

DIN EN 14067-6



ICS 45.060.01

Ersatz für
DIN EN 14067-6:2010-05 und
DIN EN 14067-6
Berichtigung 1:2011-09

**Bahnanwendungen –
Aerodynamik –
Teil 6: Anforderungen und Prüfverfahren zur Bewertung von Seitenwind;
Deutsche Fassung EN 14067-6:2018**

Railway applications –
Aerodynamics –
Part 6: Requirements and test procedures for cross wind assessment;
German version EN 14067-6:2018

Applications ferroviaires –
Aérodynamique –
Partie 6: Exigences et procédures d'essai pour l'évaluation de la stabilité vis-à-vis des vents
transversiers;
Version allemande EN 14067-6:2018

Gesamtumfang 147 Seiten

DIN-Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 14067-6:2018) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN (Deutschland) gehalten wird.

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

Dieses Dokument beruht auf der Grundlage einer englischen Referenzfassung.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 14067-6:2010-05 und DIN EN 14067-6 Berichtigung 1:2011-09 wurden folgende Änderungen vorgenommen:

- a) Verweisungen auf Teil 1 wurden entfernt, das Koordinatensystem und alle relevanten Symbole aus Teil 1 wurden diesem Teil hinzugefügt;
- b) neue Anforderungen für Personenwagen und Lokomotiven, die bei einer Geschwindigkeit von $250 \text{ km/h} \leq v_{\text{max}} \leq 360 \text{ km/h}$ betrieben werden, wurden hinzugefügt;
- c) neue Tabellen mit Referenz-Windkennkurven für Personenwagen und Lokomotiven, die bei einer Geschwindigkeit von $250 \text{ km/h} \leq v_{\text{max}} \leq 360 \text{ km/h}$ betrieben werden, wurden hinzugefügt;
- d) Formel (1) sowie der Faktor f_L in Tabelle 3 wurden korrigiert;
- e) Leitsätze zur Anwendung von Referenz-Windkennkurven (CWC) bei der Bewertung des Seitenwindrisikos von Eisenbahnstrecken sind im Abschnitt 8 aufgeführt;
- f) die Migrationsregel (ehemaliger Anhang M) wurde aus dem allgemeinen Dokument entfernt und wird im nationalen Vorwort aufgeführt, falls notwendig;
- g) ein neuer Anhang M wurde hinzugefügt und liefert erweiterte CWC;
- h) Anhang ZA wurde aktualisiert;
- i) der Anwendungsbereich wurde erweitert auf Spurweiten von 1 435 mm bis 1 668 mm.

Frühere Ausgaben

DIN EN 14067-6: 2010-05

DIN EN 14067-6 Berichtigung 1: 2011-09

Deutsche Fassung

Bahnanwendungen - Aerodynamik - Teil 6: Anforderungen und Prüfverfahren zur Bewertung von Seitenwind

Railway applications - Aerodynamics - Part 6:
Requirements and test procedures for cross wind
assessment

Applications ferroviaires - Aérodynamique - Partie 6:
Exigences et procédures d'essai pour l'évaluation de la
stabilité vis-à-vis des vents traversiers

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 3. März 2018 angenommen.

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 CEN-CENELEC-Management-Zentrum 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, der ehemaligen jugoslawischen Republik Mazedonien, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Island, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, den Niederlanden, Norwegen, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, der Schweiz, Serbien, der Slowakei, Slowenien, Spanien, der Tschechischen Republik, der Türkei, Ungarn, dem Vereinigten Königreich und Zypern.



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

CEN-CENELEC Management-Zentrum: Rue de la Science 23, B-1040 Brüssel

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	5
Einleitung	7
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen	8
3 Begriffe	8
4 Symbole und Abkürzungen	9
5 Verfahren und Anforderungen zur Bewertung der Seitenwindstabilität von Fahrzeugen.....	24
5.1 Allgemeines	24
5.2 Anwendbarkeit von Verfahren zur Bestimmung der Seitenwindstabilität für die Fahrzeugbewertung.....	24
5.3 Bestimmung der aerodynamischen Beiwerte.....	27
5.3.1 Allgemeines	27
5.3.2 Vorhersageformel	27
5.3.3 Numerische Strömungssimulation (CFD)	28
5.3.4 Windkanalversuche im reduzierten Maßstab	31
5.4 Bestimmung der Radentlastung aufgrund von Seitenwinden	37
5.4.1 Allgemeines	37
5.4.2 Einfaches Verfahren	37
5.4.3 Erweitertes quasi-statisches Verfahren.....	40
5.4.4 Zeitabhängiges MKS-Verfahren mit Anwendung des Wind-Szenarios Chinesischer Hut.....	43
5.5 Darstellungsform von Windkennkurven (CWC)	51
5.5.1 Allgemeines	51
5.5.2 Darstellungsform der CWC von Personenwagen und Lokomotiven.....	51
5.5.3 Darstellung der Windkennkurven von Güterfahrzeugen.....	53
5.6 Anforderungen	54
5.6.1 Anforderungen für Personenwagen und Lokomotiven, die bei einer Geschwindigkeit von 250 km/h $\leq v_{\max}$ $\leq$ 360 km/h betrieben werden	54
5.6.2 Anforderungen für Personenwagen und Lokomotiven, die bei einer Geschwindigkeit von 140 km/h $< v_{\max}$ $<$ 250 km/h betrieben werden	57
5.6.3 Anforderungen für Güterfahrzeuge.....	57
6 Verfahren zur Ermittlung der benötigten Streckendaten	58
6.1 Allgemeines	58
6.2 Darstellung der Streckendaten	58
6.2.1 Allgemeines	58
6.2.2 Horizontalprofil	58
6.2.3 Vertikalprofil.....	59
6.2.4 Entwurfsgeschwindigkeit der Strecke.....	60
6.2.5 Wände	61
6.2.6 Meteorologische Eingangsdaten zur Streckenbeschreibung	62
6.2.7 Integrierte Streckendatenbank.....	62
6.2.8 Geforderte Mindestauflösung/-genauigkeit.....	65
7 Verfahren zur Bewertung der Windexposition von Eisenbahnstrecken	65
8 Leitlinien für die Untersuchung und Bewertung des Seitenwindrisikos.....	65

8.1	Allgemeines	65
8.2	Infrastruktur mit Zuggeschwindigkeiten bei oder über 250 km/h.....	66
8.3	Infrastruktur mit Zuggeschwindigkeiten unter 250 km/h.....	66
9	Erforderliche Dokumentation	66
9.1	Allgemeines	66
9.2	Bewertung der Seitenwindstabilität von Personenwagen und Lokomotiven	66
9.3	Bewertung der Seitenwindstabilität von Güterfahrzeugen.....	67
9.4	Ermittlung der Eisenbahnstreckendaten.....	67
Anhang A (informativ) Anwendung von Verfahren zur Bewertung der Seitenwindstabilität von Fahrzeugen in Europa.....		68
Anhang B (informativ) Versperrungskorrektur		73
B.1	Staudruckverfahren	73
B.2	Deutsches Verfahren	73
B.3	Britisches Verfahren	73
B.4	Geschlitzte Wände.....	74
Anhang C (normativ) Windkanal-Benchmark-Versuchsdaten für die Standardbodenkonfiguration		75
C.1	Allgemeines	75
C.2	Windkanalmodell des ICE-3-Endwagens	75
C.3	Windkanalmodell des TGV-Duplex-Triebkopfs	76
C.4	Windkanalmodell des ETR-500-Triebkopfs.....	77
Anhang D (informativ) Andere Bodenkonfigurationen bei Windkanalversuchen.....		79
D.1	Flachgrund mit Spalt (TSI HS RST).....	79
D.2	Zwei Gleise mit Schotterbett und Schienen (TSI HS RST).....	79
D.3	Standarddamm mit 6 m Höhe (TSI HS RST).....	80
D.4	Flachgrund ohne Spalt (finnisches Verfahren)	81
D.5	Zwei Gleise mit Schotterbett und Schienen (britisches Verfahren)	81
Anhang E (informativ) Windkanal-Benchmark-Versuchsdaten für andere Bodenkonfigurationen		83
E.1	Allgemeines	83
E.2	Windkanalmodell des ICE-3-Endwagens	83
E.3	Windkanalmodell des TGV-Duplex-Triebkopfs	87
E.4	Windkanalmodell des ETR-500-Triebkopfs.....	91
Anhang F (informativ) Dammüberströmungseffekt		94
Anhang G (informativ) Windkanaluntersuchungen mit atmosphärischer Grenzschicht.....		95
G.1	Allgemeines	95
G.2	Benchmark-Versuche	95
G.3	Windsimulation	96
G.3.1	Grenzschichtprofile	96
G.3.2	Turbulenzgrade	96
G.3.3	Integrales Turbulenzlängenmaß.....	97
G.4	Anforderungen an den Modellmaßstab und das Versperrungsmaß.....	97
G.5	Modellgenauigkeit	97
G.6	Messtechnische Anforderungen	97
G.6.1	Allgemeines	97
G.6.2	Geschwindigkeitsmessung.....	98
G.6.3	Kraft- und Momentenwaage.....	98
G.7	Anforderungen an die Datenerfassung	98
G.7.1	Allgemeines	98
G.7.2	Zeitskala, Abtastfrequenz und Dauer der Datenerfassung.....	98
G.7.3	Messung der Temperatur und des atmosphärischen Drucks	99
G.8	Berechnung der Mittelwerte	99

G.9	Berechnung der Spitzenwerte	99
G.10	Berechnung der Luftdichte	100
G.11	Berechnung des unkorrigierten Rollmomentenbeiwerts	100
G.12	Bestimmung des Rollmomentenbeiwerts um die leeseitige Schiene	101
G.13	Interpolation der Daten	101
Anhang H (informativ) Fünf-Massen-Modell		102
H.1	Allgemeines	102
H.2	Herleitung der Formeln	104
H.3	Beispielrechnungen	108
H.3.1	Allgemeines	108
H.3.2	Beispielfahrzeug 1	109
H.3.3	Beispielfahrzeug 2	112
Anhang I (normativ) Mathematisches Modell des Chinesischen Huts		117
I.1	Mathematisches Modell des Chinesischen Huts	117
I.2	Beispielrechnung zum Chinesischen Hut	120
Anhang J (informativ) Stochastisches Windmodell		124
J.1	Allgemeines	124
J.2	Annahmen	124
J.3	Anwendungsbereich	124
J.4	Allgemeiner Ansatz	125
J.4.1	Allgemeines	125
J.4.2	Erster Schritt: Windkanaluntersuchungen (Bestimmung der aerodynamischen Eigenschaften)	125
J.4.3	Zweiter Schritt: Berechnung der turbulenten Windgeschwindigkeit	125
J.4.4	Dritter Schritt: Evaluierung der aerodynamischen Kräfte	129
J.4.5	Vierter Schritt: Simulation der Fahrzeugdynamik	130
J.4.6	Fünfter Schritt: Evaluierung der charakteristischen Windgeschwindigkeit	130
Anhang K (informativ) Standsicherheit von Personenwagen und Lokomotiven nach nationalen Richtlinien		132
K.1	Allgemeines	132
K.2	Nach DB-Richtlinie 80704 (Deutschland)	132
K.3	Nach Railway Group Standard GM/RT 2141 (Großbritannien)	134
Anhang L (informativ) Informationen zu Bewertungsverfahren der Windexposition einer Eisenbahnstrecke		135
L.1	Allgemeines	135
L.2	Windkartenansatz	135
L.3	Übertragungsansatz	136
Anhang M (informativ) Erweiterte CWC		138
Anhang ZA (informativ) Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm und den grundlegenden Anforderungen der abzudeckenden EU-Richtlinie 2008/57/EG		141
Literaturhinweise		144

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (EN 14067-6:2018) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Januar 2019, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Januar 2019 zurückgezogen werden.

Es wird auf die Möglichkeit hingewiesen, dass einige Elemente dieses Dokuments Patentrechte berühren können. CEN ist nicht dafür verantwortlich, einige oder alle diesbezüglichen Patentrechte zu identifizieren.

Dieses Dokument ersetzt EN 14067-6:2010.

Dieses Dokument wurde im Rahmen eines Normungsauftrages erarbeitet, den 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 EU-Richtlinie 2008/57/EG siehe informativen Anhang ZA, der Bestandteil dieses Dokuments ist.

Die wesentlichen Änderungen im Vergleich zur vorherigen Ausgabe sind unten aufgeführt:

- a) Verweisungen auf Teil 1 wurden entfernt, das Koordinatensystem und alle relevanten Symbole aus Teil 1 wurden diesem Teil hinzugefügt;
- b) neue Anforderungen für Personenwagen und Lokomotiven, die bei einer Geschwindigkeit von $250 \text{ km/h} \leq v_{\text{max}} \leq 360 \text{ km/h}$ betrieben werden, wurden hinzugefügt;
- c) neue Tabellen mit Referenz-Windkennkurven für Personenwagen und Lokomotiven, die bei einer Geschwindigkeit von $250 \text{ km/h} \leq v_{\text{max}} \leq 360 \text{ km/h}$ betrieben werden, wurden hinzugefügt;
- d) Formel (1) sowie der Faktor f_L in Tabelle 3 wurden korrigiert;
- e) Leitsätze zur Anwendung von Referenz-Windkennkurven (CWC) bei der Bewertung des Seitenwindrisikos von Eisenbahnstrecken sind in Abschnitt 8 aufgeführt;
- f) die Migrationsregel (ehemaliger Anhang M) wurde aus dem allgemeinen Dokument entfernt und wird im nationalen Vorwort aufgeführt, falls notwendig;
- g) ein neuer Anhang M wurde hinzugefügt und liefert erweiterte CWC;
- h) Anhang ZA wurde aktualisiert;
- i) der Anwendungsbereich wurde erweitert auf Spurweiten von 1 435 mm bis 1 668 mm.

Diese Europäische Norm ist ein Teil der Normenreihe „*Bahnanwendungen — Aerodynamik*“, welche aus folgenden Teilen besteht:

- 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 zur Bewertung von Seitenwind.*

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

Einleitung

Züge auf freier Strecke sind Seitenwind ausgesetzt. Die Sicherheit des Eisenbahnbetriebs gegenüber Seitenwind hängt von den Fahrzeug- und Infrastruktureigenschaften und den betrieblichen Randbedingungen ab. Wichtige Parameter sind:

- die aerodynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs;
- die fahrzeugdynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs (z. B. Masse, Federung, Anschläge);
- Spurweite;
- Streckencharakteristik (Radius und Überhöhung der Strecke, Damm- und Brückenhöhe, Wände in Gleisnähe);
- Windeinfall auf der Strecke;
- Fahrgeschwindigkeit, Betriebsart (ohne Neigetechnik, Neigetechnik, Fahrtrichtung).

1 Anwendungsbereich

Dieses Dokument legt Leitlinien für die Bewertung von Seitenwinden in Bahnanwendungen fest.

Dieses Dokument ist anwendbar für alle Personenwagen, Lokomotiven und Triebköpfe (mit einer maximalen Zuggeschwindigkeit von mehr als 140 km/h bis zu 360 km/h) und für Güterwagen (mit einer maximalen Zuggeschwindigkeit von mehr als 80 km/h bis zu 160 km/h) und für Spurweiten von 1 435 mm bis einschließlich 1 668 mm. Für Personenwagen, Lokomotiven und Triebköpfe mit einer maximalen Zuggeschwindigkeit zwischen 250 km/h und 360 km/h ist der Nachweis der Seitenwindstabilität verpflichtend. Dieses Dokument gilt nicht für Stadtbahnen und städtische Schienenfahrzeuge.

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 14067-4, *Bahnanwendungen — Aerodynamik — Teil 4: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik auf offener Strecke*

EN 14363, *Bahnanwendungen — Versuche und Simulationen für die Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften von Eisenbahnfahrzeugen — Fahrverhalten und stationäre Versuche*

EN 15663, *Bahnanwendungen — Fahrzeugreferenzmassen*

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:

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

3.1

Bias

systematischer Fehler, der eine Abschätzung beeinflusst

Anmerkung 1 zum Begriff: In diesem Dokument wird Bias ausgedrückt als das Verhältnis von Koeffizienten, die aus Benchmark-Windkanaluntersuchungen abgeleitet wurden, zu den entsprechenden Koeffizienten, die in neuen Windkanalversuchen bestimmt werden.

3.2

Koordinatensystem

System, welches die Achsen für Kräfte, Momente, Maße und Windgeschwindigkeiten nach der Definition im Bild 1 bezeichnet

Anmerkung 1 zum Begriff: Das Koordinatensystem ist in Bild 1 dargestellt.

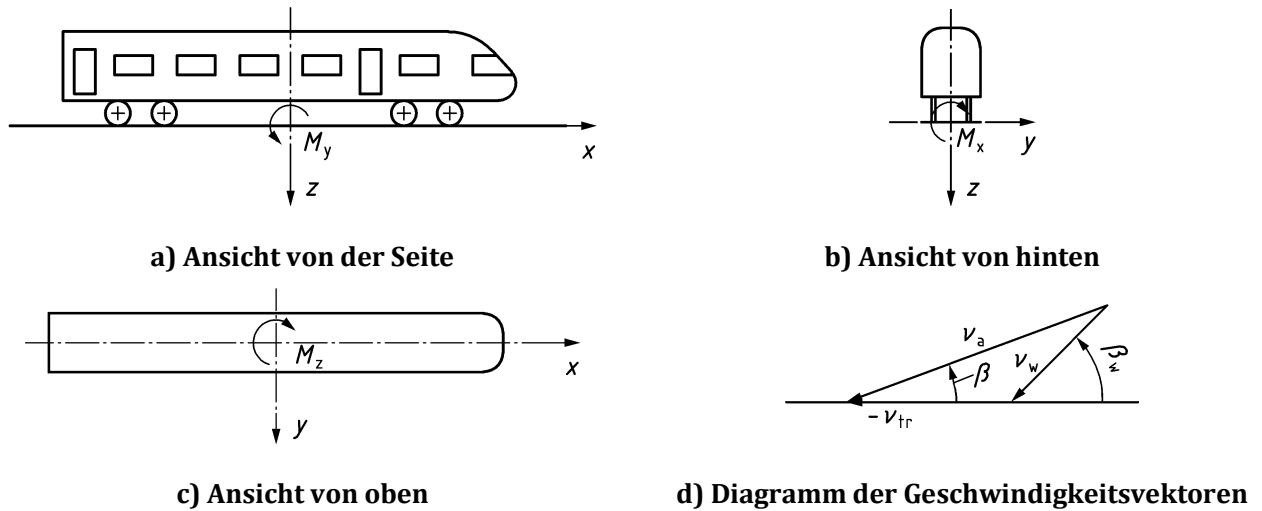


Bild 1 — Koordinatensystem

Anmerkung 2 zum Begriff: Ein positives β bedeutet, dass der scheinbare Wind v_a von rechts auf den Zug trifft.

3.3

leeseitige Schiene

Schiene auf der Seite der Spur, welche dem Wind abgewandt ist

4 Symbole und Abkürzungen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Symbole und Abkürzungen.

Tabelle 1 — Symbole und Abkürzungen

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
A	m^2	Bezugsfläche	
A_0	m^2	Vorgegebene Bezugsfläche	10 m^2
A^*	—	Konstante der Formel für σ_u	
$\tilde{A}$	—	Normierte Böen-Amplitude	
$\underline{A}_{ij}$	—	Rotationsmatrix von B_j zu B_i	
a	m	Drehgestellabstand	
a_{ij}	N	Radlasten	$i = 1, 2$: (vorne, hinten) $j = 1, 2$: (rechts, links)
a_m	s/m	Streuung	Aus der Extremwertanalyse von Windkanaldaten bestimmte Verteilung

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
a_q	m/s^2	Unausgeglichene Querbesehleunigung; entspricht dem Überhöhungsfehlbetrag	$a_q = \frac{v_{tr}^2}{R_c} - \frac{gH_{cant}}{2b_A}$
a_{q-max}	m/s^2	Höchstwert der unausgegleichenen Querbesehleunigung	
B_E	—	Versperrungsmaß eines Damms	Das Verhältnis der größten Modellhöhe des Damms zur freien Höhe des Windkanals
B_V	—	Versperrungsmaß eines Fahrzeugs	Das Verhältnis der gesamten Bezugsfläche des Modellfahrzeugs zur freien Querschnittsfläche des Windkanals
b	—	Beiwertfunktion von $\tilde{r}_g$	
b_A	m	1/2 Abstand der Radaufstandspunkte	Siehe 5.4.2.3
$b_{A,min}$	m	Mindestabstand der Radaufstandspunkte	
b_1	m	y-Position der rechten Feder der Sekundärfederung	
b_2	m	y-Position der linken Feder der Sekundärfederung	
C	—	Kohärenzfunktion der entstehenden Windgeschwindigkeit	
C_{90}	—	Kohärenzfunktion bei einem Einfallswinkel des Windes von 90°	
$C_{(z0)}$	—	Funktion der Rauigkeitslänge zur Definition des längslaufenden, integrierten Längenmaßes	
CWC		Windkennkurve	
CWC_i	m/s	Bewertung der stochastischen CWC-Windgeschwindigkeit	
c	m/s	Schallgeschwindigkeit	
c_{Fi}	—	Kraftbeiwert bezogen auf A_0	$c_{Fi} = \frac{2 \cdot F_i}{\rho \cdot v^2 A_0}, i = x, y, z$
c_M	—	Momentenbeiwert bezogen auf A_0 und d_0	$c_{Mi} = \frac{2 \cdot M_i}{\rho \cdot v^2 A_0 d_0}, i = x, y, z$
$c_{Mx,lee}$	—	Rollmomentenbeiwert um die leeseitige Schiene	
$\bar{c}_{Mx,lee}$	—	Mittlerer Rollmomentenbeiwert um die leeseitige Schiene	
$\hat{c}_{Mx,lee}$	—	Höchstwert des Rollmomentenbeiwerts um die leeseitige Schiene	
$c_{Mx,lee,bmk}$	—	Benchmark-Rollmomentenbeiwert um die leeseitige Schiene	Rollmomentenbeiwert aus Benchmark-Versuchen

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
$\hat{c}_{Mx,lee,bmk}$	—	Benchmark-Höchstwert des Rollmomentenbeiwerts um die leeseitige Schiene	
$c_{Mx,lee,test}$	—	Gemessene Prüfergebnisse für den Rollmomentenbeiwert um die leeseitige Schiene für ein Benchmark-Fahrzeug	
$\hat{c}_{Mx,lee,m}$	—	Höchstwert des Rollmomentenbeiwerts um die leeseitige Schiene ohne Bias-Korrektur	
$\bar{c}_{Mx,lee,m}$	—	Mittlerer gemessener Rollmomentenbeiwert um die leeseitige Schiene ohne Bias-Korrektur	
$c_{s\emptyset,i}$	Nm	Konstante der Torsionsfederung	
c_u	—	Beiwert basierend auf Cooper-Theorie	
c_v	—	Beiwert basierend auf Cooper-Theorie	
$c_{y,BGi}$	m	y-Position des Drehgestells i in lokalen Koordinaten (Schwerpunkt)	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$c_{z,BGi}$	m	z-Position des Drehgestells i in lokalen Koordinaten (Schwerpunkt)	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$c_{x,CB}$	m	x-Position des Fahrzeugwagenkastens in lokalen Koordinaten (Schwerpunkt)	
$c_{y,CB}$	m	y-Position des Fahrzeugwagenkastens in lokalen Koordinaten (Schwerpunkt)	
$c_{z,CB}$	m	z-Position des Fahrzeugwagenkastens in lokalen Koordinaten (Schwerpunkt)	
$c\theta$	—	$\cos(\theta_{Bi})$	
$c\Phi$	—	$\cos(\Phi_{Bi})$	
$c\Psi$	—	$\cos(\Psi_{Bi})$	
d	m	Charakteristische Länge	3 m
d_0	m	Vorgegebene Bezugslänge	3 m
$\underline{dr}_{kpi}$	m	Auslenkung der Primärfeder i	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{dr}_{cpj,i}$	m	Auslenkung der Primärfeder j	$j = 1$ (rechts), 2 (links). $i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{dr}_{csj,i}$	m	Auslenkung der Sekundärfeder j	$j = 1$ (rechts), 2 (links). $i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$d\emptyset_{cs,i}$	rad	Rotationswinkel der Wankstütze des Drehgestells	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
F_i	N	Aerodynamische Kraft	
$F_i(t)$	N	Aerodynamische Kraft	Zeitabhängige Variante von F_i
F_x F_y F_z	N	Aerodynamische Kräfte in Richtung der Koordinaten	
f	Hz	Windfrequenz	
f_{gust}	Hz	Charakteristische Böenfrequenz	
f_{BL}	—	Korrekturfaktor der Versperrung	Funktion von x_B
$\underline{f}_{\text{ci}}$	N	Federkraftvektor der Primär- und Sekundärfeder	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$f_{\text{ci},x}$	N	Federkraft der Primär- und Sekundärfeder in x-Richtung	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$f_{\text{ci},y}$	N	Federkraft der Primär- und Sekundärfeder in y-Richtung	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$f_{\text{ci},z}$	N	Federkraft der Primär- und Sekundärfeder in z-Richtung	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{f}_{\text{cpj},i}$	Nm	Primärfederungskonstante	$i = 1, 2$: (vorne, hinten) $j = 1, 2$: (rechts, links)
$\underline{f}_{\text{csj},i}$	Nm	Sekundärfederungskonstante	$i = 1, 2$: (vorne, hinten) $j = 1, 2$: (rechts, links)
f_{emb}	—	Beschleunigungsfaktor der Versperrung	
$\underline{f}_{\text{f},\text{Bi}}$	N	Federkraftvektor der Primär- und Sekundärfedern am Wagenkasten B_i	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$f_{\text{f},\text{Bgi}}$	N	Federungskraft am Drehgestell i	
$\underline{f}_{\text{f},\text{CB}}$	N	Federkraftvektor der Primär- und Sekundärfedern am Fahrzeugwagenkasten	
$f_{\text{f},\text{WSi}}$	N	Federungskraft am Radsatz i	
f_h	—	Funktion des Versperrungsmaßes eines Damms, B_E	
$f_{\Delta Q}$	—	Relativer windseitiger Radentlastungsfaktor	0,9
f_L	—	Funktion der Fahrzeuglänge	
f_m	—	Methodikfaktor	Zum Ausgleich von Unsicherheiten des Drei-Massen-Modells
$\underline{f}_{\text{m},\text{Bi}}$	N	Massenkraftvektor am Wagenkasten B_i	$i = 1$: vorderes Drehgestell,

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
			$i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{f}_{m,CB}$	N	Massenkraftvektor am Fahrzeugwagenkasten	
f_n	Hz	n-te Frequenz	$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{n\omega_0}{2\pi}$
f_{samp}	Hz	Frequenz der Datenerfassung	Die Abtastfrequenz (Rate) zur Erfassung von Daten im Windkanal
$\underline{f}_{total,Bi}$	N	Gesamtkraftvektor am Wagenkasten Bi	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{f}_{total,BGi}$	N	Gesamtkraftvektor am Drehgestell i	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{f}_{total,CB}$	N	Gesamtkraftvektor am Fahrzeugwagenkasten	
$\underline{f}_{total,WSi}$	N	Gesamtkraftvektor am Radsatz i	
f_u	—	Normierte Windfrequenz	
$\tilde{f}_u$	—	Normierte Windfrequenz basierend auf Cooper-Theorie	
$\hat{f}_u$	—	Normierte Windfrequenz basierend auf Cooper-Theorie	
$\tilde{f}_v$	—	Normierte Windfrequenz basierend auf Cooper-Theorie	
$\hat{f}_v$	—	Normierte Windfrequenz basierend auf Cooper-Theorie	
$\underline{f}_{Wi,CB}$	N	Windkraft am Fahrzeugwagenkasten	
G	—	Böenfaktor	
g	m/s ²	Fallbeschleunigung	
H	—	Admittanzfunktion der Cooper-Theorie	
H_{cant}	m	Überhöhungsbetrag	
h	m	Fahrzeughöhe	
h_2	m	Vertikale Position der Vektorkomponente	
h_{BL}	m	Grenzschichthöhe	
h_z	m	Höhe über dem Boden	
h_{z0}	m	Rauigkeitshöhe	
h_{VEH}	m	Fahrzeughöhe von Schienenoberkante bis Dach	
I_i	—	Turbulenzgrad für die Windkomponente in i -Richtung	$i = u, v, w$

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
$I_u(z)$	—	Turbulenzgrad	Standardabweichung der Windkanalgeschwindigkeit dividiert durch die mittlere Windkanalgeschwindigkeit jeweils in der Höhe z
k_p	N/m	Steifigkeit der Primärfeder	
k_s	N/m	Steifigkeit der Sekundärfeder	
$k_{\text{standstill}}$	—	Dimensionslose charakteristische Windgeschwindigkeit eines Fahrzeugs bei Stillstand	
k_v	—	Versperrungsfaktor eines Fahrzeugs	Korrekturfaktor, der auf die mittlere Windkanalgeschwindigkeit oder den Spitzenwert der Windkanalgeschwindigkeit angewandt wird, um die Auswirkungen der Einschränkung durch die Windkanalwände auf die lokale Strömung über dem Fahrzeug zu kompensieren
$\bar{k}_e$	—	Mittlerer Versperrungsfaktor des Winddamms	Korrekturfaktor, der auf die mittlere Windkanalgeschwindigkeit angewandt wird, um die Auswirkungen der Einschränkung durch das Windkanaldach auf die Strömung über dem Damm zu kompensieren
$\hat{k}_e$	—	Höchstwert des Versperrungsfaktors des Winddamms	Korrekturfaktor, der auf den Höchstwert der Windkanalgeschwindigkeit angewandt wird, um die Auswirkungen der Einschränkung durch das Windkanaldach auf die Strömung über dem Damm zu kompensieren
$\bar{k}_{Mx,bias}$	—	Mittlerer Bias-Korrekturfaktor	
$\hat{k}_{Mx,bias}$	—	Spitzenwert des Bias-Korrekturfaktors	
L	m	Fahrzeuglänge	
L_i	m	Verbundenes Turbulenzlängenmaß für die Windkomponente in i -Richtung	$i = u, v$
L_0	m	Bezugslänge	25 m
L_{VEH}	m	Längenparameter des Wagenkastens	Länge des Wagenkastens ohne Puffer und Wagenübergang
L_X	m	Turbulenzlängenmaß im Strom des Windkanals auf einer äquivalenten Höhe von 3 m	
$L_{X,FS}$	m	Turbulenzlängenmaß in Längsrichtung im 1:1-Maßstab	

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
r_{L_u}	—	Dimensionsloses verbundenes Längenmaß für die Windkomponente	
$^x L_i$	m	Integrales Längenmaß der Windgeschwindigkeitskomponente i in x-Richtung	$i = u, v, w$
$^x L_u$	m	Turbulenzlängenmaß	Turbulenzlängenmaß in der Kernströmung in x-Richtung
$^y L_u$	m	Turbulenzlängenmaß	
$^x L_v$	m	Turbulenzlängenmaß	
$^y L_v$	m	Turbulenzlängenmaß	
$^y L_i$	m	Integrales Längenmaß der Windgeschwindigkeitskomponente i in y-Richtung	$i = u, v, w$
$^x L_{u_FS}$	m	Turbulenzlängenmaß im 1:1-Maßstab	
L_u^y	m	Charakteristische Länge (räumliche Wellenlänge) der Böe	
$\tilde{L}_u$	—	Normiertes Turbulenzlängenmaß	
$\tilde{L}_v$	—	Normiertes Turbulenzlängenmaß	
Ma	—	Mach-Zahl: Verhältnis von Windgeschwindigkeit zu Schallgeschwindigkeit	$Ma = U/c$
M_{CoG}	Nm	Moment infolge der Querverschiebung des Schwerpunkts der gefederten Massen	
M_i	Nm	Aerodynamisches Moment	$i = x, y, z$
M_{la}	Nm	Moment durch unausgeglichene Querbeseleunigung	
M_m	Nm	Rückstellmoment aufgrund der Fahrzeugmassen	
M_x	Nm	Aerodynamisches Rollmoment	Siehe 3.3
$M_{x,lee}$	Nm	Rollmoment um die leeseitige Schiene	Auf der Oberseite der leeseitigen Schiene im Abstand b_A zum Mittelpunkt des Gleises
$\overline{M}_{x,lee}$	Nm	Mittleres Rollmoment	Das mittlere aerodynamische Rollmoment des Fahrzeugs um die leeseitige Schiene in einem Windkanal mit atmosphärischer Grenzschicht
$\hat{M}_{x,lee}$	Nm	Spitzenwert des Rollmoments	Eine statistische Schätzung des Spitzenwerts des aerodynamischen

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
			Rollmoments um die leeseitige Schiene, welcher bei einer festgelegten Wahrscheinlichkeit von Überschreitungen innerhalb einer bestimmten Zeitdauer auftreten würde
M_y	Nm	Aerodynamisches Nickmoment	Siehe 3.3
M_z	Nm	Aerodynamisches Wankmoment	Siehe 3.3
m	kg	(Bei der Bewertung von Seitenwind zu berücksichtigende) Fahrzeugmasse	Bezieht sich auf die Betriebsmasse des betriebsbereiten Fahrzeugs nach EN 15663, jedoch ohne Berücksichtigung von Verschleiß
m_0	kg	Ungefederte Massen	Bezieht sich auf die Betriebsmasse des betriebsbereiten Fahrzeugs nach EN 15663, jedoch ohne Berücksichtigung von Verschleiß
m_1	kg	Primär gefederte Massen	Bezieht sich auf die Betriebsmasse des betriebsbereiten Fahrzeugs nach EN 15663, jedoch ohne Berücksichtigung von Verschleiß
m_2	kg	Sekundär gefederte Massen	Bezieht sich auf die Betriebsmasse des betriebsbereiten Fahrzeugs nach EN 15663, jedoch ohne Berücksichtigung von Verschleiß
m_{Bi}	kg	Masse des Wagenkastens B_i	
$\bar{N}$	—	Anzahl der Bewertungen der stochastischen CWC	
n	Hz	Generische harmonische Komponente des Windgeschwindigkeitsspektrums	
$n_{\max}$	—	Anzahl der Harmonischen, welche bei der Seriendarstellung von $U_{TC}(t)$ berücksichtigt werden	
$P(\hat{U}_m)$	—	Kumulierte Wahrscheinlichkeit jedes Falles $\hat{U}_m$	
$Pr(T)$	—	Wahrscheinlichkeit einer Windböe der Dauer T Sekunden	
ΔQ	N	Radentlastung	
Q_{target}	N	Zielwert der Radentlastung	
Q_0	N	Mittlere statische Radaufstandskraft	
Q_{i1}	N	Q-Kräfte des entlasteten Rades des ersten Radsatzes des Drehgestells	
Q_{j1}	N	Q-Kräfte des entlasteten Rades des	

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
		zweiten Radsatzes des Drehgestells	
$Q_{1,WSi}$	N	Rad-Schienen-Kräfte	
$Q_{2,WSi}$	N	Rad-Schienen-Kräfte	
$\Delta Q/Q_0$	—	Relative Radentlastung	
R	mm	Radius des Bettungsrandes und Schienenbodens	
R_C	m	Kurvenradius	
Re	—	Reynolds-Zahl: Verhältnis von Massenträgheitskräften zu viskosen Kräften	$Re = \frac{U_{\text{test}} d}{\nu}$
Re_{max}	—	Maximale Reynolds-Zahl	Die in einem Windkanalversuch maximal erreichbare Reynolds-Zahl
r_0	m	z-Position des Radsatzes i in lokalen Koordinaten	
$\tilde{r}_g$	m	Dimensionsloser Trennungsabstand	
$\underline{r}_{CBi,Bi}$	m	Ortsvektor des Schwerpunkts des Wagenkastens i	
$\underline{r}_{CBi,I}$	m	Ortsvektor des Schwerpunkts des Wagenkastens i zum stationären globalen Bezugssystem	
$\underline{r}_{CBGi,BGi}$	m	Ortsvektor des Schwerpunkts des Drehgestells i	
$\underline{r}_{CCB,CB}$	m	Ortsvektor des Schwerpunkts des Wagenkastens	
$\underline{r}_{CP1,BGi}$	m	Ortsvektor der Primärfederung am Drehgestell i , rechte Feder	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{r}_{CP2,BGi}$	m	Ortsvektor der Primärfederung am Drehgestell i , linke Feder	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{r}_{CP1,WSi}$	m	Ortsvektor der rechten Primärfeder am Radsatz i	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{r}_{CP2,WSi}$	m	Ortsvektor der linken Primärfeder am Radsatz i	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{r}_{CS1,BGi}$	m	Ortsvektor der Sekundärfederung am Drehgestell i , rechte Feder	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{r}_{CS2,BGi}$	m	Ortsvektor der Sekundärfederung am Drehgestell i , linke Feder	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{r}_{CS1,BGi,CB}$	m	Ortsvektor am Wagenkasten der Sekundärfederung am Drehgestell i , rechte Feder	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
$\underline{r}_{CS2,BGi,CB}$	m	Ortsvektor am Wagenkasten der Sekundärfederung am Drehgestell i , linke Feder	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{r}_{CWSi,WSi}$	m	Ortsvektor des Schwerpunkts des Radsatzes i	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
S_{ii}	$m^2/s^2/Hz$	Windgeschwindigkeit, spektrale Leistungsdichte der i -Windgeschwindigkeitskomponente	$i = u, v, w$
S_t	—	Zeitmaßstab in Modellebene	Verhältnis des Zeitmaßstabs für das Modell zum Zeitmaßstab am Original
$S_u(n)$	$m^2/s^2/Hz$	Spektrale Leistungsdichte von u	n ist die Frequenz
SY_{WSi}	N	Summe der Y-Kräfte	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\tilde{S}_{uTuT}$	—	Dimensionslose Leistungsdichtenfunktion	
$\tilde{S}_{vTvT}$	—	Dimensionslose Leistungsdichtenfunktion	
$s\theta$	—	$\sin(\theta_{Bi})$	
$s\phi$	—	$\sin(\phi_{Bi})$	
$s\psi$	—	$\sin(\psi_{Bi})$	
T	s	Zeitdauer einer Böe	
$\bar{T}$	s	Mittlere Zeitkonstante einer Böe	
T_{samp}	s	Dauer der Datenerfassung	Aufnahmedauer der Datenerfassung
Tu_x	—	Turbulenzgrad	$Tu_x = (\overline{U(t)}^2 / \overline{U}_{test}^2)^{0,5}$
t	s	Zeit	
$\underline{t}_{cs,i}$	Nm	Momentvektor der Wankstütze	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{t}_{f,BGi}$	Nm	Torsionsfederungsmomente am Drehgestell i	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{t}_{f,CB}$	Nm	Torsionsfederungsmomente am Fahrzeugwagenkasten	
$\underline{t}_{f,WSi}$	Nm	Torsionsfederungsmomente am Radsatz i	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
t_i	s	Ereigniszeiten während des Chinesischen Hutes	$i = 1, 2..7$
$\underline{t}_{m,Bi}$	Nm	Massenkräfte am Wagenkasten i	
$\underline{t}_{m,CB}$	Nm	Massenkräfte am Fahrzeugwagenkasten	

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
$\underline{t}_{\text{total,Bi}}$	Nm	Gesamtmomentvektor am Wagenkasten i	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{t}_{\text{total,CB}}$	Nm	Gesamtmomentvektor am Fahrzeugwagenkasten	
$\underline{t}_{\text{total,BGi}}$	Nm	Gesamtmomentvektor am Drehgestell i	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{t}_{\text{total,WSi}}$	Nm	Gesamtmomentvektor am Radsatz i	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{t}_{\text{Wi,CB}}$	Nm	Windkräfte am Fahrzeugwagenkasten	
U	m/s	Windgeschwindigkeit	
$\overline{U}$	m/s	Mittlere Windkanalgeschwindigkeit	Mittlere Windkanalgeschwindigkeit nach Korrektur bezüglich der Versperrungseinflüsse. Für weitere Definitionen von U_{mean} siehe Anhang B und Anhang G.
U_{max}	m/s	Maximale Windgeschwindigkeit während des Chinesischen Hutes	
U_{mean}	m/s	Mittlere Windgeschwindigkeit	Bezogen auf 4 m Höhe über Grund stromaufwärts
U_{normal}	m/s	Senkrechte Windkomponente vor einem Damm	
U_{parallel}	m/s	Parallele Windkomponente vor einem Damm	
$U(t)$	m/s	Momentane Wind(kanal)geschwindigkeit	
u_{turb}	m/s	Turbulente Komponente der Windgeschwindigkeit entlang der mittleren Windrichtung	
$U_{\text{T}}(t)$	m/s	Windgeschwindigkeitskomponente senkrecht zur Gleisrichtung vom beweglichen Punkt aus	
$U_{\text{T}}(f_n)$	m/s	Generische Harmonische des Windgeschwindigkeitsspektrums S_{uTuT}	
$U_{\text{TC}}(t)$	m/s	Querkomponente der korrigierten Wind-Absolutgeschwindigkeit vom beweglichen $\overline{U}_{\text{raw}}$ -Punkt aus	
$U_{\text{TC}}(f_n)$	m/s	Generische Harmonische von $U_{\text{TC}}(t)$	
$\overline{U}_{\text{test}}$	m/s	Mittlere Windkanalgeschwindigkeit bei einer Prüfung	
$\overline{U}_{\text{m}}$	m/s	Unkorrigierter gemessener Mittelwert	

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
		der Windkanalgeschwindigkeit	
$\bar{U}_{e,m}$	m/s	Unkorrigierter gemessener Mittelwert der Windkanalgeschwindigkeit oberhalb eines Dammes	
$\bar{U}_{ref}$	m/s	Mittlere Windkanalreferenzgeschwindigkeit	Dient als Ziel bei der Prüfung; die tatsächliche Geschwindigkeit während einer Prüfung kann davon abweichen.
$\bar{U}_{FS}$	m/s	Mittlerer Wind im 1:1-Maßstab	
$\hat{U}_m$	m/s	Unkorrigierter Spitzenwert der Windkanalgeschwindigkeit	Spitzenwert der Windkanalgeschwindigkeit, bestimmt durch eine Lieblein-Analyse
$\hat{U}_{e,m}$	m/s	Unkorrigierter Spitzenwert der Windkanalgeschwindigkeit oberhalb des Damms	Eine statistische Schätzung des Spitzenwertes der gemessenen Windkanalgeschwindigkeit oberhalb des Damms, welcher bei einer festgelegten Wahrscheinlichkeit von Überschreitungen innerhalb einer bestimmten Zeitdauer auftreten würde
$\hat{U}_j$	m/s	Klassifizierte Spitzenwerte der Windkanalgeschwindigkeit	Ermittelt aus 12 Blöcken mit gleichwertigen Daten im Maßstab 1:1 über eine Dauer von je 10 Minuten, $j = 1, \dots, 12$
$\bar{U}_{m,z}$	m/s	Unkorrigiertes Mittel der Windkanalgeschwindigkeit auf Höhe z	Der mittlere Wert der gemessenen Windkanalgeschwindigkeit innerhalb einer Messdauer auf einer gleichwertigen Höhe z
$\bar{U}_{1,s}$	m/s	Durchschnittswert der Windkanalgeschwindigkeit über eine Sekunde	
u	m/s	Modus der $\hat{U}_j$ -Werte	Modus aus Extremwertanalyse von Windkanaldaten
$u(t)$	m/s	Schwankungen der Windgeschwindigkeit im Chinesischen Hut	
u_x	m/s	Windgeschwindigkeit der u -Komponente längs des Gleises (Böenmodellierung)	
u_y	m/s	Windgeschwindigkeit der u -Komponente quer zum Gleis (Böenmodellierung)	
V_{emb}	m/s	Windgeschwindigkeit an einem Damm	Wird für den Dammüberströmungseffekt verwendet
$V_{rel_TC}(t)$	m/s	Korrigierte relative Windgeschwindigkeit	
V_{rel}	m/s	Geschwindigkeit basierend auf Cooper-Theorie	

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
v_{turb}	m/s	Turbulente Komponente der Windgeschwindigkeit senkrecht zur mittleren Windrichtung	
$v_T(f_n)$	m/s	Generische Harmonische des Windgeschwindigkeitsspektrums S_{vTvT}	
$v_T(t)$	m/s	Windgeschwindigkeitskomponente entlang der Gleisrichtung vom beweglichen Punkt aus	
v_W	m/s	Windgeschwindigkeit	Windgeschwindigkeit gemessen am stationären Punkt
v_{W-90}	m/s	Windgeschwindigkeit senkrecht zum Gleis	
v_a	m/s	Relative Windgeschwindigkeit	Resultierende Windgeschwindigkeit am Fahrzeug
v_{max}	m/s	Maximale Zuggeschwindigkeit	
v_{tr}	m/s	Zuggeschwindigkeit	
w	—	Windvektor	auf x-y-Ebene
$w_{standstill}$	m/s	Charakteristische Windgeschwindigkeit eines Fahrzeugs zum Umkippen bei Stillstand	
x y z	m	Kartesische Koordinaten	Siehe 3.3 x : Nullpunkt liegt auf halbem Wege zwischen den Achsen der inneren Räder y : Nullpunkt liegt in der Gleismittellinie z : Nullpunkt liegt auf Schienenoberkante
X Y Z		Koordinaten-Achsen des Bezugssystems	
x_B	%	Versperrungsgrad für $\beta = 30^\circ$	Projizierte Seitenfläche der gesamten Modellkonfiguration zur Querschnittsfläche des Windkanals
x_{Bi}	m	x-Position des Wagenkastens i	
$\underline{x}$	m	Ortsvektor des Fünf-Massen-Modells des Fahrzeugsystems	
$\underline{x}_{Bi}$	m	Ortsvektor des Wagenkastens i	
$\underline{x}_{BGi}$		Ortsvektor des Drehgestells i	
$\underline{x}_{CB}$	m	Ortsvektor eines Fahrzeugwagenkastens	

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
$\underline{x}_{WSi}$	m	Ortsvektor eines Radsatzes i	
$\tilde{x}$	m	Räumlicher Abstand zur maximalen Böenamplitude	
y_B	m	(Maximale) Verschiebung des Radaufstandspunkts in Richtung des Spurkanzes	
y_{Bi}	m	y-Position des Wagenkastens i	
y_{BGi}	m	Verschiebung des Drehgestells i in y-Richtung	
y_{CB}	m	Verschiebung des Wagenkastens in y-Richtung	
y_1	m	Seitenverschiebung der Primärmasse	Siehe Bild 4
y_2	m	Seitenverschiebung der Sekundärmasse	Siehe Bild 4
z_{Bi}	m	z-Position des Wagenkastens i	
z_{BGi}	m	Verschiebung des Drehgestells i in z-Richtung	
z_{CB}	m	Verschiebung des Wagenkastens in z-Richtung	
z_{CoG}	m	Schwerpunkthöhe des gesamten Fahrzeugs	
$z_{CoG,0}$	m	Schwerpunkthöhe der ungefederten Massen	
$z_{CoG,1}$	m	Schwerpunkthöhe der primär gefederten Massen	
$z_{CoG,2}$	m	Schwerpunkthöhe der sekundär gefederten Massen	
β	°	Anströmwinkel	Winkel zwischen der Fahrzeugachse und dem relativ auf den Zug wirkenden Wind. In einem Windkanal mit unbeweglichem Zugmodell ist dies der Winkel zwischen der Zugachse und der Windkanalachse.
β_W	°	Windwinkel zum Gleis	Der Winkel zwischen Windrichtung und Vorwärtsrichtung des Zugs
β_{Wi}	°	Windwinkel zum Gleis aus Zerlegungsverfahren	
$\tilde{\beta}$	°	Modifizierter Anströmwinkel	
γ_{ii}	—	Quadratwurzel der Kohärenzfunktion der i -Windgeschwindigkeitskomponente	$i = u, v, w$
$\delta_{99\%}$	m	Grenzschichtdicke	z-Koordinate, bei der die lokale Geschwindigkeit 99 % der freien

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
			Strömungsgeschwindigkeit ist
Δn	Hz	Frequenzauflösung	1/300 Hz
Δt	s	Äquivalente Zeit in der atmosphärischen Grenzschicht eines Windkanals bei 1 s im Maßstab 1:1	
Δv_{tr}	m/s	Abstufung der Zuggeschwindigkeit	
ε_{max}	—	Maximaler Toleranz-Zielwert	
ε_{mean}	—	Mittlerer Toleranz-Zielwert	
θ_{Bi}	rad	Rotationswinkel des Wagenkastens i um die y-Achse	
θ_{CB}	rad	Rotationswinkel des Fahrzeugwagenkastens um die y-Achse	
κ	—	Kármán-Konstante	0,4
ν	m ² /s	Kinematische Viskosität	
ρ	kg/m ³	Luftichte der Windkanalprüfung	
ρ_0	kg/m ³	Referenzluftdichte	$\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$
$\sum m$	Nm	Gleichgewichtsmoment um die leeseitige Schiene	
σ	m/s	Standardabweichung der stochastischen CWC-Windgeschwindigkeit	
σ_u	m/s	Standardabweichung der Geschwindigkeitskomponente u -Wind	
σ_v	m/s	Standardabweichung der Geschwindigkeitskomponente v -Wind	
Φ_{Bi}	rad	Rotation des Wagenkastens i um die z-Achse	
Φ_{CB}	rad	Rotation des Fahrzeugwagenkastens um die z-Achse	
Ψ_{Bi}	rad	Rotation des Wagenkastens i um die x-Achse	
Ψ_{CB}	rad	Rotation des Fahrzeugwagenkastens um die x-Achse	
Ψ_{Bgi}	rad	Rotation des Drehgestells i um die x-Achse	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
ω_0	1/s	Grundfrequenz	

5 Verfahren und Anforderungen zur Bewertung der Seitenwindstabilität von Fahrzeugen

5.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt stellt mehrere Verfahren zur Bewertung der Seitenwindstabilität von Fahrzeugen vor.

Das Grundprinzip beruht darauf, dass die Seitenwindstabilität von Fahrzeugen durch charakteristische Windgeschwindigkeiten gegeben ist, denen die Fahrzeuge standhalten können, ohne dass bestimmte Grenzwerte der Radentlastung überschritten werden. Wenn diese charakteristischen Windgeschwindigkeiten für variierende Parameter wie Zuggeschwindigkeiten, unausgeglichene Querbeschleunigungen oder Winkel des Windes zum Gleis ermittelt werden, wird der resultierende Satz aus charakteristischen Windgeschwindigkeiten als Windkennkurven (CWC) bezeichnet.

Die Seitenwindstabilität eines Zugs ist durch die Seitenwindstabilität des seitenwindempfindlichsten Fahrzeugs im Zugverbund gegeben. Die Argumentation muss unter Berücksichtigung aerodynamischer Parameter und der wesentlichen Fahrzeugparameter erfolgen.

Es wird beachtet, dass die CWC die Seitenwindstabilität eines Zugs in Bezug zu einem charakteristischen Zustand der vertikalen Radkräfte kennzeichnen; die Windkennkurven kennzeichnen nicht eine Kippgrenze.

Die CWC definieren die maximalen Windgeschwindigkeiten in einer bestimmten Richtung zum Gleis, denen ein bestimmter Zug in einem Fahrgeschwindigkeitsbereich standhalten kann, ohne dass eine charakteristische Grenze der Radentlastung überschritten wird. Das Kriterium, das die CWC festlegt, ist die gemittelte Radentlastung ΔQ des kritischsten Fahrwerks. Der Begriff „gemittelt“ bedeutet, dass im Fall von Drehgestellen die Radentlastung über die Radsätze des Drehgestells gemittelt wird. Zur relativen Bewertung der Seitenwindstabilität von Fahrzeugen wird die Referenzluftdichte ρ_0 auf $1,225 \text{ kg/m}^3$ festgelegt. Die zu berücksichtigende Fahrzeugmasse ist als „Betriebsmasse des betriebsbereiten Fahrzeugs“ nach EN 15663 festgelegt, außer wenn verlangt wird, ohne Berücksichtigung von Verschleiß (z. B. Scheiben, Bremsbeläge, Räder usw.) zu rechnen.

Die Bewertung der Seitenwindstabilität von Fahrzeugen unterteilt sich in die Beurteilung der aerodynamischen Charakteristika (d. h. der aerodynamischen Beiwerte) und der fahrzeugdynamischen Eigenschaften.

5.2 gibt die Anwendbarkeit der verschiedenen Verfahren zur Fahrzeugbewertung an.

5.3 beinhaltet verschiedene Verfahren zur Bestimmung der aerodynamischen Beiwerte von Personen- und Güterfahrzeugen sowie Lokomotiven.

5.4 beinhaltet verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Radentlastung.

5.5 behandelt die erforderliche Darstellung von Windkennkurven für Personen- und Güterfahrzeuge sowie für Lokomotiven.

5.6 beinhaltet die Anforderungen an Fahrzeuge.

5.2 Anwendbarkeit von Verfahren zur Bestimmung der Seitenwindstabilität für die Fahrzeugbewertung

5.3 und 5.4 beinhalten verschiedene Verfahren zur Bewertung der aerodynamischen und der fahrzeugdynamischen Eigenschaften. Allgemein unterteilen sich diese Verfahren in einfache und komplexe Verfahren. Die einfacheren Verfahren sind leichter anzuwenden, enthalten aber einen zusätzlichen Unsicherheitszuschlag, da sie im Vergleich zu den komplexeren Verfahren konservativ ausgelegt sind.

Tabelle 2 gibt an, welches Verfahren für die Fahrzeugbewertung in Abhängigkeit von dem Fahrzeugtyp und der maximalen Geschwindigkeit dieses Fahrzeugtyps $v_{\max}$ anzuwenden ist.

Wenn verschiedene Verfahren zulässig sind, hängt die Wahl des anzuwendenden Verfahrens von dem benötigten Genauigkeitsgrad bei der Problemlösung ab. Allgemein ist es jedoch vernünftig, mit den einfachsten geeigneten Verfahren zu beginnen und, falls erforderlich, zu komplexeren Verfahren zu wechseln.

Alle Fahrzeuge sind mit einem der in Tabelle 2 festgelegten Verfahren zu bewerten.

Bei einem festen Zugverband genügt es, nur die Seitenwindstabilität des seitenwindempfindlichsten Fahrzeugs im Zugverband nachzuweisen. Anderenfalls muss die Seitenwindstabilität jedes Fahrzeugs nachgewiesen werden.

Tabelle 2 — Anwendbarkeit von Verfahren zur Bestimmung der Seitenwindstabilität für die Fahrzeugbewertung

	Personenfahrzeuge sowie Lokomotiven			Güterwagen	
Geschwindigkeitsbereich	$v_{\max} \leq 140 \text{ km/h}$	$140 \text{ km/h} < v_{\max} \leq 200 \text{ km/h}$	$200 \text{ km/h} < v_{\max} \leq 360 \text{ km/h}^a$	$v_{\max} \leq 80 \text{ km/h}$	$80 \text{ km/h} < v_{\max} \leq 160 \text{ km/h}$
Vereinfachter Nachweis der Seitenwindstabilität	Ja ^b	Ja, 5.3.2 und 5.4.2 oder 5.3.3 und 5.4.2 oder 5.3.3 und 5.4.3 oder 5.3.4 und 5.4.2 <u>Einschränkungen:</u> 5.3.2 nicht auf Züge mit aktiver Neigetechnik anwendbar 5.4.2 nicht auf Gliederzüge anwendbar	Ja, 5.3.4 und 5.4.2 <u>Einschränkungen:</u> 5.4.2 nicht auf Gliederzüge anwendbar	Ja ^b	Ja, 5.3.2 und 5.4.2 oder 5.3.3 und 5.4.2
Vollständiger Nachweis der Seitenwindstabilität	Nein	Ja, 5.3.4 und 5.4.3 oder 5.3.4 und 5.4.4	Ja, 5.3.4 und 5.4.3 oder 5.3.4 und 5.4.4	Nein	Ja, 5.3.4 und 5.4.2 oder 5.3.4 und 5.4.3
^a Bei Geschwindigkeiten über 360 km/h müssen die Verfahren unter Berücksichtigung von Kompressibilitätseffekten angepasst werden. ^b Regelt durch nationale Anforderungen (für weitere Information siehe Anhang K).					

Anhang A zeigt auf, wie diese Verfahren für Seitenwindstabilitätsuntersuchungen in verschiedenen europäischen Ländern in der Praxisanwendung kombiniert werden.

5.3 Bestimmung der aerodynamischen Beiwerte

5.3.1 Allgemeines

Zur Bestimmung der aerodynamischen Lasten auf Personen- oder Güterfahrzeuge stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Daten aus statischen Windkanalversuchen sind häufig Bestandteil des Nachweises, dass das Fahrzeug vorgegebene Spezifikationen oder Anforderungen der Fahrzeugbewertung erfüllt. Aus CFD-Simulationen gewonnene Daten werden häufig für Machbarkeitsstudien im frühen Fahrzeugentwicklungsprozess genutzt. Daten aus Vorhersageformeln werden im Allgemeinen für eine erste Analyse verwendet. Die nachfolgenden Unterabschnitte beschreiben, wie diese Verfahren angewandt werden müssen. Ihre Anwendbarkeit für die Fahrzeugbewertung ist in Tabelle 2 angegeben.

5.3.2 Vorhersageformel

Die Vorhersageformel darf nur mit folgenden Einschränkungen benutzt werden:

ANMERKUNG 1 Das Verfahren ist nicht gültig für Fahrzeuge, die in ihrer Form stark von gegenwärtigen Fahrzeugen abweichen.

- Das Verfahren ist nicht gültig für führende Fahrzeuge mit Längen L größer als 28 m oder kleiner als 10 m;
- Das Verfahren ist nicht gültig, falls der/die dem untersuchten Mittelwagen vorauslaufende(n) Fahrzeuge eine Gesamtlänge von weniger als 10 m besitzt/besitzen;
- Das Verfahren ist nur für Schienenfahrzeuge mit einer maximalen halben Breite von 1 700 mm gültig.

ANMERKUNG 2 Spurweiten von Schienenfahrzeugen, z. B. G1, GA, GB, GC, DE3, GHE16, GEA16, GEB16, GEC16 und FIN1 in Übereinstimmung mit EN 15273 (alle Teile) entsprechen der maximalen halben Breite von 1 700 mm.

Die Formel ist bewusst konservativ und wird daher die Windlasten überschätzen. Das Verfahren sagt die Windlast auf ein Fahrzeug unter Verwendung des Rollmomentenbeiwerts um die leeseitige Schiene voraus. Dies stellt eine Abweichung von der Definition des Rollmoments nach 3.3 dar, wo die Gleismitte die Momentbezugsachse ist. Der hier verwendete Rollmomentenbeiwert um die leeseitige Schiene wird aus den physikalischen Abmessungen des Fahrzeugs abgeschätzt.

Die Vorhersageformel erlaubt es, die Windlast wie folgt zu berechnen:

$$c_{Mx,lee}(\beta) = \frac{(z_0 + z_1 \cdot \tilde{\beta} + z_2 \cdot \tilde{\beta}^2 + z_3 \cdot \tilde{\beta}^3) \cdot h_{VEH}^2 \cdot L_{VEH} \cdot f_L \cdot f_{VEH} \cdot z_4}{A_0 \cdot d_0} \quad (1)$$

Dabei ist: $\tilde{\beta} = |\arctan[z_5 \cdot \tan(\beta)]|$

wobei die Parameter $z_0, z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, f_L$, und f_{VEH} gegeben sind (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3 — Parameter für die Standard-Bodenkonfiguration (Normalspur)

Parameter	Vorauslaufende Endwagen und Lokomotive	Mittel-Personenwagen	Güterfahrzeug
z_0	0		Für $0^\circ \leq \beta \leq 40^\circ$: $z_0 = 0$ Für $\beta > 40^\circ$: $z_0 = 0,55$
z_1	$4,3 \cdot 10^{-3}$ pro Grad		Für $0^\circ \leq \beta \leq 40^\circ$: $z_1 = 0,013\,75$ Für $\beta > 40^\circ$: $z_1 = 0$
z_2	$2,2 \cdot 10^{-4}$ pro Quadratgrad		0
z_3	$-2,1 \cdot 10^{-6}$ pro Grad		0
z_4	1,2		1
z_5	1,2		1
f_L	$f_L = 0,3 \cdot \frac{L_0}{L_{VEH}} + 0,75$ mit $L_0 = 25\text{ m}$	1	1
f_{VEH}	1	0,75	1
A_0	10 m^2		
d_0	3 m		
ANMERKUNG Die Faktoren z_1, z_2, z_3 beziehen sich auf Winkel in Grad.			

5.3.3 Numerische Strömungssimulation (CFD)

5.3.3.1 Allgemeines

Der hauptsächliche Einsatzzweck von CFD ist die Bestimmung der maßgeblichen aerodynamischen Lasten zur Ermittlung der mechanischen Stabilität eines kritischen Fahrzeugs. Die aerodynamischen Lasten, die für diese Untersuchung benötigt werden, sind im Allgemeinen Seiten- und Auftriebskräfte zusammen mit Roll-, Nick- und Wankmomenten. Zusätzlich liefert CFD eine Prognose für die Geschwindigkeits- und Druckfelder und ermöglicht eine einfache Betrachtung unterschiedlicher Konfigurationen.

Der hier beschriebene Ansatz ist ähnlich dem Ansatz, der für Windkanalversuche im reduzierten Maßstab empfohlen wird (siehe 5.3.4), insofern, dass ein stationärer Zug und ein blockförmiges Strömungsprofil mit geringer Turbulenz als Eingangsströmung verwendet werden müssen.

Die Umströmung des Fahrzeugs wird im Allgemeinen durch folgende Eigenschaften bestimmt: Dreidimensionalität, hohe Reynolds-Zahl, Turbulenz, Verzögerung und Beschleunigung, gekrümmte Wände, Strömungsablösung, mögliche Wiederanlegung, Rückströmung und Verwirbelung. Die vollständige Lösung dieses aerodynamischen Problems kann nur durch DNS (en: Direct Numerical Simulation) der Navier-Stokes-Formeln ermittelt werden; dies ist in der Praxis durch Rechnerkapazitäten stark eingeschränkt. Näherungslösungen können durch Turbulenzmodellierung entsprechend folgenden Ansätzen erhalten werden: LES (en: Large Eddy Simulation), DES (en: Detached Eddy Simulation), RANS (en: Reynolds-Averaged Navier-Stokes).

Die Umströmung eines Fahrzeugs ist von Natur aus instationär und variiert mit der Geometrie und dem Anströmwinkel. RANS-Verfahren sind im Rahmen dieser Untersuchungen jedoch ausreichend genau. Ein üblicherweise verwendetes Verfahren, die Stationarität der Strömung zu überprüfen, ist der Nachweis, dass sich die Residuen um drei bis vier Größenordnungen verringert haben und die relevanten Lasten mit vernachlässigbaren Schwankungen konvergiert sind.

Die größte Herausforderung beim Einsatz von CFD ist eine der Aufgabenstellung angemessene Wahl der geeigneten Kombination von Rechengitter, Rechenverfahren und Turbulenzmodell. Ein Vorteil von CFD ist, dass Versperrungseffekte durch Verwendung eines ausreichend großen Gebiets verringert werden können, ohne die Reynolds-Zahl oder die Mach-Zahl zu beeinträchtigen.

5.3.3.2 Benchmark-Versuche

Zum Nachweis der Eignung des CFD-Ansatzes müssen Berechnungen für mindestens ein vorgegebenes Benchmark-Fahrzeug (siehe 5.3.4.2 und Anhang C) in ähnlicher Weise wie zur Überprüfung von Windkanalmessungen in 5.3.4.2 beschrieben durchgeführt werden. Die berechneten Ergebnisse müssen mit den Werten des Benchmark-Fahrzeugs verglichen werden, die in Windkanalmessungen ermittelt wurden. Die in 5.3.4.2 festgelegten Qualitätskriterien sind anzuwenden.

5.3.3.3 Fahrzeugmodell

Die Darstellung des untersuchten Fahrzeugmodells und der angrenzenden Fahrzeugmodelle muss bezüglich der Übergänge zwischen den Fahrzeugen, der Fahrzeuglängen und der Modellgenauigkeit den Modellen für Windkanalversuche entsprechen (siehe 5.3.4.8 und 5.3.4.9).

Der Kontakt der Räder zu Schiene oder Boden darf vereinfacht dargestellt werden, z. B. durch das Hinterschneiden des Rades, um numerische Singularitäten im Radaufstandspunkt zu vermeiden.

5.3.3.4 Rechengebiet

Die Modellmaße dürfen entweder im 1:1-Maßstab oder im Modell-Maßstab sein. Letzterer kann aus praktischer Hinsicht vorteilhaft sein, wenn die Ergebnisse irgendwann mit Ergebnissen von Windkanalversuchen verglichen werden.

Die Grenzen des Rechengebiets dürfen mit dem Strömungsfeld des Fahrzeugs nicht in physikalisch inkorrekt Weise interferieren.

Für den Versperrungsgrad gelten die Anforderungen nach 5.3.4.7.

Das Rechengebiet muss sich in Strömungsrichtung im Verhältnis zum betrachteten Fahrzeug mindestens 8 charakteristische Höhen vor dem vorderen Fahrzeugende und 16 charakteristische Höhen ab dem vorderen Fahrzeugende stromabwärts ausdehnen. Die charakteristische Höhe ist definiert als der Abstand zwischen dem höchsten Punkt des Zugs und dem Boden; beispielsweise ist beim Modellieren eines Damms diese Höhe die Höhe des Damms einschließlich Gleis und Schotter zuzüglich der Höhe des Zugs.

5.3.3.5 Rechengitter

Das Rechengitter muss den grundlegenden Anforderungen, entsprechend dem gewählten Rechenverfahren und Turbulenzmodell, an die Zellgrößen in der Nähe von reibungsbehafteten Wänden genügen. Bei RANS-Simulation liegt der dimensionslose Wandabstand y^+ für die erste Zellschicht typischerweise bei Verwendung eines Low-Reynolds-Turbulenzmodells in der Größenordnung von 1 und bei Verwendung eines High-Reynolds-Turbulenzmodells mit Wandfunktionen zwischen 30 und 150.

Das Rechengitter sollte Strömungsbereiche mit großen Druck-/Geschwindigkeitsgradienten wie z. B. Grenzschichten, Wirbelstrukturen, Staugebiete, Rezirkulationszonen, Nachlauf, Strömungsbeschleunigung darstellen.

Die Auslegung des Rechengitters sollte für die verschiedenen Anströmwinkel-Berechnungen im Hinblick auf Größe und Verteilung der Zellen so unverändert wie möglich bleiben. Die Lage und die Größe von Gebieten mit relativ hoher Auflösung müssen unter Umständen verändert werden. Es muss eine ausreichende Anzahl von Gitterpunkten zwischen dem Fahrzeug und den Grenzschichten verwendet werden.

Die Unabhängigkeit vom Rechengitter ist für das untersuchte Fahrzeug durch Änderung der Auflösung mindestens in den Bereichen hoher Gradienten mit mindestens zwei Verfeinerungsstufen nachzuweisen. Die Auflösung des Gitters muss sich um den Faktor 1,5 in jede räumliche Richtung in den Bereichen unterscheiden, in denen große Geschwindigkeitsgradienten festgestellt wurden. Die Ergebnisse der drei Gitternetze müssen im Hinblick auf die Strömungstopologie und die Kraftbeiwerte eine gute Übereinstimmung aufweisen. Der Rollmomentenbeiwert um die leeseitige Schiene muss, bezogen auf die drei Verfeinerungsstufen, für Anströmwinkel zwischen 10° und 50° eine Genauigkeit von 3 % haben. Als Ergebnis muss der größte Wert bei jedem Anströmwinkel verwendet werden.

5.3.3.6 Rechenverfahren

Das Rechenverfahren muss viskose, turbulente, instationäre, dreidimensionale und stark abgelöste Strömungen modellieren können. Die Verwendung stationärer Verfahren ist jedoch zulässig, wenn die Stationarität der Strömung erwiesen ist.

Die Grundlage der meisten Verfahren ist die Kontinuitätstheorie mit den Momentenformeln (Navier-Stokes-Formeln), aber Verfahren auf der Grundlage der kinetischen Gastheorie (Lattice-Boltzmann-Formeln) dürfen auch verwendet werden.

5.3.3.7 Turbulenzmodellierung

Turbulenzmodelle sind technische Annahmen zur Vorhersage von turbulenten Spannungen. Diese Spannungen entstehen als Ergebnis der Mittelung oder Filterung der nichtlinearen Konvektionsterme in den maßgebenden Strömungsformeln. Sie können als zusätzliche Viskosität betrachtet werden, die bei turbulenten Strömungen manchmal mehrere Größenordnungen größer als die molekulare Viskosität sind. Es gibt jedoch kein allgemeingültiges Turbulenzmodell.

Die Berechnungen müssen einen Sensitivitätstest beinhalten, der die am besten geeigneten Turbulenzmodelle verwendet. Wenn die Ergebnisse nicht eindeutig sind, sind stattdessen Windkanalversuche zu verwenden.

Üblicherweise verwendete Turbulenzmodelle sind k - ε - und k - ω -Modelle. Diese Modelle sind jedoch dafür bekannt, eine übermäßige Wirbelzähigkeit zu erzeugen, die zu einer Unterschätzung der Rückströmungsbereiche und einer Unterdrückung der Strömungsablösung führen könnten. Daher sind diese Modelle mit Bedacht zu verwenden.

Andere Ansätze, die mehr Rechenleistung erfordern können, existieren und sind Teil von laufenden Forschungsaktivitäten.

5.3.3.8 Randbedingungen

Um mit den Anforderungen nach 5.3.4.4 bezüglich Windkanalmessungen übereinzustimmen, muss das Anströmprofil unmittelbar vor dem relevanten Fahrzeug gleichförmig, d. h. ein Blockprofil, sein.

Die Auslass-Randbedingung muss zur betrachteten Zugkonfiguration passen, z. B. Randbedingung für konstanten Druck oder Massenerhaltung.

Die Oberflächen des Zugs sind als reibungsbehaftete Wände zu behandeln.

Der Boden darf unbewegt sein oder sich mit relativer Geschwindigkeit im Verhältnis zur Fahrzeuggeschwindigkeit bewegen.

Die Randbedingungen für die obere und seitliche Begrenzung des Rechengebiets müssen der betrachteten Zug- und Anströmwinkelkonfiguration angemessen sein.

5.3.3.9 Reynolds-Zahl

Die Reynolds-Zahl „ Re “ wird gebildet aus der Strömungsgeschwindigkeit am Einlass und mit einer charakteristischen Länge von 3 m (im 1:1-Maßstab) berechnet. Sie darf nicht kleiner sein als die in 5.3.4.5 festgelegte Reynolds-Zahl für Windkanalmessungen.

5.3.3.10 Anforderungen an das Versuchsprogramm

Siehe 5.3.4.11 und 5.3.4.12.

5.3.3.11 Interpolation der Daten

Siehe 5.3.4.13.

5.3.3.12 Dokumentation

Die Übereinstimmung mit allen in 5.3.3 definierten Anforderungen muss dokumentiert werden.

5.3.4 Windkanalversuche im reduzierten Maßstab

5.3.4.1 Allgemeines

Der Zweck der Windkanalversuche ist es, die Bestimmung der aerodynamischen Kraft- und Momentenbeiwerte der Fahrzeuge einschließlich des Rollmomentenbeiwerts um die leeseitige Schiene zu ermöglichen. Dieser spezifische Beiwert ist die dimensionslose Form des Moments, das durch Wind im 1:1-Maßstab induziert wird und um die Kontaktlinie zwischen Rädern und leeseitiger Schiene wirkt. Es ist hauptsächlich dieses Moment, das die windzugewandten Räder bei starkem Wind entlastet und im Grenzfall ein Umkippen eines Fahrzeugs verursachen könnte.

Die hier beschriebene Art von Windkanalversuchen verwendet statische Zugmodelle in einer gleichförmigen Anströmung niedriger Turbulenz.

In der Regel liegen am Original kein blockförmiges Strömungsprofil und kein geringer Turbulenzgrad vor, dennoch sind diese im Windkanal gefordert, da sie verlässlichere und reproduzierbarere Versuche erlauben als komplexere Strömungssimulationen. Ein einfaches blockförmiges Strömungsprofil, mit Ausnahme der dünnen Grenzschicht am Boden, stellt reproduzierbarere Bedingungen zwischen verschiedenen Windkanälen sicher.

ANMERKUNG 1 Für die Grenzschichtbeeinflussung sind in Windkanälen verschiedene Techniken verfügbar, z. B. haben sich rollender Boden, Grenzschichtabsaugung, Wandstrahleinblasung oder Trennplatte bewährt.

Diese Art von Windkanaluntersuchung ist gewissermaßen eine Vereinfachung komplexerer Versuche, die bewegte Modelle zur Simulation der Fahrt eines Zugs in der atmosphärischen Grenzschicht einsetzen. Diese komplexeren Versuche benötigen weitere Forschungsarbeit, bevor sie als Standard angesehen werden können. Anforderungen an Windkanaluntersuchungen mit nicht bewegten Modellen in atmosphärischer Grenzschicht sind in Anhang G beschrieben.

ANMERKUNG 2 Die Simulation von Verschiebungen im Untergrund, die den Anforderungen von 5.3.4.11 entspricht, ist technisch schwierig zu erreichen.

Es ist zulässig, verschiedene Arten von Windkanälen zu benutzen. Die Details des verwendeten Windkanals sind nach EN 14067-4 zu beschreiben.

5.3.4.2 Benchmark-Versuche

Windkanaluntersuchungen im Rahmen des Bewertungsprozesses für Fahrzeuge müssen Versuchsergebnisse für spezifizierte Benchmark-Fahrzeuge beinhalten. Für andere Windkanaluntersuchungen werden Versuche an spezifizierten Benchmark-Fahrzeugen empfohlen. Sofern Benchmark-Versuche im Windkanal durchgeführt werden, muss zumindest eines der drei Benchmark-Fahrzeugmodelle für den führenden ICE-3-Endwagen, den TGV-Duplex-Triebkopf oder den ETR-500-Triebkopf einzusetzen (siehe Anhang C).

Ergebnisse der Benchmark-Versuche im Windkanal müssen für den im Wesentlichen selben Versuchsaufbau wie für das zu untersuchende Fahrzeug zur Verfügung stehen. Die Versuche für das neue Fahrzeug sollten unter Nutzung derselben Techniken, Konfigurationen, Anströmbedingungen, und Ausrüstung wie für die Benchmark-Versuche durchgeführt werden. Die Benchmark-Versuche müssen wiederholt werden, wenn sich Änderungen am Windkanalversuchsaufbau ergeben (z. B. Windkanal, Reynolds-Zahl, Bodenkonfiguration, Bodenmodell, Windkanalwaage, Grenzschichteigenschaften usw.).

Die am Benchmark-Fahrzeug gemessenen Versuchsergebnisse $c_{Mx,lee,test}$ sind mit den Referenzwerten des gleichen Benchmark-Fahrzeugs $c_{Mx,lee,bmk}$ (siehe Anhang C) zu vergleichen, um zu bestimmen, ob die Ergebnisse der Windkanalversuche innerhalb der geforderten Toleranzen liegen. Aufgrund der Unterschiede zwischen verschiedenen Windkanälen und Versuchsaufbauten wird keine exakte Übereinstimmung erwartet. Die geforderten Toleranzen für Versuche mit geringer Turbulenz sind:

$$\max \left(\left| \frac{c_{Mx,lee,test} - c_{Mx,lee,bmk}}{c_{Mx,lee,bmk}} \right| \right) < \varepsilon_{\max} \quad (2)$$

$$\text{mean} \left(\left| \frac{c_{Mx,lee,test} - c_{Mx,lee,bmk}}{c_{Mx,lee,bmk}} \right| \right) < \varepsilon_{\text{mean}} \quad (3)$$

Im für CWC-Berechnungen relevanten Anströmwinkelbereich haben sich $\varepsilon_{\max} = 0,15$ und $\varepsilon_{\text{mean}} = 0,1$ als geeignete Zielwerte für die Toleranzen herausgestellt.

Wenn die Ergebnisse innerhalb dieser Toleranzen liegen, wird die Versuchstechnik als eine geeignete Grundlage erachtet, um die geforderten Resultate abzuleiten. Wird jedoch eine der Toleranzen nicht erreicht, muss der Versuchsaufbau im Hinblick auf die Einhaltung der Zieltoleranzen modifiziert werden.

5.3.4.3 Turbulenzgrad

Bei den Windkanaluntersuchungen darf die turbulente atmosphärische Grenzschicht nicht abgebildet werden. Es ist notwendig, einen Turbulenzgrad $Tu_x \leq 0,025$ sicherzustellen. Dabei ist:

$$Tu_x = \left(\overline{u'^2} / \bar{u}^2 \right)^{0,5} \quad (4)$$

wobei u die Geschwindigkeitskomponente in Strömungsrichtung ist.

5.3.4.4 Grenzschicht

Das Windkanalgeschwindigkeitsprofil muss ein gleichförmiges Profil, d. h. Blockprofil, besitzen. Die Strömungsgeschwindigkeit muss, mit Ausnahme einer dünnen Grenzschicht am Windkanalboden, unabhängig von der Höhe über dem Boden sein. Die Grenzschichtdicke $\delta_{99\%}$ muss in der Rotationsachse der Drehscheibe kleiner als 30 % der Fahrzeughöhe sein. Die Grenzschichtdicke und das Geschwindigkeitsprofil müssen ohne das Zug- und ohne das Bodenmodell bestimmt werden.

5.3.4.5 Reynolds-Zahl

Die sich aus der Strömungsgeschwindigkeit des Windkanals und der charakteristischen Länge von 3 m (dividiert durch den Modellmaßstab) ergebende Reynolds-Zahl Re muss größer als $2,5 \times 10^5$ sein, um die Ähnlichkeit der Strömungen am Modell und am Original sicherzustellen. Es muss geprüft werden, dass die Ergebnisse annähernd Reynolds-Zahl-unabhängig sind. Zumindest müssen die c_{Mxlee} -Werte für mindestens eine Konfiguration jedes untersuchten Fahrzeugs im Bereich $[0,6 Re_{max}, Re_{max}]$ dokumentiert werden.

5.3.4.6 Mach-Zahl

Im Allgemeinen darf die Mach-Zahl nicht größer sein als 0,3. Wenn jedoch der echte Zug bei Mach-Zahlen über 0,3 betrieben wird, dann darf die Mach-Zahl nicht größer sein als die Mach-Zahl des tatsächlichen Zugs.

5.3.4.7 Versperrung

Das Versperrungsmaß x_B ist definiert für einen Anströmwinkel von 30° . Es wird aus dem Verhältnis der projizierten Seitenfläche der gesamten Modellkonfiguration (Zugmodell plus Damm, falls vorhanden) zur Querschnittsfläche des Windkanals berechnet. Das Versperrungsmaß x_B muss kleiner als 15 % sein.

Bei offenen und teilweise offenen Messstrecken (z. B. drei Viertel offen oder geschlitzte Wände) ist für Versperrungsverhältnisse kleiner als 5 % keine Versperrungskorrektur erforderlich. Für x_B zwischen 5 % und 15 % dürfen die Versperrungskorrekturen nach Anhang B verwendet werden. In geschlossenen Messstrecken werden die Beiwerte überschätzt, daher ist es konservativ, hier keine Korrektur anzuwenden.

5.3.4.8 Aufbau des Zugmodells

Alle linearen Abmessungen des modellierten Fahrzeugs und Bodens müssen im selben Verhältnis entsprechend dem Modellmaßstab skaliert werden, sodass geometrische Ähnlichkeit erreicht wird.

Das Verhältnis der gesamten Länge des Zugmodells zur Breite des Windkanals sollte nicht so groß sein, dass die Windkanalwände Distorsionen in der Strömung um die Enden der führenden Fahrzeuge verursachen, und sollte kleiner als 0,75 sein.

Beim Durchführen von Windkanalversuchen ist es wesentlich, die realistisch ungünstigste Zugzusammensetzung zu behandeln.

Für alle zu untersuchenden Personenwagen und Lokomotiven muss mindestens ein halbes Abströmfahrzeug hinter das zu untersuchende Fahrzeugmodell platziert werden. Es wird empfohlen, ein Abströmmodell mit voller Fahrzeuglänge hinter das zu untersuchende Fahrzeugmodell zu setzen. Falls es sich bei dem zu untersuchenden Fahrzeug nicht um ein führendes Fahrzeug handelt, muss mindestens ein vollständiges, vorlaufendes Fahrzeug vorhanden sein, um realistische Anströmbedingungen sicherzustellen. Das An- und Abströmmodell sollte eine ähnliche Querschnittsfläche wie das zu untersuchende Fahrzeug besitzen.

Güterwagen, die möglicherweise hinter einem leeren Flachwagen fahren können, müssen mit einem leeren, zweiachsigen Standardcontainerwagenmodell als Anströmkörper untersucht werden. Bei Güterwagen dürfen keine Abströmkörper verwendet werden.

Der Spalt zwischen den verbundenen Fahrzeugen muss mit den korrekten Übergängen ausgestattet sein. Mechanische Kontakte zwischen dem untersuchten Fahrzeug und den passiven Körpern sind generell auszuschließen. Vibrationen des untersuchten Modells oder der benachbarten passiven Modelle müssen minimiert werden.

5.3.4.9 Modellgenauigkeit

Das Original muss mit ausreichender Genauigkeit modelliert werden, sodass Vereinfachungen bei der Modellierung nicht zu unrealistischen Strömungen führen. Die Erfahrung zeigt, dass verhältnismäßig kleine Vereinfachungen bei der Modellierung potenziell die Lage der Strömungsablösung verändern können und damit beträchtliche Änderungen bezüglich des aerodynamischen Rollmoments verursachen können.

Die zugrundeliegende Form des Wagenkastens muss entsprechend einer Toleranz von $-0,5\%$ und $+1\%$ eines gegebenen Maßes der Körperform modelliert werden. Um künstliche Strömungsablösungen zu vermeiden, müssen glatte gewölbte Oberflächen als solche modelliert werden, statt Polygonnäherungen zu nutzen. Aerodynamisch relevante Merkmale der Zugseitenwand und des Daches müssen modelliert werden. Die Modelloberfläche muss im Allgemeinen glatt sein, falls es jedoch örtlich begrenzte Bereiche mit Oberflächenrauigkeit am Fahrzeug gibt, sollten diese modelliert werden. Es ist weniger wichtig, die Zugunterseite detailliert zu modellieren, jedoch müssen die allgemeine Form der Unterseite und die Drehgestellbereiche und die Verteilung der Versperrungen abgebildet werden. Die Räder müssen abgeflacht sein, um Kontakt zum Boden zu vermeiden. Der Stromabnehmer sollte im Allgemeinen nicht modelliert werden. Falls der Stromabnehmer einbezogen wird, ist besonders darauf zu achten, dass lokale Reynolds-Zahl-Effekte am Stromabnehmer ausgeschlossen werden. Die Genauigkeit der Dummy-Fahrzeuge ist nicht so kritisch wie die des untersuchten Fahrzeugs, jedoch sollten die allgemeinen Grundsätze für die untersuchten Fahrzeuge befolgt werden.

Das Modell sollte in y-Richtung symmetrisch sein, auch wenn das Original kleinere Asymmetrien aufweist, z. B. im Unterflur- oder im Dachbereich. Der Vorteil liegt darin, die Qualität des Windkanals anhand der Beiwerte für links- und rechtsseitige Anströmung beurteilen zu können; dies stellt eine sehr wertvolle Information für die Fehleranalyse dar. Um die Symmetrie der Anströmung zu überprüfen, müssen Prüfmessungen mit positiven und negativen Anströmwinkeln durchgeführt werden.

5.3.4.10 Messtechnische Anforderungen

Die erforderlichen Momenten- und Kraftbeiwerte müssen aus den gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten, Momenten und Kräften sowie der berechneten Luftdichte bestimmt werden. Diese Messwerte erfordern Anemometer, eine Kraftwaage, einen Temperatursensor und einen Drucksensor.

— Geschwindigkeitsmessung:

Die Windgeschwindigkeit ist stromaufwärts vom Modell zu messen, wo die Windgeschwindigkeit Grenzschichtbehandlungseffekte beinhaltet, aber nicht vom Fahrzeug und seiner Umgebung beeinflusst wird. Die Anwendung von Versperrungskorrekturen darf in Betracht gezogen werden (siehe 5.3.4.7).

Staudruckmessgeräte müssen eine Genauigkeit besser als 2% besitzen, die Auflösung muss besser als 1% sein. Die Luftgeschwindigkeitsmessgeräte müssen eine Genauigkeit der Hälfte der oben genannten Werte aufweisen.

— Kraft- und Momentenwaage:

Die mittleren Kräfte und Momente müssen mit einer Kraft- und Momentenwaage gemessen werden. Das Rollmoment um die leeseitige Schiene sollte eine Genauigkeit von 5% beim kleinsten für die Berechnung der Windkennkurven benötigten Anströmwinkel aufweisen.

Das Modell muss so gestaltet sein, dass die Untersuchung nicht von Schwingungen der Modellbefestigung beeinflusst wird. Wird dies nicht erreicht, müssen Modifikationen am Modell und seiner Befestigung vorgenommen werden. Die Darstellung der dynamischen Antwort des Systems muss in der Versuchsdokumentation zur Verfügung gestellt werden.

— **Berechnung der Luftdichte:**

Die Luftdichte ρ muss aus der gemittelten Temperatur berechnet werden und der Luftdruck für jeden Versuch (der Datenaufnahme) mit Hilfe des Gesetzes für ideale Gase und einer Gaskonstanten von $287 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ bestimmt werden.

5.3.4.11 Standardbodenkonfiguration Einzelgleis mit Schotter und Schienen

Eine richtig skalierte Nachbildung der Standardschotterbettform und Schienen (siehe Bezugskonfiguration in Bild 2 und Bild 3) muss mit folgendem Detaillierungsgrad erstellt werden: die zugrundeliegende Form muss entsprechend $\pm 5 \text{ cm}$ am Original modelliert und Merkmale größer als 10 cm Abmessung im Original müssen modelliert werden. Kleinere Merkmale müssen als allgemeine Oberflächenrauigkeit dargestellt werden. Gleichwohl sollten einzelne Schottersteine nicht modelliert werden.

Besonders ist darauf zu achten, dass die Fahrzeughöhe relativ zu den Schienen auf $\pm 5 \text{ cm}$ am Original genau ist. Die Höhe darf um nicht mehr als $\pm 2,5 \text{ cm}$ am Original variieren, falls das Fahrzeug während der Versuche entfernt und wieder eingesetzt wird. Der Abstand vom Anströmende des Bodenmodells zum vorderen Ende des Fahrzeugmodells (oder des Anströmkörpers) muss mindestens 8 m (im 1:1-Maßstab) betragen. Die Bezugskonfiguration muss unverändert auf jede Spurweite im Anwendungsbereich dieser Norm angewandt werden.

ANMERKUNG Da der Zug symmetrisch auf die Einzelgleiskonfiguration mit Schotter und Schienen aufgesetzt wird, stehen die Radsätze bei Schienenfahrzeugen mit einer von $1\,435 \text{ mm}$ abweichenden Spurweite nicht in Einklang mit den Schienen.

Maße in Millimeter

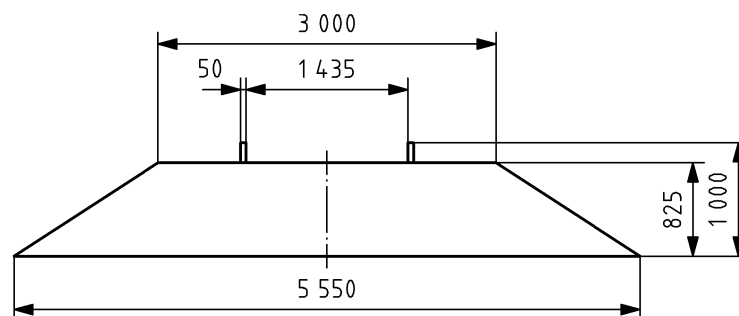
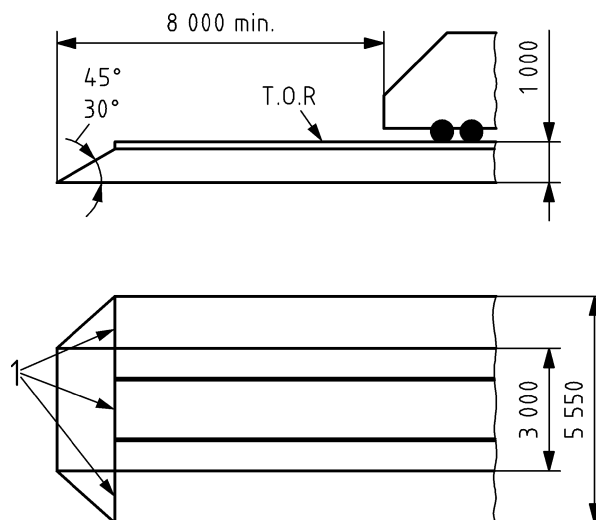


**Bild 2 — Skizze für die Windkanalkonfiguration Einzelgleis mit Schotter und Schienen
(Vorderansicht, Maßstab 1:1)**



Legende

- 1 Kantenrundung $R = 300$

**Bild 3 — Skizze für die Windkanalkonfiguration Einzelgleis mit Schotter und Schienen
(Seitenansicht und Draufsicht, Maßstab 1:1)**

5.3.4.12 Anforderungen an das Versuchsprogramm

Die Auswirkungen starken Windes auf Schienenfahrzeuge ändern sich nicht nur mit der Zugformgebung, sondern auch in Abhängigkeit davon, ob der Zug im ebenen Gelände oder auf einem Damm fährt, sowie mit der Schräglage oder der seitlichen Neigung des Zugs als auch mit dem Windwinkel zum Gleis. Es ist nicht möglich, für all diese Variablen Versuche durchzuführen. Daher werden Versuche mit dem folgenden Standardversuchsprogramm durchgeführt:

- Die Bodenkonfiguration muss nach 5.3.4.11 ausgeführt sein.
- Die für die Berechnung der CWC relevanten Messungen müssen mit Anströmwinden in 5°-Schritten bis zu $\beta = 50^\circ$, gefolgt von 10°-Schritten bis zum maximalen Anströmwinden durchgeführt werden. Falls praktikabel, sollten zusätzlich Messungen bei $\beta = 90^\circ$ durchgeführt werden.
- Bei Fahrzeugen ohne aktive Neigetechnik sind die Aerodynamik-Beiwerte für ein Fahrzeug mit einem Neigungswinkel von 0° (keine Neigung) zu messen. Bei Fahrzeugen mit aktiver Neigetechnik sind die Aerodynamik-Beiwerte für ein Fahrzeug mit einem Neigungswinkel von 0° (keine Neigung), dem größten Neigungswinkel sowie dem kleinsten Neigungswinkel zu messen.

Interoperabilitätsanforderungen für Hochgeschwindigkeitszüge mit $v_{\max} \geq 250$ km/h sind in 5.6.1 festgelegt.¹⁾

ANMERKUNG Ein Überblick über die anderen Herangehensweisen ist in Anhang A enthalten.

1) Siehe auch TSI HS/RST 2008.

5.3.4.13 Interpolation der Daten

Die diskreten Werte der mittleren Kraft- und Momentenbeiwerte müssen interpoliert werden, um eine kontinuierliche Darstellung dieser Beiwerte zu erhalten. Das Interpolationsverfahren muss dokumentiert werden.

5.3.4.14 Dokumentation

Die Übereinstimmung mit allen in 5.3.4 festgelegten Anforderungen muss dokumentiert werden.

5.4 Bestimmung der Radentlastung aufgrund von Seitenwinden

5.4.1 Allgemeines

Zur Bestimmung der Radentlastung von Personen- und Güterfahrzeugen durch Seitenwind stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Die zeitabhängige Mehrkörper-Simulation und das erweiterte quasi-statische Verfahren sind häufig Bestandteil des Nachweises, dass das Fahrzeug Spezifikationen oder Anforderungen im Rahmen der Fahrzeugbewertung erfüllt. Daten, die aus einem einfachen Verfahren (dem quasi-statischen Drei-Massen-Modell) stammen, gelten als ungenauer aber konservativ, da sie Sicherheitsmargen enthalten.

5.4.2 Einfaches Verfahren

5.4.2.1 Anwendungsbereich und Einschränkungen

Das einfache Bewertungsverfahren unterliegt folgenden Einschränkungen:

- das Verfahren ist nur geeignet für Fahrzeuge mit zwei Drehgestellen oder zwei Radsätzen. Gliederzüge, Fahrzeuge mit Jacobs-Drehgestellen oder ähnlichen Lösungen, die Rollmomente zwischen Wagenkästen übertragen, dürfen nicht mit diesem Verfahren beurteilt werden;
- das Verfahren darf für Neigetechnikzüge angewendet werden, aber die Auswirkungen der Neigung sind in die Massenverteilung, die Federungseigenschaften sowie die Schwerpunktverschiebungen des Wagenkastens einzubeziehen, um die zusätzliche Auswirkung der Neigung zu berücksichtigen.

5.4.2.2 Allgemeiner Ansatz

Für die Berechnung der charakteristischen Windgeschwindigkeit ist das aerodynamische Rollmoment um die leeseitige Schiene zu berechnen. Das Verfahren beruht auf vier fundamentalen Größen:

- dem Rückstellmoment M_m aufgrund der Fahrzeugmassen;
- dem Moment M_{la} aufgrund der unausgeglichene Querbeschleunigung;
- dem Moment M_{CoG} aufgrund der Querverschiebung des Schwerpunkts der gefederten Massen (aufgrund von Neigung und Querverschiebung);
- dem aerodynamischen Moment $M_{x,lee}$ aufgrund der Windlast.

Die Fahrzeug wird als aus drei Hauptmassen bestehend betrachtet: die ungefederte Masse m_0 , die primär gefederte Masse m_1 sowie die sekundär gefederte Masse m_2 .

5.4.2.3 Berechnung der charakteristischen Windgeschwindigkeit

Unter Verwendung des Koordinatensystems nach 3.3 mit Ausnahme des Windes von rechts in Fahrtrichtung (siehe Bild 4) ist das Momentengleichgewicht zur leeseitigen Schiene gegeben durch:

$$\sum M = f_{\Delta Q} \cdot \frac{1}{f_m} \cdot M_m + M_{CoG} + M_{la} - M_{x,lee} = 0 \quad (5)$$

Der Faktor $f_{\Delta Q}$ beschreibt die relative Radentlastung und ist auf 0,9 festgelegt. Der Faktor f_m ist ein Methodikfaktor, der Unsicherheiten des Verfahrens berücksichtigt. Er muss nach Tabelle 4 ausgewählt werden.

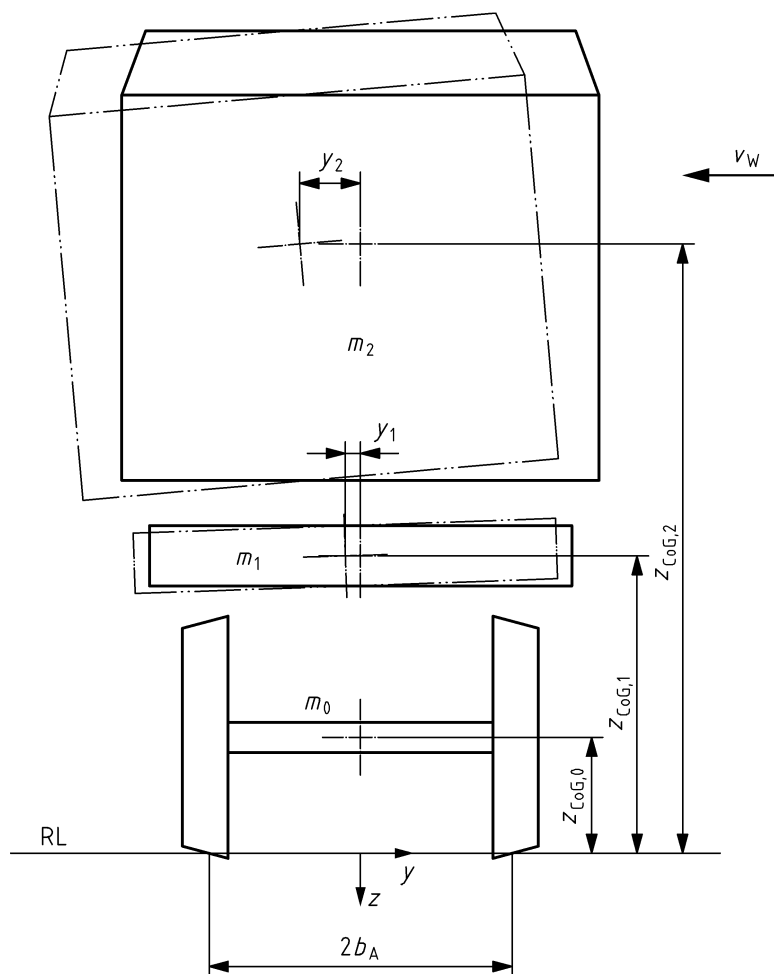


Bild 4 — Darstellung des Drei-Massen-Modells

Tabelle 4 — Methodikfaktor f_m für verschiedene Fahrzeugtypen

	Personenwagen	Güterwagen	Lokomotiven
Methodikfaktor f_m	1,20	1,15	1,20

Die Momente in Formel (5) werden nach den Formeln (6) bis (11) berechnet.

$$M_m = m \cdot g \cdot b_A \quad (6)$$

$$M_{CoG} = (m_1 \cdot y_1 + m_2 \cdot y_2) \cdot g \quad (7)$$

$$M_{la} = m \cdot a_q \cdot z_{CoG} \quad (8)$$

Dabei ist

- y_1 oder y_2 negativ bei Verschiebung des Schwerpunkts des gesamten Fahrzeugs (en: movement of the CoG) nach links;
- z_{CoG} negativ;
- m_0 die ungefederten Massen;
- m_1 die primär gefederten Massen;
- m_2 die sekundär gefederten Massen;
- die gesamte Fahrzeugmasse $m = m_0 + m_1 + m_2$;
- Abstand der Radaufstandspunkte
 - ist $2b_A = 1,5$ m bei Regelspurweite 1 435 mm;
 - ist $2b_A = 1,58$ m bei Regelspurweite 1 520 mm;
 - ist $2b_A = 1,585$ m bei Regelspurweite 1 524 mm;
 - ist $2b_A = 1,733$ m bei Regelspurweite 1 668 mm;
 - bei Regelspurweite 1 600 mm muss ein richtiger Wert für $2b_A$ bestimmt werden;
- die unausgeglichene Querschleunigung a_q ; für einen bestimmten Gleisbogen mit Radius R_c [in m] und Überhöhung H_{cant} [in m];

$$a_q = \frac{v_{tr}^2}{R_c} - \frac{gH_{cant}}{2b_A}$$

(R_c positiv für einen Bogen nach rechts, positiver Wert von h führt zu einer Rotation des Gleises um die x-Achse);
- Schwerpunkthöhe der ungefederten Massen $z_{CoG,0}$ (normalerweise der Radradius);
- Schwerpunkthöhe der primär gefederten Massen $z_{CoG,1}$;
- Schwerpunkthöhe der sekundär gefederten Massen $z_{CoG,2}$;

— Schwerpunkthöhe der gesamten Fahrzeugmasse $z_{CoG} = \left(\frac{m_0 \cdot z_{CoG,0} + m_1 \cdot z_{CoG,1} + m_2 \cdot z_{CoG,2}}{m} \right)$.

Das durch den Wind induzierte aerodynamische Moment beträgt:

$$M_{x,lee} = \frac{1}{2} \cdot \rho_0 \cdot v_a^2 \cdot A_0 \cdot d_0 \cdot c_{Mx,lee}(\beta) \quad (9)$$

Der Rollmomentenbeiwert um die leeseitige Schiene $c_{Mx,lee}(\beta)$ muss durch Windkanalversuche, CFD-Simulationen oder aus Berechnungen mit Vorhersageformeln (siehe 5.3) bestimmt werden.

Die relative Windgeschwindigkeit und der Anströmwinkel β müssen wie folgt berechnet werden:

$$v_a^2 = (v_w \cdot \cos \beta_w + v_{tr})^2 + v_w^2 \cdot \sin^2 \beta_w \quad (10)$$

$$\beta = \arctan \left(\frac{v_w \cdot \sin \beta_w}{v_{tr} + v_w \cdot \cos \beta_w} \right) \quad (11)$$

Die Formeln (5) bis (11) sind zur Ermittlung der charakteristischen Windgeschwindigkeit v_W (v_{tr} , a_q , β_w) zu lösen. Dies verlangt iterative Verfahren.

5.4.3 Erweitertes quasi-statisches Verfahren

5.4.3.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt beschreibt ein quasi-statisches Verfahren, das die Kinematik der Hauptmassen eines Fahrzeugs berücksichtigt. Dynamische Effekte, z. B. durch Dämpfer, sind ausgeschlossen. Es wurde gezeigt, dass dieses Verfahren zu charakteristischen Windgeschwindigkeiten führt, die nicht höher sind als die bei der in 5.4.4 vorgestellten Methodik, die zeitabhängige Mehrkörpersimulation (MKS, en: multi-body simulation, MBS) anwendet. Demnach ist dieses Verfahren konservativ.

Das zugrundeliegende Prinzip ist, das Fahrzeug in die relevanten, gebündelten Massen, die durch Kuppel-elemente verbunden sind, zu teilen. Das mechanische System führt zu einem Formelsystem, das mittels MKS-Programmen oder durch explizite Formulierung der Formeln gelöst werden darf.

5.4.3.2 Berechnungsverfahren

Dieses Verfahren nutzt einen quasi-statischen Ansatz zur Berechnung der Windkennkurven (CWC) unter Berücksichtigung der für die Seitenwindstabilität der Fahrzeuge maßgeblichen Effekte und beeinflussenden Faktoren.

Die folgenden Eingangsgrößen (in Klammern) werden benötigt:

- ungefederte Massen, wie Radsätze (Massen, Schwerpunktlagen);
- primär gefederte Massen, wie Drehgestelle und Anbauteile (Massen, Schwerpunktlagen);
- sekundär gefederte Massen, wie Wagenkasten und Neigetechnik (Massen, Schwerpunktlagen);
- primäre und sekundäre Federungselemente (lineare oder nicht-lineare Steifigkeiten, Lage);
- Wankstützen (Drehsteifigkeit);
- Primär- und Sekundäranschlüsse in seitlicher und vertikaler Richtung (Lage und Eigenschaften);

- Windlasten (aerodynamische Beiwerte);
- Einfluss der Neigetechnik und/oder der aktiven Querzentrierung;
- Kräfte zwischen benachbarten Wagen aufgrund der Kuppel Elemente.

Eine Modellierung des Systems dient der Herleitung der mathematischen Formulierung, die für die Berechnung der Windkennkurven (CWC) verwendet wird. Ein einfaches Modell (Fünf-Massen-Modell) ist für eine Vielzahl der Fahrzeuge geeignet. Ein vereinfachtes, fahrzeugspezifisches MKS-Modell darf für die Fahrzeuge erstellt werden, für die das einfache Modell nicht geeignet ist. Jedes Fahrzeugmodell muss verifiziert werden.

Die Entscheidung über die Eignung eines Fünf-Massen-Modells hängt von der Fahrzeugstruktur und den Kuppel Elementen zwischen benachbarten Wagen ab. Das unten beschriebene Fünf-Massen-Modell ist zur Bestimmung der Windkennkurven für Fahrzeuge mit den folgenden Eigenschaften geeignet:

- Fahrzeuge mit zwei Fahrwerken;
- keine Kuppel Elemente zwischen benachbarten Fahrzeugen oder Fahrwerken, bei denen größere statische Kräfte in seitlicher oder vertikaler Richtung sowie Rollmomente übertragen werden;
- Fahrzeuge mit aktiver Querzentrierung oder Neigetechnik. Der Einfluss dieser aktiven Komponenten auf die Schwerpunktverschiebung muss unter Beachtung folgender Aspekte einbezogen werden:
 - Falls die aktiven Komponenten zu einer Verschiebung des Wagenkastenschwerpunkts zum Bogeninneren hin führen, darf die Schwerpunktverschiebung berücksichtigt und einbezogen werden.
 - Falls die aktiven Komponenten zu einer Verschiebung des Wagenkastenschwerpunkts zum Bogenäußeren hin führen, muss die Schwerpunktverschiebung berücksichtigt und einbezogen werden.

Ein Beispiel zur Herleitung des mathematischen Formelsystems für ein einfaches Fünf-Massen-Modell ist in Anhang H gegeben. Die anschließende CWC-Berechnung darf mit geeigneten Software-Paketen durchgeführt werden.

5.4.3.3 Verifikation des Fahrzeugmodells

Eine Verifikation des verwendeten Fahrzeugmodells sollte nachweisen, dass die für die Seitenwindstabilität wesentlichen Fahrzeugeigenschaften mit ausreichender Genauigkeit wiedergegeben sind. Die Verifikation des Fahrzeugmodells ist anhand des Vergleichs der Berechnungen mit Messergebnissen, die auf den folgenden Werten beruhen, durchzuführen:

- Die Summe der Radsatzlasten jedes Drehgestells ist mit Messungen (z. B. durch Wägen) zu vergleichen. Die Abweichung darf $\pm 1\%$ nicht überschreiten. Falls mehrere Messwerte vorliegen, sollte der Durchschnittswert verwendet werden.
- Der maximale Anschlagsweg muss entsprechend den nominalen Konstruktionsdaten modelliert werden.
- Der Neigungskoeffizient des Modells sollte mit dem aus Messungen in Originalgröße verglichen werden. Die Definition des Neigungskoeffizienten s muss der Definition für Berechnungen der kinematischen Begrenzungslinie entsprechen. Falls mehr als ein Wert für s aus Versuchen verfügbar ist, sollte der Durchschnittswert verwendet werden. Falls bessere Verfahren zur Verifikation des Modells verfügbar sind, z. B. statische oder dynamische Messungen der Q -Kräfte, können diese stattdessen verwendet werden. Die Ergebnisse der Simulation müssen innerhalb der Toleranzen der gemessenen Werte liegen.

- Falls die Berechnungen zur Verifikation des Fahrzeugmodells unbefriedigend sind, muss das MKS-Modell modifiziert werden. Modifizierungen des MKS-Modells müssen entsprechend den oben stehenden Ausführungen verifiziert werden.

5.4.3.4 Berechnungen der Windkennkurven

Für CWC-Berechnungen muss die Gleichgewichtslage des Fahrzeugs in Abhängigkeit der auf das Fahrzeug wirkenden äußeren Kräfte bestimmt werden. Die folgenden Kräfte und Momente müssen berücksichtigt werden:

- Massenkräfte aufgrund der Erdbeschleunigung (g) und der unausgeglichene Querbeschleunigung (a_q);
- Federkräfte und Anschlagkräfte aufgrund der Federung und der Wankstützen;
- Windkräfte auf den Wagenkasten unter Anwendung des gesamten Satzes der aerodynamischen Beiwerte, unter Vernachlässigung des Widerstandsbeiwerts c_{Fx} .

Die Steifigkeit metallischer Anschläge sollte berücksichtigt werden. Ein empfohlener Mindestwert für die Steifigkeit metallischer Anschläge zwischen Wagenkasten und Drehgestell ist 10^8 N/m.

Abhängig vom Fahrzeug und der Windgeschwindigkeit werden die Windkräfte und -momente durch Folgendes definiert:

$$F_i = \frac{1}{2} \cdot A_0 \cdot \rho \cdot v_a^2 \cdot c_{Fi}(\beta) \quad (12)$$

$$M_i = \frac{1}{2} \cdot d_0 \cdot A_0 \cdot \rho \cdot v_a^2 \cdot c_{Mi}(\beta), i = x, y, z \quad (13)$$

Die relative Anströmgeschwindigkeit und den Anströmwinkel berechnet man wie folgt (siehe auch 3.3):

$$v_a^2 = (v_{tr} + v_w \cos \beta_w)^2 + (v_w \sin \beta_w)^2 \quad (14)$$

$$\beta = \arctan \left(\frac{v_w \cdot \sin(\beta_w)}{v_{tr} + v_w \cdot \cos(\beta_w)} \right) \quad (15)$$

Bei der Berechnung der Radaufstandskräfte (Q -Kräfte) ist die seitliche Verschiebung des Radaufstandspunkts in Richtung des Spurkanzes zu berücksichtigen (siehe Bild 5).

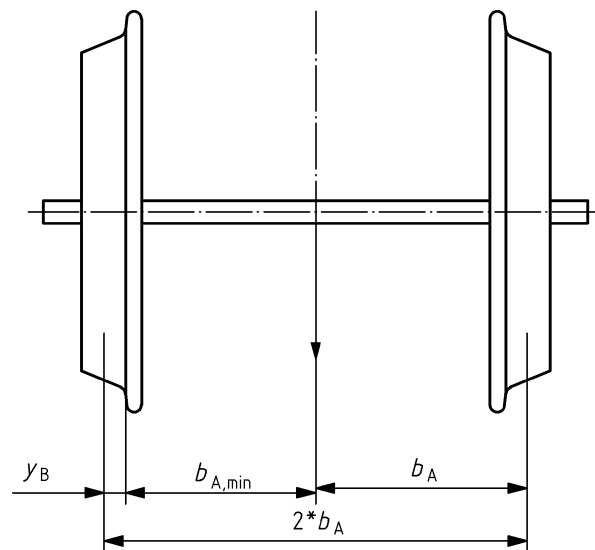


Bild 5 — Darstellung Radaufstandspunkt

Der Wert $b_{A,min}$ ist die Mindestbreite zwischen den Radaufstandspunkten, und:

$$2b_A = 1,5 \text{ m (für Nennspurweite 1 435 mm, für andere Spurweiten siehe 5.4.2.3)} \quad (16)$$

und die maximale Verschiebung des Radaufstandspunkts in Richtung des Spurkranzes ist

$$y_B = 0,028 \text{ m} \quad (17)$$

für Nennspurweite 1 435 mm, für andere Spurweiten sind die entsprechenden Werte zu verwenden.

Dabei ist

$$b_{A,min} = b_A - y_B \quad (18)$$

Für die Berechnung der Windkennkurven muss die Gleichgewichtsposition für verschiedene Windgeschwindigkeiten berechnet werden. Die charakteristische Windgeschwindigkeit ist definiert als diejenige Windgeschwindigkeit, bei der eine Restaufstandskraft von 10 % von Q_0 auftritt bei jedem Rad bei einem zweiachsigen Fahrzeug oder gemittelt über die Radsätze eines Drehgestells für ein Fahrzeug mit Drehgestell.

5.4.3.5 Verifikation

Die Implementierung muss durch eine Verifikation nachgewiesen werden.

Falls das übliche Fünf-Massen-Modell verwendet wird, muss jede CWC-Berechnung für ein Fahrzeug auch die CWC-Berechnung für die beiden in Anhang H spezifizierten Beispielfahrzeuge beinhalten. Das Verfahren ist bestätigt, wenn die damit berechneten Windkennkurven der Fahrzeuge bei $\beta_W = 90^\circ$ um maximal $\pm 0,5 \text{ m/s}$ von den Windkennkurven der Beispielfahrzeuge abweichen.

5.4.4 Zeitabhängiges MKS-Verfahren mit Anwendung des Wind-Szenarios Chinesischer Hut

5.4.4.1 Allgemeines

Ein MKS-Programm muss zusammen mit einem Böen-Szenario verwendet werden. Die Modellierung muss das kritischste Fahrzeug im Zug berücksichtigen und dass dieses Fahrzeug unbeladen ist (d. h. mit Betriebsmasse des betriebsbereiten Fahrzeugs nach EN 15663, aber ohne Berücksichtigung von Verschleiß). Es ist zu prüfen, ob eine gleichmäßige Verteilung der Fahrgäste, z. B. aufgrund der Schwerpunktverlagerung, nicht kritischer ist als ein unbeladenes Fahrzeug, z. B. durch eine vereinfachte Prüfung durch einen vollständigen statischen Ansatz.

Falls keine Übertragung von Momenten um die Fahrzeuglängsachse über die Kopplung zwischen benachbarten Fahrzeugen vorliegt, muss nur das kritische Fahrzeug modelliert werden, anderenfalls sind auch die benachbarten Fahrzeuge zu modellieren.

Gleislagefehler sind nicht zu berücksichtigen.

Für die Beurteilung von interoperablen Fahrzeugen auf einer Normalspurweite von 1 435 mm ist die Berechnung mit Normalspurweite, 60E2-Schienenprofil, neuen Radprofilen sowie Schieneneinbauneigung von 1/20 und 1/40 durchzuführen. Der ungünstigste Fall muss für die Bewertung gegenüber Grenzwerten verwendet werden. Die Berechnung muss für Normalspurweiten und Normalschienenprofile inklusive Einbauneigung unter Verwendung neuer Radprofile erfolgen.

Das Kriterium zur Bestimmung der Windkennkurven ist der Durchschnittswert der Radentlastung ΔQ des kritischsten Fahrwerks (Drehgestell oder einzelner Radsatz im Fall von Einzelradsatzfahrwerken). Die Entlastung darf, wie in der folgenden Formel dargestellt, 90 % der durchschnittlichen statischen Radsatzlast Q_0 des Fahrwerks entsprechend der nachfolgenden Formel nicht überschreiten: