

## **Beschreibung des Stufe-2 Verfahrens für die Berechnung von Windkennkurven mit der Mehrkörpersimulation**



Dokument: 04-P-001277-T.TZF95-UN-1190  
WODAN-TP5-V0-T02

Datum: 12.10.2004

Durchführung: Deutsche Bahn AG  
DB Systemtechnik  
Simulation Strukturmechanik  
und Fahrtechnik (T.TZF95.1)  
Pionierstraße 10  
32423 Minden

**Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Angaben zum Auftrag .....</b>	<b>3</b>
<b>2 Einleitung.....</b>	<b>4</b>
2.1 Vorgehensweise .....	4
2.2 Anwendungsbereich .....	5
<b>3 Modellierung .....</b>	<b>6</b>
3.1 Fahrtechnische Modellierung .....	6
3.1.1 Modellierung der Fahrzeugdynamik .....	6
3.1.2 Verifikation.....	6
3.2 Bestimmung der aerodynamischen Fahrzeugeigenschaften.....	7
3.3 Mathematische Beschreibung des Windszenarios.....	7
3.3.1 Meteorologisches Windmodell (örtlich) .....	7
3.3.2 Koordinatensystem .....	7
3.3.3 Berechnung des Böenfaktors.....	8
3.3.4 Berechnung der Zeitkonstante .....	9
3.3.5 Berechnung der resultierenden Windgeschwindigkeit.....	10
3.3.6 Filterung.....	11
3.3.7 Zeitlicher Verlauf des Windszenarios .....	11
<b>4 Berechnung .....</b>	<b>13</b>
4.1 Berechnung der Windkräfte und –momente .....	13
4.2 Randbedingungen und Parameter .....	14
4.3 Kriterium zur Bestimmung der Windkennkurven .....	14
<b>5 Darstellung.....</b>	<b>15</b>
5.1 Windkennkurve .....	15
5.2 Bericht .....	15
<b>6 Unterschriften.....</b>	<b>16</b>
<b>7 Literatur.....</b>	<b>16</b>

## 1 Angaben zum Auftrag

Bearbeiter: Dr.-Ing. Rolf Naumann  
Deutsche Bahn AG, DB Systemtechnik  
Simulation Strukturfestigkeit und Fahrtechnik (T.TZF 95.1)  
Pionierstrasse 10  
32423 Minden

Auftraggeber: TZI

Verteiler: T.TZF95.1, T.TZF13

Seiten: 16

## 2 Einleitung

Die Berechnung von Windkennkurven nach dem Stufe-2 Verfahren ist ein aufwändiges Verfahren unter Verwendung der Mehrkörpersimulation. Das Verfahren besitzt folgende wesentliche Merkmale:

- Die aerodynamischen Eigenschaften des Fahrzeugs werden durch stationäre aerodynamische Koeffizienten beschrieben, die in einem Windkanal mit Modellen ermittelt werden.
- Das Windszenario basiert auf meteorologischen Untersuchungen und beschreibt die Eigenschaften einer Windböe.
- Die Fahrzeugdynamik wird durch ein Mehrkörpermodell abgebildet, das mittels Messdaten des realen Fahrzeugs verifiziert wird. Somit können auch für aufwändigere Fahrzeugkonzepte die Seitenwindeigenschaften beschrieben werden.
- Für die Untersuchungen wird keine Gleislageanregung berücksichtigt.
- Kriterium für die Windkennkurve ist die drehgestellseitige Radentlastung (10%).

### 2.1 Vorgehensweise

In Abbildung 1 ist der schematische Ablauf der Berechnung dargestellt. In der Vorbereitungsphase ist die Bereitstellung der notwendigen fahrtechnischen und aerodynamischen Fahrzeugdaten erforderlich. Daraus erfolgt dann die Modellierung eines MKS-Modells das anschließend verifiziert wird, sowie die messtechnische Bestimmung der aerodynamischen Koeffizienten im Windkanal anhand eines Modells.

Zusammen mit dem Windszenario und den entsprechenden Randbedingungen können dann Simulationsrechnungen durchgeführt werden, bei denen die Reaktion des Fahrzeugs auf ein Seitenwindergebnis untersucht werden (Entlastung der Räder). Durch die Auswertung der Zeitdaten mit dem notwendigen Kriterium (10%-Radentlastung) erfolgt die Ermittlung der simulationstechnisch gewonnenen WKK-Punkte.

Für eine vollständige Darstellung der Windkennkurve ist eine Interpolation zwischen den berechneten Punkten möglich. Die WKK wird abschließend in einem Bericht dokumentiert.

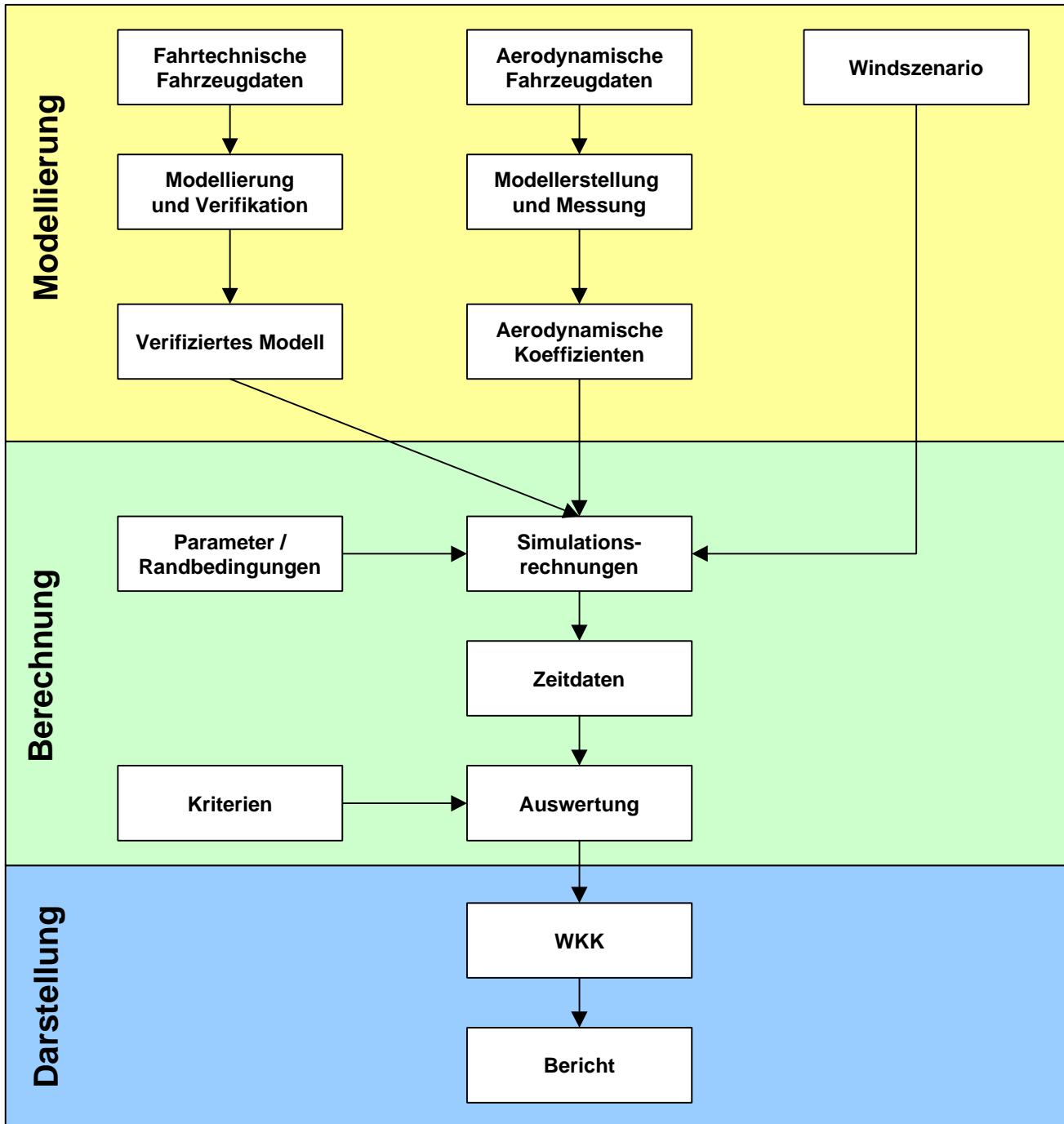


Abbildung 1: schematischer Ablauf einer Windkennkurvenberechnung

## 2.2 Anwendungsbereich

Folgende Voraussetzungen für die Anwendbarkeit des Verfahrens müssen gegeben sein:

- das Fahrzeug verkehrt unter europäischen Windbedingungen
- das hinsichtlich des Seitenwinds empfindlichste Fahrzeug ist zu betrachten (üblicherweise das führende Fahrzeug)

### 3 Modellierung

#### 3.1 Fahrtechnische Modellierung

##### 3.1.1 Modellierung der Fahrzeugdynamik

Für die Abbildung und Berechnung der dynamischen Fahrzeugeigenschaften ist ein allgemeines Mehrkörpersimulationswerkzeug zu verwenden, das insbesondere eine hinreichend genaue Abbildung von Schienenfahrzeugen (Routinen für den Rad/Schiene-Kontakt) erlaubt. Die Modellierung des Fahrzeugs erfolgt durch ein 3-D Modell bei dem mindestens der Wagenkasten, die Drehgestellrahmen und die Radsätze als separate starre Körper modelliert sind. Es sind alle Komponenten zu berücksichtigen, die einen wesentlichen Einfluß auf das Seitenwindverhalten des Fahrzeugs besitzen. Dies sind überlicherweise folgende Bauteile:

- Wagenkasten, Drehgestellrahmen, Radsätze sowie weitere evtl. notwendige Massen mit den
  - Massen und Trägheitsmomente
  - Geometrie und Schwerpunktlage
- Federungen
  - Steifigkeiten aller Federungen (primär-, sekundär) in x-, y-, z-Richtung bzw. bei nichtlinearem Verhalten die Kraft-Weg-Kennlinien
  - Dämpfungscharakteristiken aller relevanten Dämpfer in vertikaler und lateraler Richtung
- Anschläge
  - Lage und Charakteristik der vertikal- und lateral Anschläge in der Primär- und Sekundärstufe
- Neigetechnik, wenn vorhanden
- Rad/Schiene-Kontakt
  - Rad- und Schienenprofile
  - Berechnung der Kontaktkräfte unter Berücksichtigung von Spurkranzkontakt

##### 3.1.2 Verifikation

Bevor die Windkennkurvenberechnung durchgeführt wird, ist eine Verifikation des Fahrzeugmodells notwendig, mit der die Eignung des Modells für Seitenwinduntersuchungen nachgewiesen wird. Die Verifikation basiert auf Messwerten des realen Fahrzeugs. Folgende Werte sollten überprüft werden:

1. Wankkoeffizient s  
Liegen mehrere Messwerte für den Wankkoeffizienten vor, wird der Mittelwert verwendet. Die Abweichung zwischen Modell und Messwert sollte nicht mehr als 10% betragen
2. Massen  
Die Gesamtmasse des Fahrzeugs wird aus der Summe der Q-Kräfte bestimmt. Ebenso werden die Q-Kräfte jedes Rades und, falls vorhanden, jedes Drehgestells mit den Messungen verglichen. Die Abweichung zu den Messungen darf nicht mehr als 1% betragen. Wenn mehrere Messwerte vorliegen, wird empfohlen den Mittelwert zu verwenden.

Wenn weitere geeignete Messungen vorliegen, sollten diese für eine Verifikation verwendet werden. Dies können beispielsweise sein:

- Zeitdaten der Q-Kräfte für jedes Rad für verschiedene Radien bei unterschiedlichen Überhöhung.
- Verifikation der 50%-Werte der Q-Kräfte aus den Messungen der Zulassungsfahrten (z. B nach UIC518).

### 3.2 Bestimmung der aerodynamischen Fahrzeugeigenschaften

Für die Berechnung der Windlasten die auf das Fahrzeug wirken sind die fünf aerodynamischen Koeffizienten  $cy$ ,  $cz$ ,  $cmx$ ,  $cmy$ ,  $cmz$  notwendig. Diese werden unter Verwendung eines Modells im Windkanal bestimmt.

### 3.3 Mathematische Beschreibung des Windszenarios

Für die Berechnung von Windkennkurven durch MKS-Simulation ist der zeitliche Windverlauf beschrieben durch ein mathematisches Modell notwendig (Windszenario). Grundlage des Windmodells ist die mathematische Beschreibung einer typischen Windböe, gewonnen aus meteorologischen Messungen [1].

Das Windmodell dient als Anregung für das dynamische Modell und hat die in Abbildung 2 dargestellte Form. Auf der x-Achse ist die Zeit  $t$  in [sec] und auf der y-Achse die Windgeschwindigkeit in [m/s] aufgetragen. Bei der Simulationsrechnung besitzt das Fahrzeug eine konstante Fahrzeuggeschwindigkeit und wird seitlich vom Wind getroffen. In Abbildung 2 ist der Verlauf des Windes über dem Weg bei einer bestimmten Fahrzeuggeschwindigkeit aufgetragen.

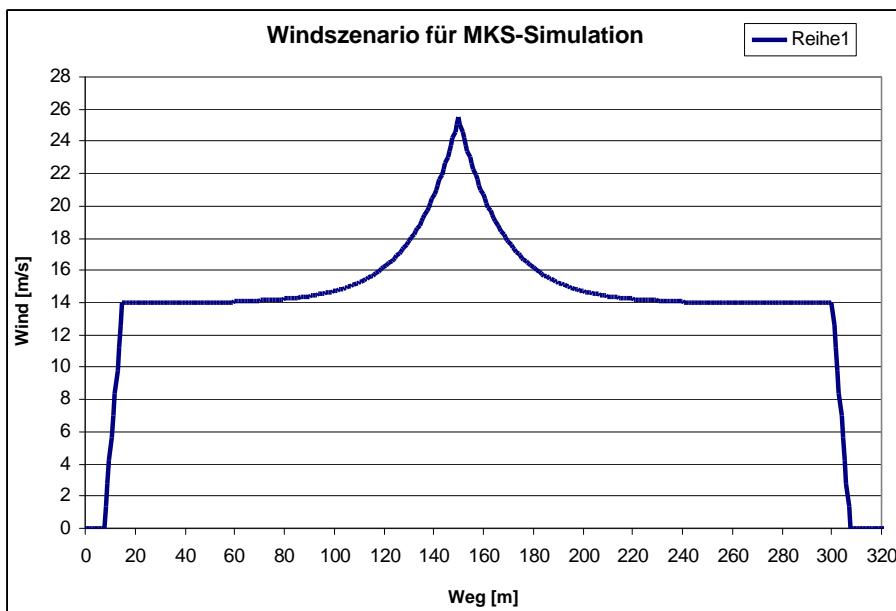


Abbildung 2: örtlicher Verlauf des Windszenarios

Es handelt sich hierbei um ein stationäres Windmodell, das heißt, es wird der örtliche Windverlauf und nicht der zeitliche Verlauf beschrieben. Aus dem **örtlichen** Verlauf kann durch eine Transformation unter Verwendung der Fahrzeuggeschwindigkeit der **zeitliche** Verlauf berechnet werden (vgl. Abschnitt 3.3.7).

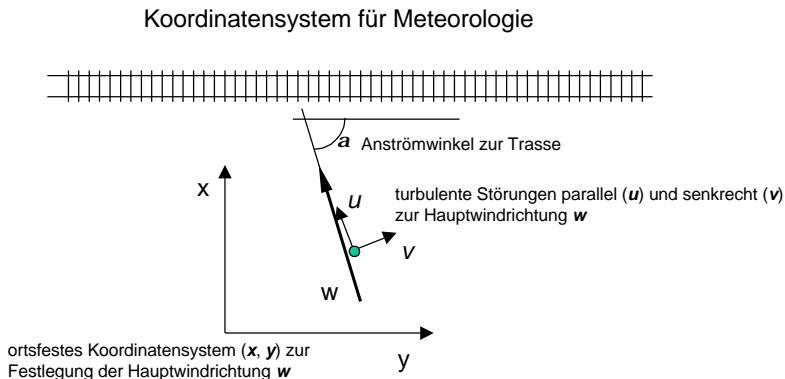
#### 3.3.1 Meteorologisches Windmodell (örtlich)

Im folgenden Teil wird die Berechnung der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Weg erläutert. Beginnend bei der Bestimmung des Böenfaktors über die Zeitkonstante wird die Windgeschwindigkeit berechnet.

#### 3.3.2 Koordinatensystem

In Abbildung 3 ist das Koordinatensystem dargestellt, daß von der Meteorologie für die Ableitung des Windszenarios verwendet wird. Die Hauptwindrichtung  $w$  wird im ortsfesten x,y-Koordinatensystem festgelegt. Die Richtungen der x- und y-Achse entsprechen dabei nicht den in der Bahntechnik üblichen Richtungen (x-Richtung = Fahrtrichtung; y-Richtung= quer zur Fahrtrichtung). Durch Turbulen-

zen werden Störungen des Windes sowohl im Betrag als auch in der Richtung hervorgerufen. Diese Abweichungen von der Hauptwindrichtung werden durch die Komponenten parallel zur Hauptwindrichtung  $u$  und senkrecht zur Hauptwindrichtung  $v$  beschrieben.



**Abbildung 3: Definition Koordinatensystem für die Meteorologie**

Der Winkel  $a$  zwischen der Hauptwindrichtung und der Trasse wird als Anströmwinkel zur Trasse bezeichnet. Bei einem Anströmwinkel von  $90^\circ$  liegt die Hauptwindrichtung  $w$  und die Komponente  $u$  parallel zur  $x$ -Richtung, während die Komponente  $v$  parallel zur  $y$ -Richtung liegt.

### 3.3.3 Berechnung des Böenfaktors

Ausgangspunkt für die Berechnung des Böenfaktors ist die Intensität der Turbulenz, die sich folgendermaßen berechnet:

$$I = \frac{f(z_0)}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad \text{Gl.( 1)}$$

I	Intensität der Turbulenz
$z_0$	Rauhigkeit des Geländes. Annahme für Windszenario $z_0=0,07$
$f(z_0)$	Hilfsfunktion (abhängig von der Rauhigkeit)
$z$	Höhe über Schienenoberkante (Annahme: $z=4m$ )

mit:

$$f(z_0) = 1 - 5 \cdot 10^{-5} \cdot \left( \log\left(\frac{z_0}{0.05}\right) + 2 \right)^7 \quad \text{Gl.( 2)}$$

Der Böenfaktor  $G$  setzt sich dann aus der Intensität und der Amplitude zusammen:

$$G = 1 + \tilde{A} \cdot I \quad \text{Gl.( 3)}$$

$\tilde{A}$	normalisierte Amplitude der Böe, Annahme: Wert=2,84 aus langjährigen Messungen
-------------	--

Aus dem Böenfaktor und der maximalen Windgeschwindigkeit kann der mittlere Wind berechnet werden aus:

$$U_{\text{mean}} = \frac{U_{\text{max}}}{G} \quad \text{Gl.( 4)}$$

$U_{\text{mean}}$	mittlere Windgeschwindigkeit
-------------------	------------------------------

Anmerkung: Der Böenfaktor hängt nur von der Rauigkeit des Geländes und der normalisierten Amplitude ab. Diese Faktoren sind **konstant** und **unabhängig** von der maximalen Windgeschwindigkeit. Somit ergibt sich bei den angegebenen Werten ein Böenfaktor von **G=1,6946**.

Für die spätere Bestimmung der Windgeschwindigkeit ist die Standardabweichung in Abhängigkeit von der mittleren Windgeschwindigkeit und der Intensität notwendig:

$$S_u = I \cdot U_{mean} \quad \text{Gl.( 5)}$$

$U_{mean}$	mittlere Windgeschwindigkeit
$S_u$	Standardabweichung der Windgeschwindigkeit

Die bisherigen Berechnungen enthalten noch keine Informationen über den zeitlichen Verlauf einer Windböe. Hierfür sind folgende weitere Berechnungsschritte erforderlich.

### 3.3.4 Berechnung der Zeitkonstante

Die Berechnung der Zeitkonstante kann aus dem Leistungsdichtespektrum (PSD) der longitudinalen Komponente  $u$  gewonnen werden.

Die charakteristische Länge (entspricht der Wellenlänge der Böe) in der Hauptwindrichtung (x-Richtung, u-Komponente) berechnet sich aus:

$$L_u^x = 50 \cdot \frac{z}{z_0^{0.063}}^{0.35} \quad \text{Gl.( 6)}$$

$L_u^x$	charakteristische Länge / Wellenlänge der Böe senkrecht zur Trasse (x-Richtung und u-Komponente)
$z$	Höhe über Schienenoberkante (Annahme: $z=4m$ )
$z_0$	Rauigkeit des Geländes (Annahme $z_0=0.07$ )

Die normalisierte Frequenz berechnet sich dann aus:

$$f_u = \frac{\bar{n} \cdot L_u^x}{U_{mean}} \quad \text{Gl.( 7)}$$

$U_{mean}$	mittlere Windgeschwindigkeit
$\bar{n}$	Der Vektor $n$ enthält Zahlenwerte zwischen $n_1$ und $n_2$ . Durch $n_1$ und $n_2$ wird ein Frequenzbereich für die berechneten/gemessenen Daten beschrieben. Annahme: Die untere Frequenz $n_1$ liegt bei 1/300 Hz und die obere Frequenz $n_2$ bei 1 Hz.
$f_u$	„normalisierte“ Frequenz

Somit kann nun das Leistungsdichtespektrum (PSD) berechnet werden:

$$\bar{S}_u(n) = \frac{4 \cdot f_u}{(1 + 70.7 \cdot f_u^2)^{\frac{5}{6}}} \cdot \frac{1}{\bar{n}} \quad \text{Gl.( 8)}$$

$S_u(n)$	Leistungsdichtespektrum (PSD) der longitudinalen Böenkomponente
----------	---

Die mittlere Zeitkonstante für die Böe ergibt sich dann aus den Integralen:

$$\bar{T} = \frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{\int_{n1}^{n2} \bar{n}^2 \cdot S_u(n) dn}{\int_{n1}^{n2} S_u(n) dn} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad \text{Gl.( 9)}$$

$\bar{T}$	mittlere Zeitkonstante der Böe
-----------	--------------------------------

Die Zeitkonstante für die Böe berechnet sich schließlich aus:

$$T = \bar{T} \cdot \tilde{T} \quad \text{Gl.( 10)}$$

$\tilde{T}$	normalisierte Zeitkonstante der Böe
-------------	-------------------------------------

Zwischen der normalisierten Amplitude und der Zeitkonstante besteht folgender Zusammenhang:

$$\tilde{T} = 0.95 \cdot \tilde{A}^q \quad \text{Gl.( 11)}$$

q	Faktor aus Messungen/Theorie Annahme: $q=1,42$
---	--

Daraus ergibt sich dann die Zeitkonstante für die Böe:

$$T = \bar{T} \cdot 0.95 \cdot \tilde{A}^q \quad \text{Gl.( 12)}$$

### 3.3.5 Berechnung der resultierenden Windgeschwindigkeit

Unter Verwendung der Zeitkonstante und dem Windwinkel zur Trasse können jeweils die Windgeschwindigkeiten in longitudinaler und lateraler Richtung über dem Weg berechnet werden.

Zunächst wird ein Faktor aus der Zeitkonstante berechnet (Einheit [1/sec] = [Hz]):

$$f = \frac{1}{2 \cdot T} \quad \text{Gl.( 13)}$$

f	Faktor [1/sec]
---	----------------

Nun kann die Windgeschwindigkeit der u-Komponente in longitudinaler und lateraler Richtung zur Trasse berechnet werden:

$$u_x(s) = f \cdot s \cdot \cos(a) \cdot \frac{1}{U_{mean}} \quad \text{Gl.( 14)}$$

$$u_y(s) = f \cdot s \cdot \sin(a) \cdot \frac{1}{U_{mean}} \quad \text{Gl.( 15)}$$

$u_x$	Windanteil longitudinal
$u_y$	Windanteil lateral
s	Weg in Richtung der Wegtrasse in [m]
a	Windwinkel zur Trasse
$U_{mean}$	mittlere Windgeschwindigkeit

Aus den Windgeschwindigkeiten der Richtungen kann dann die Korrelation für die resultierende Windgeschwindigkeit durch lineare Interpolation berechnet werden:

$$C = e^{-\sqrt{\left(C_u^x \cdot u_x^{p_u^x}\right)^2 + \left(C_u^y \cdot u_y^{p_u^y}\right)^2}} \quad \text{Gl.( 16)}$$

$C$	resultierende Windgeschwindigkeit
$C_u^x$	Abstiegskoeffizient in mittlerer Windrichtung; Wert = 5.0
$C_u^y$	Abstiegskoeffizient senkrecht zur mittleren Windrichtung; Wert = 16.0
$p_u^x$	Exponent des Abstiegs in mittlerer Windrichtung; Wert = 1.0
$p_u^y$	Exponent des Abstiegs senkrecht zur mittleren Windrichtung; Wert = 1.0

Diese Werte basieren alle auf Messungen.

Die Windgeschwindigkeit entlang der Trasse kann dann durch folgende Formel berechnet werden:

$$v_{Wind} = U_{mean} + \tilde{A} \cdot \mathbf{s}_u \cdot C \quad \text{Gl.( 17)}$$

Bei einem Anströmwinkel von  $90^\circ$  wird der longitudinale Anteil  $u_x = 0$  und die Berechnung der Korrelation vereinfacht sich zu:

$$C_{90} = e^{-\left(C_u^y \cdot u_y^{p_u^y}\right)} \quad \text{Gl.( 18)}$$

Die Windgeschwindigkeit entlang der Trasse kann dann durch folgende Formel berechnet werden:

$$v_{Wind90} = U_{mean} + \tilde{A} \cdot \mathbf{s}_u \cdot C_{90} \quad \text{Gl.( 19)}$$

$v_{Wind}$	Windgeschwindigkeit entlang der Strecke
$U_{mean}$	mittlere Windgeschwindigkeit
$\tilde{A}$	normalisierte Amplitude der Böe
$\mathbf{s}_u$	Standardabweichung der Windgeschwindigkeit (siehe Gl.( 5))

### 3.3.6 Filterung

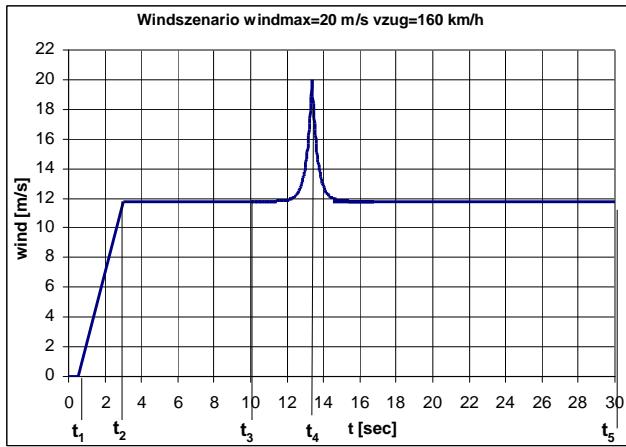
Der Verlauf des Windszenarios wird mit einem gleitenden Mittelwert entsprechend der Fahrzeugglänge gefiltert.

### 3.3.7 Zeitlicher Verlauf des Windszenarios

Das meteorologische Windmodell liefert den örtlichen Verlauf einer Windböe. Zusammen mit der Fahrzeuggeschwindigkeit kann daraus der zeitliche Verlauf bestimmt werden, der für die MKS-Simulation notwendig ist. Hierfür wird eine Länge von insgesamt 300 m angenommen, somit liegt das Windmaximum bei 150 m. Diese Strecke wird vom Fahrzeug abhängig von der Geschwindigkeit in einer bestimmten Zeit zurückgelegt. Bei der Berechnung des zeitlichen Verlaufs wird somit das Windmaximum nicht immer zu demselben Zeitpunkt erreicht. Die maximale Windgeschwindigkeit ( $U_{max}$ ) stellt das Kriterium für die Windkennkurve dar.

Das Szenario geht von einem Grundwind aus, gefolgt von dem Böenanstieg und dem anschließenden Abfall. Um aussagekräftige und vergleichbare Ergebnisse für die Fahrzeugreaktionen auf die Böe zu erhalten, muß sich das Fahrzeug in dem Grundwind in einem stationären eingeschwungenen Zustand befinden.

Ein mögliches Szenario ist in Abbildung 4 dargestellt.



**Abbildung 4: Beispiel für ein Windszenario**

Zunächst liegt bis zum Zeitpunkt  $t_1=0,5$  sec kein Wind an. Bis zum Zeitpunkt  $t_2=3$  sec erfolgt ein linearer Anstieg des Windes auf den Grundwind  $U_{mean}$ . Bis zum Zeitpunkt  $t_3=10$  sec muss sich das Fahrzeug im eingeschwungenen Zustand befinden. Nach dem Zeitpunkt  $t_3=10$  sec erfolgt der Windanstieg entsprechend dem umgekehrten *chinese hat* bis zum Windmaximum bei  $t_4$ . In dem Zeitraum  $t_3$  bis  $t_4$  wird bei dieser Fahrzeuggeschwindigkeit eine Strecke von 150 m zurückgelegt. Nach dem Windmaximum fällt der Wind in Form des *chinese hat* bis zum Grundwind ab. Bei  $t_5=30$  sec ist das Windszenario beendet. Das Windszenario in den einzelnen Intervallen wird durch folgende Funktionen beschrieben:

Intervall	Funktion
$[t_0:t_1]$	$v(t) = 0$
$[t_1:t_2]$	$v(t) = \frac{v_{mean}}{t_2 - t_1} \cdot t - \frac{v_{mean}}{t_2 - t_1} \cdot t_1$
$[t_2:t_3]$	$v(t) = v_{mean}$
$[t_3:t_4]$	$v(t) = reverse\ chinese\ hat$
$[t_4:t_5]$	$v(t) = chinese\ hat$

#### Anmerkungen:

- Für jede Fahrzeug- und Windgeschwindigkeit muß der Verlauf des Windszenarios berechnet werden
- Bei einem Windwinkel von 90° kann die Berechnung vereinfacht durchgeführt werden

## 4 Berechnung

### 4.1 Berechnung der Windkräfte und –momente

Für die unterschiedlichen Fahrzeug- und Windgeschwindigkeiten sind jeweils die Windlasten unter Verwendung des Windszenarios zu bestimmen. Die Windlast besteht aus 5 Komponenten ( $F_y$ ,  $F_z$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ) die durch folgende Gleichungen bestimmt werden können:

$$\left. \begin{aligned} F_i &= \frac{1}{2} r A c_{Fi}(\mathbf{b}) v_r^2 \\ M_i &= \frac{1}{2} r Ad c_{Mi}(\mathbf{b}) v_r^2 \end{aligned} \right\}, i \in \{x, y, z\}$$

<b>r</b>	<i>Luftdichte</i>
<b>A</b>	<i>Fläche (10 m<sup>2</sup>)</i>
<b>d</b>	<i>Länge (3 m)</i>
$c_{Fi}$ , $c_{Mi}$	<i>aerodynamische Koeffizienten in Abhängigkeit vom Anströmwinkel</i>
$v_r$	<i>scheinbare Windgeschwindigkeit</i>
<b>b</b>	<i>Anströmwinkel</i>

Die aerodynamischen Koeffizienten für einen Anströmwinkel sind durch lineare Interpolation zwischen den Messungen zu bestimmen. In folgender Abbildung 5 ist der Zusammenhang zwischen den Geschwindigkeiten graphisch dargestellt:

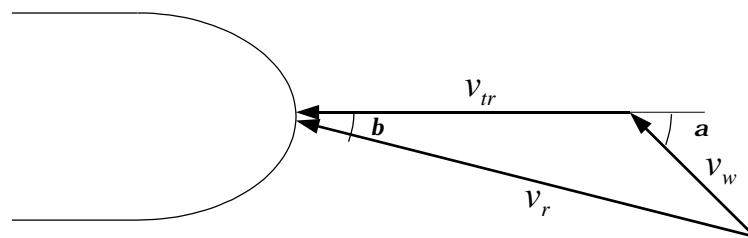


Abbildung 5: Windgeschwindigkeiten am Fahrzeug

Die scheinbare Windgeschwindigkeit ist berechnet sich aus

$$v_r = \sqrt{(v_{tr} + v_w \cos a)^2 + (v_w \sin a)^2}$$

und der Anströmwinkel  $\beta$  aus

$$\beta = \arctan \frac{v_w \sin(a)}{v_{tr} + v_w \cos(a)}$$

mit:

$v_{tr}$	<i>Fahrzeuggeschwindigkeit</i>
$v_w$	<i>Windgeschwindigkeit (vgl. Windszenario 3.3.7)</i>
<b>a</b>	<i>Windwinkel zur Trasse</i>

## 4.2 Randbedingungen und Parameter

Die Simulationsrechnungen sind unter folgenden Randbedingungen durchzuführen:

- keine Gleislagestörungen
- Spurweite und Schienenneigung entsprechend der Einsatzstrecke
- Berücksichtigung der Querbeschleunigung durch Überhöhung bei Fahrt in der Geraden
- Reibwerte für Rad/Schiene-Kontakt entsprechend einer trockenen Schiene

Folgende Punkte einer Windkennkurve sind durch Simulationsrechnungen zu bestimmen:

### 1. Windwinkel konstant 90°:

- Gerade, Fahrzeuggeschwindigkeiten von  $v=80 \text{ km/h}$  bis  $v_{\max}$  in 20 km/h Schritten
- Bogenfahrt mit  $a_q=0,5 \text{ m/s}^2$ , Fahrzeuggeschwindigkeiten von  $v=80 \text{ km/h}$  bis  $v_{\max}$  in 20 km/h Schritten
- Bogenfahrt mit  $a_q=1,0 \text{ m/s}^2$ , Fahrzeuggeschwindigkeiten von  $v=80 \text{ km/h}$  bis  $v_{\max}$  in 20 km/h Schritten

für Neigetechnikfahrzeuge (mit eingeschalteter Neigetechnik) sind zusätzlich zu berechnen:

- Bogenfahrt mit  $a_q=1,5 \text{ m/s}^2$ , Fahrzeuggeschwindigkeiten von  $v=80 \text{ km/h}$  bis  $v_{\max}$  in 20 km/h Schritten
- Bogenfahrt mit  $a_q=2,0 \text{ m/s}^2$ , Fahrzeuggeschwindigkeiten von  $v=80 \text{ km/h}$  bis  $v_{\max}$  in 20 km/h Schritten

### 2. Fahrzeuggeschwindigkeit $v_{\max}$

- Gerade, Windwinkel  $80^\circ, 60^\circ, 40^\circ, 20^\circ, 10^\circ$
- Bogenfahrt mit  $a_q=0,5 \text{ m/s}^2$ , Windwinkel  $80^\circ, 60^\circ, 40^\circ, 20^\circ, 10^\circ$
- Bogenfahrt mit  $a_q=1,0 \text{ m/s}^2$ , Windwinkel  $80^\circ, 60^\circ, 40^\circ, 20^\circ, 10^\circ$

für Neigetechnikfahrzeuge (mit eingeschalteter Neigetechnik) sind zusätzlich zu berechnen:

- Bogenfahrt mit  $a_q=1,5 \text{ m/s}^2$ , Windwinkel  $80^\circ, 60^\circ, 40^\circ, 20^\circ, 10^\circ$
- Bogenfahrt mit  $a_q=2,0 \text{ m/s}^2$ , Windwinkel  $80^\circ, 60^\circ, 40^\circ, 20^\circ, 10^\circ$

## 4.3 Kriterium zur Bestimmung der Windkennkurven

Aus den Simulationsrechnungen werden die Zeitdaten für Q-Kräfte der Räder ermittelt. Das Kriterium für die Bestimmung der Windkennkurven ist die mittlere Radentlastung eines Drehgestells. Die Berechnung des Kriteriums erfolgt nach folgender Vorschrift:

- Berechnung der  $\Delta Q/Q_0$  Werte aus den Zeitdaten der Q-Kräfte
- $$\frac{\Delta Q}{Q_0} = \frac{Q_{i1} + Q_{j1} - 2 \cdot Q_0}{2 \cdot Q_0}$$
- Tiefpassfilterung von  $\Delta Q/Q_0$  mit 2 Hz (Butterworth-Filter, 4. Ordnung)
- Bildung des Maximums von  $\Delta Q/Q_0$  von allen Drehgestellen

$Q_0$  sind dabei die Q-Kräfte des leeren Fahrzeugs im Ruhezustand,  $Q_{i1}$  sind die Q-Kräfte des entlasteten Rades des führenden Radsatzes,  $Q_{j1}$  sind die Q-Kräfte des entlasteten Rades des nachfolgenden Radsatzes.

Sind weitere Radsätze in einem Drehgestell vorhanden, sind die Gleichungen um die zusätzlichen Kräfte zu erweitern.

## 5 Darstellung

### 5.1 Windkennkurve

Für eine vollständige Beschreibung einer Windkennkurve sind weitere Werte mit einer Diskretisierung in 10 km/h und 0,1 m/s<sup>2</sup> Schritten notwendig. Diese Werte können durch lineare Interpolation aus den simulationstechnisch berechneten Werten ermittelt werden.

Für die weitere rechnergestützte Berechnung sind auch Windkennwerte für negative Querbeschleunigungen notwendig. Diese können entweder berechnet werden, oder durch eine punktsymmetrische Spiegelung bei  $aq=0,0$  m/s<sup>2</sup> ermittelt werden. Folgende Werte sind anzugeben:

**Tabelle 1: Windkennkurve für konstanten Anströmwinkel 90°**

wind [m/s]	Anströmwinkel 90°							
	aq [m/s <sup>2</sup> ]							
v [km/h]	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	...	aqmax
80								
90								
100								
110								
120								
130								
...								
vmax								

**Tabelle 2: Windkennkurve für vmax und verschiedene Windwinkel**

wind [m/s]	vmax							
	aq [m/s <sup>2</sup> ]							
alpha [°]	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	...	aqmax
80								
70								
60								
50								
40								
30								
20								
10								

### 5.2 Bericht

Die Windkennkurven sind in einem ausführlichen Bericht zu dokumentieren. Der Bericht sollte mindestens folgende Teile enthalten:

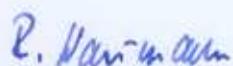
- Simulationswerkzeug (Name, Version)
- Eingangsdaten mit Quellenangaben
- Verifikationsrechnungen (Messungen und Simulationsrechnungen)
- Randbedingungen und Variationen für WKK-Berechnung
- Grenzwerte für Kriterium
- Windkennkurven in tabellarischer Form
- Literaturliste und Quellenangaben

## 6 Unterschriften

Minden, den ... 12.10.2004



Dipl.-Ing. Clemens Höppe  
Leiter T.TZF 95.1



Dr.-Ing. Rolf Naumann  
T.TZF 95.1

## 7 Literatur

- [1] Bericht: 250-FE-016-03 bzw. WODAN-TP1-V0-T01: „Mathematische Beschreibung eines Windmodells für die Berechnung von Windkennkurven durch Mehrkörpersimulation“, DB Systemtechnik, T.TZF95.1 vom 01.04.2003.