

DIN EN 14067-5



ICS 45.060.01; 93.060

Einsprüche bis 2020-12-23
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 14067-5:2011-01

Entwurf**Bahnanwendungen –****Aerodynamik –****Teil 5: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik im Tunnel;
Deutsche und Englische Fassung prEN 14067-5:2020**

Railway applications –

Aerodynamics –

Part 5: Requirements and assessment procedures for aerodynamics in tunnels;
German and English version prEN 14067-5:2020

Applications ferroviaires –

Aérodynamique –

Partie 5: Exigences et procédures d'essai pour l'aérodynamique en tunnel;
Version allemande et anglaise prEN 14067-5:2020

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2020-10-23 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) oder 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 198 Seiten

DIN-Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 14067-5:2020) 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 8756:1994 siehe DIN ISO 8756:1996-10

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 14057-5:2011-01 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) neu strukturiert und erweitert, um die Technischen Spezifikationen für die Interoperabilität des transeuropäischen Eisenbahnsystems zu unterstützen;
- b) Anforderungen an die Konformitätsbewertung für Schienenfahrzeuge hinzugefügt.

Nationaler Anhang NA (informativ)

Literaturhinweise

DIN ISO 8756:1996-10, *Luftbeschaffenheit — Handhabung von Temperatur-, Druck- und Feuchtedaten*
(ISO 8756:1994)

<i>Titel de:</i>	Bahnanwendungen — Aerodynamik — Teil 5: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik im Tunnel
<i>Titel en:</i>	Railway applications — Aerodynamics — Part 5: Requirements and assessment procedures for aerodynamics in tunnels
<i>Titel fr:</i>	Applications ferroviaires — Aérodynamique — Partie 5 : Exigences et procédures d'essai pour l'aérodynamique en tunnel

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	5
1 Anwendungsbereich	6
2 Normative Verweisungen	6
3 Begriffe	6
4 Symbole und Abkürzungen	8
5 Anforderungen an Lokomotiven und Personenfahrzeuge	13
5.1 Begrenzung der Druckänderung im Tunnel	13
5.1.1 Allgemeines	13
5.1.2 Anforderungen	14
5.1.3 Vollständige Konformitätsbewertung	15
5.1.4 Vereinfachte Konformitätsbewertung	15
5.2 Begrenzung des Druckgradienten bei Einfahrt in den Tunnel (betreffend Erzeugung von Mikrodruckwellen)	17
5.2.1 Allgemeines	17
5.2.2 Anforderungen	18
5.2.3 Vereinfachte Konformitätsbewertung	19
5.3 Festigkeit gegenüber aerodynamischen Lasten	20
5.3.1 Allgemeines	20
5.3.2 Anforderungen	21
5.3.3 Bewertung außergewöhnlicher Belastungen	26
5.3.4 Bemessung der Ermüdungslast	27
5.3.5 Bemessung im Fall von Änderungen	27
6 Anforderungen an die Infrastruktur	28
6.1 Begrenzung der Druckänderungen in Tunneln zur Erfüllung des Gesundheitskriteriums	28
6.1.1 Allgemeines	28
6.1.2 Anforderungen	28
6.1.3 Vollständige Konformitätsbewertung	30
6.1.4 Vereinfachte Konformitätsbewertung	31
6.2 Begrenzung des Druckgradienten bei Einfahrt in den Tunnel (in Bezug auf die Mikrodruckwellenerzeugung)	31
6.2.1 Allgemeines	31
6.2.2 Referenzfall	31
6.2.3 Anforderungen	32
6.2.4 Bewertung	32
6.3 Weitere Aspekte der Tunnelgestaltung	32
6.3.1 Allgemeines	32
6.3.2 Druckkomfort	32
6.3.3 Druckbelastung von Anlagen	33
6.3.4 Induzierte Luftströmungen	34
6.3.5 Fahrwiderstand	34
6.3.6 Kontaktkräfte zwischen Stromabnehmer und Oberleitung	34
6.3.7 Lüftung	35
6.3.8 Arbeitssicherheit	35
6.3.9 Belastung von Fahrzeugen im Mischverkehr	35
6.4 Zusätzliche Aspekte für unterirdische Bahnhöfe	36

6.4.1	Druckänderungen	36
6.4.2	Induzierte Luftströmungen	36
6.4.3	Spezifischer Lastfall für Bahnsteigbarrieresysteme aufgrund durchfahrender Züge	36
7	Verfahren und Prüfverfahren	37
7.1	Allgemeines	37
7.2	Verfahren zur Bestimmung von Druckänderungen in Tunneln	38
7.2.1	Allgemeines	38
7.2.2	Messungen im Maßstab 1 : 1 an festen Orten in einem Tunnel	39
7.2.3	Messgeräte	41
7.2.4	Messungen im Maßstab 1 : 1 an der Außenseite des Zugs	43
7.2.5	Näherungsgleichungen	44
7.2.6	Bewertung durch numerische Simulation	45
7.2.7	Messungen im reduzierten Maßstab an festen Orten in einem Tunnel	46
7.3	Bewertung der maximalen Druckänderung (Fahrzeugreferenzfall)	46
7.3.1	Allgemeines	46
7.3.2	Transfer der Messwerte durch einen Faktor (Ansatz 1)	47
7.3.3	Transfer der Messwerte auf der Grundlage von A.3.3 (Ansatz 2)	47
7.3.4	Transfer durch Simulation (Ansatz 3)	48
7.3.5	Bewertung des zeitlichen Druckverlaufs	49
7.3.6	Bewertungsgrößen und Vergleich	53
7.4	Bewertung der maximalen Druckänderungen (Infrastrukturreferenzfall)	53
7.4.1	Allgemeines	53
7.4.2	Bewertungsverfahren	54
7.5	Bewertung des Druckgradienten eines in einen Tunnel einfahrenden Zugs (Fahrzeugreferenzfall, betreffend die Erzeugung von Mikrodruckwellen)	55
7.5.1	Allgemeines	55
7.5.2	Bewertung durch Simulationen	55
7.5.3	Bewertung durch Prüfung im Modellmaßstab mit beweglichen Modellen	56
7.6	Bewertung von Mikrodruckwellen (Infrastrukturreferenzfall)	56
7.6.1	Allgemeines	56
7.6.2	Bewertung durch numerische Simulationen	57
7.6.3	Bewertung durch Prüfung beweglicher Modelle im reduzierten Maßstab	59
7.7	Bewertung der aerodynamischen Belastung	61
7.7.1	Bewertung der Belastung durch Starkwind	61
7.7.2	Bewertung von Vorbeifahrten auf offener Strecke	61
7.7.3	Bewertung außergewöhnlicher transienter Lasten in Tunneln	63
7.7.4	Bewertung von Ermüdungslasten	66
7.7.5	Bestimmung der schadensäquivalenten Belastungsamplitude für das Szenario	69
7.7.6	Dokumentation	69
7.7.7	Vereinfachte Lastfälle	70
7.8	Bewertung der Druckdichtigkeit	71
7.8.1	Allgemeines	71
7.8.2	Dynamische Druckdichtigkeit	72
7.8.3	Äquivalente Leckagefläche	72
7.8.4	Prüfverfahren	73
7.8.5	Dynamische Prüfungen	75
Anhang A (informativ)	Näherungsgleichungen	77
A.1	Allgemeines	77
A.2	SNCF-Ansatz	77
A.2.1	Einfahrt des Zugkopfes	77
A.2.2	Einfahrt des Hauptteils des Zugs	77
A.2.3	Einfahrt des Zughecks	78
A.3	Ansatz der TU Wien	78
A.3.1	Allgemeines	78

A.3.2	Symbole	78
A.3.3	Berechnung von Δp_N	79
A.3.4	Berechnung von Δp_{fr}	80
A.3.5	Berechnung von Δp_T	81
A.3.6	Berechnung des Widerstandsbeiwerts $C_{x,tu}$	82
A.4	GB-Ansatz unter Vernachlässigung der Änderung der Luftdichte und der Schallgeschwindigkeit	84
A.4.1	Allgemeines	84
A.4.2	Berechnung von Δp_N	84
A.4.3	Berechnung von Δp_{fr}	84
A.4.4	Berechnung von Δp_T	85
Anhang B (informativ) Kriterien für den Druckkomfort		86
B.1	Allgemeines	86
B.2	Nicht druckdichte Züge (allgemein $\tau_{dyn} < 0,5$ s)	86
B.3	Druckdichte Züge (allgemein $\tau_{dyn} > 0,5$ s)	86
Anhang C (informativ) Mikrodruckwelle		88
C.1	Allgemeines	88
C.2	Entstehung der Welle	88
C.3	Wellenausbreitung	89
C.4	Wellenabstrahlung	89
Anhang D (informativ) Druckbelastung entgegenkommender nicht druckdichter Züge		91
Anhang E (informativ) Validierungsfälle für die Bewertung aerodynamischer Lasten		94
E.1	Allgemeines	94
E.2	Validierungsverfahren	94
Anhang ZA (informativ) Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm und den grundlegenden Anforderungen der EU-Richtlinie 2016/797/EU		96
Literaturhinweise		98

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 14067-5:2020) 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 14067-5:2006+A1:2010 ersetzen.

EN 14067 Bahnanwendungen — Aerodynamik besteht aus den folgenden Teilen:

- Teil 1: Formelzeichen und Einheiten
- Teil 3: Aerodynamik im Tunnel
- Teil 4: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik auf offener Strecke
- Teil 5: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik im Tunnel
- Teil 6: Anforderungen und Prüfverfahren für die Bewertung von Seitenwind

Die Ergebnisse des von der EU finanzierten Projekts „AeroTRAIN“ (Finanzhilfvereinbarung Nr. 233985) wurden verwendet.

Der Inhalt der Vorgängerversion EN 14067-5 wurde in dieses Dokument eingebunden, neu strukturiert und erweitert, um die technischen Spezifikationen für die Interoperabilität des transeuropäischen Eisenbahnsystems zu unterstützen. Anforderungen an die Konformitätsbewertung von Schienenfahrzeugen wurden hinzugefügt.

Dieses Dokument wurde im Rahmen eines Mandats/Normungsauftrages erarbeitet, den die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelsassoziation CEN erteilt haben, und unterstützt grundlegende Anforderungen der EU-Richtlinie 2016/797/EU.

Zum Zusammenhang mit EU-Richtlinie 2016/797/EU siehe informativen Anhang ZA, der Bestandteil dieses Dokuments ist.

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt aerodynamische Anforderungen, Prüfverfahren, Bewertungsmethoden und Abnahmekriterien für den Betrieb von Schienenfahrzeugen in Tunneln fest. Aerodynamische Druckänderungen, Lasten, Mikrodruckwellenerzeugung und weitere aerodynamische Aspekte, die im Tunnelbetrieb zu erwarten sind, werden in diesem Dokument behandelt. Anforderungen an die aerodynamische Konstruktion von Schienenfahrzeugen und Tunneln des Vollbahnsystems werden beschrieben. Die Anforderungen gelten nur für Vollbahnsysteme.

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 12663-1:2010+A1:2014, *Bahnanwendungen — Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen — Teil 1: Lokomotiven und Personenfahrzeuge (und alternatives Verfahren für Güterwagen)*

EN 12663-2:2010, *Bahnanwendungen — Festigkeitsanforderungen an Wagenkästen von Schienenfahrzeugen — Teil 2: Güterwagen*

EN 14067-4:2013+A1:2018, *Bahnanwendungen — Aerodynamik — Teil 4: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik auf offener Strecke*

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

ISO 8756:1994, *Air quality — Handling of temperature, pressure and humidity data*

prEN 17343:2019, *Bahnanwendungen — Allgemeine Begriffe*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

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

- ISO Online Browsing Platform: verfügbar unter <https://www.iso.org/obp>
- IEC Electropedia: verfügbar unter <http://www.electropedia.org/>

3.1 Druckwelle

ungefähre Stufenänderung des Drucks über der Umgebung, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt

3.2 Expansionswelle

ungefähre Stufenänderung des Drucks unterhalb der Umgebung, die sich mit Lichtgeschwindigkeit bewegt

3.3 Computational Fluid Dynamics (CFD)

numerische Verfahren zur Näherung und Lösung der Formeln der Strömungsdynamik

3.4

außergewöhnliche Belastungen

maximale Belastungen, die gelegentlich während des normalen Betriebs aufgrund statischer und transienter Belastungen entstehen

3.5

Ermüdungslasten

sehr hohe Anzahl dynamischer und aerodynamischer Belastungen unterschiedlicher Größe, denen die Strukturen der Wagenkästen von Schienenfahrzeugen oder Infrastrukturkomponenten während ihrer Betriebslebensdauer ausgesetzt sind

3.6

statische Belastungen

konstante oder nahezu konstante Belastungen im Verlauf der Zeit

Anmerkung 1 zum Begriff: Diese Belastungen umfassen den dynamischen Druck durch die Luftströmungsbeschleunigung um die Vorderfront des Zugs und Druckänderungen durch starke Seitenwinde.

3.7

transiente Belastungen

Belastungen, die sich im Verlauf der Zeit ändern

Anmerkung 1 zum Begriff: Transiente Belastungen können in drei Arten unterteilt werden:

- a) Belastungen durch Züge bei Begegnungen mit anderen Zügen auf offener Strecke oder aufgrund des Druckfelds um den Zug;
- b) Belastungen durch einzelne Züge in Tunneln oder Begegnung mit anderen Zügen in Tunneln;
- c) Belastungen aufgrund von Strömungsturbulenzen um Züge herum.

Anmerkung 2 zum Begriff: Die Belastungen a) und b) sind für alle Zugstrukturen relevant, während die Belastungen c) nur für einige Komponenten von Hochgeschwindigkeitszügen gelten und nicht in dieser Norm berücksichtigt werden.

3.8

Tunnel

Erdaushub oder Konstruktion um die Gleisstrecke, die dazu dient, die Gleisstrecke beispielsweise durch Bodenerhebungen, Gebäude oder Wasser zu führen

3.9

Tunnellänge

Länge eines Tunnels ist festgelegt als vollständig geschlossener Abschnitt, gemessen in Gleishöhe

3.10

Tunnelquerschnittsfläche (für das Versperrungsmaß)

freie Querschnittsfläche eines Tunnels ohne Gleisbettung, Gleisschwellen, längslaufende Leitungen, Plattformen

3.11

Fahrzeugquerschnittsfläche (für das Versperrungsmaß)

Projektions- oder Querschnittsfläche in Längsrichtung des Fahrzeugs.

3.12

kritische Begegnung

Begegnung zweier Züge in einem Tunnel, bei der maximale Druckänderungen entstehen.

Anmerkung 1 zum Begriff: Die Begriffe „Begegnung“ und „Vorbeifahrt“ werden in dieser Norm mit der gleichen Bedeutung verwendet.

3.13

Überdruck

Betrag, um den der in einem Fluid wie Luft gemessene Druck den Umgebungsluftdruck übersteigt.

3.14

fester Zugverband

Gruppe von Schienenfahrzeugen, die nur in einer Werkstattumgebung ge-/entkoppelt oder zusammengestellt/getrennt werden können (z. B. Gelenkfahrzeuge)

[QUELLE: prEN 17343:2019, 3.1.6.4]

4 Symbole und Abkürzungen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Symbole.

Tabelle 1 — Symbole

Symbol	Bedeutung	Erläuterung oder Bemerkung	Einheit
A_s, A_T	Integrationsbereich	siehe Bild 11	sPa
B	Versperrungsmaß des Zugs/Tunnels	$B = \frac{S_{tr}}{S_{tu}}$	
b	Breite des Fahrzeugs	siehe Bild 2	m
C	Lastkollektiv	siehe 7.7.4.1	
$C_{f,tr}$	Reibungszahl oder -koeffizient des Zugs	Gleichung (15)	
$C_{f,tu}$	Reibungszahl oder -koeffizient des Tunnels		
$C_{lifecycle}$	Gesamtlastkollektive auf offener Strecke und in Tunneln	Gleichung (35)	
$C_{lifecycle,front}$	Gesamtlastkollektive auf offener Strecke und in Tunneln an der Vorderseite des Zugs	siehe 7.7.4.2	
$C_{lifecycle,tail}$	Gesamtlastkollektive auf offener Strecke und in Tunneln am Heck des Zugs	siehe 7.7.4.2	
C_n	Faktor in Abhängigkeit von der Form des Zugkopfes und der Form des Tunnelportals	Gleichung (C.2)	
$C_{oa,cros}$	Lastkollektiv für Züge, die sich auf offener Strecke begegnen	Gleichung (30)	
$C_{tu,cross}$	Lastkollektiv für Züge, die sich in Tunneln begegnen	Gleichung (34)	
$C_{tu,solo}$	Kollektiv für Einzeldurchfahrten durch einen Tunnel	Gleichung (31)	
CFL	Courant-Friedrich-Levy-Zahl	siehe 7.6.2	
c	Schallgeschwindigkeit		m/s

Symbol	Bedeutung	Erläuterung oder Bemerkung	Einheit
D_h	hydraulischer Durchmesser	Gleichung (16)	m
$F_{\max}$	maximale gemessene Kraft	siehe Bild D.4	N
g	Beschleunigung durch Schwerkraft		m/s ²
h	Höhe	siehe Bild 2	m
h_1	Frequenz entsprechend einer Amplitudenklasse in einer Rainflow-Matrix	siehe 7.7.5	
h_0	Abstand zwischen der Gleisoberkante und der Unterseite des Wagenkastens	siehe Bild 2	m
h_c	Höhe der Tunnelmitte über Schienenebene	siehe Bild 1	m
$H, H1, H2$	Relative Luftfeuchte	siehe 7.3.2	%
k	Wöhler-Kurven-Exponent	siehe 7.7.5	
k_r	Steifheitsfaktor der Fahrzeugstruktur	siehe 7.8.2	
k_1	Faktor	Gleichung (12)	
k_2	Faktor	Gleichung (12)	
k_s	Zugrauigkeitsparameter	siehe 7.3.3	m
L_n	Kopflänge des Zugs	siehe Bild 2	m
$L_{n,model}$	Kopflänge des Zugmodells	siehe 7.2.7	m
$L_{section,i}$	Länge des Streckenabschnitts i	siehe 7.7.4.3	km
L_{tr}	Zuglänge	Gesamtlänge	m
L_{tu}	Länge des Tunnels		m
$L_{tu,crit}$	kritische Tunnellänge	siehe 7.7.3.6	m
$L_{tu,min}$	Mindestlänge eines Tunnels, gemessen bei Prüfungen im Maßstab 1 : 1, ab Einfahrportal	Gleichung (4)	m
$L_{virtun,j}$	virtuelle Tunnellänge j	Gleichung (39)	m
$L_{year,e}$	Fahrstrecke pro Jahr auf dem Streckenabschnitt i	siehe 7.7.4.2	km/a
Modellmaßstab	Verhältnis des Zugs im Maßstab 1 : 1 zu seinem Modell	siehe 7.6.3.2	
N_{oa}	Anzahl offener Streckenabschnitte	siehe 7.7.4.2	1/a
N_c	Referenzzyklen bei der Berechnung der schadensäquivalenten Belastungsamplitude	siehe 7.7.5	Hz
$N_{trainsperhour}$	Anzahl der Züge, die einen stationären Punkt in eine Richtung pro Stunde passieren	siehe 7.7.5	1/h
N_{tu}	Gesamtzahl der Tunnel auf einer Strecke	siehe 7.7.4.2	
$N_{tu,cros}$	Anzahl der Tunnel, in denen Züge aufeinander treffen	siehe 7.7.4.2	
$N_{tu,solo}$	Anzahl der Tunnel, in denen Züge ohne Gegenverkehr fahren	Gleichung (33)	
$N_{\Delta t_e,j}$	berechnete Einfahrtzeitabstände für j_{th} Tunnel	Gleichung (34)	
$n_{oa,cros,i}$	Häufigkeit der Zugbegegnungen auf offener Strecke im Streckenabschnitt i	Gleichung (37)	

Symbol	Bedeutung	Erläuterung oder Bemerkung	Einheit
$n_{tu,cros,j}$	Häufigkeit der Zugbegegnungen in einem zweisgleisigen Tunnel j_{th}	Gleichung (40)	
$n_{tu,solo,i}$	Häufigkeit der einzelnen Zugdurchfahrten ohne Zugbegegnung in einem zweisgleisigen Tunnel j_{th}	Gleichung (31)	
P_{etr}	Zugumfang		m
P_{etu}	Tunnelumfang		m
p	Druck	Gleichung (41)	Pa
p_{eq}	schadensäquivalente Amplitude	siehe 7.7.5	Pa
p_l	klassifizierte Druckamplitude	siehe 7.7.5	Pa
p_L	Druckbelastung	Gleichung (24)	Pa
p_{atm}	atmosphärischer Druck		Pa
p_d	Druckdifferenz zwischen Innen- und Außendruck	siehe 7.1	Pa
$p_e, p_e(t)$	Außendruck an der Außenseite eines Fahrzeugs oder der durch einen Zug im Tunnel erzeugt wird	siehe 7.1	Pa
$p_{fullscale}$	Drücke im Maßstab 1 : 1, die mit $p_{modelscale}$ bestimmt werden	siehe Gleichung (19)	Pa
$p_i, p_i(t)$	Innendruck in einem Fahrzeug oder in einem geschlossenen Luftvolumen in einem Tunnel	siehe 7.1	Pa
$p_{modelscale}$	im Modellmaßstab gemessene Drücke	siehe Gleichung (19)	Pa
p_o	statischer Referenzdruck		Pa
p_{offset}	Ausgleichsdruck	siehe Bild 9	Pa
$p(t)_{sim}$	Drucksignal der Simulationssoftware im Tunnel	siehe 7.3.4	Pa
$p(t)_{test}$	Drucksignal der Gleisprüfung im Tunnel	siehe 7.3.4	Pa
r	Radius	der Abstand zwischen der Mitte des Ausfahrportals (am Boden) und dem relevanten Punkt (Immissionsort, außerhalb des Tunnels), siehe Anhang C	m
r_b	Eckenradius der Mikrodruckwelle des Referenzfahrzeugs	siehe Bild 2	m
R	Tunnelradius	siehe Bild 1	m
S_{eq}	äquivalente Leckagefläche		m ²
S_{tr}	Zugquerschnittsfläche	siehe 3.10	m ²
S_{tu}	Tunnelquerschnittsfläche	siehe 3.9	m ²
t, t_A, t_B, t_S, t_T	Zeit	siehe Bild 9 und Bild 11	s
t_e	Einfahrtzeitdifferenz	siehe 7.7.3.4	s
t_{life}	Zugnutzungsdauer	siehe 7.7.4.2	Jahr
$t_{50\%}$	Zeit bis zu einem Druckanstieg von 50 % des Werts zum Zeitpunkt t_T	siehe Bild 11	s

Symbol	Bedeutung	Erläuterung oder Bemerkung	Einheit
T	Absoluttemperatur		K
T_f	Tunnelfaktor	siehe Gleichung (A.26)	
U	lokale vorherrschende Geschwindigkeit (Zuggeschwindigkeit oder Druckwellengeschwindigkeit)	siehe 7.6.2	m/s
U_0	Strömungsgeschwindigkeit im Tunnel relativ zum Zug vor der Zügeinfahrt	siehe A.4	m/s
u_0	gemessene Luftströmung in einem Tunnel zum Zeitpunkt der Zügeinfahrt	siehe 7.3.2	m/s
v_{tr}	Zuggeschwindigkeit		m/s
$v_{tr,1}$	Zuggeschwindigkeit	siehe 7.7.4.3	m/s
$v_{tr,1,rel}$	Zuggeschwindigkeit relativ zur Luftströmung im Tunnel	siehe 7.3.2	m/s
$v_{tr,2}$	Geschwindigkeit des entgegenkommenden Zugs	siehe 7.7.4.3	m/s
$v_{tr,2}$	Referenzgeschwindigkeit des Zugs	siehe 7.3.2	m/s
$v_{line,max}$	Bemessungsgeschwindigkeit eines Streckensegments	Maximal zulässige Geschwindigkeit in einem bestimmten Streckensegment. Das Segment kann ein Tunnel, eine Strecke oder ein Streckensegment sein.	km/h
$v_{tr,max}$	maximale Zuggeschwindigkeit oder Bemessungs-Zuggeschwindigkeit	Die maximale Zuggeschwindigkeit bezieht sich auf den Zugverband. Im Fall einer Beschränkung durch die Infrastruktur kann die maximale Zuggeschwindigkeit geringer als die Bemessungs-Zuggeschwindigkeit sein.	km/h
$v_{tr,ref}$	Zugreferenzgeschwindigkeit		km/h
$v_{tr,test}$	Zugprüfgeschwindigkeit	siehe 7.3.2	m/s
V_{int}	inneres Fahrzeugvolumen	siehe 7.8.3	m ³
X_d, X_h, X_{fr}, X_t	Dummy-Variablen	siehe A.3	
X_p	Abstand zwischen dem Einfahrportal und der Messposition im Tunnel		m
x_1, x_2, x_3	Längspositionen am Zug	festgelegt in 7.7.3.4	m
Y_{tr}	Abstand der Gleisachsen	zwischen den Mitten	m
Δh	maximale Höhendifferenz in einem Tunnel	siehe 7.2.5	m
ΔL_1	zusätzliche Länge	siehe 7.2.2.1	m
$\Delta p, \Delta p(t)$	Differenzdruck zum Zeitpunkt t		Pa

Symbol	Bedeutung	Erläuterung oder Bemerkung	Einheit
Δp_{alt}	natürliche Druckabweichung aufgrund der Höhe	siehe Gleichung (9)	Pa
$\Delta p_{d,max}$	maximale Druckdifferenz zwischen Innen- und Außendruck	siehe Bild D.4	Pa
Δp_{exit}	Amplitude der Anfangsdruckwelle am Ausfahrportal im Tunnel	siehe Gleichung (C.4)	Pa
Δp_{fr}	Druckänderung durch die bei der Einfahrt des Hauptteils des Zugs in den Tunnel verursachten Reibungseffekte	siehe Bild 6	Pa
$\Delta p_{fr,o}$	Druckänderung durch die bei der Einfahrt des Hauptteils des Zugs in den Tunnel verursachten Reibungseffekte	siehe 7.2.4	Pa
Δp_{HP}	Druckverlauf verursacht durch die Vorbeifahrt des Zugkopfs an der Messposition im Tunnel	siehe Bild 6	Pa
$\Delta p_{i,limit}$	Druckgrenzwerte, $i = N, N+fr, N+fr+T$	siehe Tabelle 4	Pa
Δp_{max}	maximale Spitze-Spitze-Druckänderung an der Außenseite des Zugs		Pa
Δp_N	Druckänderung verursacht durch die Einfahrt des Zugkopfes in einen Tunnel	siehe Bild 6	Pa
$\Delta p_{N,o}$	Druckänderung verursacht durch die Einfahrt der Zugkopfes in einen Tunnel, gemessen an der Außenseite des Zugs	siehe 7.2.4	Pa
Δp_T	Druckänderung verursacht durch die Einfahrt des Zughecks in einen Tunnel	siehe Bild 6	Pa
$\Delta p_{T,o}$	Druckänderung verursacht durch die Einfahrt des Zughecks in einen Tunnel, gemessen an der Außenseite des Zugs	siehe 7.2.4	Pa
Δp_1	Druck nach Einfahrt des Zughecks	siehe A.3.2	Pa
$\overline{\Delta p_n}$	mittlere Druckänderung durch die Einfahrt des Kopfes	siehe Tabelle 4	Pa
$\overline{\Delta p_{fr}}$	mittlerer Reibungsdruckanstieg	siehe Tabelle 4	Pa
$\overline{\Delta p_T}$	mittlere Druckänderung durch die Einfahrt des Heckes	siehe Tabelle 4	Pa
Δt	das charakteristische Zeitintervall für den Druckanstieg	siehe Gleichung (C.2)	s
Δt_e	Zeitschritt	siehe Gleichung (26)	s
Δx_1	zusätzlicher Abstand, um eine gute zeitliche Trennung der einzelnen Druckänderungen sicherzustellen	siehe 7.2.2.2	m
$\varepsilon_{\Delta p}$	Abweichung zwischen Prüfung und Simulation	siehe 7.3.4	
ξ_E	Verlustbeiwert für das Tunnelportal	siehe A.3	
ξ_h	Verlustbeiwert des Zugkopfes im Tunnel	siehe A.3	
ξ_{h0}	Verlustbeiwert des Zugkopfes auf offener Strecke	siehe A.3	
ξ_{h1}	Zusatzverlustbeiwert für den Zugkopf im Tunnel	siehe A.3	

Symbol	Bedeutung	Erläuterung oder Bemerkung	Einheit
ξ_t	Verlustbeiwert des Zughecks im Tunnel	siehe A.3	
ξ_{t0}	Verlustbeiwert des Zughecks auf offener Strecke	siehe A.3	
ξ_{t1}	Zusatzverlustbeiwert des Zughecks im Tunnel	siehe A.3	
ξ_l	Verlustbeiwert für den Zug	siehe A.3	
ξ_N	Druckverlustbeiwert des Zugkopfs	siehe A.4	
ξ_p	Druckverlustbeiwert des Tunnelportals	siehe A.4	
ξ_r	Druckverlustbeiwert des Zughecks	siehe A.4	
θ_1, θ_2	Temperatur	siehe 7.3.2	°C
P_{amb}	atmosphärische Umgebungsluftdichte	siehe Gleichung (12)	kg/m ³
ρ_0	Referenzluftdichte	1.225 kg/m ³	kg/m ³
p, p_1, p_2	Luftdichte ρ_1 im Prüfszenario ρ_2 im Referenzszenario	siehe 7.3.2 siehe 7.3.2	kg/m ³
τ_{dyn}	Wert des Druckdichtheitsbeiwerts für fahrende Schienenfahrzeuge	siehe 7.7.3.2	s
τ_{stat}	Wert des Druckdichtheitsbeiwerts für stehende Schienenfahrzeuge	siehe 7.8.1	s
Ω	Raumwinkel, der die Abstrahlbedingungen im Bereich des Ausfahrportals charakterisiert	siehe C.4	
$\overline{}$, (overbar)	Mittelwert		

5 Anforderungen an Lokomotiven und Personenfahrzeuge

5.1 Begrenzung der Druckänderung im Tunnel

5.1.1 Allgemeines

Wenn ein Zug in einen Tunnel einfährt und ihn wieder verlässt, werden Druckabweichungen erzeugt, die sich entlang des Tunnels mit Schallgeschwindigkeit ausbreiten und an den Portalen zurück in den Tunnel reflektiert werden. Diese Druckabweichungen können bei Fahrgästen und dem Zugpersonal unangenehm auf das Gehör wirken oder es im schlimmsten Fall beschädigen und zur Einwirkung transientser Lasten auf die Struktur der Züge und die Infrastrukturkomponenten führen.

Um eine klare Schnittstelle zwischen den Teilsystemen von Schienenfahrzeugen und der Infrastruktur bei Vollbahnen festzulegen, müssen die durch den Zug induzierten aerodynamischen Druckänderungen im Tunnel bekannt sein und begrenzt werden. Zwei Referenzfälle für die Bewertung von Schienenfahrzeugen werden festgelegt, um die von Zügen induzierten aerodynamischen Druckänderungen im Tunnel zu beschreiben und zu begrenzen.

5.1.2 Anforderungen

5.1.2.1 Referenzfall

Für Spurweiten von 1 435 mm bis einschließlich 1 668 mm werden die durch einen Zug, der in einen einfachen, nicht geneigten röhrenförmigen Tunnel (d. h. ohne Schächte usw.) einfährt, erzeugten Druckänderungen durch die Druckverläufe für zwei gegebene Kombinationen von Zuggeschwindigkeit und Tunnelquerschnitt festgelegt. Diese Fälle werden als Referenzfälle bezeichnet.

Der Druckverlauf besteht aus drei charakteristischen Druckänderungen: Δp_N , verursacht durch das Einfahren des Zugkopfes in den Tunnel, Δp_{fr} durch die Reibungswirkungen aufgrund des Einfahrens des Hauptteils des Zugs in den Tunnel und Δp_T , verursacht durch das Einfahren des Zughecks in den Tunnel (siehe Bild 6).

Die Bewertung muss für die meteorologischen Normbedingungen erfolgen: atmosphärischer Druck $p_{atm} = 101\,325\text{ Pa}$, Luftdichte $\rho_{amb} = 1,225\text{ kg/m}^3$, Temperatur $\theta = 15\text{ °C}$ ohne Grundströmung im Tunnel.

Tabelle 2 — Maximale Veränderungen des charakteristischen Tunneldrucks Δp_N , Δp_{fr} und Δp_T für den Referenzfall

Maximale Bemessungsgeschwindigkeit km/h	Referenzfall		Kriterien für den Referenzfall, Pa		
	Referenzgeschwindigkeit, $v_{tr,ref}$ km/h	S_{tu} m ²	Δp_N	$\Delta p_N + \Delta p_{fr}$	$\Delta p_N + \Delta p_{fr} + \Delta p_T$
$v_{tr,max} \leq 200$	Keine Anforderung				
$200 \leq v_{tr,max} \leq 230$	200	53,6	$\leq 1\,750$	$\leq 3\,000$	$\leq 3\,700$
$230 < v_{tr,max}$	250 oder $v_{tr,max}^a$	63,0	$\leq 1\,600$	$\leq 3\,000$	$\leq 4\,100$
^a anzuwenden ist der niedrigere der Werte von $v_{tr,max}$ und 250 km/h					

5.1.2.2 Feste oder vorgegebene Zugzusammensetzungen

Eine feste oder vorgegebene Zugzusammensetzung, die mit der Referenzgeschwindigkeit im Tunnelszenario für den Referenzfall fährt ohne anderen Zügen zu begegnen, darf an einem festen Punkt in dem Tunnel zu keinen Veränderungen des charakteristischen Drucks führen, die die in Tabelle 2 angegebenen Werte überschreiten.

ANMERKUNG 1 Feste und vorgegebene Zugzusammensetzungen werden in TSI LOC&PAS 2014, Abschnitt 2.2.1 beschrieben.

Für Zugzusammensetzungen, die im Hinblick auf ihre Fahrtrichtung nicht symmetrisch sind, gilt die Anforderung für beide Fahrtrichtungen.

Für feste oder vorgegebene Zugzusammensetzungen, die aus mehr als einer Zugeinheit bestehen, muss die vollständige Bewertung für die maximale Länge des Zugs aus den gekuppelten Einheiten erfolgen, siehe 7.3.

ANMERKUNG 2 Prüfungen im Maßstab 1:1 liefern Eingangsdaten für die Bewertung und können an kürzeren Zugkonfigurationen vorgenommen werden, siehe 7.2.2.3.

5.1.2.3 Einzelne mit einem Führerraum ausgestattete Schienenfahrzeugeinheiten

Eine einzelne mit einem Führerraum ausgestattete Fahrzeugeinheit, die als führendes Fahrzeug mit der Referenzgeschwindigkeit in dem Referenzfalltunnel fährt, ohne anderen Zügen zu begegnen, darf keine charakteristischen Druckänderungen Δp_N und Δp_T über die in Tabelle 2 angegebenen Werte hinaus verursachen. Die Druckänderung Δp_{fr} muss auf 1 250 Pa für Züge mit $v_{tr,max} \leq 230$ km/h oder auf 1 400 Pa für Züge mit $v_{tr,max} > 230$ km/h festgelegt werden.

Für einzelne Schienenfahrzeugeinheiten, die für den Betrieb in beide Richtungen als führendes Fahrzeug ausgelegt sind, gilt die Anforderung in beide Richtungen.

5.1.2.4 Andere Personenschienenfahrzeuge

Andere Personenschienenfahrzeuge, die mit der Referenzgeschwindigkeit in dem Referenzfall-Tunnelszenario fahren, dürfen keine Veränderung des charakteristischen Drucks Δp_{fr} über die in Tabelle 2 angegebenen Werte hinaus verursachen. Die Druckänderung Δp_N muss auf 1 750 Pa und Δp_T auf 700 Pa für Züge mit $v_{tr,max} \leq 230$ km/h oder auf 1 600 Pa und 1 100 Pa für Züge mit $v_{tr,max} > 230$ km/h festgelegt werden.

Für Personenschienenfahrzeuge, die nicht von 5.1.2.2 oder 5.1.2.3 umfasst sind, muss die Konformität für eine mögliche reale Zugkonfiguration, mit realistischen Endfahrzeugen mit einem Führerraum beurteilt werden, die einer Zuglänge von 400 m möglichst nahekommt. Wenn das Fahrzeug für Zugzusammensetzungen mit einer Länge über 400 m geeignet sein könnte, muss die maximale Zuglänge (Länge der Führerräume plus Wagen) bestimmt werden, die das Kriterium in Tabelle 2 gerade erfüllt. Diese maximale Zuglänge muss im Fahrzeugregister dokumentiert werden. Zur Skalierung der Zuglänge, siehe 7.3.6.

5.1.3 Vollständige Konformitätsbewertung

Eine vollständige Konformitätsbewertung von Schienenfahrzeugen¹ ist nach Tabelle 3 durchzuführen.

Tabelle 3 — Anwendbare Verfahren für die vollständige Konformitätsbewertung von Schienenfahrzeugen

Maximale Bemessungsgeschwindigkeit km/h	Verfahren
$v_{tr,max} < 200$	Keine Bewertung erforderlich
$v_{tr,max} \geq 200$	Dokumentation der Konformität nach 5.1.4, sofern zutreffend; oder Prüfungen im Maßstab 1 : 1 nach 7.2.2 und Bewertung nach 7.3

5.1.4 Vereinfachte Konformitätsbewertung

Eine vereinfachte Konformitätsbewertung darf für Schienenfahrzeuge durchgeführt werden, die geringfügigen Gestaltungsunterschieden im Vergleich zu Schienenfahrzeugen, für die bereits eine vollständige Konformitätsbewertung vorliegt, unterliegen.

¹ Diese Bewertung wird die Anforderungen der Richtlinie über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems erfüllen.

In Bezug auf Druckänderungen in Tunneln sind die einzigen relevanten Gestaltungsunterschiede Unterschiede in der äußeren Geometrie und Unterschiede der Bemessungsgeschwindigkeit und der Zuglänge.

Die vereinfachte Konformitätsbewertung muss eine der folgenden Formen in Übereinstimmung mit Tabelle 4 annehmen:

- einen Nachweis, dass die Gestaltungsunterschiede keine Auswirkung auf die Druckänderungen im Tunnel haben; oder
- eine vergleichende Bewertung der relevanten Designunterschiede des Schienenfahrzeuges mit einer vorliegenden vollständigen Schienenfahrzeug -Konformitätsbewertung.

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

Gestaltungsunterschiede	Verfahren und Anforderungen
Unterschiede in der äußeren Geometrie beschränkt auf: — Nachbestellung von untersuchten Reisezugwagen der gleichen Bauart und/oder mit dem gleichen Querschnitt; — geringfügige Unterschiede der äußeren Geometrie: — Scheibenwischer, Griffe und Antennen; — lange isolierte vorstehende Objekte oder Hohlräume, die nicht quer/vertikal zur Fahrtrichtung sind oder sich in der Nähe der vorderen Rundung befinden, oder Kanten, deren Querabmessung weniger als 5 cm beträgt; — kleine isolierte vorstehende Objekte und Hohlräume mit Abmessungen von weniger als 5 cm in jeder Richtung; — Stromabnehmer, Stromkabel und Leitungen; — andere Änderungen der Dach- oder Unterbodenausstattung von weniger als 20 cm in jede physische Richtung; — Hinzufügung von Geräteverkleidungen mehr als 10 m hinter der Spitze des Zugkopfes; — Beschläge, Dichtungen, Klebeverbindungen, Griffstangen, Rückspiegelanbauten, Oberflächenrauigkeit, Türen, Fenster, Änderungen der Verglasung, Signalleuchten, Leitungen, Kabel und Stecker; — andere Teile mit Änderungen der seitlichen Abmessungen von weniger als 5 cm. — Unterschiede, die vorteilhaft sind: — Erhöhung der Kopflänge; — Reduzierung des Querschnitts; — Reduzierung der Zuglänge.	Dokumentation der Unterschiede, Erklärung, dass keine Auswirkungen entstehen, und Verweisung auf bestehende konforme vollständige Konformitätsbewertungen

Gestaltungsunterschiede	Verfahren und Anforderungen
Andere Unterschiede der äußeren Geometrie (z. B. Puffer, Frontkupplungen, Schneepflüge, Vorder- oder Seitenfenster), bei denen die grundlegenden Eigenschaften der Kopfform und insbesondere die Querschnittsfläche und Kopflänge erhalten bleiben.	Dokumentation der Unterschiede und Verweisung auf bestehende konforme vollständige Konformitätsbewertungen UND Bewertung der relativen Auswirkung von Unterschieden durch — Prüfungen beweglicher Modelle im reduzierten Maßstab nach 7.2.7, oder — dreidimensionale CFD-Simulationen nach EN 14067-4:2013+A1:2018, 6.1.2.4 UND Nachweis und Dokumentation, dass i) der Unterschied Veränderungen in $\overline{\Delta p}_N$, $\overline{\Delta p}_N + \overline{\Delta p}_{fr}$ und $\overline{\Delta p}_N + \overline{\Delta p}_{fr} + \overline{\Delta p}_T$ von jeweils weniger als 5 % verursacht. $\left \frac{\overline{\Delta p}_{i,B} - \overline{\Delta p}_{i,A}}{\overline{\Delta p}_{i,A}} \right < 0,05 \text{ für } i = N, N + fr, N + fr + T$ ANMERKUNG Index <i>B</i> bezieht sich auf die neue Zuggeometrie und Index <i>A</i> bezieht sich auf den bestehenden konformen Zug. und ii) der Unterschied beträgt nicht mehr als 50 % der in Übereinstimmung mit 5.1.2 verfügbaren Spanne, d. h.: $\overline{\Delta p}_{i,B} - \overline{\Delta p}_{i,A} < 0,5 \cdot (\Delta p_{i,limit} - \overline{\Delta p}_{i,A})$ Wobei die Werte von $\Delta p_{i,limit}$, $i = N, N + fr, N + fr + T$ in Tabelle 2 angegeben sind.
Erhöhung der: — Bemessungsgeschwindigkeit; — Zuglänge.	— Dokumentation der Unterschiede UND — Übertragung in den Referenzfall durch die in 7.3.2, 7.3.3 oder 7.3.4 beschriebene Reskalierung UND — Nachweis und Dokumentation, dass der Zug weiterhin die in 5.1.2 aufgelisteten Anforderungen erfüllt.

5.2 Begrenzung des Druckgradienten bei Einfahrt in den Tunnel (betreffend Erzeugung von Mikrodruckwellen)

5.2.1 Allgemeines

Wenn ein Hochgeschwindigkeitszug in einen Tunnel einfährt, wird im Tunnel eine Druckwelle durch den Kolbeneffekt erzeugt. Diese Druckwelle breitet sich mit Schallgeschwindigkeit vor dem Zug durch den Tunnel in Richtung des Ausfahrportals aus. Am gegenüberliegenden Portal wird die Welle teilweise zurück in den Tunnel reflektiert und teilweise in die Umgebung ausgestrahlt. Der ausgestrahlte Teil wird als Mikrodruckwelle bezeichnet. Wenn der Druckgradient der Druckwelle in dem Tunnel ausreichend groß ist, kann er zu starken hörbaren Auswirkungen auf Personen und die Umgebung führen. Weitere Informationen hierzu sind in Anhang C enthalten.

Aus diesem Grund wird eine Festlegung eines Referenzszenarios, bestehend aus einem Referenzzug und einem Referenzstreckentunnel, eingeführt und die Leistung des beurteilten Zugs wird mit der Leistung des Referenzzugs verglichen.

5.2.2 Anforderungen

5.2.2.1 Allgemein

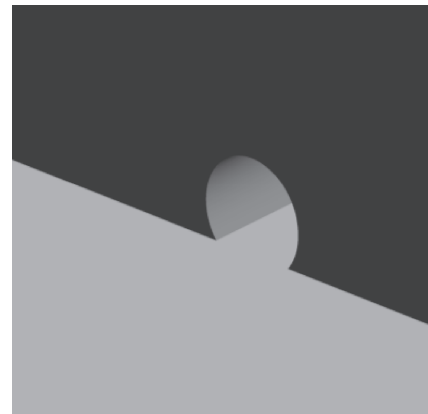
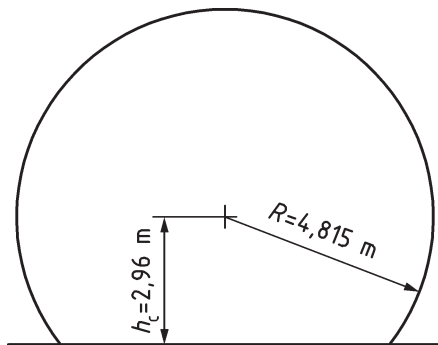
Bei Fahrzeugen mit Spurweiten von 1 435 mm bis einschließlich 1 668 mm muss der Einfahrdruckgradient beurteilt und mit dem im Referenzfall erzeugten Druckgradienten verglichen werden.

ANMERKUNG Die Anforderung gilt für den Betrieb im europäischen Schienennetz. Für Züge, die in begrenzten Netzen verkehren (z. B. ohne Tunnel) kann ihre Anwendung neu beurteilt werden.

5.2.2.2 Referenzfall

Der Referenzfall für den Tunnel und den Zug wird wie folgt festgelegt.

Der Referenztunnel hat eine freie Querschnittsfläche von 63 m^2 . Er hat eine runde Form mit einem gefüllten unteren Segment, wie in Bild 1 dargestellt. Das Portal ist in einer vertikalen Wand mit einem Radius von mindestens 75 m um die Tunnelmitte angeordnet. Der Zug muss mittig in den Tunnel einfahren. Die Tunnellänge muss mindestens 300 m betragen.



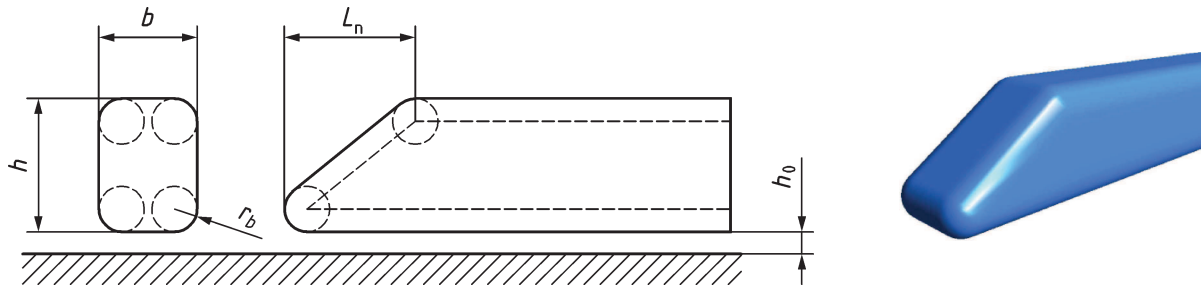
Legende

h_c Höhe der Tunnelmitte über Boden
 R Radius

Bild 1 — Referenztunnel

Der Referenzzug basiert auf einfachen geometrischen Parametern wie in Bild 2 dargestellt. Alle Ecken sind durch Fasen mit dem Radius r_b abgerundet. Der Querschnitt des Zugkörpers hinter dem Zugkopf von $S_{tr} = 11 \text{ m}^2$ bleibt bis zum Zugheck konstant. Es sind keine Drehgestelle, Stromabnehmer oder Fahrzeugzwischenräume vorhanden. Die folgenden Parameter sind für die Referenzgeometrie zu verwenden:

$$b = 3 \text{ m}, L_n = 4 \text{ m}, r_b = 0,75 \text{ m}, h_0 = 0,25 \text{ m}, h = 3,828 \text{ m}$$



Legende

- b Zugbreite
- h Höhe
- h_0 Abstand zwischen der Gleisoberkante und der Unterseite des Wagenkastens
- L_n Kopflänge
- r_b Radius

Bild 2 — Referenzfahrzeug

Der Referenzzug muss die gleiche Länge wie der beurteilte Zug haben.

ANMERKUNG Es ist ausreichend, nur die ersten 100 m der Züge nachzubilden.

5.2.2.3 Mit einem Führerraum ausgestattete Schienenfahrzeugeinheiten

Die Anforderung gilt für alle Fahrzeuge, die für den Betrieb als führendes Fahrzeug mit einer Bemessungsgeschwindigkeit von mindestens 200 km/h ausgelegt sind.

Die Anforderung gilt für jede mögliche Laufrichtung.

Tabelle 5 — Anwendbare Verfahren für die vollständige Konformitätsbewertung von Schienenfahrzeugen

Maximale Bemessungsgeschwindigkeit km/h	Verfahren
$v_{tr,max} < 200$	Keine Bewertung erforderlich
$v_{tr,max} \geq 200$	Bewertung durch numerische Simulation oder Prüfung im reduzierten Maßstab nach 7.5.

5.2.3 Vereinfachte Konformitätsbewertung

Für Schienenfahrzeuge mit Führerraum, die geringfügigen Gestaltungsunterschieden unterliegen, darf eine vereinfachte Konformitätsbewertung durchgeführt werden, im Vergleich zu Schienenfahrzeugen, für die eine vollständige Konformitätsbewertung bereits besteht. Änderungen der grundlegenden Kopfmerkmale und insbesondere des Verlaufs der Querschnittsfläche gelten grundsätzlich nicht als geringfügige Gestaltungsänderungen.

Im Hinblick auf den Druckgradienten bei der Einfahrt in den Tunnel sind die einzigen relevanten Gestaltungsunterschiede Unterschiede der äußeren Geometrie, der Bemessungsgeschwindigkeit und der Ausrüstung im Bereich des Kopfes, die die Druckwelle bei Einfahrt des Kopfes beeinflussen.

Diese vereinfachte Konformitätsbewertung muss durch eine Erklärung, dass die Gestaltungsunterschiede keine Auswirkungen auf den Druckgradienten in Übereinstimmung mit Tabelle 6 haben, erfolgen.

Tabelle 6 — Anwendbare Verfahren und Anforderungen für die vereinfachte Konformitätsbewertung von Schienenfahrzeugen

Gestaltungsunterschiede	Verfahren und Anforderungen
Unterschiede in der äußeren Geometrie beschränkt auf: — Erhöhungen der Querschnittsfläche von weniger als 1 %; — Reduzierungen der Kopflänge von weniger als 2 %; — Ausrüstung im Bereich des Zugkopfes, die die Kopfdruckwelle nicht beeinflusst und in Tabelle 4 unter ‚geringfügige Unterschiede der äußeren Geometrie‘ angegeben ist.	Dokumentation der Unterschiede, Erklärung, dass keine Auswirkungen bestehen, und Verweisung auf eine bestehende vollständige Konformitätsbewertung mit einem um mindestens 5 % im Vergleich zur Bewertung des Referenzfahrzeugs geringeren Druckgradienten bei der Einfahrt.

5.3 Festigkeit gegenüber aerodynamischen Lasten

5.3.1 Allgemeines

Aerodynamische Lasten sind eine Kombination aus den dynamischen Lasten durch die Begegnung von Zügen auf offener Strecke, die Fahrt von Zügen im Tunnel und der statischen Lasten durch die relative Luftströmung über den Zügen einschließlich Starkwindbelastungen. Die Lasten müssen bei der Konstruktion von Wagenkästen von Schienenfahrzeugen berücksichtigt werden und können als aerodynamische Lasten für Festigkeitsbewertungen nach EN 12663-1:2010+A1:2014 verwendet werden. Die Verfahren zur Ableitung von Lasten sind nur für die Wagenkästen von Schienenfahrzeugen geeignet. Die Verfahren müssen weiter angepasst werden, um Informationen für die Gestaltung kleinerer Zugelemente wie Windschutzscheiben, Wagenkasten-Seitenfenster, Türen, Hauben, Geräteverkleidungen oder anderer an dem Wagenkasten angebrachter Formteile zu liefern.

Die wichtigsten relevanten Einflussparameter, die nicht alle in jedem Referenzfall gelten (siehe 5.3.2.4, 5.3.2.5 und 5.3.2.6) sind folgende:

- natürliche Windgeschwindigkeit;
- maximale Streckengeschwindigkeit;
- Zuglänge;
- Zugquerschnitt;
- Formen der Zugspitze und des Zughecks;
- maximale Zuggeschwindigkeit;
- entsprechende Parameter vorbeifahrender oder entgegenkommender Züge;
- Gleisabstand (Gleismittenabstand);
- Tunnelquerschnitt;
- Tunnellänge;
- Tunnelart, d. h. ein- oder zweigleisig;
- relative Einfahrtzeit von in einen Tunnel einfahrenden Zügen;

- Umgebungsbedingungen;
 - Luftdichte;
 - Schallgeschwindigkeit;
 - Umgebungsdruck;
 - Umgebungstemperatur;
 - Wind (einschließlich Windrichtung, Gegenwind).

5.3.2 Anforderungen

5.3.2.1 Allgemeines

Für Spurweiten von 1 435 mm bis einschließlich 1 668 mm und Vollbahn-Schienenfahrzeuge mit Bemessungsgeschwindigkeiten von mehr als 140 km/h müssen außergewöhnliche aerodynamische Lasten und Ermüdungslasten bei der Gestaltung neuer Schienenfahrzeuge berücksichtigt werden. Diese Anforderung muss unabhängig von der Bemessungsgeschwindigkeit auch erfüllt werden, wenn das Vollbahn-Schienenfahrzeug in Tunneln Fahrzeugen mit einer Geschwindigkeit von mehr als 140 km/h in seinem normalen Zugbetrieb begegnet. Die Anforderung gilt nicht für Güterwagen.

Diese Norm sieht außergewöhnliche und aerodynamische Ermüdungslasten für die Gestaltung von Schienenfahrzeugen vor und bietet somit eine Schnittstelle für Bewertungen der Strukturfestigkeit nach EN 12663-1:2010+A1:2014. Da die Zugparameter die Belastungen beeinflussen, müssen die Belastungen einzeln für die Referenzfälle durch Anwendung der nachfolgend angegebenen Verfahren beurteilt werden. Für einige Züge sind vereinfachte Lastfälle vorgesehen und können ohne weitere Bewertungsschritte angewendet werden, siehe 7.7.7. Darüber hinaus hängen Lasten von dem Vorhandensein von Starkwind, anderen auf benachbarten Gleisen vorbeifahrenden Zügen sowie den Eigenschaften der Infrastruktur und des Zugbetriebs ab. Nationale Unterschiede können beispielsweise durch verschiedene Fahrzeuge und Spurweiten auftreten.

Für Fahrzeugwagenkästen gelten die nachfolgend festgelegten aerodynamischen außergewöhnlichen und Ermüdungslastfälle als ausreichend für:

- die Fahrt bei Starkwind;
- das Überholen anderer Züge auf offener Strecke;
- die Durchfahrt einzelner Züge durch einen Tunnel;
- Zugbegegnungen in einem Tunnel.

Die obigen Fälle führen zu einer äußeren Druckverteilung auf dem Fahrzeugwagenkasten. Der Druck im Fahrzeug passt sich mit einer Zeitverzögerung in Abhängigkeit von der Dichtigkeit des Fahrzeugs an den Außendruck an. Die Differenz zwischen dem inneren Druck p_i und dem äußeren Druck p_e repräsentiert die Druckbelastung p_L auf alle Komponenten, die die Außenfläche des Fahrzeugs bilden. Die Wagenkastenstruktur des Fahrzeugs muss diesen Lasten widerstehen. Der Wagenkasten des Fahrzeugs ist daher positiven und negativen Belastungen durch die Druckänderungen im Tunnel ausgesetzt.

Die folgenden Mindestanforderungen sind für die Bestimmung der Belastungen festgelegt. Wenn andere Parameter angegeben werden oder aus Untersuchungen zur Verfügung stehen, ist ihre Anwendung erlaubt und muss dokumentiert werden. Die Anwendung ausführlicherer Verfahren ist erlaubt und muss dokumentiert werden.

Sofern nicht anders festgelegt, müssen Bewertung bei meteorologischen Normbedingungen erfolgen, d. h.: atmosphärischer Druck $p_{\text{atm}} = 101\,325\text{ Pa}$, Luftdichte $\rho_{\text{amb}} = 1,225\text{ kg/m}^3$, Temperatur $\theta = 15\text{ °C}$ ohne Grundströmung in allen betrachteten Tunneln.

5.3.2.2 Außergewöhnliche Lastfälle für Fahrzeugwagenkästen

Außergewöhnliche Lastfälle ergeben sich aus dem Betrieb:

- auf offener Strecke bei starkem Wind;
- in Tunneln (Bedingungen im ungünstigsten Fall).

Bei Fahrten auf offener Strecke wird die lokale Lastverteilung durch starken Wind als statische Last angewendet. Sie werden durch die Anwendung des Referenzfalls für die Fahrt bei starkem Wind abgeleitet, siehe 5.3.2.4. Im Tunnelbetrieb gelten die Lasten durch die Tunnelluftströmung um den Zug als durch die Lasten im Betrieb auf offener Strecke bei starkem Wind abgedeckt.

ANMERKUNG Auch wenn eine Böengeschwindigkeit (d. h. transient) berücksichtigt wird, gilt die damit verbundene Last als statische Last.

Transiente Lasten wirken aufgrund von durch den Betrieb in Tunneln verursachten Druckänderungen auf einen Zug. Alle relevanten betrieblichen Tunnelszenarien müssen betrachtet und die maximalen Lasten bei der Gestaltung des gesamten Fahrzeugwagenkastens berücksichtigt werden. Transiente Lasten aufgrund von Druckänderungen in Tunneln werden anhand der Referenzfälle für außergewöhnliche Lasten in Tunneln beurteilt, siehe 5.3.2.6.

Die maximalen aerodynamischen Belastungen (positive und negative Werte für p_L) werden für jeden Fall separat abgeleitet. Die maximalen Lasten werden nach EN 12663-1:2010+A1:2014 auf den Fahrzeugwagenkasten angewendet.

5.3.2.3 Ermüdungslastfälle für Fahrzeugwagenkästen

Ermüdungslastfälle resultieren aus:

- häufigen Zugvorbeifahrten auf offener Strecke;
- dem allgemeinen Betrieb in Tunneln (ungünstiges, jedoch typisches Szenario).

Als Grundlage für die Bestimmung der Ermüdungslasten dient ein Betriebsszenario mit den folgenden Parametern, die zu berücksichtigen sind: für das Fahrzeug (Zuggeschwindigkeit, verschiedene Fahrzeugparameter), für das Streckensystem (Tunnel, Tunnelabmessungen, freie Streckenabschnitte, Streckengeschwindigkeitsbeschränkungen usw.) und für den Gegenverkehr (Art, Geschwindigkeit, Häufigkeit der Vorbeifahrten).

Nur transiente Lasten werden für Ermüdungslasten berücksichtigt. Die durch transiente aerodynamische Druckbelastungen verursachten Auswirkungen auf den Fahrzeugwagenkasten können bei geeigneter Kombination für ein festgelegtes Betriebsszenario die über die gesamte Lebensdauer des Fahrzeugs erfahrene Last darstellen. Je nach betrachtetem Betriebsszenario muss der Lastzeitverlauf für die folgenden Lastfälle bestimmt werden:

- Transiente Lasten für Vorbeifahrten auf offener Strecke müssen anhand des Referenzfalls für Vorbeifahrten auf offener Strecke beurteilt werden, siehe 5.3.2.5.
- Transiente Lasten in Tunneln müssen unter Verwendung des Referenzfalls für Ermüdungslasten in Tunneln, siehe 5.3.2.7, beurteilt werden.

Züge, die sich auf offener Strecke begegnen oder in Tunneln betrieben werden, verursachen vergleichbare Belastungsverteilungen und können daher in Kombination berücksichtigt werden. Die relevanten Auswirkungen auf die Wagenkastenstruktur können beispielsweise anhand einer Rainflow-Analyse obiger Druckkurven kombiniert werden, siehe 7.7.4.4. Solange die Anwendung die in Übereinstimmung mit dieser Norm festgelegten Referenzszenarien erfüllt, dürfen die Lasten als konservative Lasten für Festigkeitsbewertungen nach EN 12663-1:2010+A1:2014 betrachtet werden.

5.3.2.4 Referenzfall für das Fahren bei Starkwind (außergewöhnlicher Lastfall)

Die lokale Druckverteilung um ein mit maximaler Bemessungsgeschwindigkeit auf offener Strecke fahrendes Fahrzeug bei einer stetigen und gleichmäßigen Windgeschwindigkeit von 30 m/s mit Windwinkeln zwischen 0° und 90° verursacht statische Lasten, die je nach Position variierend auf den Fahrzeugwagenkasten einwirken. Diese werden als Referenzfälle für das Fahren bei Starkwind bezeichnet. Diese Lasten sind auf den Fahrzeugwagenkasten anzuwenden. Annahmen in Bezug auf die Position des Fahrzeugs im Zug und die Eigenschaften anderer Fahrzeuge im Zug sind bei der Bewertung zulässig.

ANMERKUNG Die vorgenannte Windgeschwindigkeit ist ein gewähltes Szenario, das als ausreichend für die Bemaßung des Fahrzeugs gilt und nicht mit der Seitenwindstabilität verbunden ist.

5.3.2.5 Referenzfall für Vorbeifahrten auf offener Strecke (Ermüdungslastfall)

Bei Nichtvorhandensein von Aufschüttungen, Einschnitten und anderen wesentlichen gleisseitigen Strukturen wird das von einem mit maximaler Streckengeschwindigkeit vorbeifahrenden Zug erzeugte Druckfeld, das auf den untersuchten Zug auf offener Strecke einwirkt, als Referenzlastfall bezeichnet

Die Position des untersuchten Fahrzeugs in einem Zug hat keinen Einfluss auf die durch den vorbeifahrenden Zug verursachten Druckbelastungen. Die verursachten Lasten richten sich nach dem Gleismittenabstand sowie den aerodynamischen Eigenschaften und der Geschwindigkeit des vorbeifahrenden Zugs. Ungünstige aerodynamische Eigenschaften sind für den vorbeifahrenden Zug anzunehmen und müssen aus EN 14067-4:2013+A1:2018, 4.1 entnommen werden. Die durch die Druckänderungen des vorbeifahrenden Zugs verursachten Lasten wirken nur auf die gegenüberliegende Seite des untersuchten Zugs.

Da Vorbeifahrten auf offener Strecke und Tunnelfahrten in Ermüdungsbewertungen zusammengeführt werden, ist der Referenzfall der Vorbeifahrten auf offener Strecke in dem in 5.3.2.7 festgelegten Referenzszenario enthalten.

5.3.2.6 Referenzfälle für außergewöhnliche Lasten bei Tunneldurchfahrten

Das Referenzszenario beschreibt den Zugbetrieb in einer Reihe von Tunneln, teilweise mit Begegnungen anderer Züge. In dem Referenzfall werden alle Züge mit einer Geschwindigkeit betrieben, die dem geringeren Wert i) der angegebenen maximalen Tunnelgeschwindigkeit, ii) der maximalen Bemessungsgeschwindigkeit des untersuchten Fahrzeugs oder iii) einer projektspezifischen Geschwindigkeitsbeschränkung in Bezug auf die Geschwindigkeit sich begegnender Züge entspricht. Die folgenden Szenarien mit festgelegten Parametern für die Betriebsgeschwindigkeit, die Tunnelmaße und die Zugeigenschaften werden als Referenzszenarien bezeichnet.

a) Einspurige Tunnel mit einer Tunnelquerschnittsfläche S_{tu} und maximalen Streckengeschwindigkeiten $v_{line, max}$:

— $v_{line, max} = 120 \text{ km/h}$, $S_{tu} = 32,4 \text{ m}^2$;

— $v_{line, max} = 160 \text{ km/h}$, $S_{tu} = 46,7 \text{ m}^2$;

— $v_{line, max} = 230 \text{ km/h}$, $S_{tu} = 52,0 \text{ m}^2$;

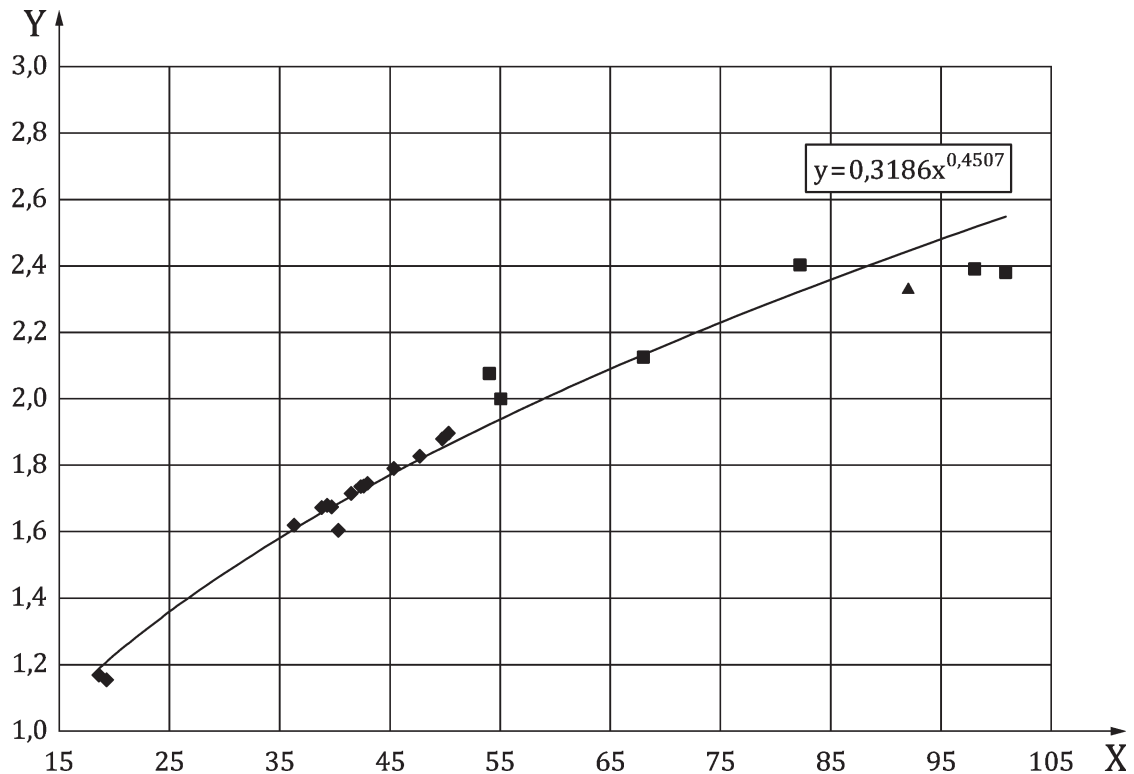
— $v_{line, max} = 300 \text{ km/h}$, $S_{tu} = 59,7 \text{ m}^2$.

b) Zweigleisige Tunnel mit einer maximalen Geschwindigkeit $v_{\text{line, max}}$ im Tunnel und einer Tunnelquerschnittsfläche S_{tu} und einer vorbeifahrenden Zugklasse unter vollständiger Nutzung der in Tabelle 2 festgelegten Kriterien:

- $v_{\text{line, max}} = 150 \text{ km/h}$, $S_{\text{tu}} = 51,0 \text{ m}^2$;
- $v_{\text{line, max}} = 160 \text{ km/h}$, $S_{\text{tu}} = 74,2 \text{ m}^2$;
- $v_{\text{line, max}} = 200 \text{ km/h}$, $S_{\text{tu}} = 79,2 \text{ m}^2$;
- $v_{\text{line, max}} = 230 \text{ km/h}$, $S_{\text{tu}} = 79,2 \text{ m}^2$;
- $v_{\text{line, max}} = 250 \text{ km/h}$, $S_{\text{tu}} = 82,1 \text{ m}^2$;
- $v_{\text{line, max}} = 280 \text{ km/h}$, $S_{\text{tu}} = 82,1 \text{ m}^2$;
- $v_{\text{line, max}} = 300 \text{ km/h}$, $S_{\text{tu}} = 92,0 \text{ m}^2$.

Wenn der Betrieb des untersuchten Fahrzeugs für eine bestimmte Strecke gilt, auf der einige Szenarien nicht relevant sind, müssen diese ausgenommen oder ersetzt werden. Wenn die Strecke beispielsweise keine Tunnel enthält, darf die Bewertung der Lasten aus Tunnelszenarien ignoriert werden.

Die vorgenannten Tunnelfestlegungen gelten als für Deutschland geeignet. Bild 3 zeigt Querschnittsbereiche für ein- und zweigleisige Streckentunnel zusammen mit ihren Tunnelbetriebsgeschwindigkeiten, die für eine Reihe europäischer Länder typisch sind. Die obigen Referenzfälle sind als Linien, die die Symbole verbinden, dargestellt. Dies deutet darauf hin, dass einige Länder möglicherweise andere Szenarien entwickelt müssen, um für ihre Streckennetze geeignete Druckverteilungen sicherzustellen.



Legende

- X S_{tu} m^2
- Y S_{tu}/P_{etu}
- ◆ Großbritannien
- Italien
- ▲ Deutschland
- Potenzgesetz

Bild 3 — Verhältnisse zwischen Tunnelfläche und Tunnelumfang

Bild 3 zeigt einen Plot des Zusammenhangs zwischen der Querschnittsfläche und dem Umfang der Tunnel auf der Grundlage nationaler Datenbankwerte und ist hilfreich, wenn nur Werte für die Querschnittsfläche zur Verfügung stehen.

Transiente Drücke in Tunneln müssen für das untersuchte in einem Zug eingereihte Fahrzeug beurteilt werden. Die Tunnellänge wird als kritische Länge auf der Grundlage der maximalen äußeren Druckänderung nach 7.7.3.6 gewählt.

5.3.2.7 Referenzfälle für Ermüdungslasten bei Tunneldurchfahrten

Ein Szenario mit festgelegten Parametern für Züge, den Betrieb und die Infrastruktur, wie nachfolgend aufgelistet, wird als Referenzfall bezeichnet. Das Referenzszenario beschreibt einen Zugbetrieb auf einer Strecke mit Tunneln und entgegenkommenden Zügen. In dem Referenzfall wird angenommen, dass das Fahrzeug während seiner gesamten Lebensdauer ausschließlich auf der durch das Referenzszenario beschriebenen Strecke betrieben wird. Bei diesem Betrieb ist die Außenfläche des Fahrzeugs verschiedenen Druckänderungen ausgesetzt. Unterschiede zwischen dem äußeren und inneren Druck wirken als transiente Lasten des Fahrzeugwagenkastens und sind daher von dem Grad der Druckdichtigkeit des untersuchten Fahrzeugs abhängig.

Die verschiedenen Druckunterschiede zwischen den äußeren und inneren Drücken und die Häufigkeit ihres Auftretens während der Lebensdauer des Fahrzeugs werden durch das Lastkollektiv dargestellt. Das für den Lebensdauerbetrieb nach dem Referenzszenario repräsentative Lastkollektiv muss als Ermüdungsbelastung auf den Fahrzeugwagenkasten angewendet werden.

Bis zur Entwicklung von Standardreferenzszenarien sollten die Szenarien in der Fahrzeugspezifikation angegeben werden. Wenn ein Referenzszenario für ein Eisenbahnnetz und nicht nur für eine bestimmte Strecke repräsentativ sein soll, muss dies begründet werden, um nachzuweisen, dass das gewählte Referenzszenario ausreichend anspruchsvolle Ermüdungslasten enthält, um für die verschiedenen Segmente (d. h. Tunnel, offene Strecken) des Streckennetzes repräsentativ zu sein.

Das allgemeine Referenzszenario wird durch die folgenden Parameter festgelegt, die den Betrieb des untersuchten Fahrzeugs auf einer Eisenbahnstrecke für jedes Streckensegment beschreiben:

- Infrastrukturparameter (pro Segment):
 - Länge des Streckensegments $L_{\text{section},i}$ und Hinweis, ob es sich um einen offenen Streckenabschnitt oder einen Tunnel handelt;
 - die maximale Streckengeschwindigkeit, $v_{\text{line, max}}$;
 - die freie Querschnittsfläche des Tunnels, S_{tu} ;
 - die Anzahl der Gleise und der Gleismittenabstand.
- Betriebsparameter:
 - Betrieb in beide Richtungen auf der vorgenannten Infrastruktur während der Lebensdauer des Fahrzeugs;
 - Anzahl der Züge, die einen stationären Punkt in eine Richtung pro Stunde passieren, $N_{\text{trainsperhour}}$.
- Zugparameter:
 - die Geschwindigkeit der entgegenkommenden Züge entspricht der maximalen Streckengeschwindigkeit, falls nicht anders festgelegt;
 - die aerodynamischen Eigenschaften entgegenkommender Züge in Tunneln, wie in Tabelle 2 in 5.1.2.2 festgelegt;
 - die aerodynamischen Eigenschaften von auf offener Strecke entgegenkommenden Fahrzeugen, wie in EN 14067-4:2013+A1:2018, Tabelle 2 festgelegt.

Die erforderlichen Parameter des untersuchten Fahrzeugs werden in 7.7.3.2 vorgestellt.

ANMERKUNG Ein Referenzszenario für das deutsche Streckennetz ist in [9] und [10] festgelegt.

5.3.3 Bewertung außergewöhnlicher Belastungen

Eine vollständige Bemessung außergewöhnlicher Lasten von Schienenfahrzeugen ist nach Tabelle 7 durchzuführen.

Tabelle 7 — Anwendbare Verfahren für die vollständige Konformitätsbewertung der außergewöhnlichen Lasten von Schienenfahrzeugen

Kriterien	Verfahren
Schienenfahrzeuge mit — nicht druckdichter Gestaltung (siehe 7.7.3.2), — $v_{tr,max} \leq 200$ km/h, und — Betrieb nur auf Eisenbahnstrecken mit $v_{line,max} \leq 200$ km/h.	Bewertung außergewöhnlicher Lasten durch — den vereinfachten Lastfall nach 7.7.7.2
ein anderes Schienenfahrzeug	Bewertung von — Lasten durch den Betrieb bei Starkwind nach 7.7.1, und — außergewöhnlichen transienten Lasten im Tunnel nach 7.7.3.
ANMERKUNG Der Begriff ‚nicht druckdicht‘ wird in dieser Norm gleichbedeutend mit ‚undicht‘ und der Begriff ‚druckdicht‘ gleichbedeutend mit ‚dicht‘ verwendet	

5.3.4 Bemessung der Ermüdungslast

Eine vollständige Bewertung der Ermüdungslast von Schienenfahrzeugen ist nach Tabelle 8 durchzuführen.

Tabelle 8 — Anwendbare Verfahren für die vollständige Bewertung der Ermüdungslast von Schienenfahrzeugen

Kriterien	Verfahren
Schienenfahrzeuge mit — nicht druckdichter Gestaltung, — $v_{tr,max} \leq 200$ km/h, und — Betrieb nur auf Eisenbahnstrecken mit $v_{line,max} \leq 200$ km/h.	Bewertung von Ermüdungslasten durch — den vereinfachten Lastfall nach 7.7.7.3
ein anderes Schienenfahrzeug	Bewertung von — Ermüdungslasten durch entgegenkommende Züge auf offener Strecke nach 7.7.2, und — Ermüdungslasten durch den Betrieb in Tunneln nach 7.7.4.

5.3.5 Bemessung im Fall von Änderungen

Für Schienenfahrzeuge darf eine vereinfachte Belastungsbewertung durchgeführt werden, die geringfügigen Gestaltungsunterschieden unterliegt, im Vergleich zu Schienenfahrzeugen, für die eine vollständige Belastungsbewertung bereits besteht.

Die einzigen relevanten Gestaltungsunterschiede sind Unterschiede in der Bemessungsgeschwindigkeit des Zugs, Änderungen der Streckeneigenschaften und Änderungen der Druckdichtigkeit des untersuchten Zugs, die nur eine wesentliche Auswirkung haben, wenn sie sich auf das aerodynamische Lastkollektiv oder die Festigkeitsanalyse auswirken.

Die vereinfachte Konformitätsbewertung muss eine der folgenden Formen annehmen:

- eine Erklärung, dass die Unterschiede keine Auswirkung auf das Lastkollektiv oder die Festigkeitsanalyse haben;
- eine vergleichende Bewertung der für Schienenfahrzeuge mit einer vorliegenden vollständigen Konformitätsbewertung relevanten Gestaltungsunterschiede.

6 Anforderungen an die Infrastruktur

6.1 Begrenzung der Druckänderungen in Tunneln zur Erfüllung des Gesundheitskriteriums

6.1.1 Allgemeines

Jeder Tunnel oder jede unterirdische Struktur muss so gestaltet werden, dass die durch die Durchfahrt von Zügen mit der maximalen zulässigen Geschwindigkeit verursachte maximale Druckänderung nicht mehr als 10 kPa im Zug beträgt, um das Gesundheitskriterium zu erfüllen. Die Erfüllung dieses Kriteriums führt zu weiteren Anforderungen in Abhängigkeit davon, ob der Tunnel ein- oder zweigleisig ist. Dies liegt daran, dass die maximale Druckänderung in einem einspurigen Tunnel für jede Zugdurchfahrt eines bestimmten Zugs mit einer gegebenen festen Geschwindigkeit immer gleich ist, während die maximale Druckänderung in einem zweigleisigen Tunnel auch von dem entgegenkommenden Zug und seiner relativen Einfahrzeit abhängt.

Die Druckänderung muss außerhalb des Zugs unter der Annahme eines Szenarios mit einem signifikanten lokalen Ausfall der Druckdichtung des Zugs ohne verbleibende Druckdichtheit erfolgen, sodass die Drücke im Zug den Drücken außerhalb des Zugs entsprechen.

ANMERKUNG 1 Die Erfüllung der vorgenannten Anforderungen für Fahrgäste stellt nicht sicher, dass das Kriterium für Gleisarbeiter in dem Tunnel selbst erfüllt wird. Die Arbeitssicherheit wird in diesen Anforderungen nicht behandelt.

Die zu untersuchenden Szenarien umfassen Züge im Referenzfall, die Drücke nach Tabelle 2 erzeugen.

ANMERKUNG 2 Die Begrenzung der Druckänderung auf 10 kPa ist grundsätzlich ausreichend für die fachgerechte Gestaltung eines Tunnels. Für weitere Erwägungen, siehe 6.2 und 6.3.

6.1.2 Anforderungen

6.1.2.1 Referenzfall

Die Bewertung der maximalen Druckänderungen auf der Außenseite des Zugs an den Positionen x_1 , x_2 und x_3 (siehe 7.7.3) muss anhand der Verfahren nach 7.4 erfolgen. Die anzuwendenden Zugeingangsparameter müssen so sein, dass der charakteristische Referenzdruckverlauf des Zugs nach Tabelle 2 in Übereinstimmung mit der maximalen Bemessungsgeschwindigkeit im Tunnel erfüllt wird.

Die Referenzquerschnittsfläche des Zugs wird als konstant angenommen. Für die maximale Betriebsbegrenzungslinie des zu betreibenden Schienenfahrzeugs wird die folgende Querschnittsfläche angenommen:

- 12 m² bei für die Begrenzungslinien GC, DE3 und GEC16 ausgelegten Fahrzeugen;
- 11 m² bei für die Begrenzungslinien GA, GB, GHE16, GEA16 und GEB16 ausgelegten Fahrzeugen;
- 10 m² bei für die Begrenzungslinien G1 ausgelegten Fahrzeugen.

Für andere Begrenzungslinien für Schienenfahrzeuge nach der Normenreihe EN 15273 muss eine Referenzquerschnittsfläche bestimmt werden.

Für die Bewertung sind zwei Zuglängen zu verwenden: 200 m und 400 m. Für zweigleisige Tunnel müssen zwei Zugbegegnungsfälle berücksichtigt werden: die kritischen Begegnungen zweier Züge mit einer Länge von 400 m und zweier Züge mit einer Länge von 200 m. Die Bewertung muss die in Tabelle 9, die ebenfalls vernachlässigbare Eigenschaften festlegt, angegebenen Konstruktionseigenschaften berücksichtigen.

Die Druckänderung muss während der Durchfahrt des gesamten Zugs durch den Tunnel beurteilt werden.

ANMERKUNG Bei einspurigen Tunneln ist dies aufgrund der weit auseinanderliegenden Druckspitzen erforderlich. Bei zweigleisigen Tunneln liegen die Spitzen näher beieinander. Da die Neigung jedoch ignoriert wird (siehe 6.1.2.3), ist es empfehlenswert und dennoch weiterhin akkurat, das gleiche Zeitintervall t_e zu verwenden, siehe Gleichung (25).

Die Druckveränderungen aufgrund der Wetterbedingungen außerhalb der Portale sind zu vernachlässigen.

Die Bewertung muss auf der Grundlage der meteorologischen Standardbedingungen erfolgen: d. h. einem atmosphärischen Druck $p_{\text{atm}} = 101\,325\text{ Pa}$, einer Luftdichte $\rho_{\text{amb}} = 1,225\text{ kg/m}^3$, ohne Grundströmung im Tunnel und mit einer Lufttemperatur von $\theta = 15\text{ °C}$.

Für die Infrastrukturbewertung ist jeder Zug, der die in Tabelle 2 angegebenen Werte erfüllt, als Referenzzug zu betrachten.

Tabelle 9 — Zu berücksichtigende und vernachlässigbare Konstruktionsmerkmale

Zu berücksichtigende Merkmale	Vernachlässigbare Merkmale
Luftschächte	Erweiterungen der Tunnelquerschnittsfläche durch Streckenkrümmungen
Änderungen der Querschnittsfläche im Tunnel über eine Länge von mehr als 20 m	einzelne Ausrüstungsteile wie etwa Signalmasten, Strommasten, Oberleitungsausrüstung
durchgehende Ausrüstung entlang des Tunnels wie etwa Kabelwannen, Kabel, Wasserleitungen, wenn die daraus resultierende Auswirkung auf das Versperrungsmaß mehr als 1 % bis 2 % beträgt	spezifische Querschnittsänderungen von weniger als $0,15 S_{\text{tu}}$ aufgrund von beispielsweise Nischen/Sicherheitsnischen
Fluchtwege oder Evakuierungsbahnsteige	Portalgeometrie
offene Querpassagen und Überkreuzungen zwischen den Tunnelröhren	
Länge der Portalhauben, sofern vorhanden	
Elemente, die zur Reibung des Tunnels beitragen, wie etwa die Rauigkeit der Tunnelwand, Gleisschotter und Schiene, die Reibungseffekte von Nischen und Aussparungen usw.	

6.1.2.2 Einspurige Tunnel

Die Auswirkungen der Tunnelneigung aufgrund des Gleisgradienten müssen berücksichtigt werden.

Drücke müssen über die Dauer der gesamten Durchfahrt des Zugs durch den Tunnel beurteilt werden.

6.1.2.3 Zweigleisige Tunnel

Die Auswirkungen der Tunnelneigung dürfen nicht berücksichtigt werden.

Durch entgegenkommende Züge verursachte Drücke müssen untersucht werden, indem die Einfahrtszeiten der beiden Züge in den Tunnel systematisch verändert werden. Die Druckänderung muss während der Durchfahrt des gesamten Zugs, für den die Drücke analysiert werden, durch den Tunnel beurteilt werden.

Näherungsgleichungen (siehe 7.2.5), die kritische Druckwellen-Wechselwirkungsszenarien verwenden, können in der Gestaltungsvorphase hilfreich sein.

Züge, die in die gleiche Richtung fahren, müssen nicht analysiert werden.

6.1.2.4 Mehrspurige Tunnel

Ein Tunnel mit mehr als zwei Gleisstrecken darf als zweigleisiger Tunnel analysiert werden. Für diesen Ansatz muss nachgewiesen werden, dass er ausreichend ist.

6.1.3 Vollständige Konformitätsbewertung

Eine vollständige Konformitätsbewertung von Tunneln ist nach Tabelle 10 durchzuführen.

Tabelle 10 — Anwendbare Verfahren für die vollständige Konformitätsbewertung von Tunneln

Bemessungsgeschwindigkeit des Tunnels $v_{line,max}$ km/h	Tunnellänge m	Verfahren
$v_{line,max} \leq 160$	$100 < L_{tu} \leq 12\,000$	— Keine Anforderung, wenn $B \leq 33\%$; — Bewertung der maximalen Druckänderung nach 7.4 für $B > 33\%$.
alle	$L_{tu} \leq 100$	Keine Anforderung
$160 < v_{line,max}$	$100 < L_{tu} \leq 12\,000$ m	Bewertung der maximalen Druckänderung nach 7.4
alle	$L_{tu} > 12\,000$	spezifische Untersuchungen

Tunnel mit einer Länge von mehr als 12 000 m müssen mit einer spezifischen Untersuchung der maximalen Druckänderungen beurteilt werden, siehe Tabelle 10. Bei dieser Untersuchung müssen entgegenkommende Züge in zweigleisigen Tunneln und mehrere Zugbelegungen berücksichtigt werden. Spezifische Untersuchungen dürfen darüber hinaus auch bei Tunneln mit einer Länge von weniger als 12 000 m vorgenommen werden, wenn zu erwarten ist, dass in dem Tunnel besondere Bedingungen vorherrschen, wie etwa Tunnel in großer Höhe oder geothermale Auswirkungen im Tunnel.

6.1.4 Vereinfachte Konformitätsbewertung

Eine vereinfachte Konformitätsbewertung darf für einen Tunnel vorgenommen werden, der geringfügigen Konstruktionsänderungen unterliegt und für die bereits eine vollständige Konformitätsbewertung in Bezug auf Druckänderungen vorliegt. Die einzigen relevanten Gestaltungsunterschiede sind die in der rechten Spalte der Tabelle 9 angegebenen Unterschiede zusammen mit der Reduzierung der Streckengeschwindigkeit. Die vereinfachte Konformitätsbewertung muss eine der folgenden Formen in Übereinstimmung mit Tabelle 11 annehmen:

- eine Erklärung, dass die Gestaltungsunterschiede keine nachteilige Auswirkung auf die Druckänderungen im Tunnel haben;
- eine vergleichende Bewertung der für Tunnel mit einer vorliegenden vollständigen Konformitätsbewertung relevanten Gestaltungsänderungen.

Tabelle 11 — Anwendbare Verfahren und Anforderungen für die vereinfachte Konformitätsbewertung von Tunneln

Gestaltungsunterschiede	Verfahren und Anforderungen
Änderungen der Tunnelgestaltung, begrenzt auf die in der rechten Spalte von Tabelle 9 angegebenen Merkmale. Reduzierung der Streckengeschwindigkeit im Tunnel.	Dokumentation der Änderungen, Erklärung, dass keine Auswirkungen entstehen, und Verweisung auf bestehende konforme vollständige Konformitätsbewertungen.

6.2 Begrenzung des Druckgradienten bei Einfahrt in den Tunnel (in Bezug auf die Mikrodruckwellenerzeugung)

6.2.1 Allgemeines

Da die nachteiligen Auswirkungen von Mikrodruckwellenemissionen hauptsächlich akustischer Natur sind, wird davon ausgegangen, dass jede gegebenenfalls angewendete Beschränkung von Mikrodruckwellenemissionen durch nationale Lärmvorschriften reguliert wird.

ANMERKUNG 1 Auch wenn in europäischen Ländern Lärmemissionsvorschriften für den Eisenbahnbetrieb bestehen sollten, sind derzeit keine geeigneten genormten Vorschriften für Mikrodruckwellenemissionen verfügbar. In Deutschland existiert eine Richtlinie, die die Bewertung von Infrastruktur sowie Akustik-Kriterien abdeckt [3].

Das folgende Verfahren und die folgende Anforderung stellen sicher, dass in einer Untersuchung eines Tunnels auf Mikrodruckwellenemissionen die Festlegung der Schnittstelle zwischen der Infrastruktur und den Schienenfahrzeugen in diesem Dokument geeignet berücksichtigt wird. Auf diese Weise ist der Betrieb eines Zugs in Übereinstimmung mit 5.2 in einem Tunnel ohne weitere Bewertung konform mit den nationalen Lärmvorschriften (sofern vorhanden). Es ist daher nicht notwendig, tatsächliche für den Betrieb vorgesehene Züge zu untersuchen, wenn der Tunnel nur unter Berücksichtigung des Referenzzugs beurteilt wird.

ANMERKUNG 2 Dieser Abschnitt behandelt nur die bei Einfahrt eines Zugs in ein Tunnelportal erzeugte Druckwelle. Er enthält kein Verfahren zur Untersuchung der Ausbreitung und der Aufteilung der durch den Tunnel gehenden Druckwelle und der Emission von Mikrodruckwellen.

6.2.2 Referenzfall

Der Referenzfall ist in 5.2.2.1 beschrieben.

6.2.3 Anforderungen

Wenn ein Tunnel des Vollbahnsystems im Hinblick auf Mikrodruckwellenemissionen beurteilt werden soll, muss der durch den in 5.2.2.1 festgelegten Referenzzug erzeugte Druckgradient angewendet werden. Wenn der Tunnel daraufhin nicht die nationalen Konformitätsvorschriften zu Anforderungen hinsichtlich der Mikrodruckwellenemissionen erfüllt, muss die Tunnelgestaltung geändert werden, um sicherzustellen, dass der Betrieb des Referenzzugs und aller Schienenfahrzeuge die Anforderung in 5.2 erfüllt.

6.2.4 Bewertung

Eine Bewertung muss anhand der in Tabelle 12 angegebenen Verfahren erfolgen. Die maximale Streckengeschwindigkeit $v_{\text{line,max}}$ bezieht sich auf das Tunnelportal.

Tabelle 12 — Anwendbare Verfahren für die vollständige Konformitätsbewertung von Infrastruktur

Maximale Bemessungsgeschwindigkeit km/h	Verfahren
$v_{\text{line,max}} < 200$	Keine Bewertung erforderlich
$v_{\text{line,max}} \geq 200$	Bewertung durch numerische Simulation oder Prüfung im reduzierten Maßstab nach 7.6.

6.3 Weitere Aspekte der Tunnelgestaltung

6.3.1 Allgemeines

Die folgenden zusätzlichen Aspekte sollten bei der Gestaltung von Tunneln und dem Betrieb in Tunneln berücksichtigt werden, um einen effizienten Betrieb zu unterstützen. Nationale Verfahren und Kriterien sind nicht harmonisiert.

6.3.2 Druckkomfort

Der den Reisenden in einem Zug bei der Fahrt durch einen Tunnel gebotene Gehördruckkomfort liegt im Ermessen des Betreibers. Der Grad der Druckdichtigkeit des Zugs beeinflusst den erreichbaren Grad des Druckkomforts.

Kriterien für den minimalen Druckkomfort in druckdichten und nicht druckdichten Zügen werden in Anhang B empfohlen. Verfahren zur Bewertung der Druckdichtigkeit von Schienenfahrzeugen sind in 7.8 angegeben.

Infrastrukturmanager sollten ein Streckennetz bieten, das einen Betrieb mit einem ausreichenden Druckkomfort in üblichen Schienenfahrzeugen ermöglicht. Bei der Gestaltung eines neuen Tunnels müssen die freie Querschnittsfläche, die Zielgeschwindigkeit und die Druckertüchtigung der Züge im Tunnel sowie der angestrebte Grad des Druckkomforts gemeinsam berücksichtigt werden, um den besten Kompromiss zu erzielen. Für Tunnellängen unter 50 m muss der Druckkomfort nicht berücksichtigt werden.

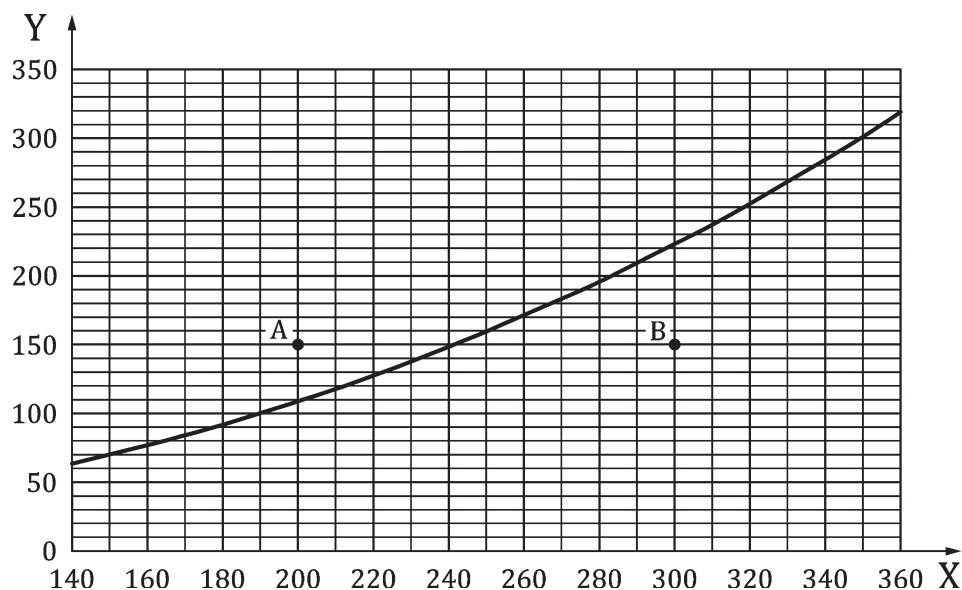
Sind für den neuen Tunnel Züge mit unterschiedlichen Druckdichtigkeitsgraden geplant, sollte der Druckkomfort auf dem Zug mit der niedrigsten Dichtigkeit bei Begegnungen mit sich selbst und mit anderen Zügen beruhen.

Für den Betrieb neuer Züge in einem bestehenden Tunnel müssen die Druckdichtigkeit des Zugs und die Betriebsgeschwindigkeit des Zugs abgewogen werden, um einen bestimmten Druckkomfort zu erzielen. Darüber hinaus muss der Druckkomfort von Fahrgästen in Zügen in einem bestehenden Tunnel berücksichtigt werden, insbesondere wenn der neue Tunnelbetrieb mit einer höheren Geschwindigkeit geplant ist.

Bei der Bewertung des Druckkomforts müssen die dynamische Druckdichtigkeit τ_{dyn} sowie das Druckmanagementsystem, sofern vorhanden, berücksichtigt werden.

Überführungen können eine ausreichende Länge aufweisen, um als Tunnel nach der Definition in dieser Norm betrachtet zu werden. Ihre Querschnittsflächen dürfen jedoch auch so groß sein, dass aerodynamische Drücke, die von durchfahrenden Zügen erzeugt werden, den Gehördruckkomfort nicht beeinträchtigen. Bild 5 zeigt eine konservative Darstellung, wann die Fläche eines Tunnels oder einer Überführung groß genug ist, damit Probleme mit dem Druckkomfort nicht bestimmt werden müssen, in Abhängigkeit zur Zuggeschwindigkeit; dies ermöglicht eine effektive Festlegung von Tunneln und Überführungen anhand der Fläche.

Bild 5 zeigt mit Punkt A und Punkt B zwei Beispiele für Strukturen anhand der Zuggeschwindigkeiten und Querschnittsflächen. Punkt A liegt über der Kurve, der Druckkomfort kann daher aufgrund der großen Querschnittsfläche ignoriert werden. Punkt B liegt unter der Kurve, daher sollte der Druckkomfort berücksichtigt werden.



Legende

X v_{tr} , km/h

Y S_{tw} , m²

Grenze zwischen Tunneln und Überführungen

Bild 4 — Definition einer Überführung mit Zuggeschwindigkeiten für unterirdische Strukturen mit Längen von 50 m und größer

6.3.3 Druckbelastung von Anlagen

Ein Zug verursacht während der Durchfahrt durch einen Tunnel Druckänderungen im Tunnel. Diese Druckänderungen lassen sich in Druckänderungen in der unmittelbaren Umgebung des Zugs während der Durchfahrt und in Druckänderungen durch die Einfahrt eines Zugs in einen Tunnel oder seine Ausfahrt aus einem Tunnel (d. h. Druckwellen) unterteilen.

Die Druckänderungen während der Durchfahrt des Zugs richten sich nach den aerodynamischen Eigenschaften der durchfahrenden oder sich begegnenden Züge, der Zuggeschwindigkeit, der Geometrie und dem Versperrungsmaß des Tunnels.

ANMERKUNG Weitere Informationen zu den Eigenschaften von Zügen sind in 5.1.2 enthalten.

Druckänderungen können Lasten auf fest installierte Anlagen im Tunnel induzieren, wenn sie Luftvolumen einschließen oder Luftvolumen vom durchfahrenen Tunnel abtrennen (z. B. Schaltschränke, Tunneltüren). Für die Belastung solcher Anlagen muss daher ihre Druckdichtigkeit berücksichtigt werden. (Ist der Grad der Druckdichtigkeit nicht bekannt, ist eine konservative Annahme die, dass die Dichtigkeit perfekt ist).

Bei der Gestaltung einer Komponente in einem Tunnel müssen die außergewöhnliche Druckbelastung und die Ermüdungsdruckbelastungen für die Lebensdauer der Komponente berücksichtigt werden.

Für einen bestimmten einspurigen Tunnel muss die außergewöhnliche Druckbelastung auf der Grundlage der in 5.1.2 festgelegten Zugeigenschaften und der maximalen Betriebsgeschwindigkeit im Tunnel festgelegt werden. Diese Belastung kann an den ungünstigsten Positionen im Tunnel häufig auftreten.

Bei einem zweigleisigen Tunnel muss die außergewöhnliche Druckbelastung auf der Grundlage der in 5.1.2. angegebenen Zugeigenschaften, der maximalen Betriebsgeschwindigkeit im Tunnel und der Bewertung kritischer Zugbegegnungssituationen nach 7.1 bestimmt werden.

Für eine Ermüdungsanalyse muss ein Betriebsszenario analysiert werden.

6.3.4 Induzierte Luftströmungen

Die Durchfahrt von Zügen in Tunneln induziert Luftbewegungen in Tunnellängsrichtung, durch Portale und alle gegebenenfalls vorhandenen offenen Luftschächte. Diese Luftströmungen können hohe Spitzenwerte (>30 m/s) insbesondere in Schächten und Querpässen in Abhängigkeit von den Zuggeschwindigkeiten und der Tunnelgestaltung erreichen. Solche hohen Luftgeschwindigkeiten können bei bestimmten Ausführungen von Luftschächten akustische Probleme verursachen.

Geringere Luftströmungen werden durch atmosphärische Druckunterschiede zwischen den Portalen des Tunnels und Luftdichteunterschiede durch die Temperaturen innerhalb und außerhalb des Tunnels oder Höhenunterschiede zwischen den Portalen erzeugt.

Diese Luftströme müssen im Hinblick auf die Sicherheit von in dem Tunnel arbeitendem Personal, beispielsweise durch die Bereitstellung von Nischen und Handgriffen, berücksichtigt werden.

Darüber hinaus müssen in dem Tunnel installierte Anlagen wie etwa Signalausleger oder Oberleitungsträger allen durch die Luftströmungen in Längsrichtung induzierten Lasten standhalten.

6.3.5 Fahrwiderstand

Ein in einem Tunnel fahrender Zug verdrängt Luft von seiner Vorderseite zu seinem Heck. Dies führt zu einer Luftströmung über dem Zug entgegen der Fahrtrichtung des Zugs, welche die Oberflächenreibung im Vergleich zu offenen Streckenabschnitten erhöht. Darüber hinaus muss der Zug in einem Tunnel die Druckdifferenz zwischen dem Kopf und dem Heck überwinden. Beide Effekte führen zu einem erhöhten Luftwiderstand, wenn ein Zug in einem Tunnel fährt. Um die volle Betriebsgeschwindigkeit in einem Tunnel beizubehalten, muss der zusätzliche Luftwiderstand durch das Antriebssystem eines Zugs ausgeglichen werden, was zu einem erhöhten Energieverbrauch führt. Die Näherungsgleichungen in A.3.7 oder eine numerische Simulationssoftware (siehe 7.2.6) können angewendet werden, um den Luftwiderstand von Zügen in Tunneln abzuschätzen.

6.3.6 Kontaktkräfte zwischen Stromabnehmer und Oberleitung

Bei der Einfahrt in den Tunnel erhöht die Luftverdrängung eines Zugs entgegen der Fahrtrichtung die Geschwindigkeit der Luftströmung am Stromabnehmer. Da alle Stromabnehmer aerodynamische Hebekräfte erzeugen, können sich die Kontaktkräfte zwischen dem Stromabnehmer und der Oberleitung erhöhen. Dies gilt insbesondere bei Tunneln mit geringen Versperrungsmaßen B. Es muss geprüft werden, ob die mechanische Auslegung der Oberleitung alle entstehenden Erhöhungen der Kontaktkräfte berücksichtigt.

6.3.7 Lüftung

In Tunneln fahrende Züge erzeugen Luftströmungen, die die Zufuhr von Frischluft in Tunneln unterstützen. Die natürliche Belüftung wird durch die Gesamtdruckdifferenz zwischen den Portalen induziert. Solche induzierten Luftströmungen müssen möglicherweise bei der Gestaltung künstlicher Belüftungssysteme berücksichtigt werden.

Im Fall eines sehr langen Tunnels oder intensiven Zugbetriebs kann sich die Lufttemperatur durch die von den Zügen erzeugte Wärme oder die Felstemperatur aufgrund geothermaler Effekte erhöhen, was sich auf das Personal oder technische Anlagen auswirken kann. Solche Temperaturerhöhungen sollten bei der Gestaltung des Belüftungssystems berücksichtigt werden.

6.3.8 Arbeitssicherheit

Wenn Personal während des Betriebs in Tunneln zugelassen ist, wird empfohlen, dass eine Bewertung der Arbeitssicherheit folgende Aspekte berücksichtigen sollte:

- Druckänderungen;
- Luftgeschwindigkeiten;
- Luftqualität (Abgase, Staub, Kohlenmonoxid, Kohlendioxid usw. aus Verbrennungsmotoren wie Zügen mit einer Diesel-Lokomotive, Anlagenausrüstung).

6.3.9 Belastung von Fahrzeugen im Mischverkehr

Der Mischverkehr bezeichnet den Betrieb von Hochgeschwindigkeitszügen (über 200 km/h) in Kombination mit Zügen, die für Geschwindigkeiten von kleiner oder gleich 200 km/h ausgelegt sind, auf derselben Strecke. Letztere Züge sind in diesem Zusammenhang Güterzüge und/oder Personenzüge wie Regionalzüge oder Nahverkehrszüge. Bei entgegenkommenden Hochgeschwindigkeitszügen, die schneller als 200 km/h fahren, können die Belastungen für solche Züge in zweigleisigen Tunneln sehr hoch werden.

Es wird empfohlen, die maximalen Betriebsgeschwindigkeiten für den Mischverkehr in Tunneln zu untersuchen, wenn die Kombination wesentlicher Designparameter wie etwa die maximale Streckengeschwindigkeit, der Mindestgleisabstand, die Mindestquerschnittsfläche des Tunnels und die Begrenzungslinien der Schienenfahrzeuge nicht eindeutig durch störungsfreie Betriebserfahrungen abgedeckt ist. Dies kann auch für den Betrieb auf offener Strecke gelten.

Die auf geschlossene Güterwagen wie etwa Schiebewandwagen einwirkenden aerodynamischen Belastungen werden in Anhang D beschrieben. Für Güterzüge besteht kein abgestimmtes Kriterium für die aerodynamische Belastung, der Güterwagen sicher widerstehen können. Die aus Betriebserfahrungen abgeleiteten technischen Normen für Güterzüge wie etwa EN 12663-2:2010 stellen eine gewisse Robustheit der verschiedenen Anbauten an Güterwagen sicher. Bewertungen von Mischverkehr mit Güterzügen sollten daher Vergleiche von Lastfällen unter Bezugnahme auf bestehende Tunnelbegegnungsszenarien mit störungsfreien Betriebserfahrungen bieten.

Für Hochgeschwindigkeitsstrecken mit zweigleisigen Tunneln und einem Betrieb mit über 200 km/h wird empfohlen, die Bedingungen des technischen Netzzugangs für die strukturellen Anforderungen an Personenzüge nach 5.3 und EN 12663-1:2010+A1:2014 oder anderen anzuwendenden Vorschriften einzubinden.

6.4 Zusätzliche Aspekte für unterirdische Bahnhöfe

6.4.1 Druckänderungen

Druckveränderungen durch Zugfahrten in Tunneln in Verbindung mit unterirdischen Bahnhöfen können sich auf Fahrgäste (Gesundheit, Druckkomfort), Anlagen (Druckbelastungen, Mikrodruckwellen) und Türen (schnelle Türbewegungen) in den Bahnhöfen und den angeschlossenen Fußgängertunneln auswirken. Hohe Druckänderungen werden durch die Einfahrt eines Zugs mit hoher Geschwindigkeit aus einem offenen Streckenabschnitt in einen Tunnel verursacht und setzen sich bis zu einem angeschlossenen unterirdischen Bahnhof fort.

Es wird empfohlen, zu untersuchen, ob Druckentlastungsschächte im Bahnhof erforderlich sind, wenn die Kombination wesentlicher Designparameter wie der maximalen Streckengeschwindigkeit, der minimalen Tunnelquerschnittsfläche, der Begrenzungslinie von Schienenfahrzeugen und des allgemeinen Layouts des Tunnelbahnhofsystems nicht durch störungsfreie Betriebserfahrungen eindeutig abgedeckt ist.

6.4.2 Induzierte Luftströmungen

Luftströmungen werden von Zügen erzeugt die von Tunneln (Kolbeneffekt) in unterirdische Bahnhöfe und deren Fußgängertunnel einfahren sowie in unmittelbarer Umgebung der Züge selbst, wenn sie am Bahnsteig vorbeifahren (Fahrtwindeffekte).

Luftströmungen können unangenehme Auswirkungen auf Fahrgäste, die diesen ausgesetzt sind, haben. Dies gilt insbesondere für Wartebereiche. Sehr hohe Geschwindigkeiten können die Standsicherheit von auf Bahnsteigen stehenden Fahrgästen beeinträchtigen oder ein potenzielles Risiko erzeugen, wenn rollfähige Objekte (z. B. Rollstühle, Kindewagen, Koffer mit Rollen) in Bewegung gesetzt werden und auf das Gleis zurollen.

Luftströmungen erzeugen Belastungen der Anlagen im Bahnhof und den Verbindungstunneln.

6.4.3 Spezifischer Lastfall für Bahnsteigbarrieresysteme aufgrund durchfahrender Züge

Wie in 6.3.3 und 6.4.1 beschrieben, können unmittelbare Druckänderungen auf den gleisseitigen Oberflächen des Bahnsteigbarrieresystems aufgrund der Durchfahrt des Kopfes, des Hecks und der Wagenübergänge des Zugs auftreten. Eine Drucklast wirkt aufgrund der Druckunterschiede zwischen beiden Seiten der Barriere grundsätzlich rechtwinklig auf die Bahnsteigbarriere. Aufgrund der relativ kleinen Abstände zwischen den Bahnsteigbarrieren und der Gleismitte sind die für flache Strukturen parallel zu den Gleisen in EN 14067-4 gegebenen Lastfälle nicht anwendbar.

Da die Belastungen in hohem Maße von der individuellen Gestaltung abhängen, sind nur die Grundsätze für die Auswahl eines Szenarios und ein Ansatz für die Bewertung zur Ableitung der Belastungen festgelegt.

Die folgenden Parameter haben eine wesentliche Auswirkung auf die Größenordnung von Belastungen:

- die Geometrie des Zugkopfes, der Wagenübergänge und des Hecks, die Begrenzungslinie der Schienenfahrzeuge;
- die Geometrie des Bahnsteigbarrieresystems;
- der Abstand zwischen der Barriere und der Außenkontur der durchfahrenden Züge;
- die Geometrie der umgebenden Infrastruktur;
- die Geometrie von Druckentlastungsöffnungen in dem Bahnsteigbarrieresystem, sofern vorhanden;
- die maximale Zuggeschwindigkeit.

Aerodynamische Belastungen von Bahnsteigbarriersystemen müssen für ein unter Berücksichtigung aller vorgenannten Parameter gewähltes Szenario abgeleitet werden.

Eine stumpfe Geometrie der Fahrzeugfront, die zu hohen Druckveränderungen führt, ist abzuleiten, zu begründen und als Referenzzug anzuwenden. Im Vollbahn-Schienennetz und sofern die maximale Streckengeschwindigkeit mehr als 160 km/h beträgt, muss die Zuggeometrie die für Δp_N in Tabelle 2 vorgesehenen Kriterien erfüllen.

Die untersuchte Geometrie der Bahnsteigbarriere, der Infrastruktur und der Druckentlastungsöffnungen muss fachgerecht ausgewählt und begründet werden. Die für die strukturelle Bewertung von Ermüdungslasten verwendete aerodynamische Belastung muss mindestens die Belastungen aufgrund der Vorbeifahrt des Kopfes und des Hecks mit einer angemessenen Anzahl an Zugvorbeifahrten und die Belastungen aufgrund der Druckwellen in dem Tunnel-/Bahnhofsysteem umfassen.

Außergewöhnliche Lastfälle für Bahnsteigbarrieren in unterirdischen Bahnhöfen mit Verbindungstunneln und an offener Strecke müssen fachgerecht gewählt und begründet werden. Für Bahnsteigbarrieren an offenen Strecken sind die in 6.4.1 beschriebenen Belastungen nicht anwendbar.

7 Verfahren und Prüfverfahren

7.1 Allgemeines

Druckänderungen werden beschrieben durch die zeitabhängige Druckdifferenz $p(t)$ in Bezug auf den atmosphärischen Druck (für die meteorologischen Standardbedingungen des atmosphärischen Drucks $p_{\text{atm}} = 101\,325\text{ Pa}$).

Der Außendruck p_e bezeichnet üblicherweise den Druck außerhalb eines Zugs oder auch innerhalb eines Tunnels, der von einem durch den Tunnel fahrenden Zug erzeugt wird. Der Innendruck p_i bezeichnet üblicherweise den Druck in einem Zug oder allgemein jedes in dem Tunnelsystem vorhandene geschlossene Luftvolumen. Der Innendruck reagiert auf den Außendruck und ist von der Druckdichtigkeit des Zugs oder allgemein jeder Struktur, die ihr Innenvolumen von der äußeren Umgebung trennt, abhängig.

Um die Auswirkungen auf die Fläche zwischen der äußeren und inneren Umgebung zu beurteilen, wird die Druckdifferenz p_d bestimmt. Die Druckdifferenz ist die Ursache struktureller Lasten.

$$p_d = p_e - p_i \quad (1)$$

ANMERKUNG In einigen Fällen kann es hilfreich sein, die umgekehrte Druckdifferenz zu definieren, siehe statische Druckbelastung p_L in 7.7.3.1

Die Festlegung von p_d muss dokumentiert werden.

Bild 5 zeigt ein Beispiel für die Druckdifferenz an einem druckdichten Zug in zwei aufeinander folgenden Tunneln.

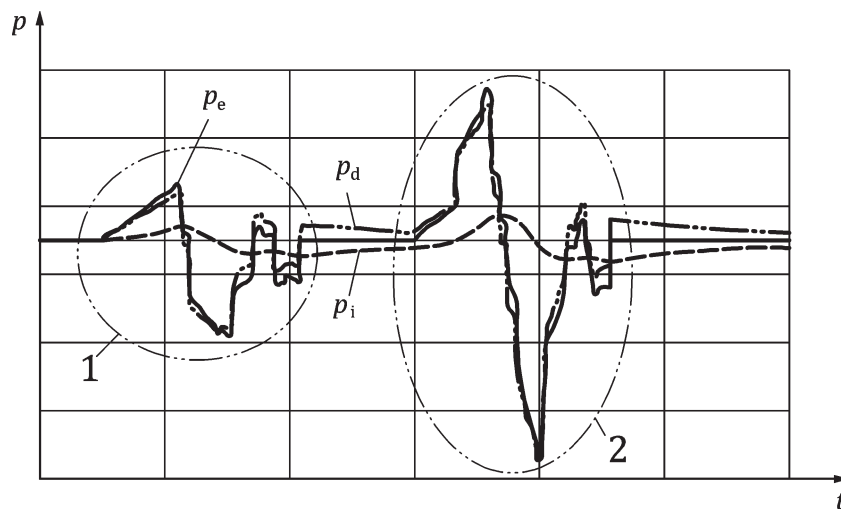
Neben den Fahrzeug- und Tunnelparametern (wie in Abschnitt 5 und Abschnitt 6 ausgeführt) hängt die Druckänderung von der Betriebsart ab. Dies gilt insbesondere für den Einzelzugbetrieb oder Zugbegegnungen im Tunnel.

Zugbegegnungen umfassen nicht nur die Situation, in der sich beide Züge gleichzeitig im Tunnel befinden, sondern auch den Zeitraum, nachdem der erste Zug den Tunnel verlassen hat und sich weiterhin Restdruckwellen ausbreiten, auch wenn diese beispielsweise durch Reibung und Portalverluste abgemindert werden. Dieses vollständige Szenario wird hier als aerodynamische Begegnung dargestellt und kann beispielsweise durch eine virtuelle Tunnellänge, die den Zeitraum umfasst, in dem die Wellenausbreitung nach dem Verlassen des ersten Zugs noch signifikant ist, beschrieben werden, siehe 7.7.4.3.

Jede Kombination aus Fahrzeug, Tunnel und Betriebsbedingungen führt zu unterschiedlichen Druckänderungen. Bestimmte Kombinationen aus Zuggeschwindigkeiten, relativer Einfahrversatzzeit und Tunnellängen führen zu maximalen Druckänderungen und werden als kritische Begegnungen bezeichnet.

Verschiedene Verfahren (wie etwa Messung im Maßstab 1 : 1, Messung im reduzierten Maßstab, numerische Simulation oder Näherungsgleichungen) dürfen angewendet werden, um die Druckänderungen in Tunneln in Bezug auf bestimmte Anforderungen zu bestimmen. Andere Berechnungs- oder Analyseverfahren dürfen angewendet werden, um die Daten zu analysieren oder erforderliche Parameter zu erhalten. Diese Verfahren werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

Das anzuwendende Verfahren muss dokumentiert und eine Fehlerbewertung im Bedarfsfall laut Unterabschnitten ausgeführt werden.



Legende

- 1 Durchfahrt eines *einzelnen* Zugs
- 2 Kritische Begegnung zweier Züge
- p_e Außendruck
- p_i Innendruck
- p_d Druckdifferenz zwischen Außen- und Innendruck

Bild 5 — Druckdifferenz bei einem Zug mit hoher Druckdichtigkeit in zwei aufeinander folgenden Tunneln

7.2 Verfahren zur Bestimmung von Druckänderungen in Tunneln

7.2.1 Allgemeines

In 7.2 werden Verfahren beschrieben, die für verschiedene Zwecke zur Bestimmung von Druckänderungen in Tunneln verwendet werden dürfen.

- Wenn ein Zug in den Tunnel einfährt, entwickelt sich der statische Druck im Tunnel (siehe Bild 6) wie folgt:
- Durch die Einfahrt des Zugkopfes in den Tunnel kommt es zunächst zu einem starken Druckanstieg Δp_N .
- Aufgrund der Reibungseffekte, die durch die Einfahrt des Hauptteils des Zugs in den Tunnel verursacht werden, kommt es zu einem zweiten Druckanstieg Δp_{fr} .
- Danach wird durch die Einfahrt des Zughecks in den Tunnel ein Druckabfall Δp_T verursacht.
- Durch die Vorbeifahrt des Zugkopfes an der Messposition im Tunnel kommt es zu einem erheblichen Druckabfall Δp_{HP} .

Reelle Druckmessungen können von dem in Bild 6 gezeigten idealisierten Druckverlauf abweichen, z. B. wenn sich der Zugquerschnitt entlang des Zugs ändert. In diesem Fall sind die einzelnen Werte für Δp in einer gesonderten Betrachtung zu bestimmen.

Alle Δp -Werte sind absolute Werte.

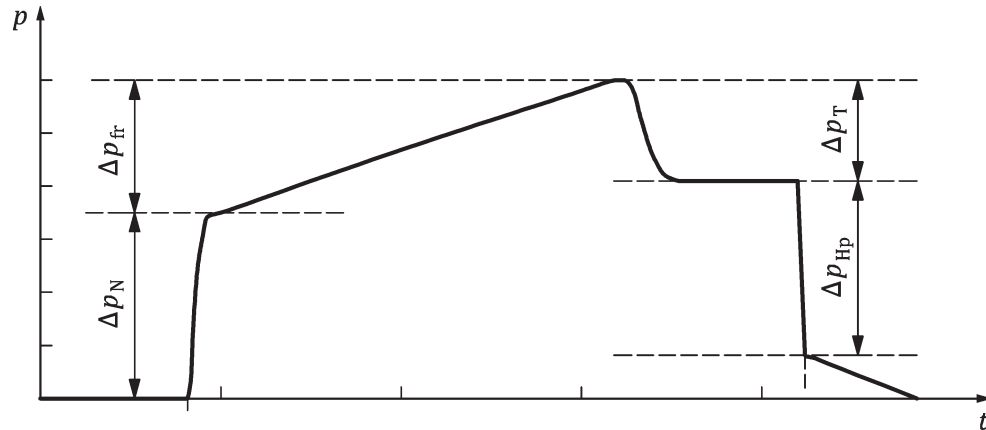


Bild 6 — Zug/Tunnel-Druckverlauf an einem festen Ort in einem Tunnel (Detail)

Der Zug/Tunnel-Druckverlauf (Δp_N , Δp_{fr} , Δp_T und Δp_{HP}) kann aus Berechnungen oder Messungen an einem festen Ort in einem Tunnel abgeleitet werden.

Zur Charakterisierung der aerodynamischen Qualität eines Zugs in einem Tunnel sind die im Folgenden beschriebenen Verfahren geeignet.

7.2.2 Messungen im Maßstab 1 : 1 an festen Orten in einem Tunnel

7.2.2.1 Prüfgelände

Der Tunnel muss einen konstanten Querschnitt aufweisen und darf keine Seitenpassagen oder Luftschächte über eine minimale Tunnellänge haben, die gegeben ist durch:

$$L_{tu,min} = x_p + \frac{cL_{tr}}{2v_{tr}} + \Delta L_1, \text{ mit } v_{tr} = v_{tr,test} \left(\text{in } \frac{m}{s} \right), \text{ wenn } \Delta p_{HP} \text{ benötigt wird} \quad (2)$$

dabei stellt die zusätzliche Länge ΔL_1 eine klare zeitliche Trennung der einzelnen Wellen sicher; sie sollte idealerweise etwa 150 m betragen.

Abweichungen der Querschnittsfläche sind in einer späteren Phase der Bewertung zu berücksichtigen. Luftschächte dürfen keine Wirkung haben, d. h. es sollten Tunnels ohne Schächte verwendet werden oder die vorhandenen Luftschächte müssen während der Prüfungen versperrt werden.

ANMERKUNG Änderungen der Tunnelquerschnittsfläche und -höhe sind für die Prüfung zulässig.

Tunnel sollten ein steil abgewinkeltes oder einfaches Portal haben. Tunnel mit Hauben sollten vermieden werden oder müssen bezüglich ihrer Wirkung korrigiert werden.

Für den Tunnel müssen die Querschnitte in der Nähe des Einfahrportals und des Prüfabschnitts bestimmt werden. Der Wert der Querschnittsfläche darf auf die nächsten 0,25 m² gerundet werden. Ein mögliches Verfahren, dies zu erreichen, basiert auf technischen Zeichnungen. Die charakteristischen Hauptmaße (Höhe und Breite) müssen vor Ort gemessen und dokumentiert werden.

7.2.2.2 Messpositionen

Um die genauen Werte für Δp_N , Δp_{fr} , Δp_T und Δp_{HP} eines voll entwickelten Wellenmusters zu erhalten, muss die folgende Bedingung an der Messposition im Tunnel sichergestellt sein. Die Gleichung für den Abstand x_p zwischen dem Einfahrportal und der Messposition muss lauten:

$$x_p = \frac{cL_{tr}}{c - v_{tr}} + \Delta x_1 \quad (3)$$

Dabei ist

$$c = 340 \text{ m/s.}$$

Der zusätzliche Abstand Δx_1 stellt eine gute zeitliche Trennung der einzelnen Druckänderungen sicher. Δx_1 muss zwischen 100 m und 300 m betragen. Das Messsystem muss bei x_p installiert werden, um Wellendämpfungseffekte zu vermeiden.

7.2.2.3 Anforderungen an den Prüfzug

Für feste und vorgegebene Zugzusammensetzungen, die aus mehr als einer Zugeinheit bestehen, ist es ausreichend, eine aus mindestens zwei Zugeinheiten bestehende Zugzusammensetzung mit einer Mindestlänge von 120 m zu beurteilen.

Für einzelne Schienenfahrzeugeinheiten, die mit einem Führerraum ausgestattet sind, muss die Konformität für Einheiten an Front und Heck einer Reihe von Personenwagen mit einer Länge von mindestens 100 m beurteilt werden. Die Prüfung muss entweder mit einer Einheit oder mit zwei identischen Einheiten an Front und Heck des Zugs durchgeführt werden. Die Wagen sollten aus den Wagen bestehen, die wahrscheinlich im Betrieb verwendet werden.

Die Konformität anderer Schienenfahrzeuge, siehe 5.1.2.4, ist durch eine Reihe zu prüfender Fahrzeuge mit einer Mindestlänge von 100 m zu beurteilen. Die Reihe muss aus Einheiten derselben Bauart bestehen. Die Prüfung muss mit zwei Einheiten mit Führerraum an Front und Heck des Zugs durchgeführt werden. Die Wagen mit Führerraum sollten aus den Wagen bestehen, die wahrscheinlich im Betrieb verwendet werden.

Wenn die für die Bewertung verwendete Zuglänge nicht mit dem Referenzfall übereinstimmt, müssen die Ergebnisse nach 7.3 berichtigt werden.

7.2.2.4 Anforderungen an die Zuggeschwindigkeit

Die gewählte Nennprüfgeschwindigkeit $v_{tr,test}$ des in den Tunnel einfahrenden Zugkopfes sollte mindestens der in Tabelle 2 angegebenen Prüfgeschwindigkeit entsprechen. Die Geschwindigkeit darf nicht weniger als 80 % der Referenzgeschwindigkeit betragen.

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 $v_{tr,ref}$ genommen werden.

Die Differenz zwischen den Geschwindigkeiten der ersten und letzten Achse darf nicht mehr als 3 % der Geschwindigkeit der ersten Achse betragen.

7.2.3 Messgeräte

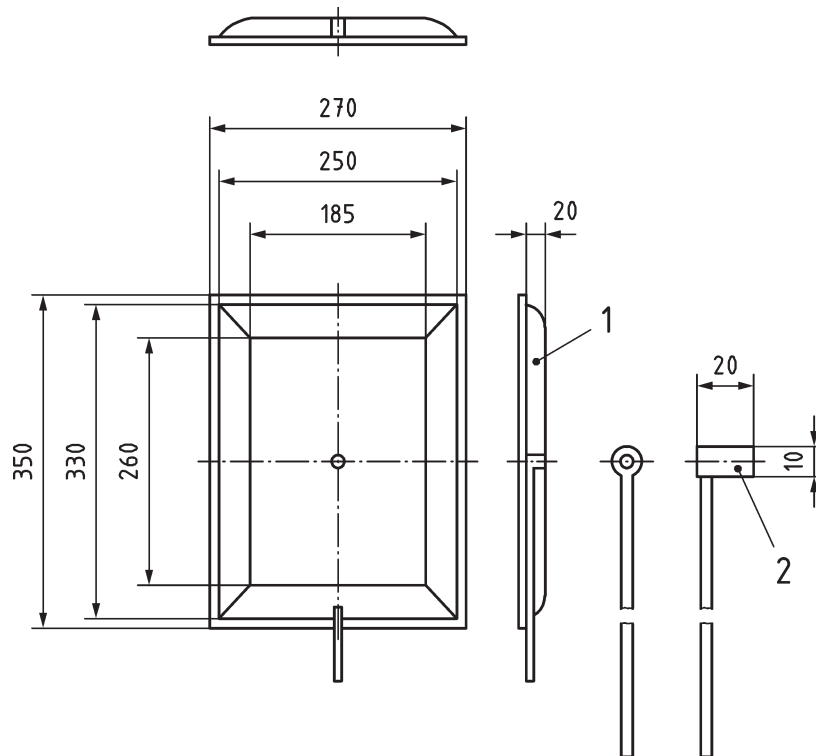
7.2.3.1 Allgemeines

Drücke werden nur an einer Position bzgl. des Einfahrportals entlang des Tunnels mithilfe von Druckmessgebern gemessen. Es wird empfohlen, die Druckmessung an einem Ort zu platzieren, an dem das Strömungsfeld nicht durch Tunnelanlagen gestört wird. Es wird empfohlen, den wahrscheinlichen Drucksignalbereich während der Planung der Prüfung abzuschätzen. Die Druckmessgeber müssen vor dem Gebrauch über den erwarteten Druckbereich, üblicherweise ± 4 kPa, kalibriert werden. Die Kombination aus verwendeten Drucksensoren und Sonden muss in der Lage sein, den Druck mindestens mit einer Auflösung von 150 Hz zu messen. Die Messfehler der Messkette bestehend aus Druckmessgeber und Datenerfassungssystem dürfen 2 % des erwarteten Werts für $\Delta p_N + \Delta p_{fr}$ nicht überschreiten.

ANMERKUNG Das Datenerfassungssystem beinhaltet die Signalkonditionierung, die Signalübertragung und die Aufzeichnung/Abtastung der Daten.

Die Messung des statischen Drucks muss so erfolgen, dass sichergestellt ist, dass die Luftströmung in dem Tunnel die Messung nicht beeinflusst. Eine geeignete Ausführung einer solchen Anlage besteht in der Verwendung einer flachen Montageplatte mit integrierten Druckmessstellen. Die Montageplatte muss an der Tunnelwand installiert werden und sollte möglichst dünn sein. Ein Beispiel ist in Bild 7 dargestellt. Eine weitere geeignete Prüfanordnung besteht darin, ein statisches (oder statisches Pitot-) Rohr zu installieren, das parallel zur Tunnelachse ausgerichtet ist und in Richtung des einfahrenden Zugs zeigt. Der statische Druck wird in diesem Fall an dem statischen Druckanschluss des Rohrs gemessen.

Um einen Verlust von (dynamischen) Informationen zu vermeiden, darf die Gesamtlänge der Rohre und Leitungen zwischen der Druckmessstelle und dem Druckmessgeber nicht mehr als 50 cm betragen.



Legende

- 1 ebene Platte
- 2 Anschluss für die Druckmessung

Bild 7 — Beispiel einer schematischen Darstellung der Konfiguration für die Druckmessung

Der statische Druck darf als Differenzdruck relativ zu einem üblichen Referenzdruck gemessen werden (z. B. gespeichert in einem isolierten Druckbehälter). Druckänderungen in dem Tunnel wirken auf die mit dem Druckbehälter verbundenen Rohre und können den Referenzdruck beeinflussen. Die strukturelle Flexibilität und das Luftvolumen in den Rohren im Vergleich zum Druckbehälter müssen so bemessen sein, dass dieser Effekt reduziert wird. Eine kleine Undichtheit im Druckbehälter kann erforderlich sein, um den Referenzdruck an langsame Veränderungen des Umgebungsdrucks anzupassen. Es muss nachgewiesen werden, dass die Undichtheit die Prüfung nicht beeinträchtigt.

Umgebungsdruck-, Temperatur- und Feuchtemesseinrichtungen müssen in dem Tunnel innerhalb eines Abstands von nicht mehr als 50 m zum Tunnelportal platziert werden. Der Luftgeschwindigkeitssensor muss entweder in der Nähe der Druckmessposition oder in einem Abstand von nicht mehr als 50 m zum Tunnelportal platziert werden. Der Luftgeschwindigkeitssensor sollte so positioniert werden, dass er nicht wesentlich von Grenzschichteffekten beeinflusst wird. Er sollte daher nach Möglichkeit in einem Abstand von mindestens 0,8 m zu jeder Tunneloberfläche platziert werden. Die Unsicherheit der Luftgeschwindigkeitsmessung muss bestimmt werden und darf nicht mehr als $\pm 0,3$ m/s für eine Luftgeschwindigkeit von 6 m/s betragen. Der Sensor muss in der Lage sein, zwischen den Strömungsrichtungen zu unterscheiden. Die Erfassung der Temperatur und Feuchte muss in Übereinstimmung mit ISO 8756 erfolgen.

Die tatsächliche Zugprüfgeschwindigkeit $v_{tr, test, i}$ für jeden Lauf muss in einem Abstand von nicht mehr als ± 50 m zum Einfahrportal des Tunnels für die erste und die letzte Zugachse mit einer Genauigkeit von 1 % gemessen werden. Dies kann durch zwei Lichtschranken oder Achsenerkennungseinrichtungen in der Gleisstrecke realisiert werden. Als Alternative zur Erkennung der Achsen darf die Geschwindigkeit des Zugkopfs und des Hecks mit geeigneten Sensoren gemessen werden. Beide Zuggeschwindigkeiten müssen dokumentiert werden. Wenn Δp_{HP} gemessen werden soll, muss eine zusätzliche Zuggeschwindigkeitsmessung an der Messposition x_p erfolgen.

Die Anordnung des gewählten Prüforts muss aufgezeichnet werden. Dies muss eine Beschreibung des Orts einschließlich des Einfahrportals des Tunnels, des Verlaufs der Tunnelquerschnittsfläche entsprechend dem Abstand zum Einfahrportal des Tunnels und der Position der Messeinrichtung beinhalten.

Die korrekte Identifizierung und Aufzeichnung des vorbeifahrenden Zugtyps, seiner Geschwindigkeit sowie seiner Länge und Zusammensetzung (z. B. durch Video oder Aufzeichnung der Achsanordnung) ist zwingend erforderlich.

7.2.3.2 Datenerfassungssystem

Das Drucksignal muss mit mindestens 300 Hz mit Anti-Aliasing-Filtern mit einer Cut-off-Frequenz von maximal einem Viertel der Abtastrate abgetastet werden. Wenn keine analogen Filter verwendet werden, sind rein digitale Filter zulässig, sofern ausreichend höhere Abtastraten genutzt werden. Die Luftgeschwindigkeit in dem Tunnel muss mit einer Abtastrate von mindestens 1 Hz aufgezeichnet werden. Die Messung der Zuggeschwindigkeit muss so gewählt werden, dass die Genauigkeitsanforderung erfüllt wird. Der Messzeitraum muss mindestens 60 s vor der Einfahrt des Zugs in den Tunnel beginnen und bis mindestens 10 s, nachdem das Zugheck den Punkt x_p passiert hat, anhalten. Es wird empfohlen, die Messung für einen Zeitraum von 120 s, nachdem das Zugheck x_p passiert hat, fortzusetzen.

Temperatur- und Feuchtigkeitsmessungen müssen Messungen innerhalb ± 5 Minuten nach der Einfahrt des Zugs in den Tunnel sicherstellen.

7.2.4 Messungen im Maßstab 1 : 1 an der Außenseite des Zugs

Wenn es nicht möglich ist, die Messungen an festen Orten in einem Tunnel durchzuführen, können Δp_N , Δp_{fr} und Δp_T durch Messungen von $\Delta p_{N,o}$, $\Delta p_{fr,o}$ und $\Delta p_{T,o}$ an der Außenseite des Zugs genähert werden, siehe Bild 8. Wenn nötig, kann Δp_{HP} entweder aus Näherungsgleichungen abgeleitet werden oder es kann angenommen werden, dass der Wert gleich $\Delta p_{N,o}$ ist.

Der Tunnel muss über einen konstanten Querschnitt verfügen, darf keine Seitenpassagen oder Luftschächte haben und es dürfen keine anderen Druckwellen darin laufen. Idealerweise sollte in dem Tunnel keine Grundströmung herrschen. Ist dies dennoch der Fall, dann muss ihr Einfluss auf die Messungen geprüft werden.

Für die Druckmessungen werden außen am Zug Druckaufnehmer eingesetzt. Diese müssen vor dem Einsatz für den zu erwartenden Druckwertebereich, typischerweise ± 4 kPa, kalibriert werden. Die Messfehler des Druckmessgebers einschließlich des Datenerfassungssystems dürfen 2 % des erwarteten Werts für $\Delta p_N + \Delta p_{fr}$ nicht überschreiten.

Um den gesamten Anstieg des Reibungsdrucks Δp_{fr} zu ermitteln, sind die Drücke an der Zugaußenseite an dem Ort x_1 unmittelbar hinter dem Zugkopf zu messen, d. h. dort, wo der volle Querschnitt erreicht ist. Für den Außendruck wird die Instrumentierung nach 7.2.3 empfohlen.

Die Zuggeschwindigkeit muss mit einer Genauigkeit von 1 % bestimmt werden und muss während der Einfahrt in den Tunnel innerhalb von 3 % konstant sein.

Die Abtastfrequenz muss mindestens $5 v_{tr}/L_n$ Hz betragen, wobei Anti-Aliasing-Filter mit einer Cut-off-Frequenz von maximal einem Viertel der Abtastrate verwendet werden. Wenn keine analogen Filter verwendet werden, sind rein digitale Filter zulässig, sofern ausreichend höhere Abtastraten genutzt werden.

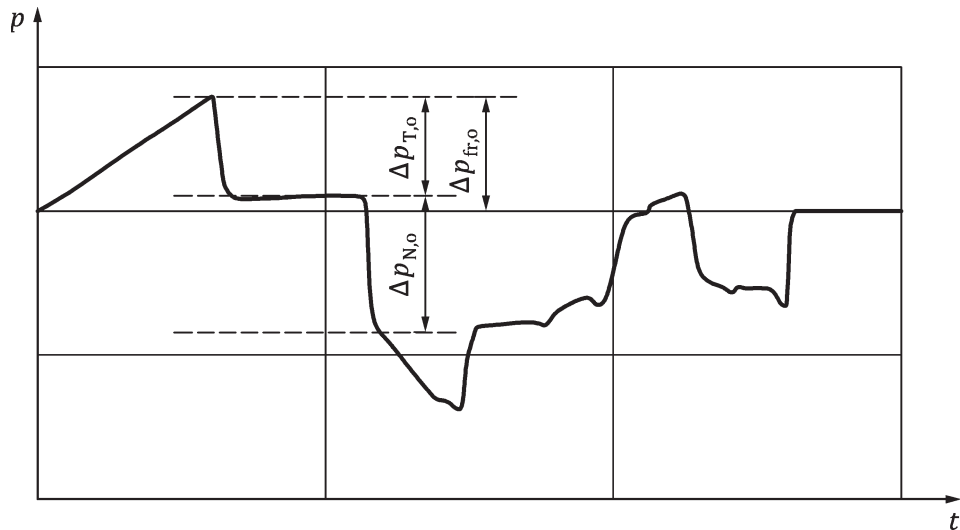


Bild 8 — Zug/Tunnel-Druckverlauf an einer Stelle außerhalb des Zugs unmittelbar hinter dem Zugkopf

Die Mindesttunnellänge $L_{tu,min}$ beträgt:

$$L_{tu,min} = \frac{L_{tr}}{2} \frac{c}{v_{tr}} \left(\frac{c + v_{tr}}{c - v_{tr}} \right) + \Delta L_2, \quad \text{mit } v_{tr} = v_{tr,test} \left(\frac{\text{in m}}{s} \right) \quad (4)$$

dabei stellt die zusätzliche Länge ΔL_2 eine klare zeitliche Trennung der einzelnen Wellen sicher; sie sollte idealerweise etwa 200 m betragen.

Da die Amplitude der ersten Reflexion der Kopfwelle $\Delta p_{N,o}$ durch die Reibung in Abhängigkeit von der Tunnellänge reduziert wird, sollte der Tunnel nicht erheblich länger als $L_{tu,min}$ sein.

7.2.5 Näherungsgleichungen

Schätzungen für Δp_N , Δp_{fr} , Δp_T und Δp_{HP} können anhand der in Anhang A, A.2, A.3 und A.4 enthaltenen Gleichungen vorgenommen werden. Bei Tunneln mit unterschiedlichen Querschnittsflächen ist die geringste Querschnittsfläche zu betrachten.

Die maximale Druckänderung (Spitze zu Spitze) Δp_{max} unter den ungünstigsten Bedingungen (z. B. kritische Tunnellänge, kritische Zugbegegnung oder Parallelfahrt, kritische Stelle) wird anhand der folgenden Gleichung berechnet.

An einem festen Ort im Tunnel bei zwei Zügen, die sich begegnen oder parallel fahren:

$$\Delta p_{max} = 2\Delta p_N + 2\Delta p_{fr} + 2\Delta p_T + 2\Delta p_{HP} \quad (5)$$

An einem festen Ort im Tunnel bei 1 Zug:

$$\Delta p_{max} = \Delta p_N + \Delta p_{fr} + \Delta p_T + \Delta p_{HP} \quad (6)$$

Außen am Zug bei zwei identischen Zügen, die sich begegnen:

$$\Delta p_{max} = 2\Delta p_N + 2\Delta p_{fr} + 2\Delta p_T + 2\Delta p_{HP} + 2\Delta p_{alt} \quad (7)$$

Außen am Zug bei einem einzelnen Zug:

$$\Delta p_{\max} = \Delta p_N + \Delta p_{fr} + \Delta p_T + \Delta p_{alt} \quad (8)$$

Dabei ist

$$\Delta p_{alt} = -\rho_0 g \Delta h \quad (9)$$

die natürliche, durch geodätische Höhenunterschiede bedingte Druckänderung;

Dabei ist

$$\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3;$$

Δh die Differenz zwischen den geodätischen Höchst- und Mindesthöhen im Tunnel (m).

7.2.6 Bewertung durch numerische Simulation

Da dreidimensionale Effekte auf den Einfahrtbereich eines Tunnels sowie den Kopf und das Heck eines Zugs beschränkt sind, kann die Ausbreitung von Druckwellen im Tunnel präzise durch eindimensionale (1-D) Berechnungsmodelle simuliert werden. Solche Modelle werden weithin verwendet. Die Modelle basieren auf den folgenden Parametern:

- Eigenschaften des Tunnels: Querschnitte und Umfänge der Tunnelröhre und -schächte, Reibungskoeffizient, Portalverluste, Längen, Lufttemperatur und Umgebungsdruck, Dichte und Höhe;
- Eigenschaften der Züge: Querschnitte und Umfänge von Zügen, Reibungskoeffizient, Kopf- und Heck-Druckverluste und Längen;
- Betriebseigenschaften: Zuggeschwindigkeitsprofil, Tunneleinfahrtszeit, Fahrtrichtung.

Die folgende Korrelation, basierend auf Bild 4, gilt als geeignete Näherung für den Zugumfang P_{etr} wenn nur die Zugfläche bekannt ist.

$$P_{etr} = 3,139 \cdot S_{tr}^{0,5493} \quad (10)$$

Die folgende Korrelation gilt als geeignete Näherung für den Tunnelumfang P_{etu} wenn nur die Tunnelfläche bekannt ist.

$$P_{etu} = (2 + \pi) \left(\frac{2 \cdot S_{tu}}{\pi} \right)^{0.5} \quad (11)$$

Die Ergebnisse der Modelle sind zeitabhängige Druck- und Luftgeschwindigkeitsreihen an festgelegten Orten im Tunnel und entlang des Zugs.

Die physikalischen Effekte sollten die Erzeugung von Druckänderungen durch die Einfahrt, die Durchfahrt und die Ausfahrt von Zügen in Tunneln, die Ausbreitung von Druckwellen durch den Tunnel, die für Reibungseffekte verantwortlich sind, (Teil-)Reflektionen an Querschnittsänderungen und an den Portalen des Tunnels, Schächten, sofern enthalten, und Zügen im Tunnel umfassen. Es wird angenommen, dass die Parameter entlang des Tunnels variieren, aber für jeden Querschnitt konstant sind.

Es wird angenommen, dass sich Druck und Luftgeschwindigkeiten im Verlauf der Zeit verändern. Die Berechnungen müssen mit validierten numerischen Verfahren ausgeführt werden. Für simulierte Signale wird üblicherweise keine Signalfilterung angewendet, da dies zu überhöhten Amplituden aufgrund der Filtermerkmale führen kann.

Spezifischere Instrumente können erforderlich sein, um Mikrodruckwellen zu untersuchen (zur Erzeugung, Aufsteilung und Emission), siehe Anhang C.

7.2.7 Messungen im reduzierten Maßstab an festen Orten in einem Tunnel

Es müssen Modelle des Versuchszugs gebaut werden, die Zugkopf und Zugheck genau wiedergeben und eine gute Darstellung der Drehgestelle, der Fahrzeugzwischenräume und der Struktur der Außenflächen des Zugs (z. B. Rauheit, Form) bieten. Die Versuchsmodelle für den Versuchszug müssen im Maßstab 1 : 25 oder größer sein, um sicherzustellen, dass die Effekte der Reynolds-Zahl minimiert werden. Die Mach-Zahl des Zugs im Maßstab 1 : 1 muss eingehalten werden.

Bei Tunnel- und Zugmodellen in reduziertem Maßstab reproduzieren die Druckwellen im Tunnel diejenigen im Maßstab 1 : 1 mit Ausnahme, dass die Zeitbasis um den Modellmaßstab reduziert wird. Bei einem Versuch im Maßstab 1 : 25 z. B. treten alle Druckwellen auf einer Zeitbasis 25-mal schneller auf, als im Maßstab 1 : 1.

In den meisten Fällen ist die Verwendung von Modellen, die die Zuglänge im Maßstab 1 : 1 wiedergeben, nicht möglich. Dann ist ein Zugmodell zu verwenden, das mindestens aus einem führenden und einem Schlussfahrzeug sowie zwei Mittelwagen besteht. Der Reibungsanteil des Druckverlaufs für diese Modelle mit reduzierter Länge reproduziert den Druckanstieg in vollem Umfang, wenn die volle Länge durch Extrapolation berücksichtigt wird. Bei Verwendung kürzerer Zugmodelle ergeben sich für Δp_T und Δp_{HP} konservative Werte.

Das Tunnelmodell muss starr und sehr gut gegenüber dem Prüfstand druckdicht sein, um eine Reduzierung der Druckwellenamplitude auszuschließen. Dichtungsprüfungen der Tunnelmontage auf einem Prüfstand müssen durchgeführt werden, um den Undichtigkeitswert des Tunnels zu bestimmen. Die äquivalente Leckagefläche für den Maßstab 1 : 1 muss $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{m}$ oder weniger betragen.

Die Mindesttunnellänge und die Messposition müssen den in 7.2.2 angegebenen Abmessungen entsprechen.

Für die Druckmessungen werden im Tunnel Druckmessgeber eingesetzt. Diese müssen vor dem Einsatz für den zu erwartenden Druckwertebereich, typischerweise $\pm 4 \text{ kPa}$, kalibriert werden. Der Messfehler muss weniger als 1 % betragen.

Die Zuggeschwindigkeit muss mit einer Genauigkeit von 1 % bekannt und sollte während der Einfahrt in den Tunnel innerhalb von 3 % konstant sein.

Die Abtastfrequenz muss mindestens $5 v_{tr}/L_{n,model} \text{ Hz}$ betragen, wobei Anti-Aliasing-Filter mit einer Cut-off-Frequenz von maximal einem Viertel der Abtastrate verwendet werden. Wenn keine analogen Filter verwendet werden, sind rein digitale Filter zulässig, sofern ausreichend höhere Abtastraten genutzt werden.

7.3 Bewertung der maximalen Druckänderung (Fahrzeugreferenzfall)

7.3.1 Allgemeines

Die Bewertung erfolgt auf der Grundlage von Messungen im Maßstab 1 : 1 an dem untersuchten Zug nach 7.2.2. Die Anzahl der Prüfläufe muss die Anforderungen in 7.3.6 erfüllen. Weitere Bewertungen und Korrekturen der Messdaten sind erforderlich, um einen Vergleich mit dem Referenzfall in 5.1.2.1 vorzunehmen. Drei alternative Ansätze zur Umwandlung der Messdaten werden in 7.3.2, 7.3.3 und 7.3.4 beschrieben. Eine allgemeine Bewertung des zeitlichen Druckverlaufs ist in 7.3.5 angegeben. Das Ergebnis der Umwandlung wird mit dem Referenzfall nach 7.3.6 verglichen.

ANMERKUNG Alle drei Ansätze werden als geeignet betrachtet. Hinsichtlich der Auswahl wird keine Empfehlung gegeben. Ein Anwendungsbeispiel hat Differenzen von $\pm 5 \%$ in $\Delta p_N + \Delta p_{fr} + \Delta p_T$ gezeigt.

7.3.2 Transfer der Messwerte durch einen Faktor (Ansatz 1)

Das Signal der gemessenen Drücke $p(t)$ wird um den Faktor $\frac{k_2}{k_1}$ korrigiert, um das Versperrungsmaß, die Zuggeschwindigkeit und die Luftströmung in dem Tunnel zu berücksichtigen.

$$k_j = \rho_j \cdot v_{tr,j}^2 \left(\frac{1}{(1 - B_j)^2} - 1 \right) \quad (12)$$

mit

$$\rho_j = \frac{p_{atm} - H_j \cdot 0,378 \cdot \exp\left(\frac{17,51 \cdot \theta_j}{241 + \theta_j} + 1,814\right)}{287,05 \cdot (273,15 + \theta_j)} \quad j = 1, 2 \quad (13)$$

$$v_{tr,1,rel} = v_{tr,test} + u_0 \quad (14)$$

und

Index $j = 1$ repräsentiert die im Maßstab 1 : 1 gemessene Situation;

Index $j = 2$ repräsentiert das Referenzszenario;

$v_{tr,1,rel}$ ist die effektive Prüfzuggeschwindigkeit (m/s);

$v_{tr,2}$ ist die Referenzgeschwindigkeit $v_{tr,ref}$ in m/;

H ist die relative Feuchte (%);

ρ_2 ist auf eine Luftdichte von 1,225 kg/m³ festgelegt;

$v_{tr,test}$ ist die Zuggeschwindigkeit während der Prüfung (m/s);

u_0 ist die gemessene Luftströmung zum Zeitpunkt der Tunneleinfahrt (positiv in einer Richtung entgegengesetzt zum Zug) (m/s);

p_{atm} ist der atmosphärische Umgebungsdruck während der Prüfung (Pa).

ANMERKUNG Die Dichteformel ist aus EN 61400-12-1:2017 entnommen

Wenn die Zuglänge nicht mit dem Referenzfall konform ist, muss eine lineare Extrapolation von Δp_{fr} mit der geprüften Zuglänge unter Berücksichtigung aller gegebenenfalls vorhandenen Kupplungen zwischen Zueinheiten vorgenommen werden. Die Druckänderungen Δp_N , Δp_{fr} und Δp_T müssen für den Referenzfall unter Verwendung des Verfahrens nach 7.3.5 abgeleitet und nach 7.3.6 mit dem Referenzfall verglichen werden.

7.3.3 Transfer der Messwerte auf der Grundlage von A.3.3 (Ansatz 2)

Die Druckänderungen für jedes gemessene Signal werden nach 7.3.5 abgeleitet, sodass eine Tabelle entsteht.

Um einen korrigierten Δp_N abzuleiten, wird der Wert für ζ_{h0} in der Gleichung A.10 auf null gesetzt. Die Gleichungen (A.9), (A.10) und (A.11) aus A.3.3 werden gelöst, um ζ_h abzuleiten, die dann auf den Referenzfall angewendet wird, um einen korrigierten Δp_N zu berechnen.

Um einen korrigierten Δp_{fr} abzuleiten, werden die Gleichungen (A.12), (A.13) und (A.14) aus A.3.4 und Gleichung (15) und Gleichung (16) gelöst, um zunächst den Zugrauigkeitsparameter k_s abzuleiten. Eine Annahme zur Tunnelreibung $C_{f,tu}$ ist erforderlich und darf auf 0,005 festgelegt werden. Dieser Wert repräsentiert einen Tunnel mit glatten Wänden, z. B. einen modernen Tunnel mit Betonauskleidung und Schottergleis, und ist ein konservativer Wert für Tunnel mit rauen Wänden. Darüber hinaus wird für (A.12) eine Annahme für $C_{f,tr}$ benötigt. Diese ist gegeben durch:

$$C_{f,tr} = 0,25 \cdot \left(2 \cdot \log_{10} \left(\frac{D_h}{k_s} \right) + 1,14 \right)^2 \quad (15)$$

mit

$$D_h = 4 \cdot \left(\frac{S_{tu} - S_{tr}}{P_{etu} + P_{etr}} \right) \quad (16)$$

Der Parameter k_s wird aus obigen Gleichungen aus den Prüfergebnissen abgeleitet und als konstanter Wert auf den Referenzfall angewendet, um einen korrigierten Δp_{fr} zu berechnen.

Da D_h für Prüf- und Referenzbedingungen unterschiedlich ist, müssen die Gleichungen zuerst für die Prüfbedingungen und anschließend unter Verwendung der in 5.1.2 festgelegten Zuglänge für den Referenzfall gelöst werden.

Um einen korrigierten Δp_T abzuleiten, wird der Wert für ζ_{t0} in der Gleichung (A.17) auf null gesetzt. Anschließend werden die Gleichungen (A.15), (A.16), (A.17), (A.18) und (A.19) aus A.3.5 gelöst, um ζ_t aus (A.16) abzuleiten. Der Wert für ζ_t wird aus der Gleichung (A.17) abgeleitet und als Konstante auf den Referenzfall angewendet, um einen korrigierten Δp_T zu berechnen. Die Luftdichte im Referenzfall wird auf $\rho_{amb} = 1,225 \text{ kg/m}^3$ festgelegt.

ANMERKUNG Der Hintergrund zu diesem Ansatz ist in [2], [11] und [12] erläutert.

Die abgeleiteten Druckänderungen Δp_N , Δp_{fr} und Δp_T müssen mit dem Referenzfall nach 7.3.6 verglichen werden. Wenn die Zuglänge nicht mit dem Referenzfall konform ist, muss eine lineare Extrapolation von Δp_{fr} mit der geprüften Zuglänge unter Berücksichtigung aller gegebenenfalls vorhandenen Kupplungen zwischen Zügeinheiten vorgenommen werden.

7.3.4 Transfer durch Simulation (Ansatz 3)

Simulationstools stellen zusätzlich zu den vorherigen Ansätzen in 7.3.2 und 7.3.3 ein alternatives Verfahren zur Umwandlung der gemessenen Drucksignale für den Referenzfall dar.

Die Gleisprüfbedingungen können von den für den Referenzfall festgelegten Bedingungen abweichen. Der erste Prozessschritt umfasst daher einen Vergleich zwischen den Druckmessungen während der Prüfungen und den Simulationen, um sicherzustellen, dass die Simulationen in der Lage sind, die Messungen mit zufriedenstellender Genauigkeit vorherzusagen.

Die Vergleichsschritte stellen sich wie folgt dar:

- Die verfügbaren Zug- und Tunneldaten in Bezug auf die Gleisprüfungen müssen als Eingangsparameter für die Simulationssoftware verwendet werden, um das Szenario für den Bewertungsfall festzulegen.
- Der Tunnelreibungskoeffizient $C_{f,tu}$ ist erforderlich und kann aus Prüfungen oder durch vorherige Kenntnis erlangt werden oder unbekannt sei.
 - $C_{f,tu} = 0,005$ darf als geeigneter Wert verwendet werden, wenn der Reibungskoeffizient unbekannt ist. Dieser Wert repräsentiert einen Tunnel mit glatten Wänden, z. B. einen modernen Tunnel mit Betonauskleidung und Schottergleis und ist ein konservativer Wert für Tunnel mit rauen Wänden.
- Das erhaltene Drucksignal $p(t)_{sim}$ aus der Simulationssoftware muss mit dem Signal $p(t)_{test}$ aus der Gleisprüfung verglichen werden.