

DIN EN 14067-5

ICS 45.060.01; 93.060

Ersatz für
DIN EN 14067-5:2006-10**Bahnanwendungen –****Aerodynamik –****Teil 5: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik im Tunnel;
Deutsche Fassung EN 14067-5:2006+A1:2010**

Railway applications –

Aerodynamics –

Part 5: Requirements and test procedures for aerodynamics in tunnels;

German version EN 14067-5:2006+A1:2010

Applications ferroviaires –

Aérodynamique –

Partie 5: Exigences et procédures d'essai pour l'aérodynamique en tunnel;

Version allemande EN 14067-5:2006+A1:2010

Gesamtumfang 36 Seiten

Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF) im DIN

Nationales Vorwort

Dieses Dokument EN 14067-5:2006+A1:2010 wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom DIN (Deutschland) gehalten wird.

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

Der in den Literaturhinweisen aufgeführte ERRI-Bericht ist in englischer und deutscher Sprache erhältlich. Die beiden Sprachfassungen weichen voneinander ab. Im Zusammenhang mit dieser Norm wurde die englische Fassung des Berichts verwendet.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 14067-5:2006-10 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Anhang ZA über den Zusammenhang dieser Norm mit EG-Richtlinien wurde an die neue Richtlinie 2008/57/EG und an den letzten Stand der Technischen Spezifikationen zur Interoperabilität, durch die grundlegende Anforderungen der Richtlinie in technische Anforderungen umgesetzt werden, angepasst.

Frühere Ausgaben

DIN EN 14067-5: 2006-10

Deutsche Fassung

Bahnanwendungen —
Aerodynamik —
Teil 5: Anforderungen und Prüfverfahren
für Aerodynamik im Tunnel

Railway applications —
Aerodynamics —
Part 5: Requirements and test procedures
for aerodynamics in tunnels

Applications ferroviaires —
Aérodynamique —
Partie 5: Exigences et procédures d'essai
pour l'aérodynamique en tunnel

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 30. Juni 2006 angenommen und schließt Änderung 1 ein, die am 28. September 2010 vom CEN angenommen wurde.

Die CEN-Mitglieder sind gehalten, die CEN/CENELEC-Geschäftsordnung zu erfüllen, in der die Bedingungen festgelegt sind, unter denen dieser Europäischen Norm ohne jede Änderung der Status einer nationalen Norm zu geben ist. Auf dem letzten Stand befindliche Listen dieser nationalen Normen mit ihren bibliographischen Angaben sind beim Management-Zentrum des CEN oder bei jedem CEN-Mitglied auf Anfrage erhältlich.

Diese Europäische Norm besteht in drei offiziellen Fassungen (Deutsch, Englisch, Französisch). Eine Fassung in einer anderen Sprache, die von einem CEN-Mitglied in eigener Verantwortung durch Übersetzung in seine Landessprache gemacht und dem Management-Zentrum mitgeteilt worden ist, hat den gleichen Status wie die offiziellen Fassungen.

CEN-Mitglieder sind die nationalen Normungsinstitute von Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION
COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Management-Zentrum: Avenue Marnix 17, B-1000 Brüssel

Inhalt

	Seite
Vorwort	4
1 Anwendungsbereich	5
2 Normative Verweisungen	5
3 Begriffe, Formelzeichen und Abkürzungen	5
4 Methoden zur Quantifizierung der Druckänderungen zur Einhaltung des Gesundheitskriteriums	5
4.1 Allgemeines	5
4.2 Zug/Tunnel-Druckverlauf	5
4.3 Maximale Druckänderungen	9
5 Druckbelastung nicht druckdichter Züge	9
6 Druckbelastung druckdichter Züge in Tunneln	11
6.1 Allgemeines	11
6.2 Ein Zug im Tunnel	12
6.3 Zwei Züge im Tunnel	14
Anhang A (informativ) Näherungsgleichungen	19
A.1 Allgemeines	19
A.2 SNCF-Methode)	19
A.3 Methode der TU Wien)	20
Anhang B (informativ) Kriterien für den Druckkomfort	27
B.1 Nicht druckdichte Züge (üblicherweise mit $\tau_{\text{dyn}} < 0,5 \text{ s}$)	27
B.2 Druckdichte Züge (üblicherweise mit $\tau_{\text{dyn}} > 0,5 \text{ s}$)	27
Anhang C (informativ) Mikrodruckwelle	28
C.1 Allgemeines	28
C.2 Entstehung der Welle	28
C.3 Wellenausbreitung	29
C.4 Wellenabstrahlung	30
Anhang ZA (informativ)  Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm und den grundlegenden Anforderungen der EU-Richtlinie 2008/57/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 17. Juni 2008 über die Interoperabilität des Eisenbahnsystems innerhalb der Gemeinschaft (Neufassung) 	31
Literaturhinweise	34

Bilder

Bild 1 — Zug/Tunnel-Druckverlauf an einem festen Ort in einem Tunnel (Detail).....	6
Bild 2 — Zug/Tunnel-Druckverlauf an einer Stelle im Zug unmittelbar hinter dem Zugkopf	7
Bild 3 — Außendruckverläufe an einem Fahrzeug aufgrund der Kopfvorbeifahrt eines entgegenkommenden Zuges.....	9
Bild 4 — Innendruckverläufe in einem nicht druckdichten Fahrzeug aufgrund der Kopfvorbeifahrt eines entgegenkommenden Zuges	10
Bild 5 — Druckdifferenzen an einem nicht druckdichten Fahrzeug bei der Kopfvorbeifahrt eines entgegenkommenden Zuges.....	10
Bild 6 — Typische Messergebnisse für die maximalen Belastungen der Tür eines Güterwagens bei der Kopfvorbeifahrt eines entgegenkommenden Zuges	11
Bild 7 — Druckdifferenz bei einem Zug mit hoher Druckdichte in zwei aufeinander folgenden Tunneln.....	12
Bild 8 — Außendruckverläufe bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten in zwei aufeinander folgenden Tunneln	13
Bild 9 — Einfluss der Tunnellänge auf die maximale Änderung des Außendrucks	13
Bild 10 — Einfluss der relativen Einfahrtszeit $\Delta t_{1,2}$ auf die maximalen Absolutwerte der Druckdifferenzen für eine bestimmte Situation	14
Bild 11 — Beispielszenario für Zugbegegnungen innerhalb von 1,5 h fahrplanmäßigen Verkehrs auf einer Hochgeschwindigkeitsstrecke, wobei 6 Züge im Betrieb 6 Tunnel durchfahren, die 10 % der Streckenlänge ausmachen	16
Bild 12 — Auswirkung von Fahrplanabweichungen auf die Anzahl der Zugbegegnungen im Tunnel bei einem bestimmten Zug	16
Bild 13 — Berechneter Druckwert und sich daraus ergebende Druckbelastungen über 500 Pa (Pfeile)	18
Bild 14 — Druckbelastungen bei zwei verschiedenen Begegnungsszenarien.....	18
Bild A.1 — Berechnung Zug/Tunnel-Druckverlauf.....	20
Bild A.2 — Werte für X_{fr} bei Lösung der Gleichung (A.13) mit verschiedenen Werten für $\zeta = \zeta_h + \zeta_{fr}$	22
Bild A.3 — Werte für X_t bei Lösung der Gleichung (A.18) mit verschiedenen Werten für $\zeta_1 = \zeta_h + \zeta_{fr} + \zeta_t$ bei $\zeta_E = 0,5$	24
Bild A.4 — Aerodynamischer Widerstandsbeiwert.....	26
Bild C.1 — Entstehung, Ausbreitung und Abstrahlung der Druckwelle.....	28
Bild C.2 — Aufsteilung in Tunneln mit fester Fahrbahn.....	29
Bild C.3 — Abstrahlung der Mikrodruckwelle	30

Vorwort

Dieses Dokument (EN 14067-5:2006+A1:2010) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom DIN gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Mai 2011, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Mai 2011 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Texte dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN [und/oder CENELEC] sind nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Dieses Dokument enthält Änderung 1, die durch CEN am 2010-09-28 angenommen wurde.

Dieses Dokument ersetzt EN 14067-5:2006.

Beginn und Ende des Textes, der durch die Änderung eingeführt oder geändert wurde, ist im Text mit den Symbolen **A1** **A1** gekennzeichnet.

A1 Dieses Dokument wurde unter einem Mandat erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelszone dem CEN/CENELEC/ETSI erteilt haben, und unterstützt grundlegende Anforderungen der EU-Richtlinie 2008/57/EG.

Zum Zusammenhang mit der EU-Richtlinie 2008/57/EG siehe informativen Anhang ZA, der Bestandteil dieses Dokuments ist. **A1**

Diese Europäische Norm ist Teil der Normenreihe *Bahnanwendungen — Aerodynamik*, die aus folgenden Teilen besteht:

- *Teil 1: Formelzeichen und Einheiten*
- *Teil 2: Aerodynamik auf offener Strecke*
- *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: Auswirkungen von Seitenwind auf den Eisenbahnverkehr*

Entsprechend der CEN/CENELEC-Geschäftsordnung sind die nationalen Normungsinstitute der folgenden Länder gehalten, diese Europäische Norm zu übernehmen: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Schweiz, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechische Republik, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern.

1 Anwendungsbereich

Diese Europäische Norm gilt für die aerodynamischen Belastungen, die Züge bei der Fahrt durch einen Tunnel verursachen.

2 Normative Verweisungen

Das folgende zitierte Dokument ist für die Anwendung dieser Europäischen Norm erforderlich. 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 14067-1:2003, *Bahnanwendungen — Aerodynamik — Teil 1: Formelzeichen und Einheiten*

3 Begriffe, Formelzeichen und Abkürzungen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die in EN 14067-1:2003 angegebenen Begriffe, Formelzeichen und Abkürzungen und der folgende Begriff.

ANMERKUNG Weitere Begriffe, Formelzeichen und Abkürzungen werden im Text erläutert.

3.1

Tunnel

geschlossene Struktur um Gleise mit einer Länge von mehr als 20 m

4 Methoden zur Quantifizierung der Druckänderungen zur Einhaltung des Gesundheitskriteriums

4.1 Allgemeines

Die durch die Fahrt von Zügen durch einen Tunnel verursachten relevanten Druckänderungen können im Maßstab 1:1 gemessen, anhand von Näherungsgleichungen (siehe Anhang A) geschätzt, mit Hilfe validierter Programme vorhergesagt oder bei Versuchen mit bewegten Modellen (Moving-Model-Versuchen) gemessen werden. Bei der Bestimmung der Druckänderungen zur Einhaltung der medizinischen Grenzwerte für die Druckbelastung kann ebenso verfahren werden.

Daten aus Versuchen im Maßstab 1 : 1 dürfen als Grundlage zur Abnahme und Zulassung von Zügen und Tunneln herangezogen werden.

Jede einzelne Kombination von Zug und Tunnel wird durch einen Zug/Tunnel-Druckverlauf beschrieben.

4.2 Zug/Tunnel-Druckverlauf

4.2.1 Allgemeines

Wenn ein Zug in den Tunnel einfährt, entwickelt sich der statische Druck im Tunnel (siehe Bild 1) wie folgt:

- durch die Einfahrt des Zugkopfes in den Tunnel kommt es zu einem starken Druckanstieg Δp_N ;
- auf Grund der Reibungseffekte, die durch die Einfahrt des Hauptteils des Zuges in den Tunnel verursacht werden, kommt es zu einem zweiten Druckanstieg Δp_{fr} ;
- danach wird durch die Einfahrt des Zughecks in den Tunnel eine Druckabsenkung Δp_T verursacht;
- durch die Vorbeifahrt des Zugkopfes an der Messposition im Tunnel kommt es zu einer erheblichen Druckabsenkung Δp_{HP} .

Reelle Druckmessungen können von dem in Bild 1 gezeigten Druckverlauf abweichen, z. B. wenn sich der Zugquerschnitt entlang des Zuges ändert. In diesem Fall sind die Δp -Werte in einer gesonderten Betrachtung zu bestimmen.

Alle Δp -Werte sind absolute Werte.

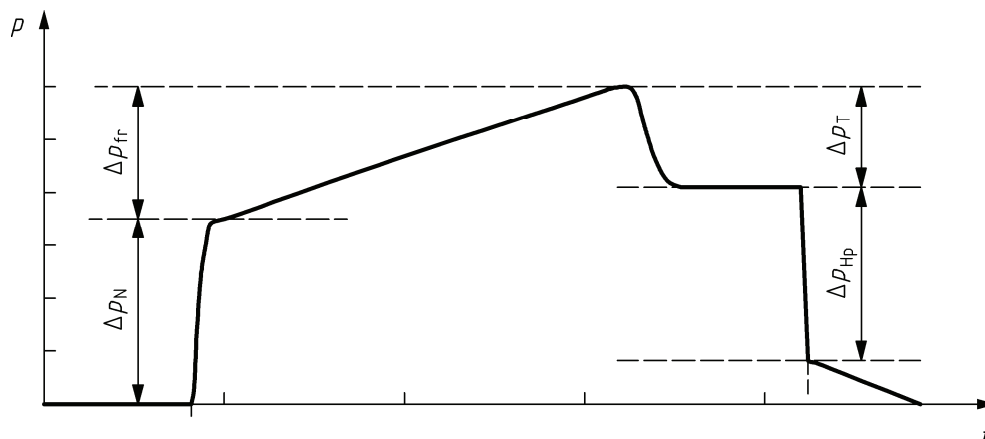


Bild 1 — Zug/Tunnel-Druckverlauf an einem festen Ort in einem Tunnel (Detail)

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

Der Druckverlauf kann anhand von Berechnungen oder Messungen an einem festen Ort in einem Tunnel bestimmt werden, d. h. anhand der vier Druckänderungen Δp_N , Δp_{fr} , Δp_T und Δp_{HP} an einem bestimmten Punkt im Tunnel (siehe 4.2.2).

4.2.2 Messung der Werte Δp_N , Δp_{fr} , Δp_T und Δp_{HP} im Maßstab 1:1 an einem festen Ort im Tunnel

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

Für die Druckmessungen werden im Tunnel Druckaufnehmer eingesetzt. Diese sollten vor dem Einsatz für den zu erwartenden Druckwertebereich, typischerweise ± 4 kPa, kalibriert werden. Der Messfehler sollte weniger als 1 % betragen.

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

Die Abtastfrequenz beträgt mindestens $5 v_{tr}/L_N$ Hz, wobei Anti-Aliasing-Filter mit einer Cut-off-Frequenz von einem Viertel der Abtastfrequenz verwendet werden.

Um genaue Werte für Δp_N , Δp_{fr} , Δp_T und Δp_{HP} bei einem vollständig entwickelten Wellenmuster zu erhalten, ist sicherzustellen, dass bei einer Zuggeschwindigkeit v_{tr} und einer Zuglänge L_{tr} die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

— Die Gleichung für den Abstand x_p zwischen dem Einfahrportal und der Messposition lautet:

$$x_p = \frac{c L_{tr}}{c - v_{tr}} + \Delta x_1 \quad (1)$$

Dabei stellt die zusätzliche Länge Δx_1 eine klare zeitliche Trennung der einzelnen Druckänderungen sicher; sie sollte idealerweise etwa 100 m betragen. Die Messvorrichtung sollte in x_p installiert werden, um eine Dämpfung der Druckwellen zu vermeiden;

— die Gleichung für die Mindesttunnellänge lautet:

$$L_{tu,min} = x_p + \frac{cL_{tr}}{2v_{tr}} + \Delta L_1 \quad \text{wenn } \Delta p_{HP} \text{ nicht benötigt wird} \quad (2)$$

$$L_{tu,min} = \frac{x_p}{2} \left(1 + \frac{c}{v_{tr}} \right) + \Delta L_1 \quad \text{wenn } \Delta p_{HP} \text{ benötigt wird} \quad (3)$$

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

4.2.3 Messungen der Werte $\Delta p_{N,o}$, $\Delta p_{fr,o}$ und $\Delta p_{T,o}$ außen am Zug im Maßstab 1:1

Ist es nicht möglich, die Messungen an festen Orten in einem Tunnel durchzuführen, so können für Δp_N , Δp_{tr} und Δp_T Näherungswerte durch Messungen von $\Delta p_{N,o}$, $\Delta p_{fr,o}$ und $\Delta p_{T,o}$ außen am Zug ermittelt werden. Wenn nötig, kann Δp_{hp} entweder mit Näherungsgleichungen abgeleitet werden, oder es kann davon ausgegangen werden, dass dieser Wert gleich $\Delta p_{N,o}$ ist.

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

Für die Druckmessungen werden außen am Zug Druckaufnehmer eingesetzt. Diese sollten vor dem Einsatz für den zu erwartenden Druckwertebereich, typischerweise ± 4 kPa, kalibriert werden. Der Messfehler sollte weniger als 1 % betragen.

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

Die Abtastfrequenz beträgt mindestens $5 v_{tr}/L_N$ Hz, wobei Anti-Aliasing-Filter mit einer Cut-off-Frequenz von einem Viertel der Abtastfrequenz verwendet werden.

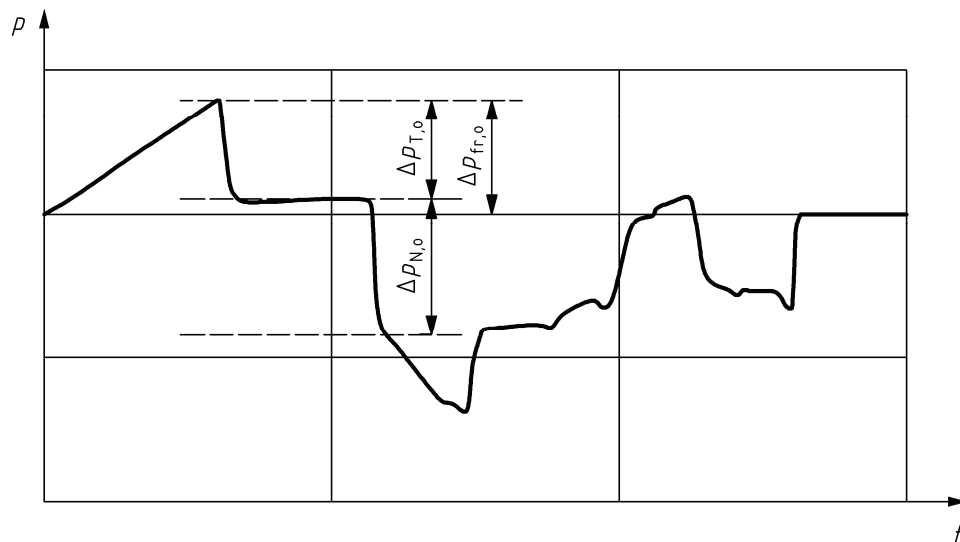


Bild 2 — Zug/Tunnel-Druckverlauf an einer Stelle im Zug unmittelbar hinter dem Zugkopf

Um den gesamten Anstieg des Reibungsdrucks Δp_{fr} zu ermitteln, sind die Drücke an der Zugaußenseite unmittelbar hinter dem Zugkopf zu messen, d. h. dort, wo der volle Querschnitt erreicht ist.

Die Gleichung für die Mindesttunnellänge $L_{tu,min}$ lautet:

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

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 $\Delta p_{N,0}$ durch die Reibung in Abhängigkeit von der Tunnellänge reduziert wird, sollte der Tunnel nicht erheblich länger als $L_{tu,min}$ sein.

4.2.4 Näherungsgleichungen für Δp_N , Δp_{fr} , Δp_T und Δp_{HP}

Zur Ermittlung von Schätzwerten für Δp_N , Δp_{fr} , Δp_T und Δp_{HP} können die in Anhang A, A.2 und A.3 aufgeführten Gleichungen verwendet werden. Bei Tunneln mit unterschiedlichen Querschnitten ist der geringste Querschnitt zu betrachten.

4.2.5 Bewertung von Δp_N , Δp_{fr} , Δp_T und Δp_{HP} anhand von numerischer Simulation

Die Berechnungen können mit validierten numerischen Verfahren ausgeführt werden. Tunnellänge und Messposition müssen aus den Gleichungen (1), (2) und (3) abgeleitet werden.

4.2.6 Messung der Werte Δp_N , Δp_{fr} , Δp_T und Δp_{HP} im reduzierten Maßstab an einem festen Ort im Tunnel

Es sollten Modelle des Versuchszugs gebaut werden, die Zugkopf und Zugheck genau wiedergeben und eine gute Darstellung der Drehgestelle, der Zwischenräume zwischen den einzelnen Wagen und der Struktur der Außenflächen des Zuges (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. Es ist äußerst wichtig, die Mach-Zahl des Zuges im Maßstab 1 : 1 einzuhalten.

Bei Tunnel- und Zugmodellen in reduziertem Maßstab reproduzieren die Druckwellen im Tunnel diejenigen im Maßstab 1 : 1 mit Ausnahme der Tatsache, dass der charakteristische Zeitmaßstab um den Modellmaßstab reduziert wird. Bei einem Versuch im Maßstab 1 : 25 z. B. läuft das Druckwellengeschehen in einem 25. Teil der Zeit ab wie 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, sofern 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 abgedichtet sein, um eine Reduzierung der Druckwellenamplitude auszuschließen. Die Mindesttunnellänge und die Messposition müssen den in 4.2.2 angegebenen Abmessungen entsprechen, mit Anpassung an den Modellmaßstab.

Für die Druckmessungen werden außen am Zug Druckaufnehmer eingesetzt. Diese sollten vor dem Einsatz für den zu erwartenden Druckwertebereich, typischerweise ± 4 kPa, kalibriert werden. Der Messfehler sollte weniger als 1 % betragen.

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

Die Abtastfrequenz beträgt mindestens $5 v_{tr}/L_N$ Hz, wobei Anti-Aliasing-Filter mit einer Cut-off-Frequenz von einem Viertel der Abtastfrequenz verwendet werden.

4.3 Maximale Druckänderungen

Die maximale Druckänderung (Spitze-zu-Spitze) $\Delta p_{\max}$ unter den ungünstigsten Bedingungen (z. B. kritische Tunnellänge, kritische Zugbegegnung oder Parallelfahrt, kritische Stelle) wird anhand der folgenden Gleichungen berechnet:

An einem festen Ort im Tunnel bei 2 Zügen: $\Delta p_{\max} = 2\Delta p_N + 2\Delta p_{fr} + 2\Delta p_T + 2\Delta p_{HP}$ (5)
(Zugbegegnung oder Parallelfahrt)

An einem festen Ort im Tunnel bei 1 Zug: $\Delta p_{\max} = \Delta p_N + \Delta p_{fr} + \Delta p_T + \Delta p_{HP}$ (6)

Außen am Zug bei Begegnung von 2 Zügen: $\Delta p_{\max} = 2\Delta p_N + 2\Delta p_{fr} + 2\Delta p_T + \Delta p_{HP} + \Delta p_{alt}$ (7)

Außen am Zug bei 1 Zug: $\Delta p_{\max} = \Delta p_N + \Delta p_{fr} + \Delta p_T + \Delta p_{alt}$ (8)

Dabei ist

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

die natürliche, durch geodätische Höhenunterschiede bedingte Druckänderung.

Dabei ist

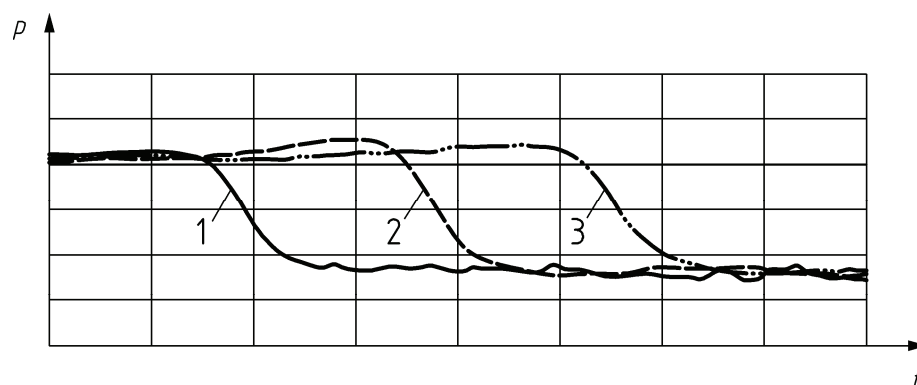
$$\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3;$$

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

Die maximalen Druckänderungen sind ein hilfreiches Instrument zum Vergleich mit der TSI und nationalen Druckgrenzwerten und für Lastschätzungen.

5 Druckbelastung nicht druckdichter Züge

Wenn der Kopf eines Zuges an einem anderen Zug vorbeifährt, dann tritt eine Druckabsenkung auf, die sich mit der relativen Geschwindigkeit der Züge bewegt (siehe Bild 3). Bei der Vorbeifahrt des Zughecks kommt es zu einem Druckanstieg. Der Gradient dieser Druckänderungen kann deutlich steiler sein als der Gradient der durch den Zug erzeugten Druckwellen. Diese Druckänderungen können wegen dieses steilen Verlaufs zu einer Belastung nicht druckdichter Fahrzeuge führen.



Legende

- 1 Außendruck vorn
- 2 Außendruck in der Mitte
- 3 Außendruck hinten

Bild 3 — Außendruckverläufe an einem Fahrzeug aufgrund der Kopfvorbeifahrt eines entgegenkommenden Zuges