

DIN EN 14067-6

ICS 45.060.01

**Bahnanwendungen –
Aerodynamik –
Teil 6: Anforderungen und Prüfverfahren für die Bewertung von
Seitenwind;
Deutsche Fassung EN 14067-6:2010**

Railway applications –
Aerodynamics –
Part 6: Requirements and test procedures for cross wind assessment;
German version EN 14067-6:2010

Applications ferroviaires –
Aérodynamique –
Partie 6: Exigences et procédures d'essai pour l'évaluation de la stabilité vis-à-vis des
vents traversiers;
Version allemande EN 14067-6:2010

Gesamtumfang 130 Seiten

Normenausschuss Fahrweg und Schienenfahrzeuge (FSF) im DIN

Nationales Vorwort

Dieses Dokument (EN 14067-6:2010) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom DIN (Deutschland) gehalten wird.

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

Deutsche Fassung

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

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

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

Diese Europäische Norm wurde vom CEN am 24. Oktober 2009 angenommen.

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

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

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



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

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

Inhalt

Seite

Vorwort	7
Einleitung.....	8
1 Anwendungsbereich	8
2 Normative Verweisungen.....	8
3 Begriffe	8
4 Symbole und Abkürzungen	9
5 Verfahren zur Bewertung der Seitenwindstabilität von Fahrzeugen.....	12
5.1 Allgemeines.....	12
5.2 Anwendbarkeit von Verfahren zur Bestimmung der Seitenwindstabilität für die Fahrzeug- bewertung.....	12
5.3 Bestimmung der aerodynamischen Beiwerte.....	14
5.3.1 Allgemeines.....	14
5.3.2 Vorhersageformeln.....	14
5.3.3 Numerische Strömungssimulation (CFD)	15
5.3.4 Windkanalmessungen im Modellmaßstab	18
5.4 Bestimmung der Radentlastung	23
5.4.1 Allgemeines.....	23
5.4.2 Einfaches Verfahren mit zweidimensionalem Fahrzeugmodell (Drei-Massen-Modell).....	23
5.4.3 Erweitertes quasi-statisches Verfahren	27
5.4.4 Zeitabhängiges MKS-Verfahren mit Anwendung des Wind-Szenarios Chinesischer Hut.....	30
5.5 Darstellungsform von Windkennkurven (WKK)	38
5.5.1 Allgemeines.....	38
5.5.2 Darstellung der Windkennkurven von Personenfahrzeugen und Lokomotiven.....	38
5.5.3 Darstellung der Windkennkurven von Güterfahrzeugen.....	40
6 Verfahren zur Ermittlung der benötigten Streckendaten.....	41
6.1 Allgemeines.....	41
6.2 Darstellung der Streckendaten.....	41
6.2.1 Allgemeines.....	41
6.2.2 Horizontalprofil	41
6.2.3 Vertikalprofil.....	42
6.2.4 Entwurfsgeschwindigkeit der Strecke.....	43
6.2.5 Wände	44
6.2.6 Meteorologische Eingangsdaten zur Streckenbeschreibung.....	44
6.2.7 Integrierte Streckendatenbank.....	45
6.2.8 Empfohlene Auflösung/Genauigkeit.....	47
7 Verfahren zur Bewertung der Windexposition von Eisenbahnlinien	47
8 Verfahren zur Untersuchung und Bewertung des Seitenwindrisikos.....	47
9 Erforderliche Dokumentation	48
9.1 Allgemeines.....	48
9.2 Bewertung der Seitenwindstabilität von Personenfahrzeugen und Lokomotiven	48
9.3 Bewertung der Seitenwindstabilität von Güterfahrzeugen	48
9.4 Ermittlung der Eisenbahnstreckendaten	49
Anhang A (informativ) Anwendung von Verfahren zur Bewertung der Seitenwindstabilität von Fahrzeugen in Europa	50
Anhang B (informativ) Versperrungskorrektur	54
Anhang C (normativ) Windkanal-Benchmark-Versuchsdaten für die Standardbodenkonfiguration.....	56
Anhang D (informativ) Andere Bodenkonfigurationen bei Windkanalversuchen	61

Anhang E (informativ) Windkanal-Benchmark-Versuchsdaten für andere Bodenkonfigurationen	65
Anhang F (informativ) Dammüberströmungseffekt	78
Anhang G (informativ) Windkanaluntersuchungen mit atmosphärischer Grenzschicht	79
Anhang H (informativ) Fünf-Massen-Modell	86
Anhang I (normativ) Mathematisches Modell des Chinesischen Huts	101
Anhang J (informativ) Stochastisches Windmodell	108
Anhang K (informativ) Standicherheit von Personenzugfahrzeugen und Lokomotiven nach nationalen Richtlinien	116
Anhang L (informativ) Informationen zu Bewertungsverfahren der Windexposition einer Eisenbahnlinie	119
Anhang M (informativ) Übergangsbestimmungen für diese Europäische Norm	122
Anhang ZA (informativ) Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm und den grundlegenden Anforderungen der EG-Richtlinie 2008/57/EG	123
Literaturhinweise	128

Bilder

Bild 1 — Skizze für die Windkanalkonfiguration Einzelgleis mit Schotter und Schienen (Vorderansicht, 1:1-Maßstab)	22
Bild 2 — Skizze für die Windkanalkonfiguration Einzelgleis mit Schotter und Schienen (Seitenansicht und Draufsicht, 1:1-Maßstab)	22
Bild 3 — Darstellung des Drei-Massen-Modells	25
Bild 4 — Darstellung Radaufstandspunkt	29
Bild 5 — Beispiel für den räumlichen Verlauf des Winds bei Anwendung des Böen-Modells Chinesischer Hut	31
Bild 6 — Darstellung des Abfalls der Windgeschwindigkeit im Böen-Szenario Chinesischer Hut	33
Bild 7 — 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	34
Bild 8 — Darstellung des geometrischen Verfahrens zur Berücksichtigung des Angriffswinkels	37
Bild 9 — Darstellung des geometrischen Verfahrens zur Berücksichtigung des Angriffswinkels für die Windkennkurven auf gerader Strecke	38
Bild C.1 — Kontur eines Windkanalmodells eines ICE-3-Endwagens	56
Bild C.2 — Kontur eines Windkanalmodells eines TGV-Duplex-Triebkopfs	58
Bild C.3 — Kontur eines Windkanalmodells eines ETR-500-Triebkopfs	60
Bild D.1 — Skizze für die Windkanalkonfiguration Flachgrund mit 235 mm Spalt	61
Bild D.2 — Skizze der Schotterbettgeometrie	62
Bild D.3 — Skizze der Dammgeometrie	62
Bild D.4 — Skizze für die Windkanalkonfiguration Flachgrund ohne Spalt	63
Bild D.5 — Schotterbett- und Schienen-Konfiguration eines nicht überhöhten Gleises in Großbritannien	64
Bild D.6 — Sägezahnförmig überhöhtes Schotterbett mit Schienen in Großbritannien	64

Bild F.1 — Darstellung des Dammüberströmungsfaktors	78
Bild G.1 — Oberer und unterer Grenzwert für Profile der mittleren Geschwindigkeit	80
Bild H.1 — Darstellung des Fünf-Massen-Modells	87
Bild I.1 — Koordinatensystem	101
Bild I.2 — Abhängigkeit von f von U_{mean} und U_{max}	103
Bild J.1 — Ablaufplan des Verfahrens	109
Bild J.2 — Parameter C und m als Funktion der Rauigkeitshöhe z_0 für die Berechnung von xL_u (Zusammenhang nach Couninhan)	111

Tabellen

Tabelle 1 — Symbole	9
Tabelle 2 — Anwendbarkeit von Verfahren zur Bestimmung der Seitenwindstabilität für die Fahrzeugbewertung	13
Tabelle 3 — Parameter für die Standard-Bodenkonfiguration (Normalspur)	14
Tabelle 4 — Methodikfaktor f_m für UIC-Standardspurweite (1 435 mm) für verschiedene Fahrzeugtypen	25
Tabelle 5 — Funktionen für den Chinesischen Hut	34
Tabelle 6 — Darstellungsform der Windkennkurven-Tabelle für Personenfahrzeuge und Lokomotiven, betrieben ohne Neigetechnik	39
Tabelle 7 — Darstellungsform der Windkennkurven-Tabelle für Fahrzeuge, betrieben mit aktiver Neigetechnik	39
Tabelle 8 — Darstellungsform der Windkennkurven-Tabelle für Güterfahrzeuge	40
Tabelle 9 — Darstellung der Parameter des Horizontalprofils	42
Tabelle 10 — Darstellung der Vertikalprofilparameter	43
Tabelle 11 — Darstellung der Streckenentwurfsgeschwindigkeit	43
Tabelle 12 — Darstellung der Wand	44
Tabelle 13 — Darstellung der Streckendaten; meteorologischer Teil	45
Tabelle 14 — Darstellung der integrierten Streckendatenbank	46
Tabelle 15 — Geforderte Mindestauflösung/-genauigkeit	47
Tabelle A.1 — Anwendung methodologischer Elemente zur Fahrzeugbewertung in Europa (aerodynamische Bewertung)	50
Tabelle A.2 — Anwendung methodologischer Elemente zur Fahrzeugbewertung in Europa (Bewertung der Fahrzeugdynamik)	53
Tabelle C.1 — Referenzdaten für die aerodynamischen Beiwerte des ICE-3-Endwagenmodells für die Bodenkonfiguration „Einzelgleis mit Schotter und Schienen“ nach 5.3.4.11	57
Tabelle C.2 — Referenzdaten für die aerodynamischen Beiwerte des TGV-Duplex-Triebkopfmodells für die Bodenkonfiguration „Einzelgleis mit Schotter und Schienen“ nach 5.3.4.11	59
Tabelle C.3 — Referenzdaten für die aerodynamischen Beiwerte des ETR-500-Triebkopfmodells für die Bodenkonfiguration „Einzelgleis mit Schotter und Schienen“ nach 5.3.4.11	60

Tabelle E.1 — Benchmark-Daten für die aerodynamischen Beiwerte des ICE-3-Endwagens auf Flachgrund mit Spalt, gemessen von der DB AG im DNW-Windkanal an einem 1:7-Modell bei 80 m/s	65
Tabelle E.2 — Benchmark-Daten für die aerodynamischen Beiwerte des ICE-3-Endwagens auf der windzugewandten Seite von zwei Gleisen mit Schotterbett und Schienen, gemessen von CSTB im CSTB-Windkanal an einem 1:15-Modell bei 50 m/s.....	66
Tabelle E.3 — Benchmark-Daten für die aerodynamischen Beiwerte des ICE-3-Endwagens auf der Leeseite von zwei Gleisen mit Schotterbett und Schienen, gemessen von CSTB im CSTB-Windkanal an einem 1:15-Modell bei 50 m/s.....	67
Tabelle E.4 — Benchmark-Daten für die aerodynamischen Beiwerte des ICE-3-Endwagens auf der windzugewandten Seite des Standarddamms mit 6 m Höhe, gemessen von CSTB im CSTB-Windkanal an einem 1:15-Modell bei 50 m/s.....	68
Tabelle E.5 — Benchmark-Daten für die aerodynamischen Beiwerte des ICE-3-Endwagens auf der Leeseite des Standarddamms mit 6 m Höhe, gemessen von CSTB im CSTB-Windkanal an einem 1:15-Modell bei 50 m/s	69
Tabelle E.6 — Benchmark-Daten für die aerodynamischen Beiwerte des TGV-Duplex-Triebkopfs auf Flachgrund mit Spalt, gemessen von der DB AG im DNW-Windkanal an einem 1:7-Modell bei 80 m/s.....	70
Tabelle E.7 — Benchmark-Daten für die aerodynamischen Beiwerte des TGV-Duplex-Triebkopfs auf der windzugewandten Seite von zwei Gleisen mit Schotterbett und Schienen, gemessen von CSTB im CSTB-Windkanal an einem 1:15-Modell bei 25 m/s	71
Tabelle E.8 — Benchmark-Daten für die aerodynamischen Beiwerte des TGV-Duplex-Triebkopfs auf der Leeseite von zwei Gleisen mit Schotterbett und Schienen, gemessen von CSTB im CSTB-Windkanal an einem 1:15-Modell bei 25 m/s.....	72
Tabelle E.9 — Benchmark-Daten für die aerodynamischen Beiwerte des TGV-Duplex-Triebkopfs auf der windzugewandten Seite des Standarddamms mit 6 m Höhe, gemessen von CSTB im CSTB-Windkanal an einem 1:25-Modell bei 40 m/s	73
Tabelle E.10 — Benchmark-Daten für die aerodynamischen Beiwerte des TGV-Duplex-Triebkopfs auf der Leeseite des Standarddamms mit 6 m Höhe, gemessen von CSTB im CSTB-Windkanal an einem 1:25-Modell bei 40 m/s.....	74
Tabelle E.11 — Benchmark-Daten für die aerodynamischen Beiwerte des ETR-500-Triebkopfs auf Flachgrund mit Spalt, gemessen vom Politecnico di Milano im MPWT-Windkanal an einem 1:10-Modell bei 12 m/s.....	75
Tabelle E.12 — Benchmark-Daten für die aerodynamischen Beiwerte für den ETR-500-Triebkopf auf der windzugewandten Seite des Standarddamms mit 6 m Höhe, gemessen vom Politecnico di Milano im MPWT-Windkanal an einem 1:10-Modell bei 12 m/s.....	76
Tabelle E.13 — Benchmark-Daten für die aerodynamischen Beiwerte des ETR-500-Triebkopfs auf der Leeseite des Standarddamms mit 6 m Höhe, gemessen vom Politecnico di Milano im MPWT-Windkanal an einem 1:10-Modell bei 12 m/s.....	77
Tabelle H.1 — Parameter der Körper.....	93
Tabelle H.2 — Parameter der Sekundärfederung.....	93
Tabelle H.3 — Parameter der Primärfederung.....	94
Tabelle H.4 — Allgemeine Parameter	94
Tabelle H.5 — Aerodynamische Beiwerte.....	94
Tabelle H.6 — Ergebnis Windkennkurven für Beispielfahrzeug 1: v_{CWC} in [m/s] über Fahrzeuggeschwindigkeit und a_q bei $\beta_W = 90^\circ$	95

Tabelle H.7 — Ergebnis Windkennkurven für Beispielfahrzeug 1: v_{CWC} in [m/s] über β_W und a_q bei $v_{max} = 160$ km/h	96
Tabelle H.8 — Parameter der Körper	97
Tabelle H.9 — Parameter der Sekundärfederung	97
Tabelle H.10 — Parameter der Primärfederung	97
Tabelle H.11 — Allgemeine Parameter	98
Tabelle H.12 — Aerodynamische Beiwerte	98
Tabelle H.13 — Ergebnis Windkennkurven für Beispielfahrzeug 2: v_{CWC} in [m/s] über Fahrzeuggeschwindigkeit und a_q bei $\beta_W = 90^\circ$	99
Tabelle H.14 — Ergebnis Windkennkurven für Beispielfahrzeug 2: v_{CWC} in [m/s] über β_W und a_q bei $v_{max} = 200$ km/h	100
Tabelle I.1 — Beispielrechnung zum Böenszenario Chinesischer Hut mit $U_{max} = 30,0$ m/s, $v_{tr} = 200$ km/h, Fahrzeuglänge = 24 m	105
Tabelle ZA.1 – Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm, der HS TSI RST, die im Amtsblatt vom 26. März 2008 veröffentlicht wurde, und der Richtlinie 2008/57/EG	124
Tabelle ZA.2 – Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm, der HS TSI INF, die im Amtsblatt vom 19. März 2008 veröffentlicht wurde, und der Richtlinie 2008/57/EG	125
Tabelle ZA.3 – Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm, der CR TSI RST Güterwagen Stand Juli 2006 und ihrer zwischenzeitlichen Überarbeitung, die am 26. November 2008 vom „Railway Interoperability and Safety Committee“ beschlossen wurde, und der Richtlinie 2008/57/EG	125
Tabelle ZA.4 – Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm, der CR TSI INF (Schluss-Entwurf Version 3.0 Stand 12.12.2008) und der Richtlinie 2008/57/EG	126
Tabelle ZA.5 – Zusammenhang zwischen dieser Europäischen Norm, der CR TSI Personenfahrzeuge und Lokomotiven (Vorläufiger Entwurf Rve 2.0 Stand 14. November 2008) und der Richtlinie 2008/57/EG	127

Vorwort

Dieses Dokument (EN 14067-6:2010) wurde vom Technischen Komitee CEN/TC 256 „Eisenbahnwesen“ erarbeitet, dessen Sekretariat vom DIN gehalten wird.

Diese Europäische Norm muss den Status einer nationalen Norm erhalten, entweder durch Veröffentlichung eines identischen Textes oder durch Anerkennung bis Juli 2010, und etwaige entgegenstehende nationale Normen müssen bis Juli 2010 zurückgezogen werden.

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

Dieses Dokument wurde unter einem Mandat erarbeitet, das die Europäische Kommission und die Europäische Freihandelszone dem CEN erteilt haben, und unterstützt grundlegende Anforderungen der EG-Richtlinien.

Zum Zusammenhang mit EG-Richtlinien siehe informativen Anhang ZA, der Bestandteil dieses Dokuments ist.

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

- *Teil 1: Formelzeichen und Einheiten*
- *Teil 2: Aerodynamik auf offener Strecke*
- *Teil 3: Aerodynamik im Tunnel*
- *Teil 4: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik auf offener Strecke*
- *Teil 5: Anforderungen und Prüfverfahren für Aerodynamik im Tunnel*
- *Teil 6: Anforderungen und Prüfverfahren zur Bewertung von Seitenwind*

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

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 gilt für die Seitenwindbewertung des Eisenbahnbetriebs unter Berücksichtigung der in Anhang M aufgeführten Empfehlungen für die Anwendung dieser Norm (Übergangsbestimmungen). Die dargestellten Verfahren sind für Personenzüge bis zu 360 km/h Fahrgeschwindigkeit und für Güterfahrzeuge bis zu 160 km/h Fahrgeschwindigkeit angewendet worden. Diese Europäische Norm gilt für Reisezugwagen, Triebzüge, Güterwagen, Lokomotiven und Triebköpfe.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente 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 14067-1:2003, *Bahnanwendungen — Aerodynamik — Teil 1: Formelzeichen und Einheiten*

EN 14067-2, *Bahnanwendungen — Aerodynamik — Teil 2: Aerodynamik auf offener Strecke*

EN 14363, *Bahnanwendungen — Fahrtechnische Prüfung für die fahrtechnische Zulassung von Eisenbahnfahrzeugen — Prüfung des Fahrverhaltens und stationäre Versuche*

EN 15663, *Bahnanwendungen — Fahrzeugmassedefinitionen*

3 Begriffe

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Begriffe nach EN 14067-1:2003 und die folgenden Begriffe.

3.1 leeseitige Schiene

Schiene auf der windabgewandten Seite

3.2

Bias

systematischer Fehler, der eine Abschätzung beeinflusst

ANMERKUNG 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.

4 Symbole und Abkürzungen

Für die Anwendung dieses Dokuments gelten die Symbole und Abkürzungen nach EN 14067-1:2003 und die Folgenden.

Tabelle 1 — Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
$\tilde{A}$	—	Normierte Böen-Amplitude	
a_m	s/m	Streuung	Aus der Extremwertanalyse von Windkanaldaten bestimmte Verteilung
a_q	m/s ²	Unausgeglichene Querbeschleunigung	
A_{xz}	m ²	Bezugsseitenfläche des Fahrzeugmodells	Seitenfläche des Fahrzeugmodells
A_0	m ²	Vorgegebene Bezugsfläche	10 m ²
b_A		Abstand der Radaufstandspunkte	
$b_{A,min}$		Mindestabstand der Radaufstandspunkte	
c_{Fi}	—	Dimensionsloser Kraftbeiwert, bezogen auf A_0	$c_{Fi} = \frac{2 \cdot F_i}{\rho \cdot v^2 A_0}$, $i = x, y, z$
c_{Mi}	—	Dimensionsloser Momentenbeiwert, bezogen auf A_0	$c_{Mi} = \frac{2 \cdot M_i}{\rho \cdot v^2 A_0 d_0}$, $i = x, y, z$
$c_{Mx,lee}$	—	Dimensionsloser Rollmomentenbeiwert um die leeseitige Schiene	
$c_{Mx,lee,bmk}$	—	Benchmark-Rollmomentenbeiwert um die leeseitige Schiene	Rollmomentenbeiwert aus Benchmark-Versuchen
d_0	m	Vorgegebene Bezugslänge	3 m
F	Hz	Frequenz	
f_h		Funktion des Versperrungsmaßes eines Damms, B_E	
$f_{\Delta Q}$	—	Relativer windseitiger Radentlastungsfaktor	0,9
f_m		Methodikfaktor	Zum Ausgleich von Unsicherheiten des Drei-Massen-Modells
h	m	Fahrzeughöhe	
h_{cant}	m	Überhöhung	
h_{VEH}	m	Fahrzeughöhe von Schienenoberkante bis Dach	
h_{BL}	m	Grenzschichthöhe	

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
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
L	m	Fahrzeuglänge	
L_{VEH}	m	Längenparameter des Fahrzeugwagenkastens	
$^x L_i$	m	Integrale Längenskala der Windgeschwindigkeitskomponente i in x-Richtung	$i = u, v, w$
$^y L_i$	m	Integrale Längenskala der Windgeschwindigkeitskomponente i in y-Richtung	$i = u, v, w$
$^x L_u$	m	Turbulenzlängenmaß	Turbulenzlängenmaß in der Kernströmung in x-Richtung
$^x L_{u_FS}$	m	Turbulenzlängenmaß im 1:1-Maßstab	
M_m	Nm	Rückstellmoment aufgrund der Fahrzeugmassen	
M_{la}	Nm	Moment durch unausgeglichene Querbesehleunigung	
M_{CoG}	Nm	Moment infolge der Querverschiebung des Schwerpunkts der gefederten Massen	
$M_{x,lee}$	Nm	Rollmoment um die leeseitige Schiene	
m	kg	(Bei der Bewertung von Seitenwind zu berücksichtigende) Fahrzeugmasse	Bezieht sich auf die Betriebsmasse des betriebsbereiten Fahrzeugs nach EN 15663
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
ΔQ		Radentlastung	
Q_0	N	Mittlere statische Radaufstandskraft	
$\Delta Q/Q_0$	—	Relative Radentlastung	
R_C	m	Kurvenradius	
Re_{max}		Maximale Reynolds-Zahl	Die in einem Windkanalversuch maximal erreichbare Reynolds-

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
			Zahl
S_U	$\text{m}^2/\text{s}^2/\text{Hz}$	Spektrale Leistungsdichte	
S_t	—	Zeitmaßstab in Modellebene	Verhältnis des Zeitmaßstabs für das Modell zum Zeitmaßstab am Original
T_{samp}	s	Dauer der Datenerfassung	Aufnahmedauer der Datenerfassung
Tu_x		Turbulenzgrad	$Tu_x = \left(\overline{u'^2} / \bar{u}^2 \right)^{0,5}$
U_{mean}	m/s	Mittlere Windgeschwindigkeit	Bezogen auf 4 m Höhe über Grund stromaufwärts
U	m/s	Wind(kanal)geschwindigkeit	
$U(t)$	m/s	Momentane Wind(kanal)geschwindigkeit	
U_{turb}	m/s	Turbulente Komponente der Windgeschwindigkeit entlang der mittleren Windrichtung	
v_a	m/s	Relative Windgeschwindigkeit	
v_{max}	m/s	Maximale Zuggeschwindigkeit	
v_W	m/s	Windgeschwindigkeit	
V_x	m/s	Größe des Windgeschwindigkeitsvektors	Bezogen auf 4 m Höhe über Grund stromaufwärts
x_B	%	Versperrungsgrad für $\beta = 30^\circ$	Projizierte Seitenfläche der gesamten Modellkonfiguration zur Querschnittsfläche des Windkanals
y_B	m	(Maximale) Verschiebung des Kontaktpunkts auf dem Rad in Richtung des Spurkranzes	
z	m	Höhe über Grund	
z_{CoG}	m	Schwerpunkthöhe gesamtes Fahrzeug	
$z_{\text{CoG},0}$	m	Schwerpunkthöhe ungefederte Massen	
$z_{\text{CoG},1}$	m	Schwerpunkthöhe primär gefederte Massen	
$z_{\text{CoG},2}$	m	Schwerpunkthöhe sekundär gefederte Massen	
z_0	m	Rauigkeitshöhe	
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
$\delta_{99\%}$	m	Grenzschichtdicke	z-Koordinate, bei der die lokale Geschwindigkeit 99 % der freien

Tabelle 1 (fortgesetzt)

Symbol	Einheit	Bedeutung	Erklärung, Bemerkung
			Strömungsgeschwindigkeit ist
$\varepsilon_{\max}$		Maximaler Toleranz-Zielwert	
$\varepsilon_{\text{mean}}$		Mittlerer Toleranz-Zielwert	
ρ_0	kg/m ³	Referenzluftdichte	$\rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3$

5 Verfahren 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 Fahrgeschwindigkeiten, unausgeglichene Querschleunigungen oder Windangriffswinkel 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, 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 kg/m³ 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 fahrzeugdynamischen Eigenschaften.

Unterabschnitt 5.2 gibt die Anwendbarkeit der verschiedenen Verfahren zur Fahrzeugbewertung an.

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

Unterabschnitt 5.4 beinhaltet verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Radentlastung.

Unterabschnitt 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

Die Unterabschnitte 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	
Geschwindigkeitsbereich	$v_{\max} \leq 140 \text{ km/h}$	$140 \text{ km/h} < v_{\max} \leq 200 \text{ km/h}$	$200 \text{ km/h} < v_{\max} \leq 360 \text{ km/h}^a$	$v_{\max} \leq 80 \text{ km/h}$	$80 \text{ km/h} < v_{\max} \leq 160 \text{ km/h}$
Vereinfachter Nachweis der Seitenwindstabilität	Ja, geregelt durch nationale Anforderungen (für weitere Information siehe Anhang K).	Ja, Unterabschnitt 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 anwendbar bei Zügen mit aktiver Neigetechnik 5.4.2 nicht anwendbar bei Gliederzügen	Ja, Unterabschnitt 5.3.4 + 5.4.2 <u>Einschränkungen:</u> 5.4.2 nicht anwendbar bei Gliederzügen	Ja, geregelt durch nationale Anforderungen (für weitere Information siehe Anhang K).	Ja, Unterabschnitt 5.3.2 + 5.4.2 oder 5.3.3 + 5.4.2
Voller Nachweis der Seitenwindstabilität	Nein	Ja, Unterabschnitt 5.3.4 + 5.4.3 oder 5.3.4 + 5.4.4	Ja, Unterabschnitt 5.3.4 + 5.4.3 oder 5.3.4 + 5.4.4	Nein	Ja, Unterabschnitt 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.					

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 gilt nur für die Normalspurweite von 1,435 m.

Die Gleichung 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 EN 14067-1 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 $\tilde{\beta} = |\arctan[\tan(\beta \cdot z_5)]|$

sofern die Parameter $z_0, z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, f_L$, und f_{VEH} gegeben sind. $c_{Mx,lee}$ bezieht sich auf A_0 und d_0 ; diese Normalisierung weicht von EN 14067-1 ab.

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

Parameter	Personenwagen (vorlaufendes Endfahrzeug) und Lokomotive	Personenwagen (Mittelwagen)	Güterfahrzeug
z_0	0		Bei $0^\circ \leq \beta \leq 40^\circ$: $z_0 = 0$ Bei $\beta > 40^\circ$: $z_0 = 0,55$

Tabelle 3 (fortgesetzt)

Parameter	Personenwagen (vorlaufendes Endfahrzeug) und Lokomotive	Personenwagen (Mittelwagen)	Güterfahrzeug
z_1	$4,3 \times 10^{-3}$		Bei $0^\circ \leq \beta \leq 40^\circ$: $z_1 = 0,01375$ Bei $\beta > 40^\circ$: $z_1 = 0$
z_2	$2,2 \times 10^{-4}$		0
z_3	$-2,1 \times 10^{-6}$		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	$f_L = 2 - \frac{L_{VEH}}{L_0}$ 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 nach EN 14067-1		

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 nach EN 14067-1. Zusätzlich liefert CFD eine Prognose für die Geschwindigkeits- und Druckfelder und ermöglicht eine einfache Betrachtung unterschiedlicher Konfigurationen.

ANMERKUNG Diejenigen, die CFD-Simulationen und Ergebnisanalysen durchführen, sollten ihre Kompetenz durch belegbare Arbeiten auf dem Gebiet der eisenbahnaerodynamischen Simulation nachweisen können und Kenntnisse in der Fahrzeugaerodynamik besitzen.

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: Large Eddy Simulation (LES), Detached Eddy Simulation (DES), Reynolds-gemittelte Navier Stokes Gleichungen (RANS).

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 Radaufstandpunkt 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 Dammes diese Höhe die Höhe des Dammes 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- und Geschwindigkeitsgradienten, 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 nicht-linearen 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 Dateninterpolation

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.

ANMERKUNG Diejenigen, die Windkanalversuche und Ergebnisanalysen durchführen, sollten ihre Kompetenz durch belegbare Arbeiten auf dem Gebiet aerodynamischer Versuche in Windkanälen nachweisen können und Kenntnisse in der Fahrzeugaerodynamik besitzen.

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. 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 14067-2 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:

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

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

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

Allgemein darf die Mach-Zahl nicht größer als 0,3 sein. Wenn jedoch der reale Zug mit Mach-Zahlen größer als 0,3 verkehrt, darf die Mach-Zahl im Versuch nicht größer sein als die des realen Zugs.

5.3.4.7 Versperrung

Das Versperrungsmaß x_B ist für einen Schiebewinkel von 30° festgelegt. 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 Genauigkeit der Modellierung

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. Ist dies nicht erreicht, sollten Modifikationen am Modell und an der Befestigung durchgeführt 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 $287 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ 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 $\pm 5 \text{ cm}$ am Original modelliert werden.

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 Standardbodenkonfiguration Einzelgleis mit Schotter und Schienen zeigen Bild 1 und Bild 2.

Maße in Millimeter

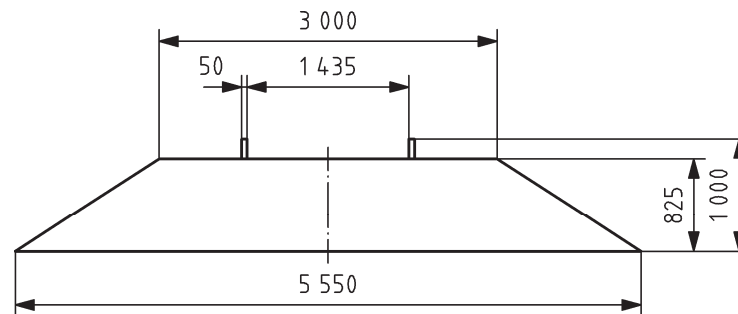
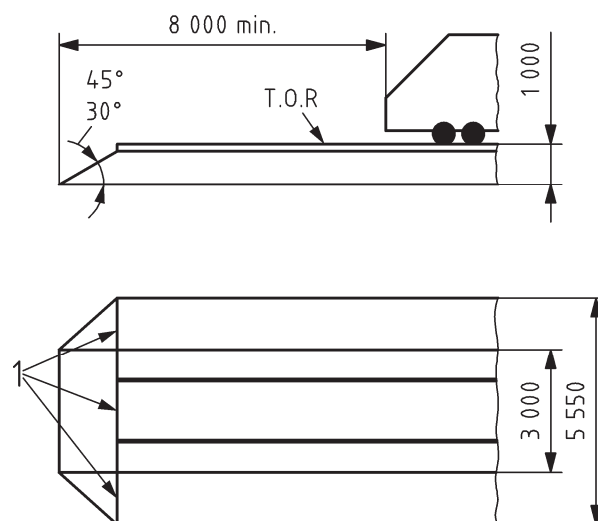


**Bild 1 — Skizze für die Windkanalkonfiguration Einzelgleis mit Schotter und Schienen
(Vorderansicht, 1:1-Maßstab)**

Maße in Millimeter



Legende

- 1 Kantenrundung $R = 300$

**Bild 2 — 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 die gegenwärtigen (und zusätzlichen) Interoperabilitätsanforderungen in Anhang A dargestellt. Ebenfalls in Anhang A wird ein Überblick zu den Versuchsanforderungen anderer Vorgehensweisen gegeben.

5.3.4.13 Dateninterpolation

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 EN 14067-1 mit Ausnahme des Windes von rechts in Fahrtrichtung (siehe Bild 3) ist das Momentengleichgewicht zur leeseitigen Schiene gegeben durch:

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

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 ist größer als 1,0 und bei UIC-Standardgleis (1 435 mm) nach Tabelle 4 auszuwählen.

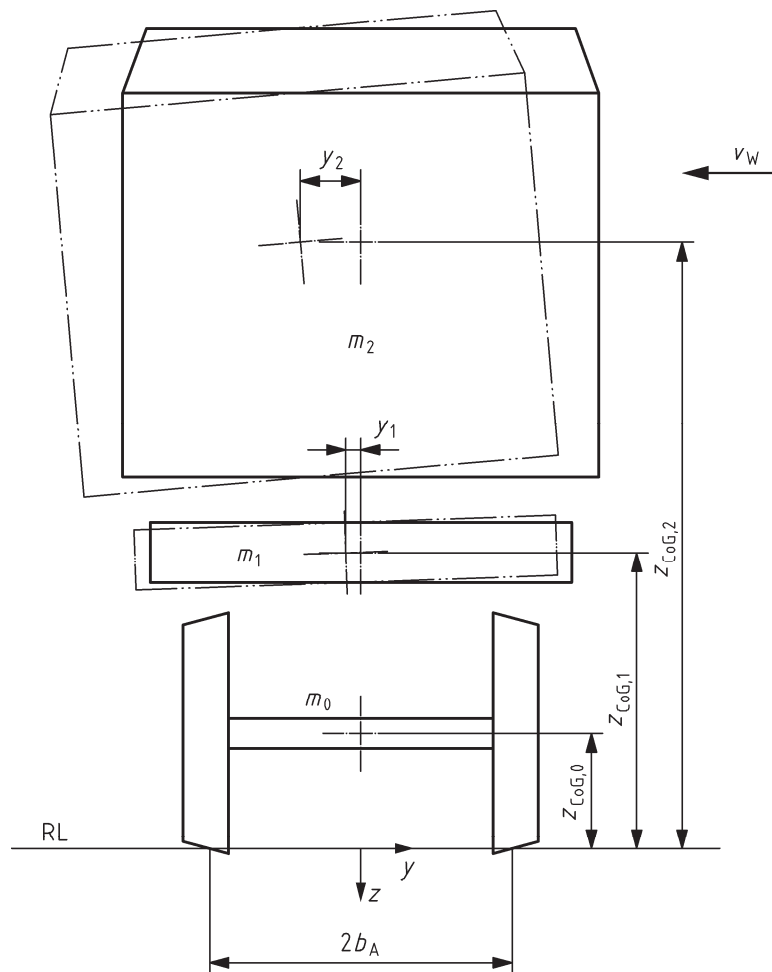


Bild 3 — Darstellung des Drei-Massen-Modells

Tabelle 4 — Methodikfaktor f_m für UIC-Standardspurweite (1 435 mm) für verschiedene Fahrzeugtypen

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

Die Momente in Gleichung (5) werden nach den Gleichungen (6) bis (11) berechnet.

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

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

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

Dabei ist:

- y_1 oder y_2 negativ bei Schwerpunktverschiebungen nach links;
- z_{CoG} negativ;

- m_0 die ungefederte Masse;
- m_1 die primär gefederte Masse;
- m_2 die sekundär gefederte Masse;
- $m = m_0 + m_1 + m_2$ die gesamte Fahrzeugmasse;
- der Abstand der Radaufstandspunkte (für UIC-Standardgleis) $2 b_A = 1,5 \text{ m}$;
- a_q die unausgeglichene Querbewegung; bei einem bestimmten Bogen mit Radius R_c [m] mit Überhöhung h [m];

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

(R_c positiv bei Rechtskurven, h positiv führt zu Rotation des Gleises in x-Richtung);

- 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 15273-2:2009 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 Sekundäranschlüge 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 Achslasten 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 (a_q);
- 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:

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

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

Die relative Anströmgeschwindigkeit wird aus der Windgeschwindigkeit, der Zuggeschwindigkeit und dem Winkel zwischen Wind- und Gleisrichtung nach EN 14067-1 bestimmt.

Die relative Anströmgeschwindigkeit und den Schiebewinkel berechnet man wie folgt (siehe auch EN 14067-1):

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

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

Bei der Berechnung der Rad-Gleis-Kräfte (Q -Kräfte) ist die seitliche Verschiebung des Kontaktpunktes auf dem Rad in Richtung des Spurkranzes zu berücksichtigen (siehe Bild 4).

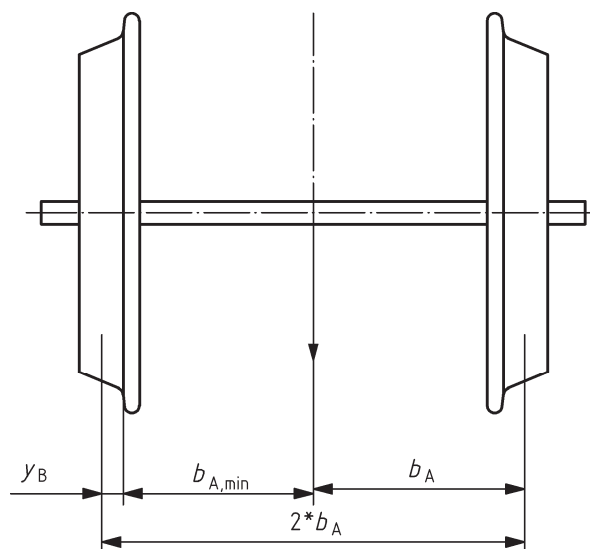


Bild 4 — Darstellung Radaufstandspunkt

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

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

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

$$y_B = 0,028 \text{ m (bei Nennspurweite 1 435 mm)} \quad (17)$$

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 Reisen, 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 ist die Berechnung mit Normalspurweite, 60E2-Schienenprofil, neuen Radprofilen sowie Schieneneinbauneigung von 1/20 und 1/40 durchzuführen. Der ungünstigste Fall wird für die Bewertung gegenüber Grenzwerten verwendet. 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 ~ 99 %) und eine Überschreitenswahrscheinlichkeit 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 5);
- der mittlere Wind wird als horizontal angenommen; nur die Längskomponente U wird benutzt. Diese Komponente stellt den maßgeblichen Teil der Windfluktuationen dar, sie ist die Projektion des momentanen Windvektors auf die mittlere 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, bezogen auf die Strecke.

Die folgenden Parameter sind festgelegt:

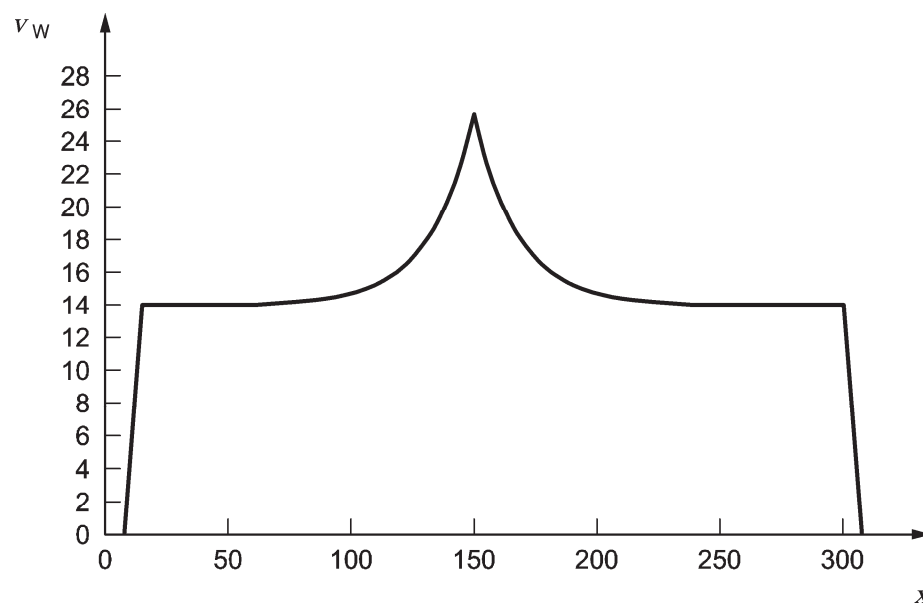
$z = 4 \text{ m}$ Referenzhöhe,

$\tilde{A} = 2,84$ mit der mittleren Windgeschwindigkeit U normierte Böen-Amplitude $\tilde{A} = (U_{max} - U) / \sigma_u$,

$z_0 = 0,07 \text{ m}$ 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 5 dargestellt ist.



Legende

x Weg, in m

v_W Windgeschwindigkeit, in m/s

Bild 5 — 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:

$$U_{\text{mean}} = \frac{U_{\text{max}}}{1,6946} \quad (20)$$

Die spektrale Leistungsdichte wird berechnet aus:

$$S_u(n) = \frac{22,9839 \text{ m} \cdot U_{\text{mean}}}{\left(1 + 652107 \text{ m}^2 \cdot \left(\frac{n}{U_{\text{mean}}}\right)^2\right)^{\frac{5}{6}}} \quad (21)$$

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

Die charakteristische Frequenz f für die Böe ist gegeben durch das Integral:

$$f = 0,239091 \cdot \left[\frac{\int_{1/300}^1 n^2 \cdot S_u(n) \, dn}{\int_{1/300}^1 S_u(n) \, dn} \right]^{0,5} \quad (22)$$

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

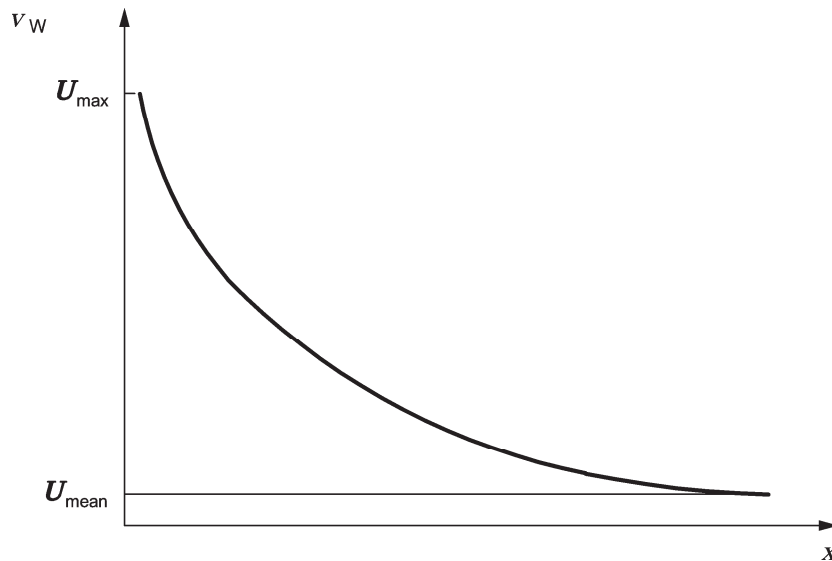
Die Windgeschwindigkeit senkrecht zum Fahrzeug auf dem Gleis kann bestimmt werden mit:

$$v_{W-90} = U_{\text{mean}} \cdot (1 + 0,6946 \cdot C_{90}) \quad (23)$$

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

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 6).



Legende

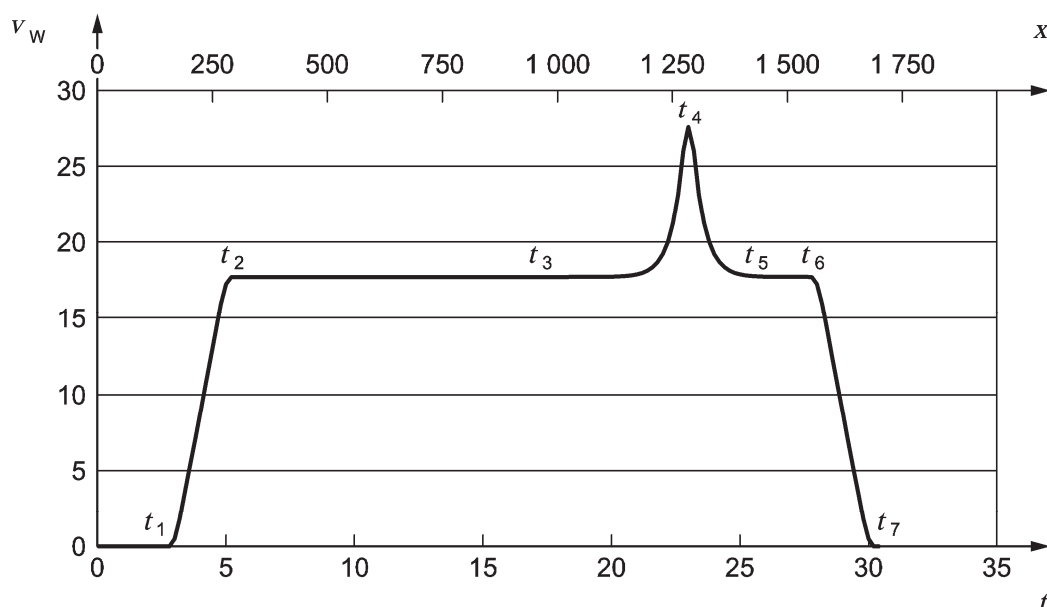
x Weg
 v_W Windgeschwindigkeit

Bild 6 — 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 7, Beispiel in Anhang I, I.2).



Legende

x in m
 v_W in m/s
 t in s

Bild 7 — 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 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 kann gleich t_5 gewählt werden. Wenn $t_6 \neq t_5$ 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
$[t_0:t_1]$	$u(t) = 0$
$[t_1:t_2]$	$u(t) = \frac{U_{mean}}{t_2 - t_1} \cdot (t - t_1)$
$[t_2:t_3]$	$u(t) = U_{mean}$
$[t_3:t_4]$	$u(t) = \text{gespiegelter Chinesischer Hut; } t_3: \text{ Abweichung zwischen } U_{mean} \text{ und der berechneten Windgeschwindigkeit von weniger als 1 \%}$

Tabelle 5 (fortgesetzt)

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

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 wird entweder der mittlere Wind oder die Böe angewendet. Da die Böe räumlich fixiert ist und auf jedes einzelne Fahrzeug wirkt, wirken die Kräfte und Momente mit einem Zeitverzug. 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 5 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, Nichtlinearitäten in der Steifigkeit, Dämpfungseigenschaften in Vertikal- und Querrichtung, Nichtlinearitäten 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.

5.4.4.4 Verifikation des Fahrzeugmodells

Eine Verifikation des verwendeten Fahrzeugmodells sollte nachweisen, dass die für die Seitenwindstabilität wesentlichen Fahrzeugeigenschaften mit hinreichender Genauigkeit wiedergegeben sind. Die Verifikation des Fahrzeugmodells muss anhand des Vergleichs der Berechnungen mit Messergebnissen, welche auf den folgenden Werten beruhen, durchgeführt werden:

- 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 MKS-Modell modifiziert werden. Modifizierungen des MKS-Modells müssen entsprechend den oben stehenden Ausführungen verifiziert werden.

5.4.4.5 Eingangsgroößen aerodynamische Kräfte und Momente

Berechnungen des Fahrzeugverhaltens unter dem Einfluss von über ihre Maximalgeschwindigkeit $U_{\max}$ definierten Böen sind mit zunehmenden Werten für $U_{\max}$ durchzuführen, bis das Kriterium für die Radentlastung erreicht ist. Die entsprechenden Darstellungen der $U_{\max}$ -Werte, die zur maximal zulässigen Radentlastung führen, über der Fahrgeschwindigkeit und/oder dem Windwinkel werden Windkennkurven genannt. Die Darstellung der Windkennkurven ist in 5.5 detailliert beschrieben.

Die Simulation des Fahrzeugverhaltens unter Böeneinfluss ist mit dem in 5.4.4.2 beschriebenen Böen-Szenario durchzuführen.

Die fünf Kraft- und Momentenkomponenten (F_y , F_z , M_x , M_y und M_z) sind mit den folgenden Gleichungen zu berechnen:

$$\left. \begin{aligned} F_i(t) &= \frac{1}{2} \rho A_0 c_{Fi}(\beta(t)) v_a^2(t) \\ M_i(t) &= \frac{1}{2} \rho A_0 d_0 c_{Mi}(\beta(t)) v_a^2(t) \end{aligned} \right\}, i \in \{x, y, z\} \quad (25)$$

$$\left. \begin{aligned} v_a(t) &= \sqrt{(v_{tr} + v_W(t) \cos \beta_W)^2 + (v_W(t) \sin \beta_W)^2} \\ \beta(t) &= \arctan \left(\frac{v_W(t) \sin \beta_W}{v_{tr} + v_W(t) \cos \beta_W} \right) \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

Es muss sichergestellt werden, dass das Integrationsverfahren einen Integrationsschritt bei der maximalen Windgeschwindigkeit durchführt. Die Ausgabeschrittweite der Berechnung muss kleiner sein als 1/30 s.

5.4.4.6 Berechnung der Windkennkurven

5.4.4.6.1 Auswertung des Kriteriums

Für jeden Simulationslauf mit veränderten Parametern erhält man Zeitverläufe der Q -Kräfte jeden Rades.

Die folgenden Berechnungsschritte werden benötigt:

- Berechnung der $\Delta Q/Q_0$ -Werte aus den Zeitverläufen der Q -Kräfte:

$$\frac{\Delta Q}{Q_0} = 1 - \frac{Q_{i1} + Q_{j1}}{2 \cdot Q_0} \quad (27)$$

- Tiefpassfilterung der $\Delta Q/Q_0$ -Werte mit einem 2-Hz-Butterworth-Filter 4. Ordnung oder einem anderen, nachgewiesenermaßen gleichwertigen Filter;
- Feststellung des maximalen $\Delta Q/Q_0$ -Werts am Fahrgestell.

Hierin sind Q_0 die Q -Kräfte am leeren (unbeladenen) Fahrzeug ohne jede Anregung, Q_{i1} sind die Q -Kräfte an den Rädern des ersten Radsatzes im Drehgestell, Q_{j1} sind die Q -Kräfte an den Rädern des zweiten Radsatzes im Drehgestell, jeweils im unbeladenen Zustand.

5.4.4.6.2 Berechnung des Bogeneinflusses

In Bögen wird angenommen, dass zusätzlich zum Seitenwind die Zentrifugalkraft auf das Fahrzeug wirkt.

Die Berechnung muss mit MKS für ein gerades Gleis, das entsprechend den a_q -Werten überhöht ist, durchgeführt werden.

5.4.4.6.3 Verfahren zur relativen Zerlegung des Windwinkels

Bei Zügen, die keine starke Abhängigkeit der Fahrzeugdynamik von der Zuggeschwindigkeit aufweisen, können die berechneten charakteristischen Windgeschwindigkeiten auf andere Kombinationen von Zuggeschwindigkeit und Winkel übertragen werden.

Üblicherweise wird die charakteristische Windgeschwindigkeit für einen Windwinkel von 90° zum Gleis angegeben. Um die Windkennkurven für andere Windwinkel, Fahrzeug- und Windgeschwindigkeiten zu erhalten, ist zuvor eine geometrische Zerlegung/Addition der Geschwindigkeitsvektoren durchzuführen (siehe Bild 8).

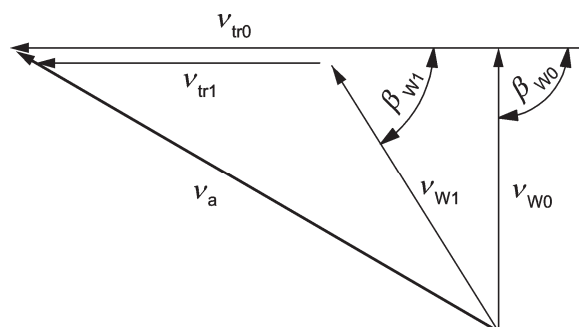


Bild 8 — Darstellung des geometrischen Verfahrens zur Berücksichtigung des Angriffswinkels

Hier ist v_a die resultierende Anströmung, der das Fahrzeug ausgesetzt ist. Die Zerlegung von v_a in eine von der Fahrzeuggeschwindigkeit herrührende Komponente (v_{tr0} und v_{tr1}) sowie eine Windkomponente (v_{W0} und v_{W1}) kann unterschiedlich erfolgen. Für die Vektorkette v_{W0} und v_{tr0} ist β_{W0} der Windwinkel, für die Vektorkette v_{W1} und v_{tr1} ist β_{W1} der Windwinkel. Für gerade Strecken kann die Windgeschwindigkeit für verschiedene Angriffswinkel direkt aus einem Diagramm entnommen werden. Bild 9 zeigt ein Beispiel, in dem $\beta_{W1} = 60^\circ$ und $\beta_{W0} = 90^\circ$ sind.