Die Bahn DB

Deutsche Bahn AG
DB Systemtechnik
T.TZF 95.1 Simulation Strukturmechanik
und Fahrtechnik
Pionierstraße 10
D – 32423 Minden

Berechnung von Windkennkurven nach dem Stufe-1 Verfahren

Dokument: 04-P-1277-T.TZF95-UN-0860
WODAN-TP5-V0-T01

Datum: 10.08.2004

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

Inhaltsverzeichnis

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: -

Verteiler: T.TZF95.1, T.TZF13

Seiten: 10

2 Stufe-1 Verfahren

Für die Berechnung von Windkennkurven nach dem Stufe-1 Verfahren wird ein vereinfachtes quasistatisches Modell verwendet. Dabei werden die für den Seitenwind wesentlichen Effekte und Parameter berücksichtigt. In diesem Bericht wird eine mathematische Beschreibung des Verfahrens gegeben. Die rechnergestützte Auswertung der Gleichungen kann auf beliebigen geeigneten Plattformen durchgeführt werden. Hierfür können beispielsweise Formelmanipulationsprogramme (z. B. Matlab, Maple) oder Mehrkörpersystemprogramme (z. B. SIMPACK, Adams) eingesetzt werden. Das Modell zur Berechnung der Windkennkurven besteht aus 5 Körpern/Massen, dem Wagenkasten (WK), vorderem und hinterem Drehgestell (DG1 u. DG2) und jeweils einem Körper für beide Radsätze eines Drehgestells (RS1 u. RS2). Die Aufstellung der Kräfte/Momentensumme für die einzelnen Körper führt auf ein von der Lage der Körper abhängiges, nichtlineares Gleichungssystem. Die Lösungsvektoren des Gleichungssystems beschreiben die Gleichgewichtslage des Modells.

3 Gleichungssystem

3.1 Kinematik

Das ortsfeste Koordinatensystem I liegt im Ursprung, die x-Achse weist in Fahrtrichtung des Fahrzeugs, die y-Achse in Fahrtrichtung nach rechts und die z-Achse nach unten. Die Schienenoberkante liegt auf der Höhe

$$z_{S0} = 0.0 \,.$$

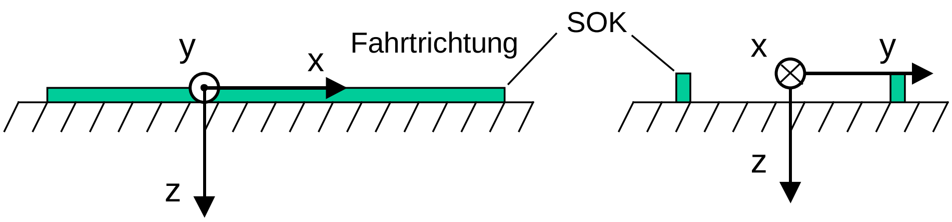

Abbildung 3.1: Ausrichtung des ortsfesten Koordinatensystems (Inertialsystem)

Die Lage eines Körpers wird durch seinen Lagevektor

$$\underline{x}_{Ki} = \left[x_{Ki}, y_{Ki}, z_{Ki}, \varphi_{Ki}, \phi_{Ki}, \psi_{Ki}\right]^T$$

beschrieben.

Der Wagenkasten WK hat 5 Freiheitsgrade, translatorisch in y- und z-Richtung, y_{WK}, z_{WK} und Drehfreiheitsgrade um alle Achsen, φ_{WK}, ϕ_{WK}, ψ_{WK}.

Die Drehgestelle DGi haben jeweils 3 Freiheitsgrade, translatorisch in y- und z-Richtung y_{DGi} u. z_{DGi} und einen Drehfreiheitsgrad um die x-Achse φ_{DGi}.

Die Radsatzkörper RSi sind ortsfest.

Somit hat das System insgesamt 11 Freiheitsgrade, die im Lagevektor des Systems $\underline{x} = \left[y_{WK}, z_{WK}, \varphi_{WK}, \phi_{WK}, \psi_{WK}, y_{DG1}, z_{DG1}, \varphi_{DG1}, y_{DG2}, z_{DG2}, \varphi_{DG2}\right]^T$ zusammengefaßt werden.

Mit dem halben Drehzapfenabstand *a* ergeben sich damit für die einzelnen Körper die folgende Lagevektoren:

$\underline{x}_{WK} = \left[0, y_{WK}, z_{WK}, \varphi_{WK}, \phi_{WK}, \psi_{WK}\right]^T$,

$\underline{x}_{DG1} = \left[a, y_{DG1}, z_{DG1}, \varphi_{DG1}, 0, 0\right]^T$,

$\underline{x}_{DG2} = \left[-a, y_{DG2}, z_{DG2}, \varphi_{DG2}, 0, 0\right]^T$,

$\underline{x}_{RS1} = \left[a, 0, 0, 0, 0, 0\right]^T$,

$\underline{x}_{RS2} = \left[-a, 0, 0, 0, 0, 0\right]^T$.

Die Drehmatrix des Körpers Ki ins ortsfeste Koordinatensystem I ist mit $c\varphi = \cos(\varphi_{Ki}); c\phi = \cos(\phi_{Ki}); c\psi = \cos(\psi_{Ki})$ und $s\varphi = \sin(\varphi_{Ki}); s\phi = \sin(\phi_{Ki}); s\psi = \sin(\psi_{Ki})$

wie folgt definiert:

$$\underline{A}_{IKi} = \begin{bmatrix} c\phi \cdot c\psi & -c\phi \cdot s\psi & s\phi \\ c\varphi \cdot s\psi + s\varphi \cdot s\phi \cdot c\psi & c\varphi \cdot c\psi - s\varphi \cdot s\phi \cdot s\psi & -s\varphi \cdot c\phi \\ s\varphi \cdot s\psi - c\varphi \cdot s\phi \cdot c\psi & s\varphi \cdot c\psi + c\varphi \cdot s\phi \cdot s\psi & c\varphi \cdot c\phi \end{bmatrix};$$

Für die Drehmatrix von Kj nach Ki gilt somit

$$\underline{A}_{KiKj} = \underline{A}_{IKi}{}^T \cdot \underline{A}_{IKj}$$

Jeder Körper Ki hat ein körperfestes Koordinatensystem. In der Ausgangslage hat das körperfeste Koordinatensystem die gleiche Orientierung wie das ortsfeste Koordinatensystem.

Die Lage des Schwerpunkts auf dem Körper Ki wird durch den Vektor $\underline{r}_{CKi,Ki}$ beschrieben. Der Vektor beschreibt die Lage im körperfesten Koordinatensystem des Körpers Ki.

$\underline{r}_{CWK,WK} = \left[c_{x,WK}, c_{y,WK}, c_{z,WK}\right]^T$,

$\underline{r}_{CDGi,DGi} = \left[0, c_{y,DGi}, c_{z,DG}\right]^T$

$\underline{r}_{CRSi,RSi} = \left[0, 0, r_0\right]^T$;

Die Lage der Primärfederung auf dem Radsatz RSi wird durch die folgenden Vektoren beschrieben:

$\underline{r}_{c1re,RSi} = \left[0, b_1, -r_0\right]^T$ für die Primärfeder rechts,

$\underline{r}_{c1li,RSi} = \left[0, -b_1, -r_0\right]^T$ für die Primärfeder links;

Die Lage der Primärfederung auf dem Drehgestell DGi wird durch die folgenden Vektoren beschrieben:

$\underline{r}_{c1re,DGi} = \left[0, b_1, -r_0\right]^T$ für die Primärfeder rechts,

$\underline{r}_{c1li,DGi} = \left[0, -b_1, -r_0\right]^T$ für die Primärfeder links;

Die Lage der Sekundärfederung auf dem Drehgestell DGi wird durch die folgenden Vektoren beschrieben:

$\underline{r}_{c2re,DGi} = [0, b_2, h_2]^T$ für die Sekundärfeder rechts,

$\underline{r}_{c2li,DGi} = [0, -b_2, h_2]^T$ für die Sekundärfeder links;

Die Lage der Sekundärfederung auf dem Wagenkasten wird durch die folgenden Vektoren beschrieben:

$\underline{r}_{c2reDG1,WK} = [a, b_2, h_2]^T$ für die Sekundärfeder rechts, Drehgestell 1,

$\underline{r}_{c2liDG1,WK} = [a, -b_2, h_2]^T$ für die Sekundärfeder links, Drehgestell 1,

$\underline{r}_{c2reDG2,WK} = [-a, b_2, h_2]^T$ für die Sekundärfeder rechts, Drehgestell 2,

$\underline{r}_{c2liDG2,WK} = [-a, -b_2, h_2]^T$ für die Sekundärfeder links, Drehgestell 2,

Die Auslenkungen der Primärfedern rechts/links werden über die folgende Gleichung bestimmt, Messung der Auslenkungen im Referenzsystem von Rsi

$$\underline{dr}_{c1re/li,i} = \underline{A}_{IRSi}{}^T \cdot \left(\underline{x}_{DGi}(1:3) - \underline{x}_{RSi}(1:3)\right) - \underline{r}_{c1re/li,RSi} + \underline{A}_{RSiDGi} \cdot \underline{r}_{c1re/li,DGi}$$

Analog gilt für die Sekundärfedern bei Messung im Referenzsystem von Dgi

$$\underline{dr}_{c2re/li,i} = \underline{A}_{IDGi}{}^T \cdot \left(\underline{x}_{WK}(1:3) - \underline{x}_{DGi}(1:3)\right) - \underline{r}_{c2re/li,DGi} + \underline{A}_{DGiWK} \cdot \underline{r}_{c2re/liDGi,WK}$$

Die Verdrehwinkel $d\varphi_{c2,i}$ der Wankstützen an $DG1$ und $DG2$ erhält man durch Rücktransformation der Drehmatrizen $\underline{A}_{DGiWK}$.

3.2 Kräfte

Die Federkräfte der Primär- und Sekundärfeder werden aus den Auslenkungen $\underline{dr}$ berechnet.

$$\underline{f}_{ci} = \left[f_{ci,x}, f_{ci,y}, f_{ci,z}\right]^T = \underline{f}\left(\underline{dr}_{ci}\right) = \left[f_{ci,x}\left(\underline{dr}_{ci}(1)\right), f_{ci,y}\left(\underline{dr}_{ci}(2)\right), f_{ci,z}\left(\underline{dr}_{ci}(3)\right)\right]^T$$

Da keine Relativbewegungen in x-Richtung betrachtet werden gilt für die Längskräfte

$f_{ci,x} = 0$;

Die y- und z-Komponenten der Kräfte werden aus den gegebenen nichtlinearen Kraft-Weg-Verläufen der Federstufen bestimmt. Die Kraft-Weg-Verläufe müssen die Steifigkeiten der Primär- und Sekundärfeder sowie die in den Federstufen vorhandenen Anschläge berücksichtigen. In Vertikalrichtung ist für jedes Federelement ein Parameter $f_{ci,nom}$ für die nominellen Kräfte im Ausgangszustand einzuführen.

Für das Moment in der Wankstütze gilt:

$$\underline{t}_{c2,i} = \left[c_{\varphi 2} \cdot d\varphi_{c2,i}, 0, 0\right]^T$$

Für die Windkräfte gilt in Abhängigkeit von der Fahrzeug- und Windgeschwindigkeit:

$$\underline{f}_{Wi,WK} = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c_i(\beta) \quad , \quad i = x, y, z$$

$$\underline{t}_{Wi,WK} = \frac{1}{2} \cdot d \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c_{mi}(\beta) \quad , \quad i = x, y, z$$

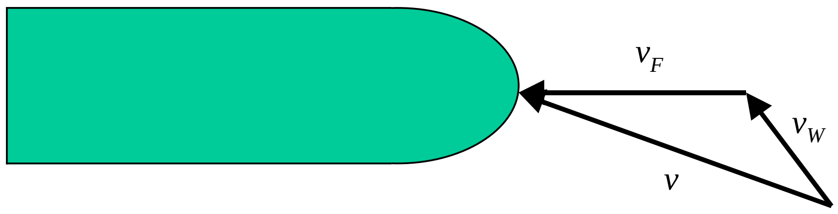

Abbildung 3.2: Resultierende Windgeschwindigkeit

Die aerodynamischen Koeffizienten für einen bestimmten Anströmwinkel β werden durch **lineare** Interpolation zwischen den zur Verfügung stehenden Punkten bestimmt. *v* ist die scheinbare Windgeschwindigkeit am Fahrzeug und wird aus der Fahrzeuggeschwindigkeit v_F und der Windgeschwindigkeit v_W bestimmt. Der Anströmwinkel ist der Winkel zwischen Windgeschwindigkeit und Fahrzeuggeschwindigkeit. Bei einer Windrichtung 90 Grad zur Trasse werden die scheinbare Windgeschwindigkeit und der Anströmwinkel wie folgt berechnet: $v^2 = v_F^2 + v_W^2$, $\beta = a\tan\frac{v_W}{v_F}$

3.3 Kinetik

Für jeden Körper des Modells wird die Kraft- und Momentensumme bezogen auf das Referenzsystem des Körpers berechnet. Die Darstellung des Kraft- und Momentenvektors erfolgt im ortsfesten Koordinatensystem I.

<u>Massenkräfte auf den Körper *Ki*:</u>

$$\underline{f}_{m,Ki} = m_{Ki} \cdot [0, ay, g]^T,$$

$$\underline{t}_{m,Ki} = \underline{r}_{CKi} \times \underline{f}_{m,Ki};$$

<u>Federkräfte auf den Wagenkasten *WK*:</u>

$$\underline{f}_{f,WK} = \underline{A}_{IWK} \cdot \underline{A}_{DGWK}{}^T \cdot \sum_{i=1}^{2} \left(-\underline{f}_{c2re,i} - \underline{f}_{c2li,i} \right)$$ .... kann noch vereinfacht werden

$$\underline{t}_{f,WK} = \underline{A}_{IWK} \cdot \sum_{i=1}^{2} \begin{pmatrix} \underline{r}_{c2reDGi,WK} \times \left(\underline{A}_{DGiWK}{}^T \cdot \left(-\underline{f}_{c2re,i} \right) \right) + \underline{r}_{c2liDGi,WK} \times \left(\underline{A}_{DGiWK}{}^T \cdot \left(-\underline{f}_{c2li,i} \right) \right) \\ + \underline{A}_{DGiWK}{}^T \cdot \left(-\underline{t}_{c2,i} \right) \end{pmatrix}$$

<u>Federkräfte auf die Drehgestelle *DGi*:</u>

$$\underline{f}_{f,DGi} = \underline{A}_{IDGi} \cdot \left(\underline{A}_{RSiDGi}{}^{T} \cdot \left(-\underline{f}_{c1re,i} - \underline{f}_{c1li,i} \right) + \underline{f}_{c2re,i} + \underline{f}_{c2li,i} \right)$$

$$\underline{t}_{f,DGi} = \underline{A}_{IDGi} \cdot \left(\begin{array}{l} \underline{r}_{c1re,DGi} \times \left(\underline{A}_{RSiDGi}{}^{T} \cdot \left(-\underline{f}_{c1re,i} \right) \right) + \underline{r}_{c1li,DGi} \times \left(\underline{A}_{RSiDGi}{}^{T} \cdot \left(-\underline{f}_{c1li,i} \right) \right) \\ + \underline{r}_{c2re,DGi} \times \underline{f}_{c2re,i} + \underline{r}_{c2li,DGi} \times \underline{f}_{c2li,i} + \underline{dr}_{c2re,i} \times \underline{f}_{c2re,i} + \underline{dr}_{c2li,i} \times \underline{f}_{c2li,i} + t_{c2,i} \end{array} \right)$$

<u>Federkräfte auf die Radsätze *RSi*:</u>

$$\underline{f}_{f,RSi} = \underline{A}_{IRSi} \cdot \left(\underline{f}_{c1re,i} + \underline{f}_{c1li,i} \right)$$

$$\underline{t}_{f,RSi} = \underline{A}_{IRSi} \cdot \left(\underline{r}_{c1re,RSi} \times \underline{f}_{c1re,i} + \underline{r}_{c1li,RSi} \times \underline{f}_{c1li,i} + \underline{dr}_{c1re,i} \times \underline{f}_{c1re,i} + \underline{dr}_{c1li,i} \times \underline{f}_{c1li,i} \right)$$

Kräftesumme auf den Körper *Ki*:

$$\underline{f}_{ges,Ki} = \underline{f}_{m,Ki} + \underline{f}_{f,Ki}$$
$$\underline{t}_{ges,Ki} = \underline{t}_{m,Ki} + \underline{t}_{f,Ki}$$

Auf den Wagenkasten wirken außerdem die Windkräfte:

$$\underline{f}_{ges,Wk} = \underline{f}_{m,WK} + \underline{f}_{f,WK} + \underline{f}_{Wi,WK}$$
$$\underline{t}_{ges,Ki} = \underline{t}_{m,Ki} + \underline{t}_{f,Ki} + \underline{t}_{Wi,WK}$$

Für das aufzustellende Gleichungssystem sind nur Kraft- bzw. Momentenrichtungen relevant, in denen der zugehörige Körper auch einen Freiheitsgrad hat. Damit ergibt sich folgendes Gesamtsystem:

$$F = F(\underline{x}) = \begin{bmatrix} \underline{f}_{ges,WK}(2:6) \\ \underline{f}_{ges,DG1}(2:4) \\ \underline{f}_{ges,DG2}(2:4) \end{bmatrix} = \underline{0}$$

4 Berechnung der Rad-Schiene-Kräfte

Aus der Kräfte-/Momentensumme $\underline{f}_{ges,RSi}/\underline{t}_{ges,RSi}$ lassen sich die Rad-Schiene-Kräfte für den Radsatz RSi berechnen.

Die minimale Basis s_{min} für die Radaufstandskräfte ergibt sich aus dem Laufkreisabstand

$2s = 1.5m$

und der maximalen Verschiebung des Kontaktpunktes auf dem Rad in Richtung Spurkranz

$s_W = 0.028m$

zu

$$s_{\min} = s - s_W \, .$$

Damit berechnen sich die Radaufstandskräfte und die Radsatzführungskraft (Kräfte auf den Radsatz!, durch 2 teilen, da Körper 2 RS zusammenfaßt) zu:

$$Q_{re,RSi} = -\frac{\left(\underline{t}_{ges,RSi}(4) + \underline{f}_{ges,RSi}(3) \cdot s_{\min}\right)}{4 \cdot s_{\min}}$$

$$Q_{li,RSi} = -\frac{\underline{f}_{ges,RSi}(3)}{2} - Q_{re,RSi}$$

$$SY_{RSi} = -\frac{1}{2}\underline{f}_{ges,RSi}(2)$$

5 Berechnung der Windkennkurven

Für die Berechnung der Windkennkurven muss für verschiedene Windgeschwindigkeiten die Gleichgewichtslage gefunden werden. Das Kriterium für die charakteristische Windgeschwidigkeit ist das Erreichen einer drehgestellseitigen Entlastung von 10% der nominellen Radaufstandskraft (10%-Q_0). Folgende Vorgehensweise für die Berechnung der Windkennwerte wird vorgeschlagen:

1.) „Nominelle Kräfte“: Bestimmung der Parameter $f_{ci,nom}$, so dass x = 0 das Gleichungssystem löst. Fahrgeschwindigkeit, Windgeschwindigkeit und Querbeschleunigung sind zu 0 zu setzen!

2.) Berechung der Radaufstandskraft Q_0 für die Ausgangslage x = 0, Qsoll = 0.1*Q_0

2.) äußere Schleife v_Fahrzeug

3.) innere Schleife aq

4.) Startwert für v_Wind = 30m/s

5.) GGW berechnen (Gleichungssystem lösen), für den berechneten Zustand Q bestimmen

6.) Wenn Genauigkeit für Q erreicht, v_Wind korrekt, sonst v_Wind_neu aus vorigen Wind- und Q-Werten interpolieren

7.) Windkennkurven ausgeben

6 Unterschriften

Minden, den 10.8.2004

Clemens Höppe

Dipl.-Ing. Clemens Höppe

Leiter T.TZF 95.1

Rolf Naumann

Dr.-Ing. Rolf Naumann

T.TZF 95.1

7 Anhang

Formelzeichen:

y_{WK}	y-Auslenkung Wagenkasten
z_{WK}	z-Auslenkung Wagenkasten
φ_{WK}	Drehwinkel Wagenkasten um x
ϕ_{WK}	Drehwinkel Wagenkasten um y
ψ_{WK}	Drehwinkel Wagenkasten um z
y_{DGi}	y-Auslenkung Drehgestell i
z_{DGi}	z-Auslenkung Drehgestell i
φ_{DGi}	Drehwinkel Drehgestell i um x

$\underline{x}$	Lagevektor des Systems
$\underline{x}_{Ki}$	Lagevektor des Körpers Ki
$\underline{A}_{KiKj}$	Drehmatrix von Kj in Ki
$\underline{r}$	Ortsvektor
$\underline{dr}$	Vekor Auslenkung Federelement
$\underline{f}$	Kraftvektor
$\underline{t}$	Momentenvektor

a	halber Drehzapfenabstand
$c_{x,Ki}$, $c_{y,Ki}$, $c_{z,Ki}$,	Schwerpunktkoordinaten des Körpers Ki
r_0	Rollradius Radsatz
b_1	halbe Basis Primärfederung (y)
b_2	halbe Basis Sekundärfederung (y)
h_2	Höhe Sekundärfederung (z)
$g=9.81m/s^2$	Erdbeschleunigung
ay	Querbeschleunigung
m_{Ki}	Masse des Körpers Ki
$2s$	Laufkreisabstand
s_W	max. Verschiebung Kontaktpunkt auf dem Rad in Richtung Spurkranz
A	aerodynamische Fläche (10 m²)
d	aerodynamische Länge (3 m)
ρ	Luftdichte 1,225 kg/m³
c_i	aerodynamische Kraftbeiwerte für die x-, y-, z-Richtung
cm_i	aerodynamische Momentenbeiwerte für die x-, y-, z-Achse

<u>Schreibweisen:</u>

Matrizen: Großbuchstaben, unterstrichen, <u>A;</u>

Vektoren: Kleinbuchstaben, unterstrichen, *f;*

Komponente eines Vektors: $f(i)$, $i=1,2,3$; $f(1) = f_x$, $f(2) = f_y$, $f(3) = f_z$;

Teilbereich eines Vektors: $f(i:j)$, $i=1,2,3$, $j \geq i$; $f(i:j) = [\, f(i),\ldots, f(j)]^T$;