
7.1.2 Druckänderungen im ungestörten Druckfeld (Referenzfall)	27
7.1.3 Druckänderungen auf gleisparallelen Flächen	37
7.1.4 Windeinfluss auf zugverursachte Belastungen	44
7.2 Bewertung von zugverursachten Luftströmungen neben dem Gleis	44
7.2.1 Allgemeines	44
7.2.2 Strömungseffekte auf Personen neben dem Gleis (Referenzfall)	44
7.2.3 Strömungseffekte auf Objekte neben dem Gleis	48
7.3 Bewertung von zugverursachten aerodynamischen Belastungen im Gleisbett	48
7.4 Bewertung des Fahrwiderstands	49
7.4.1 Allgemeines	49
7.4.2 Versuche im 1:1-Maßstab	49
Anhang A (informativ) Verfahren zur Prüfung zugverursachter Luftströmungen im Gleisbett im 1:1-Maßstab	56
A.1 Allgemeines	56
A.2 Streckenaufbau	56
A.3 Fahrzeugkonfiguration und Prüfbedingungen	57
A.4 Instrumentierung und Datenerfassung	57
A.5 Datenverarbeitung	58

Literaturhinweise	59
-----------------------------	----

Bilder

Bild 1 — Koordinatensystem	12
Bild 2 — Beispiele momentaner Druckverteilungen an einer vertikalen Wand verursacht durch die Vorbeifahrt eines einteiligen und eines zweiteiligen Triebzugs	25
Bild 3 — Mit der Vorbeifahrt des Zugkopfs verbundene Druckänderung	25
Bild 4 — Typische Änderung von ΔC_p mit Y	26
Bild 5 — Beispiel für die Abhängigkeit der Druckänderungen Δp_i vom Seitenwind	29
Bild 6 — Querschnittsskizze der Bodenkonfiguration	30
Bild 7 — Simulationsgebiet mit Zugmodell	34
Bild 8 — Beispiel einer schematischen Darstellung der Konfiguration für die Druckmessung	37
Bild 9 — Belastung ebener vertikaler Bauwerke parallel zu den Gleisen	39
Bild 10 — Belastung ebener horizontaler Bauwerke über den Gleisen	40
Bild 11 — Belastung ebener horizontaler Bauwerke in Gleisnähe	41
Bild 12 — Belastung von vertikal und horizontal oder geneigt errichteten Bauwerken in Gleisnähe	43
Bild 13 — Belastung der vertikalen und horizontalen Flächen eines Bauwerks, das zwei Gleise umschließt	44
Bild 14 — Beschreibung des Kriteriums des vertikalen Abstands zum umgebenden Boden	45
Bild 15 — Beschreibung des Kriteriums des vertikalen Abstands zum umgebenden Boden	48
Bild 16 — Versuchsabschnitt für den „Schwungversuch“	50
Bild 17 — Beschreibung des Kriteriums des vertikalen Abstands zum umgebenden Boden	51

Tabellen

Tabelle 1 — Symbole	7
Tabelle 2 — Höchstzulässige Spitze-Spitze-Druckänderung $\Delta p_{95\%,\max}$, bezogen auf die vorgesehene Höchstgeschwindigkeit	13
Tabelle 3 — Anwendbare Verfahren für die vollständige Konformitätsbeurteilung von Schienenfahrzeugen	14
Tabelle 4 — Anwendbare Verfahren und Anforderungen für die vereinfachte Konformitätsbeurteilung von Schienenfahrzeugen	15
Tabelle 5 — Höchstzulässige horizontale Strömungsgeschwindigkeit $U_{95\%,\max}$, bezogen auf die vorgesehene Höchstgeschwindigkeit	17
Tabelle 6 — Anwendbare Verfahren für den vollen Konformitätsnachweis von Fahrzeugen	19
Tabelle 7 — Anwendbare Verfahren und Anforderungen für die vereinfachte Konformitätsbeurteilung von Schienenfahrzeugen	20
Tabelle 8 — Bestimmung von $\Delta p_{95\%}$ durch CFD-Simulation	36

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 14067-4:2022) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN 14067-4:2013+A1:2018 ersetzen.

Ergebnisse des von der EU finanzierten Forschungsprojektes „AeroTRAIN“ (Finanzhilfevereinbarung Nr. 233985) sind in diesem Dokument enthalten.

Die wesentlichen Änderungen im Vergleich zur Vorgängerausgabe sind folgende:

Der Anwendungsbereich wurde geändert, um andere Spurweiten als 1 435 mm abzudecken. Im gesamten Dokument wurden geringfügige Änderungen und Verbesserungen vorgenommen. Die Prüf- und Nachweisverfahren für den Fahrwiderstand und die zugverursachten aerodynamischen Lasten im Gleisbett wurden aktualisiert.

Dieses Dokument wurde im Rahmen eines Mandats erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelsassoziation CEN erteilt haben.

EN 14067 Bahnanwendungen — Aerodynamik besteht aus den folgenden Teilen:

- Teil 4: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik auf offener Strecke;
- Teil 5: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik im Tunnel;
- Teil 6: Anforderungen und Prüfverfahren zur Bewertung von Seitenwind;
- Teil 7 (TR): Fundamentals for test procedures for train-induced ballast projection

Einleitung

Züge auf offener Strecke verursachen aerodynamische Belastungen an Personen und Objekten, an denen sie vorbeifahren. Wenn Züge anderen Zügen begegnen, sind sie selbst ebenfalls aerodynamischen Belastungen ausgesetzt. Die aerodynamischen Belastungen, die durch die Zugvorbeifahrt an Objekten und Personen in Gleisnähe oder durch zwei aneinander vorbeifahrende Züge verursacht werden, sind wichtige Schnittstellenparameter zwischen den Teilsystemen „Fahrzeuge“, „Infrastruktur“ und „Betrieb“. Daher werden sie bei der Spezifikation des transeuropäischen Eisenbahnsystems reglementiert.

Züge müssen bei der Fahrt auf offener Strecke einen Fahrwiderstand überwinden, der großen Einfluss auf die benötigte Antriebsleistung, erreichbare Geschwindigkeit, Fahrzeit und den Energieverbrauch hat. Daher ist der Fahrwiderstand häufig Gegenstand vertraglicher Vereinbarungen und erfordert genormte Prüf- und Bewertungsverfahren. Der Prüfaufbau für den Schotterflug wurde ebenfalls aktualisiert.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt Anforderungen, Prüfverfahren, Beurteilungsverfahren und Abnahmekriterien für den Betrieb von Schienenfahrzeugen auf offener Strecke fest. Für Druckänderungen und Strömungseffekte neben dem Gleis werden Anforderungen und Beurteilungsverfahren bereitgestellt. Für den Fahrwiderstand werden Beurteilungsverfahren in diesem Dokument behandelt. Lastfälle auf Infrastrukturkomponenten aufgrund von zugverursachten Druckänderungen und Strömungseffekten werden in diesem Dokument behandelt. Für Schottergleise werden Prüfaufbauten zur Beurteilung des Schotterflugs empfohlen.

Die Anforderungen gelten nur für Schienenfahrzeuge des Vollbahnsystems mit Höchstgeschwindigkeiten über 160 km/h und nicht für andere Bahnsysteme. Das Dokument gilt für alle Schienenfahrzeuge und Infrastrukturen im Freien mit einer Nennspurweite von 1 435 mm bis einschließlich 1 668 mm.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente werden im Text in solcher Weise in Bezug genommen, dass einige Teile davon oder ihr gesamter Inhalt Anforderungen des vorliegenden Dokuments darstellen. Bei datierten Verweisungen gilt nur die in Bezug genommene Ausgabe. Bei undatierten Verweisungen gilt die letzte Ausgabe des in Bezug genommenen Dokuments (einschließlich aller Änderungen).

EN 1991-2:2003¹, *Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke — Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken*

EN 15273 (alle Teile), *Bahnanwendungen — Begrenzungslinien*

EN 16727-2-2:2016, *Bahnanwendungen — Oberbau — Lärmschutzwände und verwandte Vorrichtungen zur Beeinflussung der Luftschallausbreitung — Nicht akustische Eigenschaften — Teil 2-2: Mechanische Eigenschaftsanforderungen unter dynamischen Belastungen infolge Zugverkehr — Berechnungsverfahren*

EN 17343, *Bahnanwendungen — Allgemeine Begriffe*

ISO 8756, *Air quality — Handling of temperature, pressure and humidity data*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die in EN 17343 und im Folgenden aufgeführten Begriffe und Definitionen.

ISO und IEC stellen terminologische Datenbanken für die Verwendung in der Normung unter den folgenden Adressen bereit:

— ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <http://www.iso.org/obp>

— IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>

3.1

Spitze-Spitze-Druckänderung

Unterschiedsbetrag zwischen größtem und kleinstem Druckwert für den entsprechenden Lastfall

3.2

Vorbeifahrt des Zugkopfs

Vorbeifahrt des vorderen Endes des führenden Fahrzeugs, die für die Erzeugung des charakteristischen Druckanstiegs und -abfalls über und neben dem Zug sowie auf dem Gleisbett verantwortlich ist

¹ Von AC:2010 betroffenes Dokument.

3.3

Computational Fluid Dynamics

CFD

numerische Verfahren zur Annäherung und Lösung der strömungsmechanischen Erhaltungsgleichungen

3.4

stromlinienförmiges Fahrzeug

Fahrzeug mit einer geschlossenen und glatten Kopfform, die keine Strömungsablösungen von mehr als 5 cm von der Fahrzeugseite entfernt im mittleren Strömungsfeld verursacht

3.5

stumpf geformtes Fahrzeug

nicht stromlinienförmiges Fahrzeug

4 Symbole

Für die Anwendung dieser Norm gelten die Symbole nach Tabelle 1.

Tabelle 1 — Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erläuterung oder Bemerkung
a	m/s^2	während der Auslaufversuche gemessene Zugbeschleunigungen	
a_D	m/s^2	während der Auslaufversuche gemessene Zugbeschleunigungen, wenn der Zug bergab fährt	
a_d	m/s^2	Differenz der Zugbeschleunigungen zwischen zwei Auslaufversuchen auf derselben Gleisposition	
a_U	m/s^2	während der Auslaufversuche gemessene Zugbeschleunigungen, wenn der Zug bergauf fährt	
C_F	—	aerodynamischer Beiwert	
C_{p1}	—	aerodynamischer Beiwert, der vom seitlichen Abstand Y zur Gleisachse abhängt	
C_{p2}	—	aerodynamischer Beiwert, der von der Höhe h über Schienenoberkante abhängt	
C_{p3}	—	aerodynamischer Beiwert, der vom seitlichen Abstand Y zur Gleisachse abhängt	
C_1	N	Rollwiderstand	
$C_{1,A}$	N	Näherung des Rollwiderstands	siehe 7.4.2
$C_2 v_{tr}$	N	Impulswiderstand, der durch die Kühlluft der Lokomotiven und die Klimatisierung der Wagen verursacht wird	
$C_3 v_{tr}^2$	N	aerodynamischer Widerstand in der Fahrwiderstandsformel	
$\overline{C_3}$	N/Pa	$\overline{C_3}$ zeigt den Dichtheitsbeitrag	

Tabelle 1 (*fortgesetzt*)

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erläuterung oder Bemerkung
c	m/s	Schallgeschwindigkeit	
dt	s	zeitliche Änderung	
dv_{tr}	m/s	Änderung der Zuggeschwindigkeit	
dx	m	örtliche Änderung	
F	N	Strömungsbelastung eines Objekts, Höchstwert der Kraft während der Vorbeifahrt	
F_d	N	Kraft	siehe 7.4.2.2.3
g	m/s ²	Beschleunigung durch Schwerkraft	
h	m	Höhe über Schienenoberkante	
i	—	Streckengefälle	innerhalb eines typischen Bereichs von $\pm 0,03$
k	—	Faktor zur Berücksichtigung der kinetischen Energie der rotierenden Massen	$\geq 1,0$
k_1	—	Formbeiwert des Zugs	
k_2	—	Formbeiwert des Zugs	
k_3	—	Formbeiwert des Zugs	
L_n	m	Länge des Bugs	Abstand zwischen der Spitze des Zugs und der Stelle, an der der volle Querschnitt des führenden Fahrzeugs erreicht wird
L_s	m	Länge der Versuchsstrecke	siehe 7.4.2.2
M_x	Nm	Rückstellmoment aufgrund der Fahrzeugmassen	siehe Bild 1
M_y	Nm	aerodynamisches Nickmoment	siehe Bild 1
M_z	Nm	aerodynamisches Giermoment	siehe Bild 1
m	kg	Masse des Zugs	
P_d	N	Funktion der Zugbeschleunigungen im Quadrat zwischen zwei Auslaufversuchen auf derselben Gleisposition	siehe 7.4.2.4
p	Pa	Druck	
p_{max}	Pa	Höchstdruck	
p_{min}	Pa	Minstdruck	
p_{1k}	Pa	Wert der Flächenlasten	
p_{2k}	Pa	Wert der Flächenlasten	
p_{3k}	Pa	Wert der Flächenlasten	
Re_{max}	—	höchste Reynoldszahl	basierend auf 3 m Referenzlänge im 1:1-Maßstab
R_1	N	Fahrwiderstand	fahrzeugseitig

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erläuterung oder Bemerkung
R_2	N	Fahrwiderstand	infrastrukturseitig
r	m	Bogenradius	
S	m ²	charakteristische Fläche	
s	m	Abstand	siehe 7.4.2.2
t	s	Zeit	
t_i	s	skalierte Zeit, die sich auf die i -te Vorbeifahrt bezieht	
$t_{m,i}$	s	Zeit, die sich auf die i -te Vorbeifahrt bezieht	
U_i	m/s	höchste bei der i -ten Vorbeifahrt auftretende horizontale Strömungsgeschwindigkeit nach Mittelwertbildung und Anpassung an die charakteristische Zuggeschwindigkeit	
$\bar{U}$	m/s	Mittelwert aller gemessenen Höchstwerte U_i	
$U_{\max}$	m/s	Höchstwert von U	
$U_{2\sigma}$	m/s	Obergrenze des 2σ -Intervalls der höchsten Strömungsgeschwindigkeit	
$U_{95\%}$	m/s	höchste bei der Vorbeifahrt auftretende horizontale Strömungsgeschwindigkeit	charakteristische Strömungsgeschwindigkeit aus der Messung
$U_{95\%,\max}$	m/s	höchste bei der Vorbeifahrt zulässige horizontale Strömungsgeschwindigkeit	Grenzwert für die charakteristische Strömungsgeschwindigkeit
$u_i(t_i)$	m/s	bei der i -ten Vorbeifahrt auftretende horizontale Strömungsgeschwindigkeit	nach Transformation der Zeitbasis
$u_{m,i}(t_{m,i})$	m/s	gemessener Wert der bei der i -ten Vorbeifahrt auftretenden horizontalen Strömungsgeschwindigkeit	
v_a	m/s	relative Windgeschwindigkeit	siehe Bild 1
v_d	m/s	Differenz der Zuggeschwindigkeit zwischen zwei Auslaufversuchen auf derselben Gleisposition	siehe 7.4.2.4
$v_{d,q}$	m ² /s ²	Differenz der Zugbeschleunigungen im Quadrat zwischen zwei Auslaufversuchen auf derselben Gleisposition	siehe 7.4.2.4
v_{tr}	m/s	Zuggeschwindigkeit	
v_{trD}	m/s	momentane Zuggeschwindigkeit, wenn der Zug bergab fährt	siehe 7.4.1.2
$v_{tr,i}$	m/s	Geschwindigkeit des Zugs bei der i -ten Vorbeifahrt	

Tabelle 1 (*fortgesetzt*)

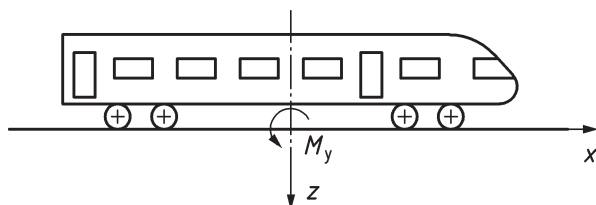
Symbol	Einheit	Bedeutung	Erläuterung oder Bemerkung
$v_{tr,max}$	m/s	maximale Zuggeschwindigkeit oder Bemessungs-Zuggeschwindigkeit	Die maximale Zuggeschwindigkeit bezieht sich auf den Zugverband. Im Fall einer Beschränkung durch die Infrastruktur darf die maximale Zuggeschwindigkeit geringer als die Bemessungs-Zuggeschwindigkeit sein.
$v_{tr,ref}$	m/s	Referenzgeschwindigkeit	
$v_{tr,S1}$	m/s	gemessene Geschwindigkeit am Punkt S, wenn der Zug bergauf fährt	siehe 7.4.1.2
$v_{tr,S2}$	m/s	gemessene Geschwindigkeit am Punkt S, wenn der Zug bergab fährt	siehe 7.4.1.2
$v_{tr,S1a}$	m/s	gemessene Geschwindigkeit an Startpunkt S1 in Auslaufrichtung 1	siehe 7.4.2.2.3
$v_{tr,S1b}$	m/s	gemessene Geschwindigkeit am Endpunkt in Auslaufrichtung 1	siehe 7.4.2.2.3
$v_{tr,S2a}$	m/s	gemessene Geschwindigkeit an Startpunkt S2 in Auslaufrichtung 2	siehe 7.4.2.2.3
$v_{tr,S2b}$	m/s	gemessene Geschwindigkeit am Endpunkt in Auslaufrichtung 2	siehe 7.4.2.2.3
$v_{tr,test}$	m/s	nominale Prüfgeschwindigkeit	
v_{trU}	m/s	momentane Zuggeschwindigkeit, wenn der Zug bergauf fährt	siehe 7.4.1.2
v_w	m/s	Windgeschwindigkeit	Windgeschwindigkeit gemessen am ortsfesten Punkt, siehe Bild 1
$v_{w,x,i}$	m/s	Windgeschwindigkeitskomponente in x-Richtung bei der i -ten Vorbeifahrt	
$v_{w,y,i}$	m/s	Windgeschwindigkeitskomponente in y-Richtung bei der i -ten Vorbeifahrt	
W_y	—	Quotient aus Seitenwindgeschwindigkeit und Geschwindigkeit der einfallenden Strömung in Gleisrichtung	siehe 7.1.2.1
Y	m	seitlicher Abstand zur Gleisachse	
Y_{min}	m	kleinster seitlicher Abstand zur Gleisachse	
Y_{max}	m	größter seitlicher Abstand zur Gleisachse	
y^+	—	dimensionsloser Wandabstand	

Tabelle 1 (fortgesetzt)

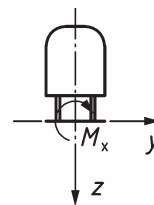
Symbol	Einheit	Bedeutung	Erläuterung oder Bemerkung
β	—	Gierwinkel	Winkel zwischen der Fahrzeugachse und dem relativen Wind, der auf den Zug wirkt. In einem Windkanal mit stationärem Zugmodell ist dies der Winkel zwischen der Zugachse und der Windkanalachse, siehe Bild 1.
β_w	—	Windwinkel zum Gleis	Winkel zwischen den Windrichtungen und der Vorwärtsrichtung des Zuges, siehe Bild 1.
ΔC_p	—	Druckbeiwert der Spitze-Spitze-Druckänderung	
$\Delta C_{p,2\sigma}$	—	Druckbeiwert der Spitze-Spitze-Druckänderung	Obergrenze des 2σ -Intervalls des Spitze-Spitze-Druckänderungsbeiwerts. Der Spitze-Spitze-Druckänderungsbeiwert wird mit Gleichung (2) bestimmt.
Δp	Pa	Spitze-Spitze-Druckänderung	
$\overline{\Delta p}$	Pa	Mittelwert der Spitze-Spitze-Druckänderung	ermittelt aus sämtlichen Messergebnissen Δp_i oder durch CFD
Δp_i	Pa	korrigierter höchster Wert des Spitze-Spitze-Drucks bei der i -ten Vorbeifahrt	Gleichung (5)
$\Delta p_{m,i}$	Pa	höchster bei der i -ten Vorbeifahrt gemessener Wert des Spitze-Spitze-Drucks	Gleichung (5)
Δp_{sim}	Pa	durch instationäre CFD-Berechnungen ermittelte Änderung des zugkopfverursachten Drucks	
$\overline{\Delta p_{sim}}$	Pa	durch CFD-Berechnungen ermittelte Änderung des durchschnittlichen zugkopfverursachten Drucks	der Durchschnitt bezieht sich entweder auf stationäre CFD-Berechnungen oder auf den Durchschnitt der Ergebnisse aus instationären Simulationen
$\overline{\Delta p_{sim,k}}$	Pa	durch stationäre CFD-Berechnungen ermittelte Änderung für die k -te Höhe	Gleichung 0
$\Delta p_{test,k}$	Pa	durchschnittliche Wert des Spitze-zu-Spitze-Drucks für die 6 Höhen k , ermittelt durch Messungen	Gleichung (8)
$\Delta p_{2\sigma}$	Pa	Obergrenze des 2σ -Intervalls der Spitze-Spitze-Druckänderung	

Tabelle 1 (fortgesetzt)

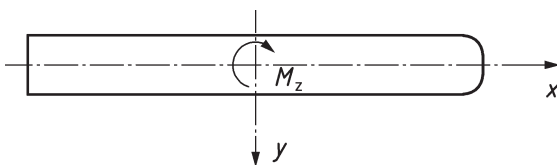
Symbol	Einheit	Bedeutung	Erläuterung oder Bemerkung
$\Delta p_{95\%}$	Pa	größte Spitze-Spitze-Druckänderung	charakteristische Druckänderung
$\Delta p_{95\%,\max}$	Pa	größte zulässige Spitze-Spitze-Druckänderung	zulässige charakteristische Druckänderung
Δt	s	charakteristisches Zeitintervall	Vorbeifahrt des Zugkopfs, Zeit zwischen den Druckspitzen
ε	—	relativer quadratischer Mittelwert der Differenz zwischen einer berechneten Druckänderung und den Prüfergebnissen	
η	Pa s	dynamische Viskosität der Luft	
ρ	kg/m ³	Luftdichte	
ρ_i	kg/m ³	bei der i -ten Vorbeifahrt ermittelte Luftdichte	
ρ_0	kg/m ³	Normalluftdichte	$\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$
σ	—	Standardabweichung	für Druck oder Geschwindigkeit
σ_{sim}	Pa	Standardabweichung des simulierten Drucks	



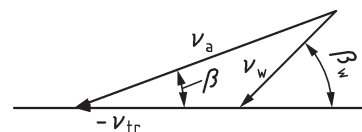
a) Seitenansicht



b) Rückansicht



c) Ansicht von oben



d) Geschwindigkeitsdreieck

ANMERKUNG Ein positiver Wert β bedeutet, dass der scheinbare Wind v_a von der rechten Seite des Zuges kommt.

Bild 1 — Koordinatensystem

5 Anforderungen an Lokomotiven und Personenfahrzeuge

5.1 Begrenzung von Druckänderungen neben dem Gleis

5.1.1 Allgemeines

Ein vorbeifahrender Zug erzeugt ein sich änderndes Druckfeld neben dem Gleis, das auf Objekte wie in Gegenrichtung vorbeifahrende Züge, Lärmschutzwände, Bahnsteigaufbauten usw. einwirkt. Zur Definition einer ein-

deutigen Schnittstelle zwischen den Teilsystemen „Fahrzeuge“ und „Infrastruktur“ müssen die zugverursachten aerodynamischen Drucklasten neben dem Gleis bekannt sein und begrenzt werden.

Zur Beschreibung und Begrenzung der zugverursachten aerodynamischen Drucklasten neben dem Gleis werden Referenzfälle für Spurweiten von 1 435 mm bis einschließlich 1 668 mm festgelegt.

5.1.2 Anforderungen

5.1.2.1 Referenzfall

Für Spurweiten von 1 435 mm bis einschließlich 1 668 mm wird das ungestörte Druckfeld, das durch einen vorbeifahrenden Zug in einem Abstand nach Tabelle 2 von der Mitte des Gleises erzeugt wird, als Referenzfall bezeichnet. Der Referenzfall ist für ein gerades Gleis mit Standardbettungsquerschnitt und in Abwesenheit von Dämmen, Geländeeinschnitten und anderen bedeutenden Objekten in Gleisnähe definiert. Die auftretenden Druckänderungen werden durch die obere Grenze des 95%-Vertrauensintervalls, gebildet aus den größten Spitze-Spitze-Druckänderungen, beschrieben. Die größte Spitze-Spitze-Druckänderung $\Delta p_{95\%}$ bezieht sich auf die größte Druckänderung, die während der Vorbeifahrt des Zugkopfs auftritt.

5.1.2.2 Nicht trennbare oder vordefinierte Zugverbände

Ein nicht trennbarer oder vordefinierter Zugverband, der mit Referenzgeschwindigkeit im Referenzfallszenario fährt, darf während der Vorbeifahrt des Zugkopfs keine größere Spitze-Spitze-Druckänderung verursachen als den in Tabelle 2 aufgeführten Wert $\Delta p_{95\%,\max}$ in 1,50 m bis 3,00 m Höhe über Schienenoberkante. Bei nicht identischen Endwagen gilt die Anforderung für jede mögliche Fahrtrichtung.

Tabelle 2 — Höchstzulässige Spitze-Spitze-Druckänderung $\Delta p_{95\%,\max}$, bezogen auf die vorgesehene Höchstgeschwindigkeit

Spurweite	Vorgesehene Höchstgeschwindigkeit	Messabstand zur Gleisachse	Zulässige Druckänderung $\Delta p_{95\%,\max}$ bei Referenzgeschwindigkeit	Referenzgeschwindigkeit
mm	km/h	m	Pa	km/h
alle	$v_{tr,\max} \leq 160$	2,5	keine Anforderung	
1 435	$160 < v_{tr,\max} < 250$	2,5	$\Delta p_{95\%,\max} = 800$	$v_{tr,\max}$
1 435	$250 \leq v_{tr,\max}$	2,5	$\Delta p_{95\%,\max} = 800$	250
1 524	$160 < v_{tr,\max} < 250$	2,5	$\Delta p_{95\%,\max} = 1\,600$	$v_{tr,\max}$
1 668	$160 < v_{tr,\max} < 250$	2,6	$\Delta p_{95\%,\max} = 800$	$v_{tr,\max}$
1 668	$250 \leq v_{tr,\max}$	2,6	$\Delta p_{95\%,\max} = 800$	250

Für die Spurweite von 1 435 mm wurde die Anforderung auf der Grundlage von Schienenfahrzeugen mit einer halben Breite abgeleitet, die den Begrenzungslinien GA, GB, GC, G1, G2, GB-M6, EBV 01, EBV 02, DE1 und DE3 nach EN 15273 (alle Teile) entsprechen. Für eine Spurweite von 1 435 mm und wenn die halbe Breite des Fahrzeugs größer als 1 575 mm ist, darf der Messabstand von der Gleisachse vergrößert werden, so dass die Drucksonden 0,925 m von der Zugseite entfernt sind.

ANMERKUNG Die oben genannte Änderung ist möglicherweise in Schweden und Norwegen erforderlich. Wenn eine solche Änderung vorgenommen wird, können sich dadurch auch die Lastfälle für die Infrastruktur ändern, siehe 6.1 und 6.2.

5.1.2.3 Einzelfahrzeuge mit Führerraum

Einzelfahrzeuge mit Führerraum, die als führendes Fahrzeug mit Referenzgeschwindigkeit im Referenzfallszenario fahren, dürfen keine größte Spitze-Spitze-Druckänderung verursachen, die zur Überschreitung des in Tabelle 2 aufgeführten Wertes $\Delta p_{95\%,\max}$ führt. Bei der Vorbeifahrt des vorderen Fahrzeugendes ist hierbei ein Höhenbereich zwischen 1,50 m und 3,00 m über Schienenoberkante zu berücksichtigen. Bei Einzelfahrzeugen, die in beiden Richtungen als führendes Fahrzeug eingesetzt werden können, gilt die Anforderung für jede mögliche Fahrtrichtung.

5.1.2.4 Sonstige Einheiten

Für andere Einheiten, die nicht unter 5.1.2.2 oder 5.1.2.3 fallen, bestehen keine Anforderungen.

5.1.3 Voller Konformitätsnachweis

Ein voller Konformitätsnachweis für interoperable Fahrzeuge ist nach Tabelle 3 durchzuführen.

Tabelle 3 — Anwendbare Verfahren für die vollständige Konformitätsbeurteilung von Schienenfahrzeugen

Vorgesehene Höchstgeschwindigkeit	Verfahren
$v_{tr,\max} \leq 160 \text{ km/h}$	kein Nachweis erforderlich
$160 \text{ km/h} < v_{tr,\max}$	Nachweis durch: — Versuche im 1:1-Maßstab nach 7.1.2.1 oder — Versuche mit bewegten Modellen im verkleinerten Maßstab nach 7.1.2.2 oder — CFD-Simulationen nach 7.1.2.4

5.1.4 Vereinfachter Konformitätsnachweis

Für Fahrzeuge, an denen im Vergleich zu Fahrzeugen, für die ein voller Konformitätsnachweis bereits vorliegt, geringfügige konstruktive Änderungen vorgenommen wurden, darf ein vereinfachter Konformitätsnachweis durchgeführt werden.

Bezüglich der Druckänderungen neben dem Gleis sind ausschließlich Designunterschiede der Außengeometrie und der vorgesehenen Geschwindigkeit von Belang.

Der vereinfachte Konformitätsnachweis muss in Übereinstimmung mit Tabelle 4 wie folgt durchgeführt werden:

- anhand einer Erklärung und Begründung dafür, dass die konstruktiven Unterschiede keinen Einfluss auf die Druckänderungen neben dem Gleis haben, oder
- durch eine vergleichende Auswertung der konstruktiven Unterschiede bezogen auf das Fahrzeug, für das ein voller Konformitätsnachweis bereits vorliegt.

Tabelle 4 — Anwendbare Verfahren und Anforderungen für die vereinfachte Konformitätsbeurteilung von Schienenfahrzeugen

Gestaltungsunterschiede	Verfahren und Anforderungen
Unterschiede in der Außengeometrie, beschränkt auf: — Stellen, die sich vom Bug aus gesehen entweder stromabwärts von dem Ort befinden, an dem der größte Querschnitt erreicht wird, oder stromabwärts von der Stelle, an der die kleinste Druckspitze relativ zum Bug auftritt; — den inneren Bereich des Zugunterbodens (unter dem Zug und zwischen den Schienen); — geringfügige Unterschiede in der Außengeometrie; — Scheibenwischer und Griffe; — Antennen mit einem Volumen von weniger als 5 l; — lange, isoliert hervorstehende Objekte oder Spalten mit einem Querschnitt von weniger als 50 mm, die nicht vertikal zu Frontradius oder -kante verlaufen oder sich in Nähe dazu befinden; — kleine isoliert hervorstehende Objekte und Spalten, die in jeder Dimension kleiner sind als 50 mm.	Dokumentation der Unterschiede; Bestätigung, dass diese keinen Einfluss auf die horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten neben dem Gleis haben, und Bezug auf einen vorliegenden vollen Konformitätsnachweis.
Andere Unterschiede in der Außengeometrie (z. B. bei Puffern, Frontkupplungen, Schneepflügen, Front- oder Seitenfenstern), durch die die Grundmerkmale der Kopfform erhalten bleiben.	Dokumentation der Unterschiede und Bezug auf einen vorliegenden vollen Konformitätsnachweis UND Bewertung des relativen Einflusses der Unterschiede durch — Versuche mit bewegten Modellen im Modellmaßstab nach 7.1.2.2 oder — CFD-Simulationen nach 7.1.2.4, UND Nachweise und Dokumentation, dass 1) (i) die Unterschiede $\overline{\Delta p}$ um weniger als $\pm 10\%$ verändern; $\frac{\overline{\Delta p(B)} - \overline{\Delta p(A)}}{\overline{\Delta p(A)}} < 0,1$ UND 2) die Unterschiede 50 % der verfügbaren Toleranz bezüglich der Übereinstimmung mit 5.1.2 nicht überschreiten.

Tabelle 4 (fortgesetzt)

Gestaltungsunterschiede	Verfahren und Anforderungen
	$\left(\overline{\Delta p}(B) - \overline{\Delta p}(A) \right) < 0,5 \times (\Delta p_{95\%, \max} - \Delta p_{95\%}(A))$ ANMERKUNG <i>B</i> bezieht sich auf die neue Zuggeometrie. <i>A</i> bezieht sich auf den nachgewiesenermaßen konformen Zug.
Erhöhung der vorgesehenen Geschwindigkeit — um weniger als 10 % für einen Zug mit ursprünglich vorgesehener Geschwindigkeit < 250 km/h, — für einen Zug mit ursprünglich vorgesehener Geschwindigkeit ≥ 250 km/h.	Dokumentation der Unterschiede und Bezug auf einen vorliegenden vollen Konformitätsnachweis UND Nachweis und Dokumentation auf der Grundlage einer ΔC_p -Analyse, dass das neue Design, das untersucht wird, die in 5.1.2 aufgeführten Anforderungen noch erfüllt.

5.2 Begrenzung von Strömungseffekten neben dem Gleis

5.2.1 Allgemeines

Ein vorbeifahrender Zug erzeugt ein sich änderndes Strömungsfeld neben dem Gleis, das auf Personen und Objekte neben dem Gleis und auf Bahnsteigen einwirkt. Daher müssen Messungen in zwei Höhen vorgenommen werden, die die Position der Gleisarbeiter und Fahrgäste repräsentieren. Zur Definition einer eindeutigen Schnittstelle zwischen den Teilsystemen „Fahrzeuge“ und „Infrastruktur“ müssen die zugverursachten Strömungseffekte bekannt sein und begrenzt werden.

Zur Beschreibung und Begrenzung der zugverursachten Strömungseffekte werden Referenzfälle für Spurweiten von 1 435 mm bis einschließlich 1 668 mm festgelegt.

ANMERKUNG Zum Schutz von Gleisarbeitern und von Passagieren auf Bahnsteigen sind zusätzlich betriebliche und infrastrukturelle Maßnahmen erforderlich.

5.2.2 Anforderungen

5.2.2.1 Referenzfälle

Bei Spurweiten von 1 435 mm bis 1 668 mm und in Abwesenheit von Dämmen, Geländeeinschnitten und anderen signifikanten Objekten in Gleisnähe wird das ungestörte Strömungsfeld, das durch einen vorbeifahrenden Zug in einem Abstand nach Tabelle 4 von der Gleisachse entfernten Stelle auf gerader Strecke mit Standardbettungsquerschnitt erzeugt wird, als Referenzfall bezeichnet. Die auftretenden Luftströmungen werden durch die obere Grenze des 95%-Vertrauensintervalls für die größte horizontale Strömungsgeschwindigkeit beschrieben. Die größte horizontale Strömungsgeschwindigkeit $U_{95\%}$ bezieht sich auf die gesamte Vorbeifahrt des Zugs und seinen Nachlauf.

5.2.2.2 Nicht trennbare oder vordefinierte Zugverbände

Ein nicht trennbarer oder vordefinierter Zugverband voller Länge, der mit Referenzgeschwindigkeit im Referenzfallszenario fährt, darf während der Vorbeifahrt des gesamten Zugs einschließlich Nachlaufeffekten keine größeren horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten $U_{95\%}$ verursachen als den in Tabelle 5 aufgeführten Werten $U_{95\%, \max}$. Die horizontale Strömungsgeschwindigkeit wird 0,20 m und 1,4 m über Schienenoberkante ermittelt. Bei nicht symmetrischen Zugverbänden gilt die Anforderung für jede mögliche Fahrtrichtung. Bei festen oder vordefinierten Zugverbänden, die aus mehr als einer Zugeinheit bestehen, ist es ausreichend, einen Zugverband zu beurteilen, der aus mindestens zwei Einheiten besteht und eine Mindestlänge von 120 m aufweist. Gegebenenfalls muss die Wahl der nach Tabelle 6 beurteilten Zugkonfigurationen unter

Berücksichtigung der Länge und Anzahl der Einheiten sowie der Symmetrie (Vergleich der vorderen mit der hinteren Hälfte des Zuges) dokumentiert werden. Die Wahl der Änderungen bei der Positionierung der Wagen innerhalb des Zuges muss begründet werden.

Tabelle 5 — Höchstzulässige horizontale Strömungsgeschwindigkeit $U_{95\%,\max}$, bezogen auf die vorgesehene Höchstgeschwindigkeit

Spurweite mm	Vorgesehene Höchstgeschwindigkeit $v_{tr,\max}$ km/h	Höhe über Schienenoberkante m	Abstand von der Gleisachse m	Zulässige horizontale Strömungsgeschwindigkeit $U_{95\%,\max}$ bei Referenzgeschwindigkeit m/s	Referenzgeschwindigkeit $v_{tr,\text{ref}}$
alle	$v_{tr,\max} \leq 160$	keine Anforderung			
1 435	$160 < v_{tr,\max} < 250$	0,2	3,0	$U_{95\%,\max} = 20$	vorgesehene Höchstgeschwindigkeit
		1,4	3,0	$U_{95\%,\max} = 15,5$	min. (200 km/h, vorgesehene Höchstgeschwindigkeit)
	$250 \leq v_{tr,\max}$	0,2	3,0	$U_{95\%,\max} = 20$	min. (300 km/h, vorgesehene Höchstgeschwindigkeit)
		1,4	3,0	$U_{95\%,\max} = 15,5$	200 km/h
1 524	$160 < v_{tr,\max} < 250$	0,2	3,0	$U_{95\%,\max} = 22,5$	vorgesehene Höchstgeschwindigkeit
		1,4	3,0	$U_{95\%,\max} = 18$	min. (200 km/h, vorgesehene Höchstgeschwindigkeit)

Tabelle 5 (*fortgesetzt*)

Spurweite	Vorgesehene Höchstgeschwindigkeit $v_{tr,max}$	Höhe über Schienenoberkante	Abstand von der Gleisachse	Zulässige horizontale Strömungsgeschwindigkeit $U_{95\%,max}$ bei Referenzgeschwindigkeit	Referenzgeschwindigkeit $v_{tr,ref}$
mm	km/h	m	m	m/s	
1 668	$160 < v_{tr,max} < 250$	0,2	3,1	$U_{95\%,max} = 20$	vorgesehene Höchstgeschwindigkeit
		1,4	3,1	$U_{95\%,max} = 15,5$	min. (200 km/h, vorgesehene Höchstgeschwindigkeit)
	$250 \leq v_{tr,max}$	0,2	3,1	$U_{95\%,max} = 22$	min. (300 km/h, vorgesehene Höchstgeschwindigkeit)
		1,4	3,1	$U_{95\%,max} = 15,5$	200 km/h
ANMERKUNG 1 Die Messhöhe von 0,2 m in Tabelle 5 repräsentiert eine Situation in Zusammenhang mit Gleisarbeitern, siehe TSI HS RST 2008, 4.2.6.2.1. Die Höhe von 1,4 m repräsentiert eine Situation in Zusammenhang mit Fahrgästen auf einem Bahnsteig, siehe TSI HS RST 2008, 4.2.6.2.2. ANMERKUNG 2 In EN 14067-4:2005+A1:2009 und TSI HS RST 2008 gab es die Anforderung, die Geschwindigkeit in 1,2 m Höhe über einem niedrigen Bahnsteig sowie in Gleisnähe zu messen. Die Messung in Gleisnähe in 1,4 m Höhe erwies sich in einer Reihe von Prüfungen als gleichwertig mit der Messung auf dem Bahnsteig.					

Für die Spurweite von 1 435 mm wurde die Anforderung auf der Grundlage von Schienenfahrzeugen mit einer halben Breite abgeleitet, die den Begrenzungslinien GA, GB, GC, G1, G2, GB-M6, EBV 01, EBV 02, DE1 und DE3 nach EN 15273 (alle Teile) entsprechen. Für eine Spurweite von 1 435 mm und wenn die halbe Breite des Fahrzeugs größer als 1 575 mm ist, darf der Messabstand von der Gleisachse vergrößert werden, so dass die Anemometerfühler 1,425 m von der Zugseite entfernt sind.

ANMERKUNG Die oben genannte Änderung ist möglicherweise in Schweden und Norwegen erforderlich. Wenn eine solche Änderung vorgenommen wird, könnten sich dadurch auch die Lastfälle für die Infrastruktur ändern, siehe 6.1 und 6.2.

5.2.2.3 Einzelfahrzeuge mit Führerraum

Einzelfahrzeuge mit Führerraum, die mit Referenzgeschwindigkeit im Referenzfallszenario fahren, dürfen während der Vorbeifahrt des gesamten Zugs einschließlich Nachlaufeffekten keine größte horizontale Strömungsgeschwindigkeit $U_{95\%}$ verursachen, die auf 0,20 m und 1,40 m Höhe über Schienenoberkante zur Überschreitung des in Tabelle 5 aufgeführten Wertes $U_{95\%,max}$ führt.

Der Konformitätsnachweis muss für die Fahrzeuge am vorderen und hinteren Ende eines Personenzugverbandes mit einer Länge von mindestens 100 m erfolgen. Die Bewertung muss entweder mit einem Fahrzeug oder mit zwei identischen Fahrzeugen, eines am vorderen und eines am hinteren Ende des Zugs, durchgeführt werden. Dabei sollten die Personenwagen denen entsprechen, die voraussichtlich im späteren Betrieb eingesetzt werden.

Bei nicht symmetrischen Fahrzeugen gilt die Anforderung für jede mögliche Fahrtrichtung. Es muss eine Erklärung zur Symmetrie vorgelegt werden.

5.2.2.4 Andere Personenwagen

Personenwagen, die in Zugverbänden unterschiedlicher Zusammensetzung betrieben werden, gelten als konform, wenn sie im Hinblick auf folgende Eigenschaften ähnlich zu bereits existierenden oder konformen Einzelfahrzeugen sind:

- vorgesehene Geschwindigkeit (niedriger oder gleich der des existierenden Fahrzeugs) und
- äußere Gestaltung des Drehgestells (Position, Kavität und Drehgestelleinschränkung (Hüllkurve)) und
- Erhöhungen der Abmessungen der Hüllkurve (d. h. Wagenkastenbreite, Höhe) von weniger als 10 cm über der Ebene der Drehgestelle.

Die Ähnlichkeit sowie die Einhaltung dieses Verfahrens müssen dokumentiert werden.

Wenn dieses Kriterium nicht herangezogen werden kann, darf das Fahrzeug, das mit Referenzgeschwindigkeit im Referenzfallszenario fährt, während der Vorbeifahrt des gesamten Zugs einschließlich Nachlaufeffekten in 0,20 m und 1,40 m Höhe über Schienenoberkante keine größte horizontale Strömungsgeschwindigkeit $U_{95\%}$ verursachen, die die in Tabelle 5 aufgeführten Werte $U_{95\%,\max}$ überschreitet. Das Fahrzeug sollte in zwei Zugkonfigurationen zusammen mit Fahrzeugen des voraussichtlichen Betriebseinsatzes geprüft werden: unmittelbar hinter einer bereits vorhandenen oder regelkonformen Lokomotive mit einer Wagengruppe von mindestens 100 m Länge hinter ihr und am Ende einer Wagengruppe von mindestens 100 m Länge hinter einer regelkonformen Lokomotive. Spezialfahrzeuge, wie z. B. Restaurantwagen, die immer in der Mitte eines Zugs betrieben werden, sollten allerdings auch in der Mitte einer Wagengruppe von mindestens 100 m Länge geprüft werden.

5.2.3 Voller Konformitätsnachweis

Ein voller Konformitätsnachweis für Fahrzeuge ist nach Tabelle 6 durchzuführen.

Tabelle 6 — Anwendbare Verfahren für den vollen Konformitätsnachweis von Fahrzeugen

Vorgesehene Höchstgeschwindigkeit	Verfahren
$v_{tr,\max} \leq 160 \text{ km/h}$	kein Nachweis erforderlich
$160 \text{ km/h} < v_{tr,\max}$	Nachweis durch Versuche im 1:1-Maßstab nach 7.2.2.1 oder Dokumentation der Konformität nach 5.2.2.4

5.2.4 Vereinfachter Konformitätsnachweis

Für Fahrzeuge, an denen im Vergleich zu Fahrzeugen, für die ein voller Konformitätsnachweis bereits vorliegt, geringfügige konstruktive Änderungen vorgenommen wurden, darf ein vereinfachter Konformitätsnachweis durchgeführt werden.

Bezüglich der horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten neben dem Gleis sind ausschließlich Designunterschiede der Außengeometrie und der vorgesehenen Geschwindigkeit von Belang.

Der vereinfachte Konformitätsnachweis muss in Übereinstimmung mit Tabelle 7 wie folgt durchgeführt werden:

- anhand einer Erklärung und Begründung dafür, dass die konstruktiven Unterschiede keinen Einfluss auf die resultierenden horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten neben dem Gleis haben, oder

- durch eine vergleichende Auswertung der konstruktiven Unterschiede bezogen auf das Fahrzeug, für das ein voller Konformitätsnachweis bereits vorliegt.

Für einen Zugverband, dessen Konformität für eine Fahrtrichtung bereits nachgewiesen wurde, darf für die andere Fahrtrichtung ein vereinfachter Konformitätsnachweis zur Behandlung geringfügiger Unterschiede durchgeführt werden, der auf dem vollen Konformitätsnachweis basiert.

Tabelle 7 — Anwendbare Verfahren und Anforderungen für die vereinfachte Konformitätsbeurteilung von Schienenfahrzeugen

Gestaltungsunterschiede	Verfahren und Anforderungen
Unterschiede in der Außengeometrie, beschränkt auf: — den inneren Bereich des Zugunterbodens (unter dem Zug und zwischen den Schienen); — Dachaufbauten, namentlich Stromabnehmer, Antennen, elektrische Leitungen und Rohre; — andere Dachaufbau-Veränderungen, die in jeder physikalischen Dimension kleiner sind als 20 cm; — Verschraubungen, Abdichtungen, Verklebungen, Klinken und Handgriffe, Scheibenwischer, Vorrichtungen für die Sicht nach hinten, Oberflächenrauigkeit, Türen, Fenster, Verglasung, Signalleuchten, Rohre, Kabel und Stecker; — andere Teile mit Änderungen der seitlichen Ausdehnung um weniger als 5 cm; — Teile oder Geräte, die nachweislich keinen signifikanten Einfluss auf die Strömung haben, die $U_{95\%}$ beeinflusst (z. B. durch CFD).	Dokumentation der Unterschiede; Bestätigung, dass diese keinen Einfluss auf die horizontalen Strömungsgeschwindigkeiten neben dem Gleis haben, und Bezug auf einen vorliegenden vollen Konformitätsnachweis.
Andere Unterschiede in der Außengeometrie, durch die die Grundmerkmale der Kopfform erhalten bleiben.	Dokumentation der Unterschiede und Bezug auf einen vorliegenden vollen Konformitätsnachweis UND Bewertung des relativen Einflusses der Unterschiede durch — Versuche mit bewegten Modellen nach 7.2.2.2 UND Nachweis und Belegmaterial dafür, dass 1) der Unterschied keine Erhöhung an $U_{95\%}$ von mehr als 10 % verursacht UND 2) das neue Design, das untersucht wird (basierend auf dem Originalwert aus einem vollen Konformitätsnachweis und dem festgestellten relativen Unterschied), die in 5.2.2 aufgeführten Anforderungen noch erfüllt.

Tabelle 7 (fortgesetzt)

Gestaltungsunterschiede	Verfahren und Anforderungen
Absenkung der vorgesehenen Geschwindigkeit	Dokumentation der Unterschiede und Bezug auf einen vorliegenden vollen Konformitätsnachweis.
Erhöhung der vorgesehenen Geschwindigkeit — um weniger als 20 km/h oder – sofern geringer – um weniger als 10 % bei einem Zug mit ursprünglich vorgesehener Geschwindigkeit < 300 km/h, — für einen Zug mit ursprünglich vorgesehener Geschwindigkeit ≥ 300 km/h.	Dokumentation der Unterschiede und Bezug auf einen vorliegenden vollen Konformitätsnachweis UND Nachweis und Dokumentation auf der Grundlage linearer Hochrechnung der Strömungsgeschwindigkeit $U_{95\%}$ auf die neue vorgesehene Geschwindigkeit, dass das neue Design, das untersucht wird, die in 5.2.2 aufgeführten Anforderungen noch erfüllt.

5.3 Aerodynamische Belastungen im Gleisbett

Zugverursachte Strömungsgeschwindigkeiten und Druckänderungen im Bereich des Unterbodens eines Zuges können einen Lastfall für Infrastrukturkomponenten darstellen, insbesondere auf Hochgeschwindigkeitsstrecken, siehe 6.2, 6.3 und 6.5. Für diesen Punkt gibt es in diesem Dokument keine Vorgaben.

ANMERKUNG 1 Dieser Punkt wird u. U. durch nationale Bestimmungen geregelt.

ANMERKUNG 2 In EN 50125-3:2003² werden die Umweltbedingungen für Signal- und Telekommunikationseinrichtungen behandelt.

ANMERKUNG 3 Ein Prüfverfahren zur Messung der aerodynamischen Belastungen im Gleisbett in Verbindung mit der Bewertung von Schotterflug ist in Anhang A (informativ) beschrieben.

5.4 Aerodynamisch bedingter Schotterflug

Züge, die mit hohen Geschwindigkeiten betrieben werden, erzeugen eine sich schnell bewegende Luftströmung, die eine Wechselwirkung mit der Infrastruktur im Unterbodenbereich verursacht. Daher haben die Eigenschaften des Fahrzeugunterbodens einen Einfluss auf diesen Effekt. Beim Betrieb auf Schottergleisen können die damit verbundenen aerodynamischen Lasten die Aufnahme und den Flug von Schottersteinen verursachen.

Aerodynamisch bedingter Schotterflug kann auf Schottergleisen auftreten, wenn der Zug mit einer Geschwindigkeit von mehr als 250 km/h fährt, siehe 6.5. Einheiten mit einer vorgesehenen Höchstgeschwindigkeit von mehr als 250 km/h sollten beurteilt werden. Es wird empfohlen, die Ergebnisse im Fahrzeugregister zu dokumentieren.

Es existieren keine einheitlichen europäischen Beurteilungsverfahren. CEN/TR 14067-7:2021 gibt einen Überblick über die in Europa angewandten Verfahren und empfiehlt zwei Verfahren zur Untersuchung auf der Grundlage von Messergebnissen im Originalmaßstab. Anhang A beschreibt einen Messaufbau im Gleis, der geeignet ist, Daten für beide Ansätze zu liefern, um abweichende nationale Ansätze zu vermeiden.

ANMERKUNG Siehe CEN/TR 14067-7:2021; der nächste Schritt für die Untersuchung ist ein Quervergleich von Hochgeschwindigkeitszügen und Gleisen unter Verwendung des spanischen Ansatzes und eine Validierung des Verfahrens und der Kriterien im Vergleich zu den in Europa gesammelten Erfahrungen.

5.5 Fahrwiderstand

Der Fahrwiderstand hängt von der Betriebsart des Zuges und seiner Konstruktion, der Masse und Konfiguration, der Gleisform und der Neigung sowie von den atmosphärischen Bedingungen ab. Er wird oft vereinfacht als die Summe aus Roll-, Impuls- und aerodynamischem Widerstand dargestellt.

Entsprechend der TSI LOC&PAS sind Informationen zum Fahrwiderstand Teil der Traktionsleistung und müssen dokumentiert werden, um z. B. die Berechnung von Fahrplänen zu ermöglichen. In der Industrie werden verschiedene Ansätze angewandt, die auf einer Kombination aus Schätzungsgleichung, Modellversuchen, Berechnungen oder Prüfungen im Originalmaßstab basieren. Es wird empfohlen, den Fahrwiderstand durch Messungen bei Prüfungen im Originalmaßstab zu ermitteln. Verfahren für solche Prüfungen unter Referenzbedingungen sind in 7.4 aufgeführt.

6 Anforderungen an die Infrastruktur

6.1 Zugverursachte Drucklasten auf Bauwerke parallel zum Gleis

6.1.1 Allgemeines

Für Schienenfahrzeuge werden die zugverursachten Drucklasten neben dem Gleis durch eine entsprechende Anforderung an begrenzt (siehe 5.1). Als Schnittstelle zur Infrastruktur werden in diesem Dokument Lastfälle bereitgestellt.

ANMERKUNG Lastfälle für Infrastrukturkomponenten wie in 7.1.3.5 wurden auf der Grundlage typischer Zuggeometrien abgeleitet, die den Spurweiten GA, GB und GC entsprechen. Es wird davon ausgegangen, dass diese Lastfälle auch für breite Spurweiten für Schienenfahrzeuge (z. B. Spanien) angewendet wurden, wobei der Einfluss der Begrenzungslinie der Schienenfahrzeuge vernachlässigt wird.

Oberflächen, die parallel zum Gleis verlaufen (z. B. Lärmschutzwände), sind so auszulegen, dass sie den zugverursachten aerodynamischen Belastungen während ihrer vorausbestimmten Lebensdauer standhalten können, siehe EN 1991-2:2003¹ und EN 16727-2-2:2016. Dies erfordert die genaue Berücksichtigung des dynamischen Charakters der aerodynamischen Belastung sowie des dynamischen Verhaltens des Bauwerks.

6.1.2 Anforderungen

Bei der Gestaltung von Oberflächen, die parallel zum Gleis verlaufen, müssen zugverursachte Lasten berücksichtigt werden. Dynamische Effekte sind zu berücksichtigen.

ANMERKUNG Die in 7.1.3.5 angegebenen Näherungsgleichungen stimmen mit den in EN 1991-2 grafisch dargestellten Drucklasten überein, erlauben jedoch eine breitere Anwendung.

6.1.3 Konformitätsnachweis

Soweit anwendbar, muss ein Konformitätsnachweis nach EN 1991-2:2003¹ und EN 16727-2-2:2016 erbracht werden. In anderen Fällen müssen die zugverursachten Drucklasten nach 7.1.3 ermittelt werden.

6.2 Zugverursachte Strömungsgeschwindigkeiten, die auf Infrastruktur-Komponenten neben dem Gleis wirken

Zugverursachte Strömungsgeschwindigkeiten neben dem Gleis können einen Lastfall für Infrastrukturkomponenten darstellen, insbesondere bei Hochgeschwindigkeitsstrecken, siehe 5.2.1. Beurteilungsverfahren können nach 7.2 angewendet werden.

In diesem Dokument sind keine entsprechenden Anforderungen enthalten.

ANMERKUNG Dieser Punkt wird u. U. durch nationale Bestimmungen geregelt.

6.3 Zugverursachte aerodynamische Belastungen am Gleisbett

Zugverursachte Strömungsgeschwindigkeiten und Druckänderungen am Gleisbett können einen Lastfall für Infrastrukturkomponenten, z. B. Weichen, darstellen, insbesondere auf Hochgeschwindigkeitsstrecken, siehe 5.3. Beurteilungsverfahren können nach 7.2 angewendet werden.

In diesem Dokument sind keine entsprechenden Anforderungen enthalten.

ANMERKUNG 1 Dieser Punkt wird u. U. durch nationale Bestimmungen geregelt.

ANMERKUNG 2 In EN 50125-3:2003² werden die Umweltbedingungen für Signal- und Telekommunikationseinrichtungen behandelt.

6.4 Zugverursachte Strömungsgeschwindigkeiten, die auf Personen neben dem Gleis wirken

Zugverursachte Strömungsgeschwindigkeiten neben dem Gleis könnten zu besonderen Maßnahmen führen, um die dort arbeitenden Personen zu schützen, z. B. durch die Festlegung eines sicheren Standabstands, siehe auch 5.2.

In diesem Dokument sind keine entsprechenden Anforderungen enthalten.

ANMERKUNG 1 Dieser Punkt wird u. U. durch nationale Bestimmungen geregelt.

ANMERKUNG 2 Die Sicherheit von Personen auf Bahnsteigen und Arbeitern in Gleisnähe ist eine Systemfrage. Hier sind Schutzmaßnahmen, wie z. B. Sicherheitsabstände, erforderlich.

6.5 Aerodynamisch bedingter Schotterflug

Züge, die mit hohen Geschwindigkeiten betrieben werden, erzeugen eine sich schnell bewegende Luftströmung, die eine Wechselwirkung mit der Infrastruktur im Unterbodenbereich verursacht, siehe 5.4. Beim Betrieb auf Schottergleisen können die damit verbundenen aerodynamischen Lasten die Aufnahme und den Flug von Schottersteinen verursachen. Bei Kontakt mit dem Zug werden die Schottersteine weiter beschleunigt und können mit Gleisbestandteilen kollidieren oder die Verschiebung anderer Schottersteine auslösen. Dieser Effekt hängt stark von den Eigenschaften des Unterbodens des Zuges sowie von der Konstruktion und Wartung der Infrastruktur ab. Herumfliegende Schottersteine können zu schweren Schäden am Zug und an der Infrastruktur führen und besondere Maßnahmen zum Schutz von Personen, die neben dem Gleis arbeiten, erfordern. Ausgehend von historischen Vorfällen mit Schotterflügen, siehe CEN/TR 14067-7:2021, tritt ein solcher Schaden erst bei Zuggeschwindigkeiten über 250 km/h auf.

Bei Erhöhungen der vorgesehenen Höchstgeschwindigkeit des Gleises oder bei neuen Gleisbettinfrastrukturen, die nicht nachweislich mit Geschwindigkeiten über 250 km/h betrieben wurden, sollten diese Arten von Infrastrukturen beurteilt werden. Es existieren keine einheitlichen europäischen Beurteilungsverfahren. Die folgende Vorgehensweise wird empfohlen. Messungen im Originalmaßstab mit einem bestehenden Hochgeschwindigkeitszug, mit dem positive Betriebserfahrungen bezüglich des Schotterflugs vorliegen und der mit der für das Gleis vorgesehenen Geschwindigkeit fährt, sollten auf einem Gleisabschnitt in einer typischen Wartungsphase geprüft werden. Nach Wartungsarbeiten können Steine eine höhere Tendenz zur Verschiebung aufweisen; daher sollte eine solche Prüfung durchgeführt werden, nachdem sich das Gleisbett aerodynamisch stabilisiert hat. Die empfohlene Prüfung besteht aus der Zählung von Schotteraufschlägen auf den Unterboden des Zuges und Messungen nach dem spanischen Ansatz, siehe CEN/TR 14067-7:2021 und Messaufbau nach Anhang A.

ANMERKUNG Siehe CEN/TR 14067-7:2021; ein Quervergleich von Hochgeschwindigkeitszügen und Gleisen unter Anwendung des spanischen Ansatzes und eine Validierung des Verfahrens und der Kriterien im Vergleich zu den in Europa gesammelten Erfahrungen wird vor einer weiteren Normung für sinnvoll erachtet.

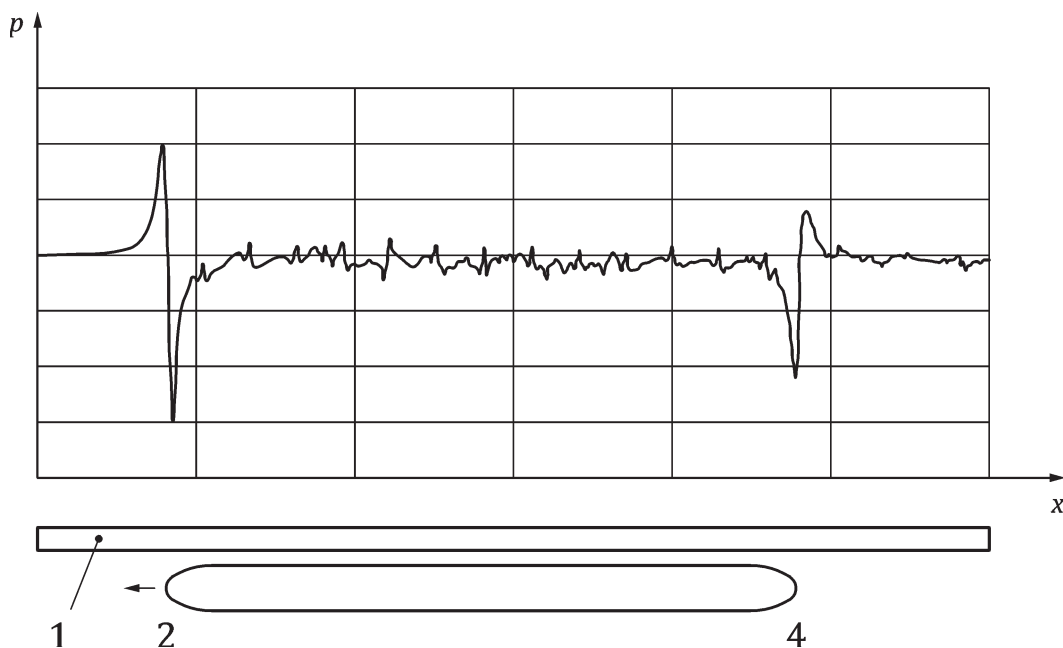
Alle Anforderungen an das Teilsystem Infrastruktur, die zur Minderung des Risikos eines Schotterflugs dienen, gelten nur für Strecken, die für Geschwindigkeiten von mehr als 250 km/h vorgesehen sind.

7 Prüf- und Nachweisverfahren

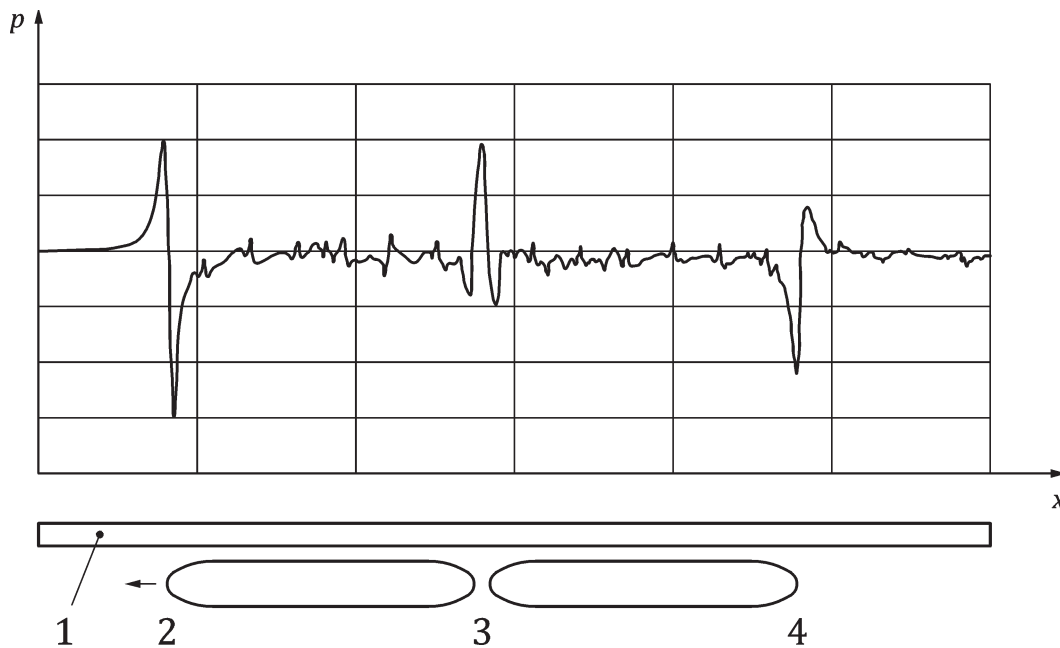
7.1 Bewertung von zugverursachten Druckänderungen neben dem Gleis

7.1.1 Allgemeines

Ein fahrender Zug erzeugt Druckänderungen neben dem Gleis, die auf Objekte in der Nähe wirken. Bild 2 zeigt Beispiele für derartige Druckänderungen auf eine nahe gelegene vertikale Wand, die durch Vorbeifahrten eines einteiligen und eines zweiteiligen Triebzugs verursacht werden. Die Druckänderungen an einem ortsfesten Punkt neben dem Gleis zeigen ein qualitativ ähnliches Verhalten, wenn kein Objekt oder Hindernis vorhanden ist.



a) Einteiliger Triebzug



b) Zweiteiliger Triebzug

Legende

- | | |
|-------------------------------|------------------------------|
| 1 Wand | p Druck |
| 2 Zugkopf | x Strecke entlang der Wand |
| 3 Kupplung zwischen Zugteilen | $\leftarrow$ Fahrtrichtung |
| 4 Zugheck | |

Bild 2 — Beispiele momentaner Druckverteilungen an einer vertikalen Wand verursacht durch die Vorbeifahrt eines einteiligen und eines zweiteiligen Triebzugs

Das Druckfeld bewegt sich mit dem Zug, daher ändert sich der Druck p an einem ortsfesten Punkt neben dem Gleis mit der Zeit während der Vorbeifahrt des Zugs, ähnlich wie er sich abhängig von der Position entlang der Länge des Zugs ändert.

Die stärkste Druckänderung wird üblicherweise beim Vorbeifahren des Zugkopfs verursacht. Ihr Verlauf ist in Bild 3 dargestellt.

Signifikante Druckänderungen können auch an anderen Stellen wie dem Zugheck und den Kupplungen wie in Bild 2 gezeigt auftreten. Die Druckänderung am Zugkopf wird jedoch als charakteristisch für alle drei genannten Stellen (Kopf, Kupplungen, Heck) angesehen.

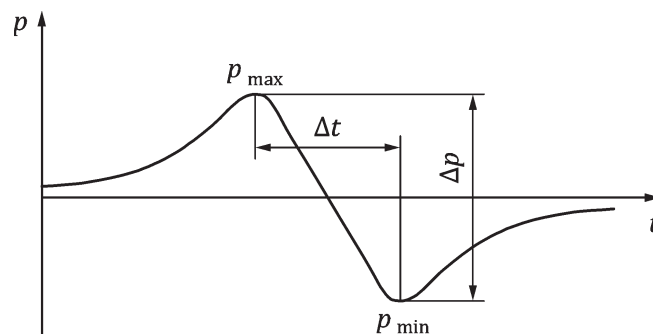


Bild 3 — Mit der Vorbeifahrt des Zugkopfs verbundene Druckänderung

Während der Vorbeifahrt des Zugs steigt der statische Druck auf einen positiven Spitzenwert an und fällt dann schnell auf einen negativen Spitzenwert ab. Der wichtigste Parameter ist die Spitze-Spitze-Druckänderung Δp . Sie wird durch die Bugform beeinflusst und ist üblicherweise bei einer längeren, stromlinienförmigen Form kleiner als bei einer stumpfen, scharfkantigen Form. Die Zeitspanne zwischen den Druckspitzen Δt kann in Beziehung gesetzt werden zu der Zeitspanne für die Vorbeifahrt des Bugs mit der Länge L_n , entsprechend Gleichung (1).

$$\Delta t \approx \frac{L_n}{v_{tr}} \quad (1)$$

Wenn das Zugheck vorbeifährt, wird eine geringere Spitze-Spitze-Druckänderung hervorgerufen, allerdings verläuft die Druckänderung umgekehrt, so dass das Minimum vor dem Maximum liegt. Zusätzlich werden kleinere Spitze-Spitze-Druckwerte hervorgerufen, wenn die Kupplungen des Zugs vorbeifahren.

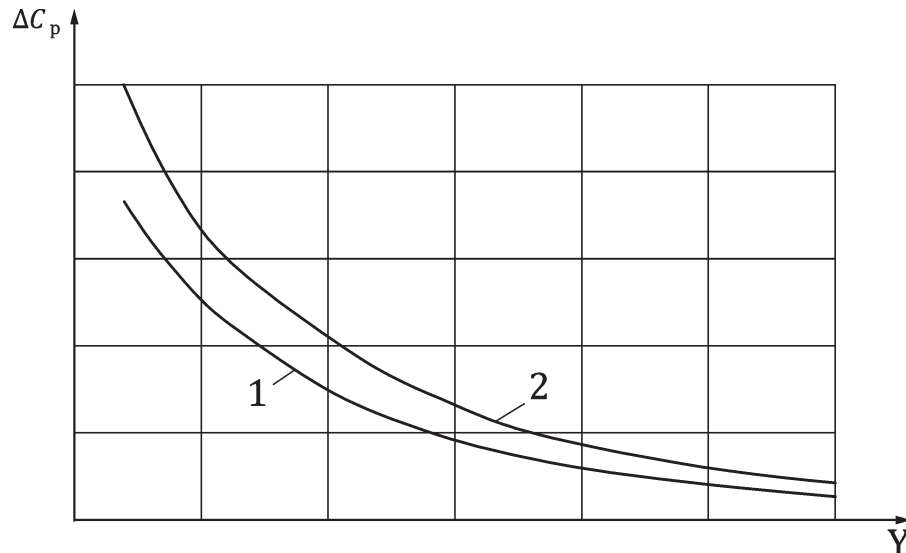
Die Spitze-Spitze-Druckänderung verhält sich näherungsweise proportional zum Quadrat der Zuggeschwindigkeit.

Der dimensionslose Beiwert der Druckänderung ΔC_p ist definiert durch Gleichung (2):

$$\Delta C_p = \frac{2(p_{\max} - p_{\min})}{\rho v_{tr}^2} \quad (2)$$

Der Wert von ΔC_p für das ungestörte Druckfeld eines bestimmten Zugs hängt von der Höhe der Messstelle und dem Abstand zum Zug ab, wobei ΔC_p mit zunehmendem Abstand abnimmt. ΔC_p ist eine wesentliche aerodynamische Größe eines Zugs.

In Bild 4 ist ein Beispiel dargestellt.



Legende

- ΔC_p Druckänderungsbeiwert der Wand
 Y seitlicher Abstand zur Gleisachse
1 Lange, stromlinienförmige Bugform
2 Stumpfe, scharfkantige Bugform

Bild 4 — Typische Änderung von ΔC_p mit Y

Zugverursachte Druckänderungen neben dem Gleis sind von besonderem Interesse, wenn sie auf vorbeifahrende Züge und parallel zum Gleis verlaufende Bauwerke wie Lärmschutz- oder Windschutzwände wirken.

Um eine eindeutige Schnittstelle zwischen den Teilsystemen „Fahrzeuge“ und „Infrastruktur“ zu definieren, werden die charakteristischen Druckänderungen neben dem Gleis auf das ungestörte Druckfeld um den Zug (d. h. in Abwesenheit von anderen Objekten) bezogen. Dies erlaubt auch, die zugverursachten Drucklasten auf der Grundlage entsprechender Fahrzeuganforderungen zu begrenzen.

ANMERKUNG Auch wenn die Lastfälle für Bauwerke parallel zum Gleis und die Begrenzung der Druckänderung für Schienenfahrzeuge nicht exakt übereinstimmen, wird die Anwendung von Lasten auf Bauwerke als ausreichend erachtet.

7.1.2 enthält Verfahren zur Bewertung zugverursachter Druckänderungen im ungestörten Druckfeld, während 7.1.3 sich auf zugverursachte Drucklasten auf parallel zum Gleis verlaufende Bauwerke bezieht.

7.1.2 Druckänderungen im ungestörten Druckfeld (Referenzfall)

7.1.2.1 Versuche im 1:1-Maßstab

Die Versuchsstrecke ist entsprechend der Referenzfall-Spezifikation in 5.1.2.1 zu wählen. Der Höhenunterschied zwischen Schienenoberkante und dem umgebenden Boden darf bis zu einem Abstand von 3 m seitlich zur Gleisachse, an der die Instrumente eingerichtet sind und in x-Richtung bis zu einer Entfernung von ± 10 m von den Messstellen 1,00 m nicht überschreiten.

Atypische Messpositionen, die das zugverursachte Druckfeld abschirmen, sind auszuschließen. Die Versuche sind auf gerader, offener Strecke durchzuführen. Die örtlichen Gegebenheiten der ausgewählten Versuchsstrecke sind zu dokumentieren. Die Dokumentation muss die Beschreibung der Versuchsstelle, des Geländes, der Gleisüberhöhung, der Gleisgeometrie, des Gleisabstandes, der Form des Oberbaus und der Böschung beinhalten.

Für die Bewertung muss die Fahrzeugkonfiguration 5.1.2 entsprechen. Die korrekte Identifikation und Dokumentation des vorbeifahrenden Zugs, seiner Fahrgeschwindigkeit, Länge und Zusammenstellung sind erforderlich (z. B. mit Videokameras und Achszählern).

Die meteorologischen Bedingungen (Lufttemperatur, Luftdruck, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Windrichtung) müssen gemessen und die Witterungsbedingungen dokumentiert werden. Temperatur, Druck und Feuchte sind nach ISO 8756 zu erfassen. Für jeden Druckaufnehmer-Messaufbau sind Windgeschwindigkeit und -richtung durch eine meteorologische Messeinrichtung zu bestimmen. Diese muss in 2 m Höhe über Schienenoberkante mit ca. 4 m Abstand zur Gleisachse und in kleinstmöglicher Entfernung (max. 15 m) zum Aufbau der Druckaufnehmer angebracht sein.

Die Referenzwindgeschwindigkeit ist gleich der mittleren Windgeschwindigkeit im 1-s-Intervall, beginnend 1,2 s vor der Vorbeifahrt des Zugs am Windgeschwindigkeitsmesser.

ANMERKUNG 1 Bestehende Ergebnisse nach früheren Versionen dieses Dokuments, die andere Referenzwinddefinitionen verwenden, werden als gültig angesehen.

Die Versuche müssen mindestens 10 unabhängige und vergleichbare Einzelmessungen umfassen bei Referenzwindgeschwindigkeiten, die 2 m/s nicht überschreiten. Falls verfügbar, sollten mindestens zehn Messungen mit kleinstmöglichen Windschwankungen (niedrigster Standardabweichung der Windgeschwindigkeit innerhalb des oben genannten 1-s-Intervalls) berücksichtigt werden. Das zu betrachtende Ereignis umfasst mindestens den Zeitraum von 1 s vor bis 1 s nach der Zugvorbeifahrt. Für eine gültige Messreihe müssen mindestens 50 % der Messungen innerhalb eines Bereichs von ± 5 % und 100 % der Messungen innerhalb eines Bereichs von ± 10 % der Nennprüfgeschwindigkeit $v_{tr,test}$ genommen werden.

Die nominelle Prüfgeschwindigkeit $v_{tr,test}$ ist gleich der Referenzgeschwindigkeit $v_{tr,ref}$.

Die Druckmesspunkte müssen in einem Abstand von 2,50 m zur Gleisachse liegen und in 1,50 m; 1,80 m; 2,10 m; 2,40 m; 2,70 m und 3,00 m Höhe über Schienenoberkante. Die Positionierungsunschärfe der Sensoren muss unter 0,02 m liegen. Die tatsächlichen Messpunkte müssen dokumentiert werden. Es dürfen mehrere Messaufbauten für Druckaufnehmer benutzt werden, um mehrere unabhängige Messergebnisse von einer

Zugvorbeifahrt zu erhalten. Der Abstand zwischen diesen Messaufbauten muss jeweils mindestens 20 m betragen.

Die Druckaufnehmer müssen in der Lage sein, den Druck mit einer Auflösung von mindestens 150 Hz zu messen. Es wird empfohlen, Druckaufnehmer mit mindestens 1 500 Pa Messbereich zu verwenden. Die verwendeten Umgebungswindsensoren müssen in der Lage sein, die Luftströmung in x- und y-Richtung zu messen und 3-Hz-Schwingungen in der Strömung korrekt aufzulösen. Das Signal muss mit mindestens 10 Hz abgetastet werden.

Alle Druckaufnehmer sollten mit der Bohrung für statischen Druck von Prandtl-Rohren verbunden werden, die parallel zur Strecke ausgerichtet sind.

ANMERKUNG 2 Die Messungen des Zugkopfs in beiden Richtungen sind zulässig, da sie nicht durch Strömungseffekte bei der weiteren Vorbeifahrt des Zuges verändert werden.

Ein konstanter Referenzdruck (z. B. ein in einem isolierten Druckbehälter gespeicherter) ist zu verwenden. Um Verluste (dynamischer) Informationen zu vermeiden, darf die Länge der Anschlussschläuche und -rohre zwischen Druckbohrung und Drucksensor 50 cm nicht überschreiten. Alle Schläuche und Rohre müssen die gleiche Länge und den gleichen Durchmesser aufweisen.

Falls keine Prandtl-Rohre verwendet werden, muss aufgezeigt werden, dass die gewählte Messmethode gleichwertig ist.

Die Unschärfe der Druckmessung muss bestimmt werden und darf $\pm 2 \%$ nicht überschreiten. Der Fehler der Zuggeschwindigkeitsmessung muss bestimmt werden und darf $\pm 1 \%$ nicht überschreiten.

Das Drucksignal muss mit einem 75-Hz-Butterworth-Tiefpass sechster Ordnung (oder einem anderen Filter mit gleichwertigen Filtereigenschaften) gefiltert und mit einer Samplerrate von 300 Hz abgetastet werden. Für jeden Druckaufnehmer und jeden Versuchslauf muss der größte Wert der von der Vorbeifahrt des Zugkopfs verursachten Spitze-Spitze-Druckänderung, Δp_i , berechnet und dann mit Gleichung (3) auf die Referenzgeschwindigkeit, die Windgeschwindigkeitskomponente in x-Richtung und die Normalluftdichte $\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$ bezogen werden:

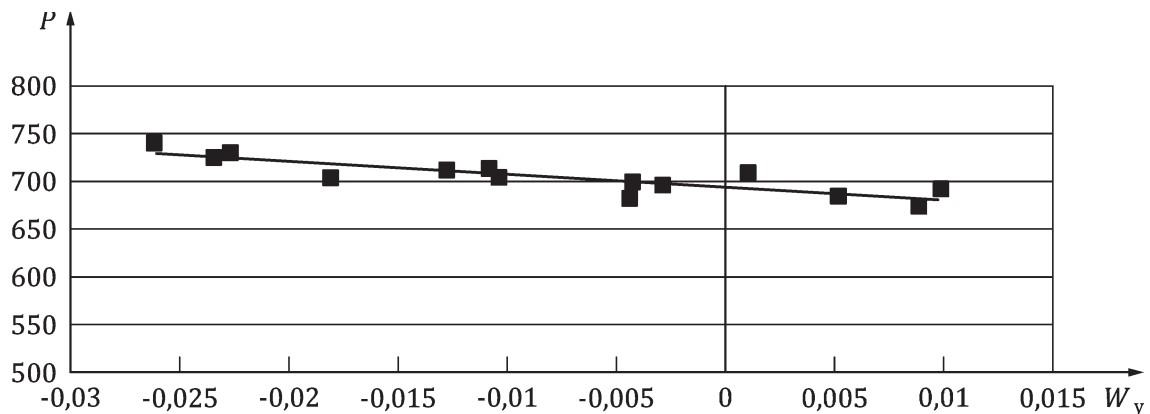
$$\Delta p_i = \Delta p_{m,i} \times \left(\frac{v_{tr,ref}}{v_{tr,i} - v_{w,x,i}} \right)^2 \times \frac{\rho_0}{\rho_i} \quad (3)$$

Dabei ist

$v_{w,x,i}$ die Windgeschwindigkeitskomponente in x-Richtung bei der i -ten Vorbeifahrt.

Wenn es eine deutliche Abhängigkeit der Spitze-Spitze-Druckänderung vom Seitenwind gibt, d. h. der Bestimmungskoeffizient $> 0,5$ ist, dürfen die Einzelergebnisse der Versuchsläufe unter Verwendung einer linearen Regression von Δp_i als Funktion der mittleren Seitenwindgeschwindigkeit auf Seitenwind = 0 korrigiert werden. In diesem Fall muss ein Diagramm angefertigt werden, das die Abhängigkeit vom Seitenwind und die Regressionskurve zeigt.

Ein Beispiel für eine solche Korrektur unter Verwendung der linearen Regressionskurve ist in Bild 5 dargestellt, das den Wert Δp_i der einzelnen Prüfungsläufe über $W_y = v_{w,y,i} / (v_{tr,i} - v_{w,x,i})$ zeigt. In dem Beispiel würde ein Wert Δp_i für $W_y = -0,01$ um $1\,365,9 \times 0,01$, d. h. um etwa 14 Pa reduziert.



Legende

P Druck (Pa)

W_y Quotient aus Seitenwindgeschwindigkeit und Geschwindigkeit der einfallenden Strömung in Gleisrichtung

Bild 5 — Beispiel für die Abhängigkeit der Druckänderungen Δp_i vom Seitenwind

Die charakteristische Druckdifferenz, die für weitere Analysen herangezogen wird, ist die obere Grenze eines 2σ -Intervalls der Spitze-Spitze-Druckänderungen, die während der Vorbeifahrt des Zugkopfs auftreten, siehe Gleichung (4).

$$\Delta p_{95\%} = \Delta p_{2\sigma} = \overline{\Delta p} + 2\sigma \quad (4)$$

Dabei ist

$\overline{\Delta p}$ der Mittelwert aus allen Δp_i ;

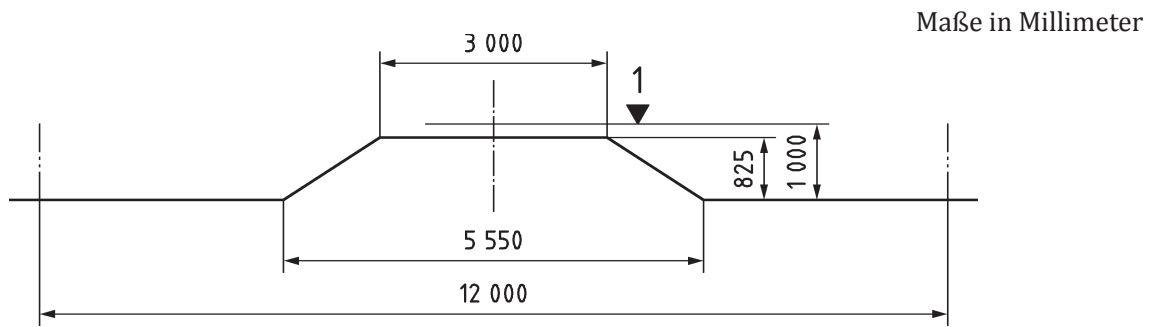
σ die Standardabweichung aus allen Δp_i .

Es ist empfehlenswert, zusätzlich die maximalen und minimalen Werte der Druckänderung getrennt zu analysieren. Auch die Spitze-Spitze-Druckdifferenz während der Vorbeifahrt der Kupplung oder des Hecks kann analysiert werden.

7.1.2.2 Versuche mit bewegten Modellen im verkleinerten Maßstab

Der Versuchsaufbau ist entsprechend der Referenzfall-Spezifikation in 5.1.2 zu wählen. Die Bodenkonfiguration sollte mit Bild 6 übereinstimmen.

ANMERKUNG 1 Sofern nicht anders angegeben, beziehen sich alle Abmessungen auf den Maßstab 1:1.



Legende

1 Schienenoberkante

Bild 6 — Querschnittsskizze der Bodenkonfiguration

Für die Bestimmung der Druckänderungen bei der Vorbeifahrt des Zugkopfs genügt es, das führende Fahrzeug des Zugs nachzubilden. Die Modelle des zu prüfenden Zugs müssen den Zugkopf detailgenau darstellen. Die Fahrzeugoberfläche ist mit einer maximalen Abweichung von ± 10 mm bezogen auf den 1:1-Maßstab des Originalfahrzeugs zu modellieren. Die Außenflächen müssen in Bezug auf hydraulische Glattheit vergleichbar mit dem 1:1-Maßstab sein, d. h. maßgebliche Einzelheiten müssen abgebildet werden. Originalausgaben der Fahrzeugkonstruktion (oder die reale Zuggeometrie, sofern verfügbar) müssen vorgelegt werden.

Für die Aerodynamik maßgebliche Merkmale des Zugs an den Seiten und auf dem Dach müssen nachgebildet werden, während kleinere Aufbauten wie Antennen, Griffe usw. (Durchmesser, Vorsprünge und Objekte < 50 mm) vernachlässigt werden können. Die Fahrzeugunterseite muss nicht notwendigerweise detailliert modelliert werden, jedoch muss der grundsätzliche Umriss des Unterflurbereichs, insbesondere im Bereich des Bahnräumers, Schneeflugs und der Drehgestelle, erkennbar sein.

Auch die Geometrie der Drehgestelle darf vereinfacht dargestellt werden, wobei Objekte, die kleiner sind als 100 mm, entfallen dürfen. Der relative Versperrungseffekt muss jedoch korrekt wiedergegeben werden. Die Stromabnehmer dürfen entfallen.

Die auf der nominellen Prüfgeschwindigkeit $v_{tr,test}$ basierende Reynoldszahl muss über 250 000 liegen, um sicherzustellen, dass die dimensionslosen $\Delta C_{p,2\sigma}$ -Werte für den 1:1-Maßstab repräsentativ sind. Es muss nachgewiesen werden, dass die dimensionslosen $\Delta C_{p,2\sigma}$ -Werte im Bereich von $0,6 Re_{max}$ bis Re_{max} unabhängig von der Reynoldszahl sind und nicht mehr als ± 3 % voneinander abweichen. Die Anforderungen an die Reynoldszahl geben den Modellmaßstab implizit vor. Der gewählte Modellmaßstab ist auf die gesamte Modellkonfiguration anzuwenden.

Sofern die Machzahl des Originals $v_{tr,test}/c$ kleiner ist als 0,25, können Machzahleffekte vernachlässigt werden. Wenn die Machzahl größer ist als 0,25, muss die nominelle Prüfgeschwindigkeit $v_{tr,test}$ mit den tatsächlichen Geschwindigkeiten im Zugbetrieb übereinstimmen.

Die Kenngrößen der Versuchsanlage sowie die Daten der Umgebungsluft zur Zeit der Versuche, d. h. Lufttemperatur, Luftdruck und Luftfeuchte, müssen protokolliert werden.

Die Versuche müssen mindestens 10 unabhängige und vergleichbare Einzelmessungen umfassen. Für eine gültige Messreihe müssen mindestens 50 % der Messungen innerhalb eines Bereichs von ± 5 % und 100 % der Messungen innerhalb eines Bereichs von ± 10 % der Nennprüfgeschwindigkeit $v_{tr,test}$ genommen werden. Für die Auswertung der Zugvorbeifahrt muss mindestens die Zeitspanne von $1 / (\text{Modellmaßstab})$ Sekunden vor der Vorbeifahrt des Zugkopfs bis $1 / (\text{Modellmaßstab})$ Sekunden nach der Vorbeifahrt des Zugkopfs betrachtet werden.

Die Messwerte müssen mit mindestens $10 v_{tr,test}/(L_n (\text{Modellmaßstab}))$ Hz (z. B. 2 500 Hz für ein 1:25-Modell mit 50 m/s und $L_n = 5$ m) erfasst und anschließend mit einem Viertel der Abtastrate mit einem Butterworth-Filter erster Ordnung oder gleichwertig gefiltert werden.

Die eingesetzten Drucksensoren müssen Messungen mit einer minimalen Auflösung entsprechend der Abtast-rate ermöglichen. Die Druckaufnehmer müssen vor dem Einsatz für den erwarteten Messbereich kalibriert werden. Der Messfehler muss unter 2 % des erwarteten Messbereichs liegen. Die Fehler in der Geschwindigkeitsmessung müssen bestimmt werden und dürfen $\pm 1 \%$ nicht überschreiten.

Für jeden Druckaufnehmer und jeden Versuchslauf des bewegten Modells wird die größte von der Vorbeifahrt des Zugkopfs verursachte Spitze-Spitze-Druckänderung $\Delta p_{m,i}$ berechnet und dann mit Gleichung (5) auf die zu Referenzgeschwindigkeit und die Normalluftdichte $\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$ bezogen:

$$\Delta p_i = \Delta p_{m,i} \times \left(\frac{v_{tr,ref}}{v_{tr,i}} \right)^2 \times \frac{\rho_0}{\rho} \quad (5)$$

Die charakteristische Druckdifferenz, die für weitere Analysen herangezogen wird, ist die obere Grenze eines 2σ -Intervalls der Spitze-Spitze-Druckänderungen $\Delta p_{95\%}$, die während der Vorbeifahrt des Zugkopfs auftreten, siehe Gleichung (4).

Die Messorte müssen in einem Abstand von 2,50 m zur Gleisachse liegen und in 1,50 m; 1,80 m; 2,10 m; 2,40 m; 2,70 m und 3,00 m Höhe über Schienenoberkante. Die Positionierungsunschärfe der Sensoren muss unter 0,02 m liegen. Die tatsächliche Position der Sensoren muss dokumentiert werden. (Alle Höhen und Entfernungen auf Basis des 1:1-Maßstabs.)

Wenn der Druck während der gesamten Zugvorbeifahrt von Interesse ist, sollten die Druckdifferenzen bei Vorbeifahrt der Kupplungen und des Hecks in gleicher Weise bewertet werden wie der charakteristische Spitze-Spitze-Druckwert $\Delta p_{95\%}$, der während der Vorbeifahrt des Zugkopfs auftritt. In diesem Fall gelten die oben beschriebenen Modellierungsanforderungen für den gesamten Zug, insbesondere für das Heck. Über die Bewertung aller charakteristischen Spitze-Spitze-Werte hinaus sollte in ähnlicher Weise eine separate Analyse der wesentlichen positiven und negativen Druckänderungen vorgenommen werden.

ANMERKUNG 2 Aufgrund von Abweichungen in der relativen Grenzschichtdicke gegenüber Zügen in Originalgröße kann es bei der Verwendung von kurzen Zugmodellen zu einer leichten Überschätzung der Druckänderung während der Vorbeifahrt des Zughecks kommen.

7.1.2.3 Versuche mit statischen Modellen im verkleinerten Maßstab

Da die zugverursachte Druckänderung in Bezug auf das Fahrzeugbezugskoordinatensystem quasi-stationär ist, können herkömmliche Windkanaluntersuchungen für die Bewertung des ungestörten Druckfelds an nicht bodennahen Stellen ausreichen. Solche Versuche im Modellmaßstab dienen nicht zum experimentellen Konformitätsnachweis, sondern zur Durchführung wirtschaftlicher und schneller Parameterstudien während der Konzeptions- und Designphase.

In solchen Versuchen wird der Druck relativ zum Zug gemessen und muss in ein gleisfestes Koordinatensystem transformiert werden.

Der Versuchsaufbau sollte entsprechend der Referenzfall-Spezifikation in 5.1.2 gewählt werden. Die Bodenkongfiguration sollte mit Bild 6 übereinstimmen.

Der gewählte Modellmaßstab ist für die gesamte Windkanalkonfiguration anzuwenden. Für die Messung der zugkopferursachten Druckänderung ist es in der Regel ausreichend, nur das führende Fahrzeug zu modellieren.

Die Modelle des zu prüfenden Zugs sollten so gebaut werden, dass sie den Zugkopf genau wiedergeben. Die Fahrzeugoberfläche sollte mit einer maximalen Abweichung von $\pm 10 \text{ mm}$ bezogen auf den 1:1-Maßstab des Originalfahrzeugs modelliert werden. Die Glattheit der Außenflächen sollte hydraulisch vergleichbar sein, bei den meisten modernen Personenzügen also hydraulisch glatt. Ein Vergleich der geometrischen Daten des Modellkopfs einschließlich aller relevanten Einzelheiten mit den Original-Ausgaben der Fahrzeugkonstruktion (oder der realen Zuggeometrie, sofern verfügbar) sollte vorgelegt werden.

Für die Aerodynamik maßgebliche Merkmale des Zugs an den Seiten und auf dem Dach sollten nachgebildet werden, während kleinere Aufbauten wie Antennen, Griffe usw. (Durchmesser, Vorsprünge und Objekte < 50 mm) vernachlässigt werden können. Die Fahrzeugunterseite muss nicht notwendigerweise detailliert modelliert werden, jedoch sollte der grundsätzliche Umriss des Unterflurbereichs, insbesondere im Bereich des Schneeflugs und der Drehgestelle, erkennbar sein.

Auch die Geometrie der Drehgestelle darf vereinfacht dargestellt werden, wobei Objekte, die kleiner sind als 100 mm, entfallen dürfen. Der relative Versperrungseffekt muss jedoch korrekt wiedergegeben werden. Die Stromabnehmer dürfen entfallen.

ANMERKUNG Sofern nicht anders angegeben, beziehen sich alle Abmessungen in diesem Abschnitt auf den Maßstab 1:1.

Die auf der Strömungsgeschwindigkeit im Windkanal basierende Reynoldszahl muss über 250 000 liegen, um sicherzustellen, dass die dimensionslosen ΔC_p -Werte für den 1:1-Maßstab repräsentativ sind. Es sollte nachgewiesen werden, dass die dimensionslosen ΔC_p -Werte im Bereich von $0,6 Re_{\max}$ bis $Re_{\max}$ unabhängig von der Reynoldszahl sind und nicht mehr als $\pm 3 \%$ voneinander abweichen.

Sofern die Machzahl des Originals kleiner ist als 0,25, können Machzahleffekte vernachlässigt werden.

Die Kenngrößen des Windkanals sowie die Umgebungsluftbedingungen müssen protokolliert werden.

Da die Druckänderung im fahrzeugbasierten Koordinatensystem quasi-stationär ist, können herkömmliche Druckaufnehmer und Manometer verwendet werden, die Länge der Anschlussschläuche ist hierbei unerheblich. Der Druck muss mit geeigneten Sonden für den statischen Druck an den gewünschten Stellen gemessen werden. Der Einfluss des Windkanaltyps, wie z. B. Versperrungseffekte, sollte beachtet werden. Die Messgenauigkeit der Drucksensoren muss bei $\pm 1 \%$ der abgelesenen Spitze-Spitze-Druckänderung liegen.

In Längsrichtung sollten die Messungen mindestens eine Fahrzeuglänge vor dem führenden Fahrzeug beginnen und bis mindestens eine Fahrzeuglänge hinter den Zugkopf weitergeführt werden. Hierzu muss die Sonde für den statischen Druck z. B. am Zug entlang traversiert werden. Jede Druckaufnahme muss zeitlich gemittelt werden, bis der Mittelwert innerhalb $\pm 1 \%$ stabil ist.

Die örtliche Änderung dx des Drucks am Zugkopf muss analog zu Messungen im Originalmaßstab mit Hilfe von $dt = dx/v_{tr,ref}$ in die zeitliche Änderung dt transformiert werden. Der Wert des Druckkoeffizienten ΔC_p darf nicht transformiert werden.

Die Messpositionen sollten in einem Abstand von 2,50 m zur Gleisachse liegen und in 1,50 m; 1,80 m; 2,10 m; 2,40 m; 2,70 m und 3,00 m Höhe über Schienenoberkante. Die Positionierungsunschärfe der Sensoren muss unter 0,02 m liegen. Die tatsächlichen Messpunkte müssen dokumentiert werden.

Es wird empfohlen, die Versuche für Gierwinkel von $\pm 5^\circ$ zu wiederholen, um den Einfluss des Seitenwinds auf Versuche im 1:1-Maßstab abschätzen zu können.

7.1.2.4 Numerische Simulationen

7.1.2.4.1 Allgemeines

Es sind dreidimensionale CFD-Simulationsprogramme zu verwenden, die physikalische Strömungseffekte wie Reibung und Ablösung modellieren können.

Die dreidimensionale turbulente Fahrzeugumströmung bei hohen Reynoldszahlen wird im Allgemeinen durch folgende Eigenschaften charakterisiert: Verzögerung und Beschleunigung, gekrümmte Wände, Strömungsablösung, mögliche Wiederanlegung, Rückströmung und Verwirbelung. Im Allgemeinen können hinreichend genaue Ergebnisse durch folgende Turbulenzmodelle erzielt werden:

— Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen (RANS) oder

- auf dem Lattice-Boltzmann-Verfahren basierende Programme. (diese Verfahren erfordern, dass das Volumen, das die betrachtete Strömung enthält, in kleinere Volumina oder Zellen aufgeteilt werden kann, in denen die physikalischen Gleichungen durch Näherungsgleichungen gelöst werden können);
- validierte Anwendung eines weithin anerkannten Turbulenzmodells.

Alle oben genannten Verfahren werden unter dem allgemeinen Begriff numerische Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics CFD) zusammengefasst. Die größte Herausforderung beim Einsatz von CFD ist eine der Aufgabenstellung angemessene Auswahl und Unterteilung des Rechengebiets (Gitterzellen oder Gitterknoten), der Randbedingungen, des Rechenverfahrens und des Turbulenzmodells.

Wer CFD-Simulationen und Analysen der so erhaltenen Ergebnisse durchführt, sollte seine Kompetenz durch nachgewiesene Leistungen in der numerischen Simulation von Fahrzeugaerodynamik belegen können. Er muss ferner nachweisen, dass er die Anforderungen des Referenzfalls erfüllen kann.

Der Prüfaufbau ist entsprechend der Referenzfall-Spezifikation in 5.1.2 zu wählen. Die Bodenkonfiguration sollte mit Bild 6 übereinstimmen. Die Schienen dürfen modelliert werden.

Die Einstufung eines Fahrzeugs als stromlinienförmig erfolgt anhand der Ergebnisse der Strömungssimulation.

ANMERKUNG Allgemeine Grundsätze und bewährte Verfahren für die Anwendung numerischer Verfahren sind in CEN/TR 17833 enthalten.

7.1.2.4.2 Benchmark-Versuche

Zum Nachweis der Eignung des CFD-Ansatzes muss mindestens ein Referenzfahrzeug mit einer stromlinienförmigen bzw. stumpfen Fahrzeuggeometrie ähnlich der des beurteilten Fahrzeugs berechnet werden. Der berechnete Druck muss mit den Druckwerten des Referenzfahrzeugs verglichen werden, die in Versuchen im 1:1-Maßstab nach 7.1.2.1 ermittelt wurden.

Es ist nachzuweisen, dass ε , die mittlere quadratische Abweichung zwischen dem numerisch ermittelten Druckverlauf und den Messdaten über alle Höhen (siehe Gleichung 0) für ein Fahrzeug mit stumpfer Fahrzeuggeometrie innerhalb von -5% und $+10\%$ liegt und für ein Fahrzeug mit stromlinienförmiger Fahrzeuggeometrie innerhalb von -3% und $+5\%$.

$$\varepsilon = \text{sign} \left\{ \sum_k [(\text{sign}(\overline{\Delta p_{\text{sim},k}} - \Delta p_{\text{test},k})(\overline{\Delta p_{\text{sim},k}} - \Delta p_{\text{test},k})^2)] \right\} \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^6 (\overline{\Delta p_{\text{sim},k}} - \Delta p_{\text{test},k})^2}{\sum_{k=1}^6 \Delta p_{\text{test},k}^2}} \quad (6)$$

Der Index k bezieht sich auf die 6 Höhen, wie in 7.1.2.4.9 angegeben. Für siehe $\overline{\Delta p_{\text{sim},k}}$ 7.1.2.4.9 und für $\Delta p_{\text{test},k}$ werden die Werte aus $\overline{\Delta p}$ nach Gleichung (5) verwendet.

Der gleiche Ansatz bezüglich Rechengebiet, Gitterauflösung, Turbulenzmodell und Randbedingungen wird als geeignet betrachtet, um die Kopfwellenamplitude zu berechnen. Dieser Ansatz muss für das zu untersuchende Fahrzeug verwendet werden.

Die Benchmark-Rechnungen sollten bei neuen CFD-Software-Releases (einschließlich Upgrades desselben Softwarepakets) oder neuem Personal, das die Benchmark-Rechnungen durchführt, wiederholt werden.

7.1.2.4.3 Fahrzeugmodell

Im Allgemeinen ist die Modellierung des führenden Fahrzeugs ausreichend. Es kann jedoch vorteilhaft sein, den Querschnitt des führenden Fahrzeugs zu extrudieren oder weitere Wagen anzufügen, so dass das Fahrzeugmodell bis zum stromabwärtsgerichteten Ende des Rechengebietes reicht.

Die Fahrzeugoberfläche ist mit einer maximalen Abweichung von ± 10 mm bezogen auf den 1:1-Maßstab des Originalfahrzeugs zu modellieren. Die Glattheit der Außenflächen muss hydraulisch vergleichbar sein, bei den