

DIN EN 14067-6



ICS 45.060.01

Entwurf

Einsprüche bis 2016-12-28
Vorgesehen als Ersatz für
DIN EN 14067-6:2010-05 und
DIN EN 14067-6
Berichtigung 1:2011-09

**Bahnanwendungen –
Aerodynamik –
Teil 6: Anforderungen und Prüfverfahren für die Bewertung von
Seitenwind;
Deutsche und Englische Fassung prEN 14067-6:2016, nur auf CD-ROM**

Railway applications –
Aerodynamics –

Part 6: Requirements and test procedures for cross wind assessment;
German and English version prEN 14067-6:2016, only on CD-ROM

Applications ferroviaires –
Aérodynamique –

Partie 6: Exigences et procédures d'essai pour l'évaluation de la stabilité vis-à-vis des vents
transversiers;

Version allemande et anglaise prEN 14067-6:2016, seulement en CD-ROM

Anwendungswarnvermerk

Dieser Norm-Entwurf mit Erscheinungsdatum 2016-10-28 wird der Öffentlichkeit zur Prüfung und
Stellungnahme vorgelegt.

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

Stellungnahmen werden erbeten

- vorzugsweise online im Norm-Entwurfs-Portal des DIN unter www.din.de/go/entwuerfe bzw. für Norm-Entwürfe der DKE auch im Norm-Entwurfs-Portal der DKE unter www.entwuerfe.normenbibliothek.de, sofern dort wiedergegeben;
- oder als Datei per E-Mail an fsf@din.de möglichst in Form einer Tabelle. Die Vorlage dieser Tabelle kann im Internet unter www.din.de/go/stellungnahmen-norm-entwuerfe oder für Stellungnahmen zu Norm-Entwürfen der DKE unter www.dke.de/stellungnahme abgerufen werden;
- oder in Papierform an den DIN-Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF), Panoramaweg 1, 34131 Kassel.

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

Gesamtumfang 296 Seiten

DIN-Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF)

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (prEN 14067-6:2016) wurde unter der Federführung der WG 6 „Aerodynamik“ (Vorsitz: Deutschland) innerhalb des CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ (Sekretariat: DIN, Deutschland) erarbeitet.

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.

Übergangsbestimmungen für diese Europäische Norm:

Die Verpflichtung zur Anwendung einer Norm kann per Gesetz, Vorschrift oder durch einen Privatvertrag, aber nicht in der Norm selbst festgelegt werden. Die interessierten Kreise, die in dem für die Norm verantwortlichen Technischen Komitee des CEN vertreten sind, sind der Meinung, dass die Norm folgendermaßen angewendet werden sollte.

Sofern nicht ausdrücklich durch eine europäische Vorschrift oder TSI verlangt, sollte die Norm, für die CEN im Zusammenhang mit den Richtlinien zur Interoperabilität ein Mandat von der Europäischen Kommission erhalten hat, nicht für die Zulassung und die Zertifizierung oder zur Inbetriebsetzungsgenehmigung von Eisenbahnfahrzeugen verwendet werden, wenn diese einer der folgenden Ausnahmekategorien unterliegen:

- Fahrzeuge, die am Tag der Veröffentlichung (dop) dieser Europäischen Norm durch bereits unterzeichneten oder in der Endphase des Angebotsprozesses befindlichen Vertrag eingekauft werden;
- erneuerte oder umgerüstete Fahrzeuge, wenn die notwendige Arbeit zur Erzielung der Übereinstimmung an die Anforderungen dieser Europäischen Norm Änderungen erforderlich machen würde, die eine Neubewertung der Seitenwindstabilität des Fahrzeuges erfordern würde.

Ausgenommen während einer Übergangsperiode sind auch:

- Fahrzeuge, die am Tag der Veröffentlichung (dop) dieser Europäischen Norm durch bereits unterzeichnete oder in der Endphase des Angebotsprozesses befindliche Vertragsoptionen eingekauft werden;
- Fahrzeuge, die nach einer bestehenden erprobten Konstruktion gebaut werden und vor dem Tag der Veröffentlichung (dop) dieser Europäischen Norm bereits eine Zulassung, Zertifizierung oder Genehmigung zur Inbetriebsetzung innerhalb der EU erhalten haben und durch Verträge eingekauft werden, die in dieser Übergangsperiode unterschrieben werden.

Die vorgeschlagene Übergangsperiode von 4 Jahren sollte ab dem Veröffentlichungsdatum beginnen.

Diese Ausnahmen sollten während des gesamten Betriebslebens der betreffenden Fahrzeuge fortbestehen und würden auch für Teile bei Wartung und Reparatur gelten, solange diese Fahrzeuge weder erneuert noch umgerüstet werden.

Um Zweifelsfälle in der Übersetzung auszuschließen, ist die englische Originalfassung der prEN 04067-6 beigelegt. Die Nutzungsbedingungen für den deutschen Text des Norm-Entwurfes gelten gleichermaßen auch für den englischen Text.

Änderungen

Gegenüber DIN EN 14067-6:2010-05 und DIN EN 14067 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 Personenfahrzeuge 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 Personenfahrzeuge 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) die Gleichung (1) sowie der Faktor f_L in der Tabelle 3 wurden korrigiert;
- e) Leitsätze zur Anwendung von Referenz-Windkennkurven bei der Bewertung des Seitenwindrisikos von Eisenbahnlinien im Abschnitt 8;
- f) die Migrationsregel (ehemaliger Anhang M) wurde aus dem allgemeinen Dokument entfernt und wird im nationalen Vorwort aufgeführt;
- g) ein neuer Anhang M wurde hinzugefügt und liefert erweiterte Windkennkurven (WKK);
- h) Anhang ZA wurde aktualisiert.

— Leerseite —

Bahnanwendungen — Aerodynamik — Teil 6: Anforderungen und Prüfverfahren für die Bewertung von Seitenwind

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

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

ICS:

Deskriptoren

Dokument-Typ: Europäische Norm

Dokument-Untertyp:

Dokument-Stage: CEN-Umfrage

Dokument-Sprache: D

STD Version 2.8f

Inhalt

	Seite
Europäisches Vorwort	5
Einleitung	6
1 Anwendungsbereich	7
2 Normative Verweisungen	7
3 Begriffe	7
4 Symbole und Abkürzungen	8
5 Verfahren und Anforderungen zur Bewertung der Seitenwindstabilität von Fahrzeugen.....	22
5.1 Allgemeines	22
5.2 Anwendbarkeit von Verfahren zur Bestimmung der Seitenwindstabilität für die Fahrzeugbewertung.....	23
5.3 Bestimmung der aerodynamischen Beiwerte.....	25
5.3.1 Allgemeines	25
5.3.2 Vorhersageformeln.....	25
5.3.3 Numerische Strömungssimulation (CFD)	26
5.3.4 Windkanalmessungen im Modellmaßstab.....	29
5.4 Bestimmung der Radentlastung.....	34
5.4.1 Allgemeines	34
5.4.2 Einfaches Verfahren mit zweidimensionalem Fahrzeugmodell (Drei-Massen-Modell)	34
5.4.3 Erweitertes quasi-statisches Verfahren.....	38
5.4.4 Zeitabhängiges MKS-Verfahren mit Anwendung des Wind-Szenarios Chinesischer Hut.....	41
5.5 Darstellungsform von Windkennkurven (WKK).....	49
5.5.1 Allgemeines	49
5.5.2 Darstellungsform der WKK von Personenfahrzeugen und Lokomotiven.....	49
5.5.3 Darstellung der Windkennkurven von Güterfahrzeugen.....	51
5.6 Anforderungen	52
5.6.1 Anforderungen für Personenfahrzeuge und Lokomotiven, die bei einer Geschwindigkeit von $250 \text{ km/h} \leq v_{\text{max}} \leq 360 \text{ km/h}$ betrieben werden.....	52
5.6.2 Anforderungen für Personenfahrzeuge und Lokomotiven, die bei einer Geschwindigkeit von $140 \text{ km/h} < v_{\text{max}} < 250 \text{ km/h}$ betrieben werden.....	55
5.6.3 Anforderungen für Güterfahrzeuge.....	55
6 Verfahren zur Ermittlung der benötigten Streckendaten	56
6.1 Allgemeines	56
6.2 Darstellung der Streckendaten	56
6.2.1 Allgemeines	56
6.2.2 Horizontalprofil	56
6.2.3 Vertikalprofil.....	57
6.2.4 Entwurfsgeschwindigkeit der Strecke.....	58
6.2.5 Wände	59
6.2.6 Meteorologische Eingangsdaten zur Streckenbeschreibung	60
6.2.7 Integrierte Streckendatenbank.....	60
6.2.8 Empfohlene Auflösung/Genauigkeit	63
7 Verfahren zur Bewertung der Windexposition von Eisenbahnstrecken	63
8 Verfahren zur Untersuchung und Bewertung des Seitenwindrisikos	64

9	Erforderliche Dokumentation	64
9.1	Allgemeines	64
9.2	Bewertung der Seitenwindstabilität von Personenzugfahrzeugen und Lokomotiven.....	64
9.3	Bewertung der Seitenwindstabilität von Güterfahrzeugen.....	65
9.4	Ermittlung der Eisenbahnstreckendaten.....	65
Anhang A (informativ) Anwendung von Verfahren zur Bewertung der Seitenwindstabilität von Fahrzeugen in Europa.....		66
Anhang B (informativ) Versperrungskorrektur		72
B.1	Staudruckverfahren	72
B.2	Deutsche Methode.....	72
B.3	Britische Methode	72
B.4	Geschlitzte Wände.....	73
Anhang C (normativ) Windkanal-Benchmark-Versuchsdaten für die Standardbodenkonfiguration		74
C.1	Allgemeines	74
C.2	Windkanalmodell des ICE-3-Endwagens	74
C.3	Windkanalmodell des TGV-Duplex-Triebkopfs	75
C.4	Windkanalmodell des ETR-500-Triebkopfs.....	77
Anhang D (informativ) Andere Bodenkonfigurationen bei Windkanalversuchen.....		78
D.1	Flachgrund mit Spalt (TSI HS RST).....	78
D.2	Zwei Gleise mit Schotterbett und Schienen (TSI HS RST)	78
D.3	Standarddamm mit 6 m Höhe (TSI HS RST).....	79
D.4	Flachgrund ohne Spalt (Finnische Methode)	80
D.5	Zwei Gleise mit Schotterbett und Schienen (Britische Methode).....	80
Anhang E (informativ) Windkanal-Benchmark-Versuchsdaten für andere Bodenkonfigurationen		82
E.1	Allgemeines	82
E.2	Windkanalmodell des ICE-3-Endwagens	82
E.3	Windkanalmodell des TGV-Duplex-Triebkopfs	87
E.4	Windkanalmodell des ETR-500-Triebkopfs.....	91
Anhang F (informativ) Dammüberströmungseffekt		95
Anhang G (informativ) Windkanaluntersuchungen mit atmosphärischer Grenzschicht.....		96
G.1	Allgemeines	96
G.2	Benchmark-Versuche	96
G.3	Windsimulation	97
G.3.1	Grenzschichtprofile	97
G.3.2	Turbulenzgrade	98
G.3.3	Integrales Turbulenzlängenmaß.....	98
G.4	Anforderungen an den Modellmaßstab und das Versperrungsmaß.....	98
G.5	Modellgenauigkeit	98
G.6	Messtechnische Anforderungen	99
G.6.1	Allgemeines	99
G.6.2	Geschwindigkeitsmessung.....	99
G.6.3	Kraft- und Momentenwaage.....	99
G.7	Anforderungen an die Datenerfassung	99
G.7.1	Allgemeines	99
G.7.2	Zeitskala, Abtastfrequenz und Dauer der Datenerfassung.....	99
G.7.3	Messung der Temperatur und des atmosphärischen Drucks	100
G.8	Berechnung der Mittelwerte	100
G.9	Berechnung der Spitzenwerte	100
G.10	Korrektur der Windkanalgeschwindigkeit aufgrund von Versperrungen durch Fahrzeug und Damm	101

G.11	Berechnung der Luftdichte	101
G.12	Berechnung des unkorrigierten Rollmomentenbeiwerts	101
G.13	Bestimmung des Rollmomentenbeiwerts um die leeseitige Schiene.....	102
G.14	Interpolation der Daten	102
Anhang H (informativ) Fünf-Massen-Modell.....		103
H.1	Allgemeines	103
H.2	Herleitung der Gleichungen.....	105
H.3	Beispielrechnungen.....	109
H.3.1	Allgemeines	109
H.3.2	Beispielfahrzeug 1.....	110
H.3.3	Beispielfahrzeug 2.....	113
Anhang I (normativ) Mathematisches Modell des Chinesischen Huts		118
I.1	Mathematisches Modell des Chinesischen Huts	118
I.2	Beispielrechnung zum Chinesischen Hut	121
Anhang J (informativ) Stochastisches Windmodell		125
J.1	Allgemeines	125
J.2	Annahmen	125
J.3	Anwendungsbereich.....	125
J.4	Allgemeiner Ansatz.....	126
J.4.1	Allgemeines	126
J.4.2	Erster Schritt: Windkanaluntersuchungen (Bestimmung der aerodynamischen Eigenschaften)	126
J.4.3	Zweiter Schritt: Berechnung der turbulenten Windgeschwindigkeit.....	126
J.4.4	Dritter Schritt: Bestimmung der aerodynamischen Kräfte.....	130
J.4.5	Vierter Schritt: Simulation der Fahrzeugdynamik.....	131
J.4.6	Fünfter Schritt: Bestimmung der charakteristischen Windgeschwindigkeit.....	131
Anhang K (informativ) Standsicherheit von Personenzugfahrzeugen und Lokomotiven nach nationalen Richtlinien		133
K.1	Allgemeines	133
K.2	Nach DB-Richtlinie 80704 (Deutschland).....	133
K.3	Nach Railway Group Standard GM/RT 2141 (Großbritannien)	135
Anhang L (informativ) Informationen zu Bewertungsverfahren der Windexposition einer Eisenbahnstrecke		136
L.1	Allgemeines	136
L.2	Windkartenansatz.....	136
L.3	Übertragungsansatz	137
Anhang M (informativ) Erweiterte WKK		139
Anhang ZA (informativ) Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm und den grundlegenden Anforderungen der EU-Richtlinie 2008/57/EG, die abgedeckt werden soll.....		142
Literaturhinweise.....		144

Europäisches Vorwort

Dieses Dokument (prEN 14067-6:2016) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat von DIN gehalten wird.

Dieses Dokument ist derzeit zur CEN-Umfrage vorgelegt.

Dieses Dokument wird EN 14067-6:2010 ersetzen.

Dieses Dokument wurde unter einem Mandat erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelszone dem CEN 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.

Die hauptsächlichen 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 Personenzüge 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 Personenzüge 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) die Gleichung (1) sowie der Faktor f_L in der Tabelle 3 wurden korrigiert;
- e) Leitsätze zur Anwendung von Referenz-Windkennkurven bei der Bewertung des Seitenwindrisikos von Eisenbahnstrecken im Abschnitt 8;
- 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 WKK;
- h) Anhang ZA wurde aktualisiert.

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

- *Teil 1: Formelzeichen und Einheiten;*
- *Teil 3: Aerodynamik im Tunnel (wird zurückgezogen);*
- *Teil 4: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik auf offener Strecke;*
- *Teil 5: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik im Tunnel;*
- *Teil 6: Anforderungen und Prüfverfahren für die Bewertung von Seitenwind.*

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);
- Windexposition der Strecke;
- Fahrgeschwindigkeit, Betriebsart (konventionell, Neigetechnik, Fahrtrichtung).

1 Anwendungsbereich

Diese Europäische Norm ist auf die Bewertung von Seitenwinden für Eisenbahnstrecken anzuwenden. Die dargestellten Verfahren sind für Personenfahrzeuge bis zu 360 km/h Fahrgeschwindigkeit und für Güterfahrzeuge bis zu 160 km/h Fahrgeschwindigkeit anwendbar. Diese Europäische Norm gilt für Reisezugwagen, Triebzüge, Güterwagen, Lokomotiven und Triebköpfe mit Spurweiten von 1 435 mm bis einschließlich 1 668 mm.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden Dokumente, die in diesem Dokument teilweise oder als Ganzes zitiert werden, sind für die Anwendung dieses Dokuments 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 14363, *Bahnanwendungen — Versuche und Simulationen für die Zulassung der fahrtechnischen Eigenschaften von Eisenbahnfahrzeugen — Fahrverhalten und stationäre Versuche*

EN 15663, *Bahnanwendungen — Definition der Fahrzeugreferenzmassen*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die folgenden Begriffe.

3.1

leeseitige Schiene

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

3.2

Bias

systematischer Fehler, der eine Abschätzung beeinflusst

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

3.3

Koordinatensystem

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

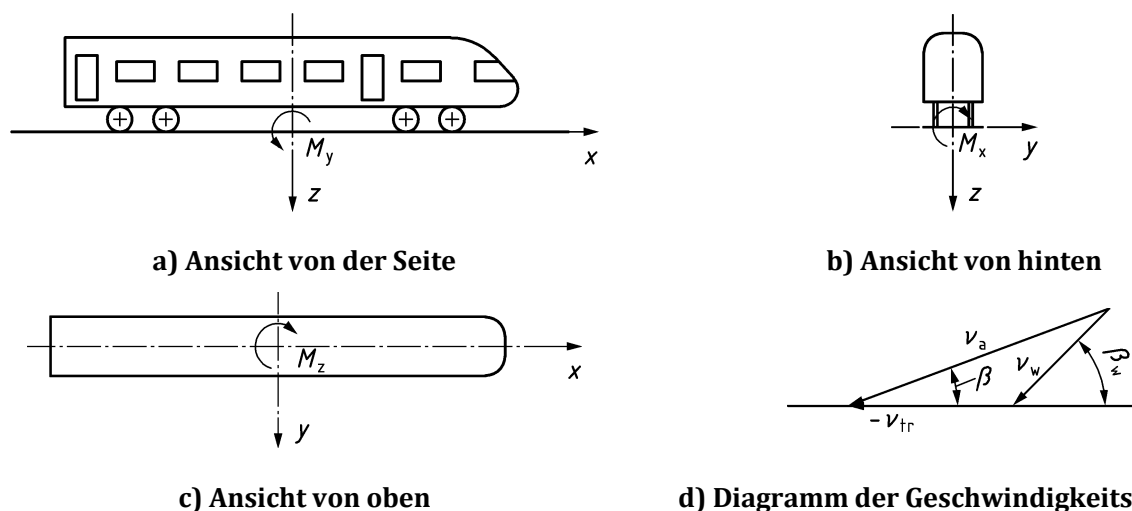


Bild 1 — Koordinatensystem

4 Symbole und Abkürzungen

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

Tabelle 1 — Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
A	m^2	Bezugsfläche	
A_0	m^2	Vorgegebene Bezugsfläche	10 m^2
A^*	—	Konstante der Gleichung für σ_u	
$\tilde{A}$	—	Normierte Böen-Amplitude	
A_{xz}	m^2	Bezugsseitenfläche des Fahrzeugmodells	Seitenfläche des Fahrzeugmodells
$\underline{A}_{BiBj}$	—	Rotationsmatrix von Bj zu Bi	
$\underline{A}_{BGiCB}$	—	Rotationsmatrix vom Drehgestell i zum Fahrzeugwagenkasten im stationären globalen Bezugssystem	
$\underline{A}_{IBi}$	—	Rotationsmatrix vom Wagenkasten i zum stationären globalen Bezugssystem	
$\underline{A}_{IBGi}$	—	Rotationsmatrix vom Drehgestell i zum stationären globalen Bezugssystem	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{A}_{ICB}$	—	Rotationsmatrix vom Fahrzeugwagenkasten im stationären globalen Bezugssystem	
$\underline{A}_{IWSi}$	—	Rotationsmatrix des Radsatzes i	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{A}_{IBGiWSi}$	—	Rotationsmatrix vom Drehgestell i zum Radsatz i im stationären globalen Bezugssystem	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{A}_{WSiBGi}$	—	Rotationsmatrix des Radsatzes i zum Drehgestell i Koordinatensystem WSi	
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
a_q	m/s^2	Unausgeglichene Querbeschleunigung	$a_q = \frac{v_{tr}^2}{R_c} - \frac{gh}{2b_A}$
$a_{q-\max}$	m/s^2	Höchstwert der unausgegliehenen Querbeschleunigung	
B_E	—	Versperrungsmaß eines Damms	Das Verhältnis der größten Modellhöhe des Damms zur freien Höhe des Windkanals

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
B_V	—	Versperrungsmaß eines Fahrzeugs	Das Verhältnis der gesamten Bezugsfläche des Modellfahrzeugs zur freien Querschnittsfläche des Windkanals
b	—	Beiwertfunktion von $\hat{r}_g$	
b_A	m	Abstand der Radaufstandspunkte	siehe 5.4.2.3
$b_{A,min}$	m	Mindestabstand der Radaufstandspunkte	
b_{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	
C_{WGi}	m/s	Bewertung der stochastischen (WKK) Windgeschwindigkeit	
c	—	Funktion zur Definition von η_1	
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_{Mi}	—	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	
$\tilde{C}_{Mx,lee}$	—	Mittlerer Rollmomentenbeiwert um die leeseitige Schiene	
$C_{Mx,lee,bmk}$	—	Benchmark-Rollmomentenbeiwert um die leeseitige Schiene	Rollmomentenbeiwert aus Benchmark-Versuchen
$\hat{C}_{Mx,lee,bmk}$	—	Benchmark-Höchstwert des Rollmomentenbeiwerts um die leeseitige Schiene	
$\tilde{C}_{Mx,lee,bmk}$	—	Mittlerer Benchmark des Rollmomentenbeiwerts um die leeseitige Schiene	$\hat{C}_{Mx,lee,bmk}$

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
$C_{Mx,lee,test}$	—	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	
$\tilde{C}_{Mx,lee,m}$	—	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
$\underline{dr}_{c,i}$	m	Auslenkung der i Primärfeder	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{dr}_{cpj,i}$	m	Auslenkung der j Primärfeder	$j = 1$ (rechts), 2 (links). $i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{dr}_{csj,i}$	m	Auslenkung der j Sekundärfeder	$j = 1$ (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
F_i	N	Aerodynamische Kraft	
$F_i(t)$	N	Aerodynamische Kraft	Zeitabhängige Variante von F_i

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
F_x F_y F_z	N	Aerodynamische Kräfte in Richtung der Koordinaten	
r	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	
$\underline{f}_{\text{fBi}}$	N	Federkraftvektor der Primär- und Sekundärfedern am Wagenkasten B_i	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$f_{\text{f,BGi}}$	N	Federungskraft am Drehgestell i	
$\underline{f}_{\text{f,CB}}$	N	Federkraftvektor der Primär- und Sekundärfedern am Fahrzeugwagenkasten	
$f_{\text{f,WSi}}$	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
$\underline{f}_{\text{m,Bi}}$	N	Massenkraftvektor am Wagenkasten B_i	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{f}_{\text{m,CB}}$	N	Massenkraftvektor am Fahrzeugwagenkasten	
f_n	Hz	n-te Frequenz	$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{n\omega_0}{2\pi}$

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
f_{samp}	Hz	Frequenz der Datenerfassung	Die Abtastfrequenz (Rate) zur Erfassung von Daten im Windkanal
$\underline{f}_{\text{total,Bi}}$	N	Gesamtkraftvektor am Wagenkasten Bi	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{f}_{\text{total,BGi}}$	N	Gesamtkraftvektor am Drehgestell i	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell
$\underline{f}_{\text{total,CB}}$	N	Gesamtkraftvektor am Fahrzeugwagenkasten	
$\underline{f}_{\text{total,WSi}}$	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	
$\underline{f}_{\text{Wi,CB}}$	N	Windkraft am Fahrzeugwagenkasten	
G	m/s ²	Fallbeschleunigung	
G	—	Böenfaktor	
H	m	Fahrzeughöhe	
h_2	m	Vertikale Position der Vektorkomponente	
H_{cant}	m	Höhe der Überhöhung	
h_{BL}	m	Grenzschichthöhe	
h_{VEH}	m	Fahrzeughöhe von Schienenoberkante bis Dach	
H	—	Aerodynamische Admittanzfunktionen basierend auf Cooper-Theorie	
I_i	—	Turbulenzgrad für die Windkomponente in i -Richtung	$i = u, v, w$
$I_u(z)$	—	Turbulenzgrad	Standardabweichung der Windkanalgeschwindigkeit dividiert durch die mittlere Windkanalgeschwindigkeit jeweils in der Höhe z
$k_{\text{standstill}}$	—	Dimensionslose charakteristische Windgeschwindigkeit eines Fahrzeugs bei Stillstand	

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
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 Winddammes	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 Versperrungsfaktor des Winddammes	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 Fahrzeugwagenkastens	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	
r_{Lu}	—	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	

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
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	
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
$\tilde{M}_{x,lee}$	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 Spitzenwertes des aerodynamischen 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 Giermoment	siehe 3.3
M	kg	(Bei der Bewertung von Seitenwind zu berücksichtigende) Fahrzeugmasse	Bezieht sich auf die Betriebsmasse des betriebsbereiten Fahrzeugs nach EN 15663

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
m_0	kg	Ungefederte Massen	Bezieht sich auf die Betriebsmasse des betriebsbereiten Fahrzeugs nach EN 15663
m_1	kg	Primär gefederte Massen	Bezieht sich auf die Betriebsmasse des betriebsbereiten Fahrzeugs nach EN 15663
m_2	kg	Sekundär gefederte Massen	Bezieht sich auf die Betriebsmasse des betriebsbereiten Fahrzeugs nach EN 15663
m_{Bi}	kg	Masse des Wagenkastens B_i	
$\bar{N}$	—	Anzahl der Bewertungen der stochastischen WKK	
n	Hz	Generische harmonische Komponente des Windgeschwindigkeitsspektrums	
$n_{\max}$	—	Anzahl der Harmonischen, welche bei der Serieldarstellung 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 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	$Re = \frac{Ud}{\nu}$
$Re_{\max}$	—	Maximale Reynolds-Zahl	Die in einem Windkanalversuch maximal erreichbare Reynolds-Zahl

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
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	$\underline{r}_{CBi,Bi}$
$\underline{r}_{CCB,CB}$	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
$\underline{r}_{C2,BGi}$	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
$\underline{r}_{CS2,BGi,CB}$	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}	$\text{m}^2/\text{s}^2/\text{Hz}$	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
$S_u(n)$	$\text{m}^2/\text{s}^2/\text{Hz}$	Spektrale Leistungsdichte von u	n ist die Frequenz
SY_{WSi}	N	Summe der y -Kräfte	$i = 1$: vorderes Drehgestell, $i = 2$: hinteres Drehgestell

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
$\tilde{\xi}_{uTuT}$	—	Dimensionslose Leistungsdichtenfunktion	
$\tilde{\xi}_{vTvT}$	—	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	$Tu_x = (\overline{u'^2}/\bar{u}^2)^{0,5}$
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	
$\underline{t}_{\text{total},Bi}$	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
$\underline{t}_{Wi,CB}$	Nm	Windkräfte am Fahrzeugwagenkasten	
U	m/s	Wind(kanal)geschwindigkeit	
$\tilde{U}$	m/s	Mittlere Windkanalgeschwindigkeit	Mittlere Windkanalgeschwindigkeit nach Korrektur bezüglich der Versperrungseinflüsse.
$\bar{U}$	m/s	Mittlere Windgeschwindigkeit	

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
$U_{\max}$	m/s	Maximale Windgeschwindigkeit während des Chinesischen Hutes	
U_{mean}	m/s	Mittlere Windgeschwindigkeit	Bezogen auf 4 m Höhe über Grund stromaufwärts
$U(t)$	m/s	Momentane Wind(kanal)geschwindigkeit	
U_{turb}	m/s	Turbulente Komponente der Windgeschwindigkeit entlang der mittleren Windrichtung	
$U_T(t)$	m/s	Windgeschwindigkeitskomponente senkrecht zur Gleisrichtung vom beweglichen Punkt aus	
$U_T(f_n)$	m/s	Generische Harmonische des Windgeschwindigkeitsspektrums S_{uTuT}	
$U_{TC}(t)$	m/s	Querkomponente der korrigierten Wind-Absolutgeschwindigkeit vom beweglichen $\bar{U}_{\text{raw}}$ -Punkt aus	
$U_{TC}(f_n)$	m/s	Generische Harmonische von $U_{TC}(t)$	
$\bar{U}_{\text{raw}}$	m/s	Gemessener Mittelwert der Windkanalgeschwindigkeit	
$\bar{U}_{\text{e,raw}}$	m/s	Gemessener Mittelwert der Windkanalgeschwindigkeit oberhalb eines Damms	
$\tilde{U}_{FS}$	m/s	Mittlerer Wind im 1:1-Maßstab	
$\tilde{U}_m$	m/s	Mittlere Windkanalgeschwindigkeit	
$\hat{U}_m$	m/s	Spitzenwert der Windkanalgeschwindigkeit	Spitzenwert der Windkanalgeschwindigkeit nach Korrektur bezüglich der Versperrungseinflüsse
$\hat{U}_{\text{e,m}}$	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
$\hat{U}_m$	m/s	Klassifizierte Spitzenwerte der Windkanalgeschwindigkeit	Ermittelt aus 12 Blöcken mit gleichwertigen Daten im Maßstab 1:1 über eine Dauer von je 10 Minuten, $m = 1, \dots, 12$
$\hat{U}_{m,z}$	m/s	Unkorrigiertes Mittel der Windkanalgeschwindigkeit auf Höhe z	Der mittlere Wert der gemessenen Windkanalgeschwindigkeit innerhalb einer Messdauer auf einer gleichwertigen Höhe z

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
u	m/s	Modus der U_m -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 des Gleises (Böenmodellierung)	
V_{emb}	m/s	Windgeschwindigkeit an einem Damm	Wird für den Dammüberströmungseffekt verwendet
$V_{rel_T}(t)$	m/s	Korrigierte relative Windgeschwindigkeit	
V_{rel}	m/s	Geschwindigkeit basierend auf Cooper-Theorie	
V_x	m/s	Größe des Windgeschwindigkeitsvektors	Bezogen auf 4 m Höhe über Grund stromaufwärts
$v_T(fn)$	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	—	Windrichtung	
$w_{standstill}$	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

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
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	
$\underline{x}_{WSi}$	m	Ortsvektor eines Radsatzes i	
$\tilde{x}$	m	Räumlicher Abstand zur maximalen Böenamplitude	
y_B	m	(Maximale) Verschiebung des Kontaktpunkts auf dem Rad in Richtung des Spurkranzes	
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	
y_2	m	Seitenverschiebung der Sekundärmasse	
z	m	Höhe über Grund	
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 gesamtes Fahrzeug	
$z_{CoG,0}$	m	Schwerpunkthöhe ungefederte Massen	
$z_{CoG,1}$	m	Schwerpunkthöhe primär gefederte Massen	
$z_{CoG,2}$	m	Schwerpunkthöhe sekundär gefederte Massen	
z_0	m	Rauigkeitshöhe	

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
β		Schiebewinkel	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 Zuges
β_{Wi}		Windwinkel zum Gleis aus Zerlegungsverfahren	
$\tilde{\beta}$	Bogenmaß	Modifizierter Schiebewinkel	
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 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	Luftdicke der Windkanalprüfung	
ρ_0	kg/m ³	Referenzluftdicke	$\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$
$\sum m$	Nm	Gleichgewichtsmoment um die leeseitige Schiene	
σ	m/s	Standardabweichung der stochastischen (WKK) Windgeschwindigkeit	
σ_u	m/s	Standardabweichung der Geschwindigkeitskomponente u-Wind	

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
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_o	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 gegeben ist durch charakteristische Windgeschwindigkeiten, denen die Fahrzeuge widerstehen 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 (WKK) bezeichnet.

Die Seitenwindstabilität eines Zuges ist durch die Seitenwindstabilität des seitenwindempfindlichsten Fahrzeugs im Zugverbund gegeben.

Es ist zu beachten, dass die WKK die Seitenwindstabilität eines Zuges in Bezug zu einem charakteristischen Zustand der vertikalen Radkräfte kennzeichnen; die Windkennkurven kennzeichnen nicht eine Kippgrenze.

Die WKK definieren die maximalen Windgeschwindigkeiten in einer bestimmten Richtung zum Gleis, denen ein bestimmter Zug in einem Fahrgeschwindigkeitsbereich widerstehen kann, ohne dass eine charakteristische Grenze der Radentlastung überschritten wird. Das Kriterium, das die WKK 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 Luftdichte ρ_0 auf $1,225 \text{ kg/m}^3$ festgelegt. Die zu berücksichtigende Fahrzeugmasse ist als „Betriebsmasse des betriebsbereiten Fahrzeugs“ nach EN 15663 festgelegt.

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

5.2 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.

Im Fall eines festen Zugverbandes 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	
Ge- schwin- digkeits- bereich	$v_{\max} \leq 140 \text{ km/h}$	$140 \text{ km/h} < v_{\max} \leq 200 \text{ km/h}$	$200 \text{ km/h} < v_{\max} \leq 360 \text{ km/h}^a$	$v_{\max} \leq 80 \text{ km/h}$	$80 \text{ km/h} < v_{\max} \leq 160 \text{ km/h}$
Verein- fachter Nach- weis der Seiten- wind- stabilität	Ja ^b	Ja, 5.3.2 + 5.4.2 oder 5.3.3 + 5.4.2 oder 5.3.3 + 5.4.3 oder 5.3.4 + 5.4.2 <u>Einschränkungen:</u> 5.3.2 nicht auf Züge mit aktiver Neigetechnik anwend- bar 5.4.2 nicht auf Gliederzüge anwendbar	Ja, 5.3.4 + 5.4.2 <u>Einschränkungen:</u> 5.4.2 nicht auf Gliederzüge anwendbar	Ja ^b	Ja, 5.3.2 + 5.4.2 oder 5.3.3 + 5.4.2
Vollstän- diger Nach- weis der Seiten- wind- stabilität	Nein	Ja, 5.3.4 + 5.4.3 oder 5.3.4 + 5.4.4	Ja, 5.3.4 + 5.4.3 oder 5.3.4 + 5.4.4	Nein	Ja, 5.3.4 + 5.4.2 oder 5.3.4 + 5.4.3
a Bei Geschwindigkeiten über 360 km/h müssen die Verfahren angepasst werden, um auch Kompressibilitätseffekte zu berücksichtigen. b geregelt 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 Vorhersageformeln

Die Vorhersageformeln können nur mit folgenden Einschränkungen benutzt werden:

- Das Verfahren ist möglicherweise nicht gültig für Fahrzeuge, die stark in ihrer Form von gegenwärtigen Fahrzeugen abweichen;
- Das Verfahren ist nicht gültig für führende Endfahrzeuge 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) Wagen 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 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 wurde bestimmt, um konservative Werte zu liefern, und sollte daher die Windlasten nicht unterschätzen. 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 (Vorhersageformeln).

Die Vorhersageformeln erlauben 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: $\tilde{\beta} = |\arctan[z_5 \cdot \tan(\beta)]|$

sofern die Parameter $z_0, z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, f_L$ und f_{VEH} gegeben sind (siehe Tabelle 3). $c_{Mx,lee}$ bezieht sich auf A_0 und d_0 , diese Normalisierung weicht von 3.3 ab.

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

Parameter	Personenwagen (vorlaufendes Endfahrzeug) und Lokomotive	Personenwagen (Mittelwagen)	Güterfahrzeug
z_0	0		Für $0 \leq \beta \leq 40^\circ$: $z_0 = 0$ Für $\beta > 40^\circ$: $z_0 = 0,55$
z_1	$4,3 \cdot 10^{-3}$		Für $0^\circ \leq \beta \leq 40^\circ$: $z_1 = 0,013\,75$ Für $\beta > 40^\circ$: $z_1 = 0$
z_2	$2,2 \cdot 10^{-4}$		0
z_3	$-2,1 \cdot 10^{-6}$		0
z_4	1,2		1
z_5	1,2		1
L_{VEH}	Länge des Wagenkastens ohne Puffer und Wagenübergang		Länge über Puffer
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		
β	Schiebewinkel in Grad		
h_{VEH}	Fahrzeughöhe von Schienenoberkante bis Dach		

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 Giermomenten. Zusätzlich liefert CFD eine Prognose für die Geschwindigkeits- und Druckfelder und ermöglicht eine einfache Betrachtung unterschiedlicher Konfigurationen.

Der hier beschriebene Ansatz ist ähnlich zu 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 (Direct Numerical Simulation) der Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen ermittelt werden; dies ist in der Praxis durch Rechnerkapazitäten stark eingeschränkt. Näherungslösungen können durch Turbulenzmodellierung gemäß folgenden Ansätzen erhalten werden: LES (Large Eddy Simulation), DES (Detached Eddy Simulation), RANS (Reynolds-gemittelte Navier-Stokes-Gleichungen).

Die Umströmung eines Fahrzeugs ist von Natur aus instationär und variiert mit der Geometrie und dem Schiebewinkel. Die Verwendung stationärer Verfahren ist jedoch zulässig, wenn die Stationarität der Strömung erwiesen ist. Ein üblicherweise verwendetes Kriterium 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 nach 5.3.4.2 ermittelt wurden. Die in 5.3.4.2 festgelegten Qualitätskriterien sind anzuwenden.

5.3.3.3 Fahrzeugmodell

Die Darstellung des Fahrzeugmodells muss bezüglich des Übergangs zwischen den Fahrzeugen, der Fahrzeuglängen und der Modellgenauigkeit des untersuchten Fahrzeugs und der angrenzenden Fahrzeuge den Anforderungen an Modelle 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, 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 Zuges und dem Boden; beispielsweise ist beim Modellieren eines Damms diese Höhe die Höhe des Damms einschließlich Gleis und Schotter zuzüglich der Höhe des Zuges.

5.3.3.5 Rechengitter

Das Rechengitter muss den grundlegenden Anforderungen, entsprechend dem gewählten Rechenverfahren und Turbulenzmodell, an die Zellen 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 Schiebewinkel-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 sollte 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 sollte, bezogen auf die drei Verfeinerungsstufen, für jeden Schiebewinkel im relevanten Bereich eine Genauigkeit von 3 % haben. Als Ergebnis ist der größte Wert bei jedem Schiebewinkel zu verwenden.

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 Momentengleichungen (Navier-Stokes-Gleichungen), aber Verfahren auf der Grundlage der kinetischen Gastheorie (Lattice-Boltzmann-Gleichungen) 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 Strömungsgleichungen. 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 des relevanten Fahrzeugs 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 Zuges 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 Schiebewinkelkonfiguration angemessen sein.

5.3.3.9 Reynolds-Zahl

Die Reynolds-Zahl wird gebildet aus der Strömungsgeschwindigkeit am Einlass und einer charakteristischen Länge von 3 m (im 1:1-Maßstab). 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 Windkanalmessungen im Modellmaßstab

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 Windkanalbetreibern sicher.

ANMERKUNG 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 Zuges 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.

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 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. Der Benchmark-Versuch sollte unter Nutzung derselben Techniken, Konfigurationen, Anströmbedingungen, Ausrüstung usw. wie für die Versuche an den neuen Fahrzeugen 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. Dabei zeigen sich auch systematische Abweichungen der Beiwerte von den Referenzwerten (Bias). 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 WKK-Berechnungen relevanten Schiebewinkelbereich 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, erscheint die Versuchstechnik eine geeignete Grundlage zu sein, um die geforderten Resultate abzuleiten. Wird jedoch eine der Toleranzen nicht eingehalten, sollte 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 gleichförmig sein, 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 des gemessenen Fahrzeugs kleiner als 30 % der Fahrzeughöhe sein. Die Grenzschichtdicke ist ohne das Zug- und ohne das Bodenmodell zu bestimmen.

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 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 sollten die $c_{Mx,lee}$ -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 Zuges.

5.3.4.7 Versperrung

Das Versperrungsmaß x_B ist definiert für einen Schiebewinkel 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. Zwischen 5 % und 15 % können 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 sind im selben Verhältnis entsprechend dem Modellmaßstab zu skalieren, 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 Personenfahrzeuge 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, 2-achsigen Standardcontainerwagenmodell als Anströmkörper untersucht werden. Bei Güterwagen darf kein Abströmkörper verwendet werden.

Der Übergang zwischen Fahrzeugen ist mit der korrekten Trennung angrenzender Fahrzeuge darzustellen. Mechanische Kontakte zwischen dem untersuchten Fahrzeug und den passiven Körpern sind generell auszuschließen. Vibrationen des untersuchten Modells oder der benachbarten passiven Modelle sind zu minimieren.

5.3.4.9 Modellgenauigkeit

Das Original sollte 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 sollte entsprechend einer Toleranz von - 0,5 % und + 1 % eines gegebenen Maßes der Körperform modelliert werden. Um künstliche Strömungsablösungen zu vermeiden, sollten glatte gewölbte Oberflächen als solche modelliert werden, statt Polygonnäherungen zu

nutzen. Aerodynamisch relevante Merkmale der Zugseitenwand und des Daches sollten modelliert werden. Die Modelloberfläche sollte 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 korrekt zu modellieren, jedoch sollten die allgemeine Form der Unterseite und die Versperrung im Drehgestellbereich abgebildet werden. Die Räder sollten 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.

Es wird empfohlen, symmetrische Modelle zu bauen, 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 Zuströmung zu überprüfen, sollten Prüfmessungen mit positiven und negativen Schiebewinkeln durchgeführt werden.

5.3.4.10 Messtechnische Anforderungen

Die erforderlichen Momenten- und Kraftbeiwerte werden aus den gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten, Momenten und Kräften sowie der berechneten Luftdichte bestimmt. 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 berücksichtigt werden.

Staudruckmessgeräte sollten eine Genauigkeit besser als 2 % besitzen, die Auflösung sollte besser als 1 % sein. Luftgeschwindigkeitsmessgeräte sollten halb so große Werte aufweisen.

Kraft- und Momentenwaage

Die mittleren Kräfte und Momente sollten 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 Schiebewinkel aufweisen.

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

Berechnung der Luftdichte

Die Luftdichte ρ sollte aus der gemittelten Temperatur und dem Luftdruck des jeweiligen Versuchs (der Datenaufnahme) mit Hilfe des idealen Gasgesetzes und einer Gaskonstanten von 287 J/(kg K) bestimmt werden.

5.3.4.11 Standardbodenkonfiguration Einzelgleis mit Schotter und Schienen

Eine richtig skalierte Nachbildung der Schotterbettform und der Schienen sollte mit folgendem Detaillierungsgrad erstellt werden: die zugrundeliegende Form sollte entsprechend ± 5 cm am Original modelliert und Merkmale größer als 10 cm Abmessung im Original sollten modelliert werden. Kleinere Merkmale sollten als allgemeine Rauigkeit dargestellt werden. Gleichwohl sollten einzelne Schottersteine nicht modelliert werden.

Besonders ist darauf zu achten, dass die Fahrzeughöhe relativ zu den Schienen auf ± 5 cm am Original genau ist. Die Höhe sollte um nicht mehr als $\pm 2,5$ 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. Skizzen der Bezugskonfiguration Einzelgleis mit Schotter und Schienen zeigen Bild 2 und Bild 3. Die Bezugskonfiguration muss 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 mm abweichenden Spurweite nicht in Einklang mit den Schienen.

Maße in Millimeter

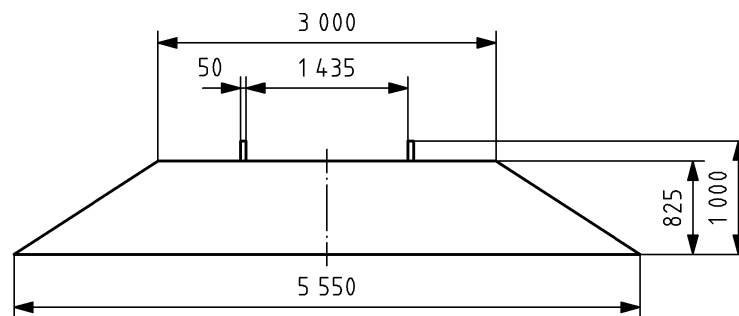
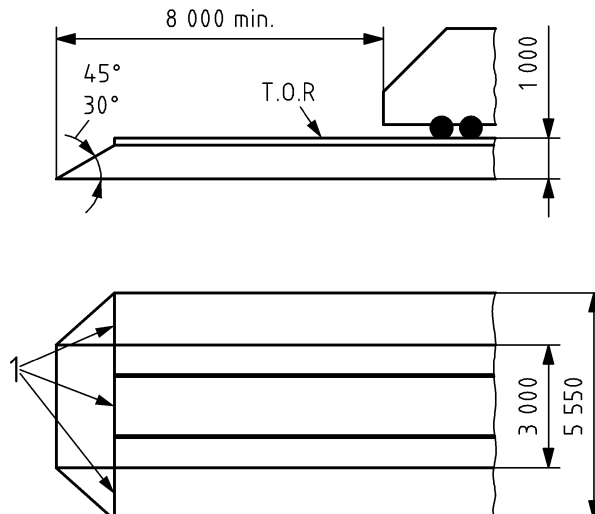


**Bild 2 — Skizze für die Windkanalkonfiguration Einzelgleis mit Schotter und Schienen
(Vorderansicht, 1:1-Maßstab)**

Maße in Millimeter



Legende

- 1 Kantenrundung $R = 300$

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

5.3.4.12 Anforderungen an das Versuchsprogramm

Die Auswirkungen starken Windes auf Schienenfahrzeuge ändern sich nicht nur mit der Zugformgebung, sondern auch damit, ob der Zug im ebenen Gelände oder auf einem Damm fährt, sowie mit der Schräglage

oder der seitlichen Neigung des Zuges 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 WKK relevanten Messungen sollten mit einer ausreichenden Auflösung des Schiebewinkels durchgeführt werden. Falls praktikabel, sollten zusätzlich Messungen bei $\beta = 90^\circ$ durchgeführt werden.
- Bei Fahrzeugen ohne aktive Neigetechnik sind die Aerodynamik-Koeffizienten für ein Fahrzeug mit einem Neigungswinkel von 0° (keine Neigung) zu messen. Bei Fahrzeugen mit aktiver Neigetechnik sind die Aerodynamik-Koeffizienten für ein Fahrzeug mit einem Neigungswinkel von 0° (keine Neigung), dem größten Neigungswinkel sowie dem kleinsten Neigungswinkel zu messen.

Für Hochgeschwindigkeitszüge mit $v_{\max} \geq 250$ km/h sind in 5.6.1 und TSI HS/RST 2008 Interoperabilitätsanforderungen festgelegt.

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

5.3.4.13 Interpolation der Daten

Zwischen den diskreten Werten der mittleren Kraft- und Momentenbeiwerte sollte interpoliert werden, um eine kontinuierliche Darstellung dieser Beiwerte zu erhalten. Die Interpolationsmethode sollte dokumentiert werden.

5.3.4.14 Dokumentation

Die Übereinstimmung mit allen in 5.3.4 festgelegten Anforderungen ist zu dokumentieren.

5.4 Bestimmung der Radentlastung

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 mit zweidimensionalem Fahrzeugmodell (Drei-Massen-Modell)

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. Diese Modellierung muss angemessen und konservativ sein.

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.

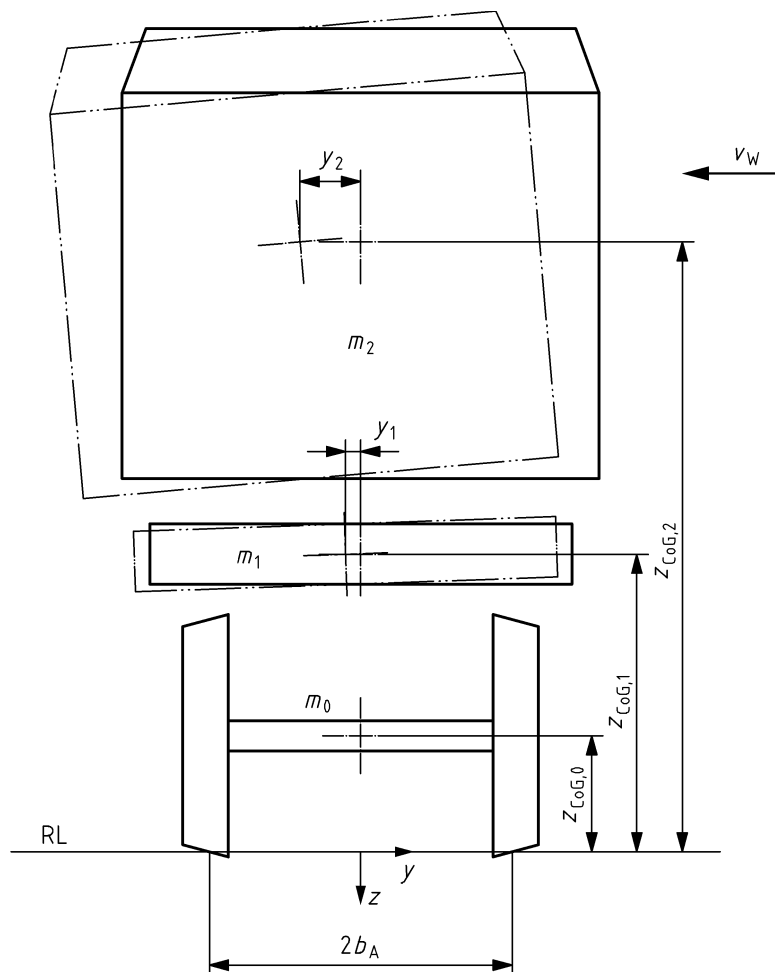


Bild 4 — Darstellung des Drei-Massen-Modells

Tabelle 4 — Methodikfaktor f_m für verschiedene Fahrzeugtypen

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

Die Momente in Gleichung (5) werden nach den Gleichungen (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 Schwerpunktverschiebungen (engl.: movement of the CoG) nach links;
- z_{CoG} negativ;
- m_0 die ungefederten Massen;
- m_1 die primär gefederte Massen;
- m_2 die sekundär gefederte 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 Querbesehleunigung a_q ; für einen bestimmten Gleisbogen mit Radius R_c [m] und Überhöhung h [m];

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

(R_c positiv für einen Bogen nach rechts, positiver Wert von h führt zu einer Rotation des Gleises in Richtung x);

- Schwerpunktshöhe der ungefederten Masse $z_{CoG,0}$ (normalerweise der Radradius);
- Schwerpunktshöhe der primär gefederten Masse $z_{CoG,1}$;
- Schwerpunktshöhe der sekundär gefederten Masse $z_{CoG,2}$;
- Schwerpunktshöhe der gesamten Fahrzeugmasse $z_{CoG} = \left(\frac{m_0 \cdot z_{CoG,0} + m_1 \cdot z_{CoG,1} + m_2 \cdot z_{CoG,2}}{m} \right)$.

ANMERKUNG Die zur Berechnung von y_1 und y_2 benötigten Daten (z. B. Wankpolhöhe, Maximalabstände der Querverschiebung, Neigungskoeffizient) können den Annahmen zur Lichtraumberechnung des Fahrzeugs nach EN 15273-2:2013 entnommen werden.

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) zur Verfügung stehen.

Die relative Windgeschwindigkeit und der Schiebewinkel β können 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 Gleichungen (5) bis (11) sind zur Ermittlung der charakteristischen Windgeschwindigkeit v_w (v_{tr} , a_q , β_w) zu lösen. Dies darf mit iterativen Verfahren durchgeführt werden.

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) 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 Gleichungssystem, das mittels MKS-Programmen oder durch explizite Formulierung der Gleichungen gelöst werden kann.

5.4.3.2 Berechnungsverfahren

Dieses Verfahren nutzt einen quasi-statischen Ansatz zur Berechnung der Windkennkurven (WKK) 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, Schwerpunktslagen);
- primär gefederte Massen, wie Drehgestelle und Anbauteile (Massen, Schwerpunktslagen);
- sekundär gefederte Massen, wie Wagenkasten und Neigetechnik (Massen, Schwerpunktslagen);
- 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 (WKK) verwendet wird. Ein einfaches Modell (Fünf-Massen-Modell) ist für eine Vielzahl der Fahrzeuge geeignet. Ein vereinfachtes, fahrzeugspezifisches MKS-Modell kann 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 Schwerpunktsverschiebung muss unter Beachtung folgender Aspekte einbezogen werden:
 - Falls die aktiven Komponenten zu einer Verschiebung des Wagenkastenschwerpunkts zum Bogeninneren hin führen, kann die Schwerpunktsverschiebung berücksichtigt und einbezogen werden.
 - Falls die aktiven Komponenten zu einer Verschiebung des Wagenkastenschwerpunkts zum Bogenäußeren hin führen, muss die Schwerpunktsverschiebung berücksichtigt und einbezogen werden.

Ein Beispiel zur Herleitung des mathematischen Gleichungssystems für ein einfaches Fünf-Massen-Modell ist in Anhang H gegeben. Die anschließende WKK-Berechnung kann 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 Wiegen) zu vergleichen. Die Abweichung darf $\pm 1\%$ nicht überschreiten. Falls mehrere Messwerte vorliegen, sollte der Durchschnittswert verwendet werden.
- Der maximale Anschlagsweg muss gemäß 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 einfache MKS-Modell modifiziert werden. Modifizierungen des vereinfachten MKS-Modells müssen entsprechend den oben stehenden Ausführungen verifiziert werden.

5.4.3.4 Berechnungen der Windkennkurven

Für WKK-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 (aq);
- Federkräfte und Kräfte in den Anschlägen 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 muss 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 gilt das Folgende für die Windkräfte und -momente:

$$F_i = \frac{1}{2} \cdot A_0 \cdot \rho_0 \cdot v_a^2 \cdot c_{Fi}(\beta) \quad (12)$$

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

Die relative Anströmgeschwindigkeit wird aus der Windgeschwindigkeit, der Zuggeschwindigkeit und dem Winkel zwischen Wind- und Gleisrichtung nach 3.3 bestimmt.

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

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

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

Bei der Berechnung der Rad-Gleis-Kräfte (Q -Kräfte) ist die seitliche Verschiebung des Kontaktpunkts auf dem Rad in Richtung des Spurkranzes zu berücksichtigen (siehe Bild 5).

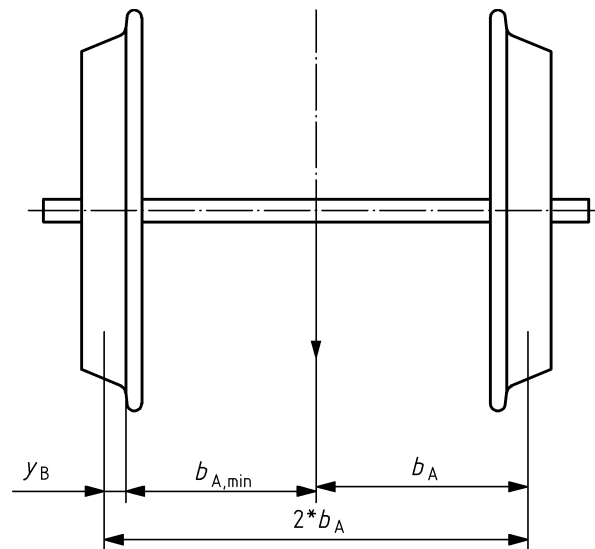


Bild 5 — Darstellung Radaufstandspunkt

Der Wert $b_{A,min}$ resultiert aus der Breite zwischen den Abstützungen

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

und der maximalen Verschiebung des Kontaktpunkts des Rades in Richtung des Spurkranzes

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

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

mit

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

Für die Berechnung der Windkennkurven muss die Gleichgewichtsposition für verschiedene Windgeschwindigkeiten berechnet werden. Die charakteristische Windgeschwindigkeit ist definiert als diejenige Windgeschwindigkeit, bei der eine 90 %ige Radentlastung auftritt (d. h. eine Restaufstandskraft von 10 % von Q_0).

5.4.3.5 Verfahrensverifikation

Die Implementierung ist durch eine Verfahrensverifikation nachzuweisen.

Falls das übliche Fünf-Massen-Modell verwendet wird, sollte jede WKK-Berechnung für ein Fahrzeug auch die WKK-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 $\pm 0,5$ 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 (Betriebsmasse des betriebsbereiten Fahrzeugs nach EN 15663). 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 komplett 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 sollte für die Bewertung gegenüber Grenzwerten verwendet werden. Bei der Bewertung anderer Fahrzeuge ist die Berechnung mit der verwendeten Spurweite durchzuführen.

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 Gleichung dargestellt, 90 % der durchschnittlichen statischen Radsatzlast Q_0 des Fahrwerks gemäß der nachfolgenden Gleichung nicht überschreiten:

$$\frac{\Delta Q}{Q_0} < 0,9 \quad (19)$$

Die so erhaltene Windkennkurve bezieht sich auf den Windspitzenwert der zeitabhängigen Böe.

5.4.4.2 Das Böen-Szenario Chinesischer Hut

Dieser Abschnitt enthält eine kurze Beschreibung des Böen-Modells. Die hier vorgestellten Gleichungen gelten für eine Windrichtung senkrecht zum Gleis. Die volle mathematische Beschreibung für dieses Böen-Modell für alle Windrichtungen wird in Anhang I gegeben.

Die Böe für dieses Modell besitzt eine feste Amplitude (entsprechend einer Amplitudenwahrscheinlichkeit von ungefähr 99 %) und eine Überschreitungswahrscheinlichkeit von 50 % bezüglich der Böendauer (Modus der Verteilung). Darüber hinaus besitzt der gewählte Ansatz die folgenden Eigenschaften:

- Das zeitlich-räumliche Böenmodell (bi-exponential) entspricht der Approximation des Durchschnittswerts eines Zufallsprozesses in der Nähe eines lokalen Maximums (siehe Bild 6).
- Der mittlere Wind wird als horizontal angenommen; nur die Längskomponente U wird benutzt. Diese Komponente stellt den maßgeblichen Teil der Windfluktuationen dar und ist die Projektion des momentanen Windvektors in der mittleren Windrichtung.

- Veränderungen der Windrichtung während des betrachteten Zeitfensters der Böe werden nicht berücksichtigt.
- Zeitliche Veränderungen werden gegenüber räumlichen Veränderungen vernachlässigt, d. h., die Böe bewegt sich nicht mit der mittleren Windgeschwindigkeit fort.

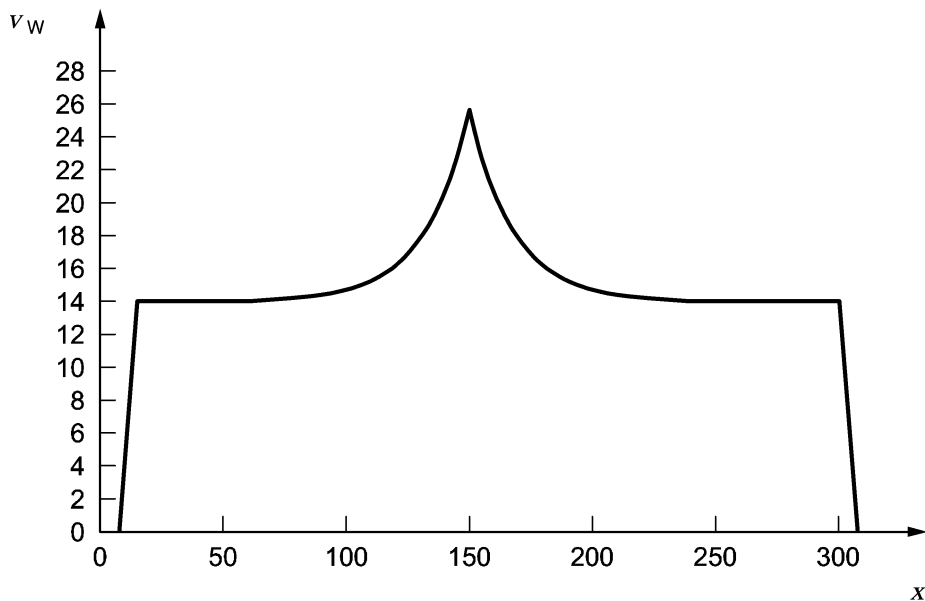
Die Eingangsdaten für dieses Szenario sind:

- v_{tr} Zuggeschwindigkeit;
- U_{max} maximale Windgeschwindigkeit;
- β_W Windrichtung bezüglich der Strecke.

Die folgenden Parameter sind festgelegt:

- $z = 4$ m Referenzhöhe;
- $\tilde{A} = 2,84$ mit der mittleren Windgeschwindigkeit U
normierte Böen-Amplitude $\tilde{A} = (U_{max} - U)/\sigma_u$;
- $z_0 = 0,07$ m Rauigkeitshöhe des typischen Umfelds interoperabler Strecken;
- $Pr(T) = 0,5$ Wahrscheinlichkeit einer Böe der Dauer T bei gegebener Amplitude.

Für die Berechnung der Windkennkurven (WKK) wird die räumliche Windverteilung mit einem mathematischen Modell beschrieben, dessen Form in Bild 6 dargestellt ist.



Legende

x Weg, in m

v_W Windgeschwindigkeit, in m/s

**Bild 6 — Beispiel für den räumlichen Verlauf des Winds bei Anwendung des Böen-Modells
Chinesischer Hut**

Die Windböe ist räumlich fixiert. Die Zuggeschwindigkeit wird als konstant angenommen, daher kann der zeitliche Verlauf vom räumlichen Verlauf durch eine Transformation bestimmt werden.

Die mittlere Windgeschwindigkeit berechnet sich aus der maximalen Windgeschwindigkeit nach:

$$U_{\text{mean}} = \frac{U_{\text{max}}}{1,694\ 6} \quad (20)$$

Die spektrale Leistungsdichte wird berechnet aus:

$$S_u(n) = \frac{22,983\ 9 \cdot U_{\text{mean}}}{\left(1 + 652\ 107\ \text{m}^2 \cdot \left(\frac{n}{U_{\text{mean}}}\right)^2\right)^{\frac{5}{6}}} \quad (21)$$

Dabei ist der Frequenzbereich begrenzt auf $n = [1/300\ \text{Hz}, 1\ \text{Hz}]$.

Die charakteristische Frequenz f_{gust} für die Böe ist gegeben durch das Integral:

$$f_{\text{gust}} = 0,239\ 091 \times \left[\frac{\int_{1/300}^1 n^2 \times S_u(n) dn}{\int_{1/300}^1 S_u(n) dn} \right]^{0,5} \quad (22)$$

das numerisch gelöst werden kann (siehe Anhang I, I.1), z. B. durch eine trapezförmige numerische Integration mit einer Auflösung von mindestens $\Delta n = 1/300\ \text{Hz}$

Die Windgeschwindigkeit senkrecht zum Fahrzeug auf dem Gleis kann bestimmt werden mit:

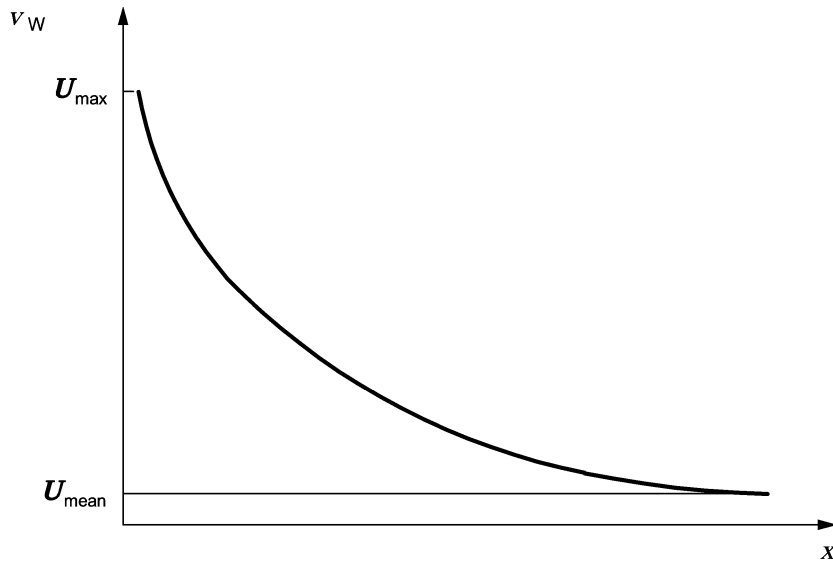
$$v_{w-90} = U_{\text{mean}} \cdot (1 + 0,694\ 6 \cdot C_{90}) \quad (23)$$

Dabei ist

$$C_{90} = e^{\frac{-16 \cdot f_{\text{gust}} \cdot \tilde{x}}{U_{\text{mean}}}} \quad (24)$$

und $\tilde{x}$ der räumliche Abstand zum Ort der maximalen Böenamplitude.

Die mathematische Beschreibung bezieht sich nur auf die zweite Hälfte des Chinesischen Huts, in der der Wind von U_{max} auf U_{mean} abfällt. Da der exponentielle Abfall zu keinem Zeitpunkt das Niveau der mittleren Windgeschwindigkeit U_{mean} erreicht, muss der Chinesische Hut auf einen geeigneten Bereich beschränkt werden (siehe Bild 7).



Legende

x Weg

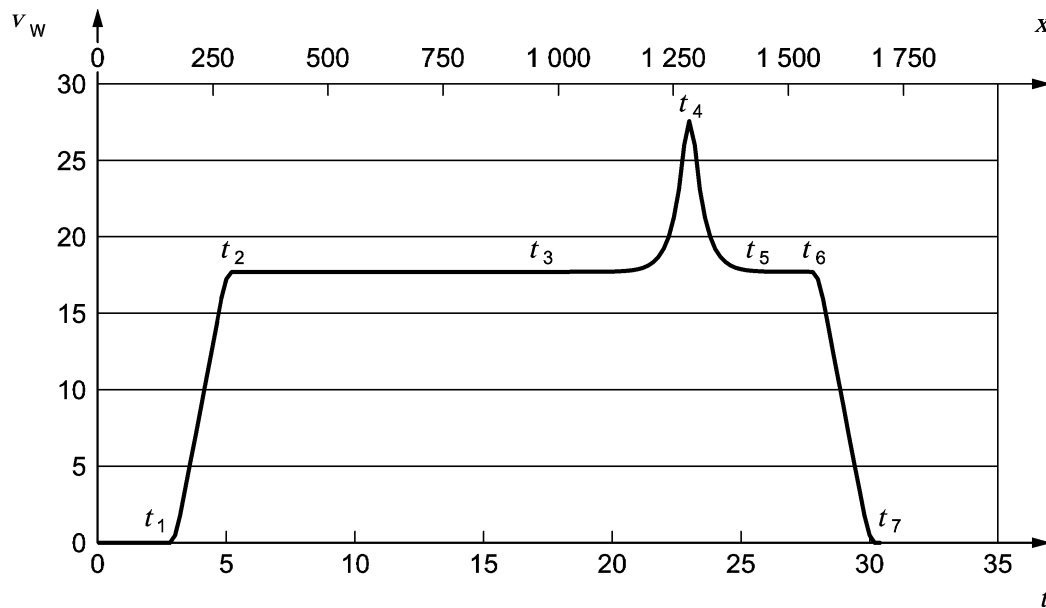
v_W Windgeschwindigkeit

Bild 7 — Darstellung des Abfalls der Windgeschwindigkeit im Böen-Szenario Chinesischer Hut

Bei der praktischen Umsetzung wird angenommen, dass der exponentielle Abfall die untere Grenze erreicht, wenn die Abweichung zwischen U_{mean} und der berechneten Windgeschwindigkeit kleiner als 1 % ist. Für die vollständige Darstellung des Chinesischen Huts muss an der y-Achse gespiegelt werden.

Die Windböe muss mittels eines gleitenden räumlichen Mittelwerts basierend auf einer Fensterbreite entsprechend der Fahrzeuglänge und einer Schrittweite kleiner als 0,5 m tiefpassgefiltert werden.

Das Szenario besteht aus einer Grundwindgeschwindigkeit, gefolgt von dem Teil des Chinesischen Huts mit zunehmender Windgeschwindigkeit. Dem folgt der abfallende Teil und anschließend wiederum die Grundwindgeschwindigkeit. Um reproduzierbare Resultate in der zeitabhängigen MKS-Simulation zu erhalten, muss sich das Fahrzeug in einem stationären Zustand der Windbelastung befinden. Aus diesem Grund setzt sich das Szenario im Hinblick auf den zeitlichen Verlauf wie folgt zusammen (siehe Bild 8, Beispiel in Anhang I, I.2).



Legende

x in m

v_w in m/s

t in s

Bild 8 — Anwendung des Böen-Szenarios Chinesischer Hut: Beispiel für den zeitlichen Windgeschwindigkeitsverlauf bei $v_{tr} = 200$ km/h, $v_w = 30$ m/s, Fahrzeuglänge = 24 m

Bis t_1 herrscht Windstille. Von t_1 bis t_2 steigt die Windgeschwindigkeit linear bis zur Grundwindgeschwindigkeit U_{mean} an. Das Fahrzeug muss zwischen t_2 und t_3 einen stationären Zustand der Windbelastung erreichen, bevor der zweite Anstieg der Windgeschwindigkeit beginnt. Dazu darf das Ausgangsniveau oder der gespiegelte Chinesische Hut mit einer Abweichung zwischen U_{mean} und der berechneten Windgeschwindigkeit von weniger als 1 % verwendet werden. Nach t_3 folgt der Anstieg entsprechend dem gespiegelten Chinesischen Huts bis zu einem Maximum bei t_4 . Nach dem Maximum fällt der Wind entsprechend der Funktion des Chinesischen Huts bis t_5 . Zeitpunkt t_6 kann gleich t_5 gewählt werden. Wenn t_6 als $t_6 \neq t_5$ gewählt wird, verbleibt der Wind von t_5 bis t_6 auf dem Ausgangsniveau. Ab t_6 folgt bis zum Abschluss des Windszenarios bei t_7 ein linearer Abfall. Die Windgeschwindigkeit in den einzelnen Intervallen wird durch die Funktionen in Tabelle 5 beschrieben.

Tabelle 5 — Funktionen für den Chinesischen Hut

Intervall	Funktion
$[t_0:t_1]$	$u(t) = 0$
$[t_1:t_2]$	$u(t) = \frac{U_{\text{mean}}}{t_2 - t_1} \cdot (t - t_1)$
$[t_2:t_3]$	$u(t) = U_{\text{mean}}$
$[t_3:t_4]$	$u(t) = \text{gespiegelter Chinesischer Hut; } t_3: \text{ Abweichung zwischen } U_{\text{mean}} \text{ und der berechneten Windgeschwindigkeit von weniger als 1 \%}$
$[t_4:t_5]$	$u(t) = \text{Chinesischer Hut; } t_5: \text{ Abweichung zwischen } U_{\text{mean}} \text{ und der berechneten Windgeschwindigkeit von weniger als 1 \%}$
$[t_5:t_6]$	$u(t) = U_{\text{mean}}$
$[t_6:t_7]$	$u(t) = \frac{U_{\text{mean}}}{t_7 - t_6} \cdot (t_7 - t)$

Bei Gliederzügen, Fahrzeugen mit Jacobs-Drehgestellen oder ähnlichen Lösungen, bei denen Rollmomente zwischen Wagenkästen übertragen werden, wird eine einzelne Böe betrachtet, und auf jeden Wagenkasten sollte entweder der mittlere Wind oder die Böe angewendet. Da die Böe räumlich fixiert ist und auf jedes einzelne Fahrzeug wirkt, sollten die Kräfte und Momente mit einem Zeitverzug wirken. Dieser Zeitverzug wird von dem Abstand zwischen zwei hintereinander liegenden Wagenkästen und der Zuggeschwindigkeit bestimmt. Der Abstand wird definiert als Abstand zwischen den geometrischen Mittelpunkten (in Längsrichtung betrachtet) der beiden nebeneinander liegenden Wagenkästen.

Die Böe muss für jeden Wagenkasten einzeln gefiltert werden. Dabei muss die Länge dieses Wagenkastens berücksichtigt werden.

Das Szenario für Gliederzüge kann aufbauend auf dem in Bild 6 dargestellten Szenario definiert werden. Bis t_1 herrscht Windstille. Von t_1 bis t_2 steigt die Windgeschwindigkeit linear bis zur Ausgangswindgeschwindigkeit U_{mean} an. Alle Einheiten des Gliederzugs müssen zwischen t_2 und t_3 einen stationären Zustand der Windbelastung erreichen, bevor der zweite Anstieg der Windgeschwindigkeit beginnt. Nach t_3 folgt der Anstieg entsprechend dem gespiegelten Chinesischen Hut bis zu einem Maximum bei t_4 . Nach dem Maximum fällt der Wind entsprechend der Funktion des Chinesischen Huts bis t_5 . Zeitpunkt t_6 wird erreicht, sobald das Ende des letzten Wagenkastens des Gliederzugs wieder vollständig dem mittleren Wind ausgesetzt ist.

5.4.4.3 Aufbau des Fahrzeugmodells

Die Modellierung des Fahrzeugs muss angemessen sein für die Untersuchung der Seitenwindeigenschaften. Das dynamische Modell muss dreidimensional sein und mindestens die folgenden Merkmale beinhalten:

- Wagenkasten, Drehgestelle und Radsätze und weitere relevante Teile des Fahrzeugs (Massen, Massenträgheiten, Schwerpunktlagen);
- Federungen (Federsteifigkeiten in Vertikal-, Quer- und Längsrichtung, Nichtlinearität in der Steifigkeit, Dämpfungseigenschaften in Vertikal- und Querrichtung, Nichtlinearität der Dämpfung, Lage);
- Anschläge, die relevant sein könnten;
- Rad-Schiene-Kontakt, berechnete Kontaktkräfte, die nichtlineare Berührungsgeometrie und Schlupfkkräfte und -verformungen berücksichtigen. Alle weiteren speziellen Bauteile im Federungssystem, die einen Einfluss auf den Kippmechanismus haben können.