

Berechnungsgrundlagen für die Standsicherheitsnachweise von Tragmastkonstruktionen mit angebauten abgasführenden Rohren aus nichtrostendem Stahl

August 1998

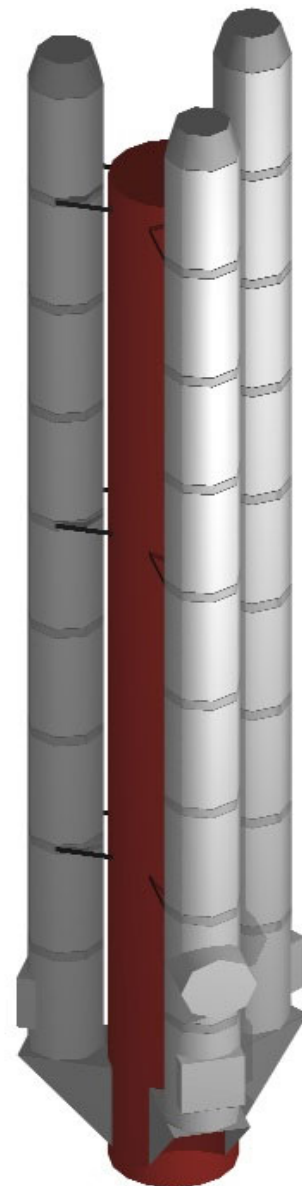
Diese Richtlinie beruht auf einem Forschungsvorhaben, das der Lehrstuhl für Stahlbau, Abt. Windingenieurtechnik der RWTH Aachen unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Ruscheweyh im Auftrag des VSE durchführte.

Sie befaßt sich mit wirbel- und selbsterregten Schwingungen von Tragmastkonstruktionen, an die allgemein bauaufsichtlich zugelassene Elemente aus Edelstahl angebaut werden.

Praktisch bedeutsam werden diese Schwingungsmechanismen insbesondere bei Bauhöhen über 20 m (vergl. Petersen, Stahlbau 3. Aufl. 1993).

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens sollen als ergänzende Berechnungsgrundlage nach DIN 4133 für die Bemessung von Tragmastkonstruktionen mit angebauten abgasführenden Elementen aus nichtrostendem Stahl dienen.

Ein Nachweis dieser Beanspruchung darf entfallen, wenn die Bauhöhe der Tragmastkonstruktion kleiner als 16 m und die kritische Windgeschwindigkeit größer als 20 m/s ist.



1. Allgemeines

1.1 Definition Tragmastkonstruktion mit angebauten abgasführenden Elementen aus nichtrostendem Stahl

Bei dieser Bauart werden mehrere rauchgasführende Satellitenrohre an einen Tragmast angebaut. Diese Kombination führt im Hinblick auf Windwirkungen zu einem Querschnitt, der deutlich von dem kreiszylindrischen Querschnitt eines herkömmlichen Stahlschornsteins abweicht.

1.2 Konfigurationen

Die in der Praxis gebräuchlichsten Typen von Tragmastkonstruktionen mit angebauten abgasführenden Elementen aus nichtrostendem Stahl sind Anlagen mit zwei, drei oder vier Satelliten (s. Bild 1–3).

1.3 Grundsätzliche Bemessungsregeln

Der Abstand s zwischen Tragmast und Abgasrohr hat entscheidenden Einfluß auf die Schwingungsanfälligkeit der Gesamtkonstruktion.

Grundsätzlich gilt:

Je größer der Abstand s desto geringer die Schwingungsanfälligkeit.

2. Wirbelerregte Querschwingungen

2.1 Allgemeines

Durch alternierende Wirbelablösungen können Tragmastkonstruktionen mit angebauten Elementen zu Querschwingungen angeregt werden. Hierbei handelt es sich um ein Resonanzproblem, das auftritt, wenn die Wirbelablösefrequenz mit der Eigenfrequenz der Abgasanlage übereinstimmt.

Das hier vorgeschlagene Berechnungsmodell lehnt sich an das Verfahren der DIN 4133, Nov. 1991, „Schornsteine aus Stahl“ und des Eurocode 1, Teil 2.4 (1994) „Wind Actions“ an, sowie an den Eurocode 3, Teil 3.2 „Chimneys“.

2.2 Berechnungsmodell

Die bezogene Schwingwegamplitude errechnet sich zu:

$$\max \frac{y}{D} = \frac{\varepsilon \cdot a}{\frac{Sc \cdot S^2}{K \cdot K_W} - 1} \leq 0,3 \quad (2.1)$$

Darin bedeuten:

y = Schwingwegamplitude senkrecht zur Windrichtung

D = umhüllender Durchmesser des Abgasanlagensteinquerschnitts (s. Bild 1 – 3)

Definition des umhüllenden Durchmessers:

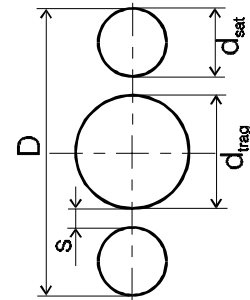


Bild 1: 2 Satelliten

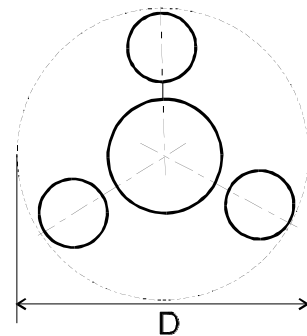


Bild 2: 3 Satelliten

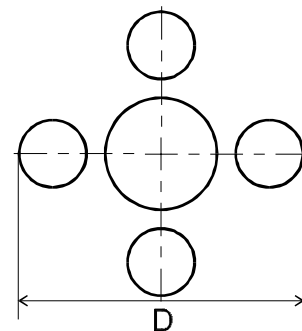


Bild 3: 4 Satelliten

ε = schlankheitsabhängiger Abminderungsfaktor

$$\varepsilon = -0,085 + 4,6 \cdot 10^{-6} \cdot \lambda^5$$

jedoch $0 \leq \varepsilon \leq 1,0$

a = Konstante (s. Anhang Tabelle 1)

K = Beiwert der Schwingungsform. Für ein Kragsystem kann näherungsweise $K = 0,13$ gesetzt werden.

K_W = Wirklängenfaktor gemäß DIN 4133 A.2.2.4.4

$$Sc = \text{Scrutonzahl} = \frac{2 \cdot M \cdot \delta}{\rho \cdot D^2}$$

M = reduzierte Masse [kg/m] (mittlere Masse pro Länge des gesamten Schornsteinquerschnitts im oberen Schornsteindrittel)

δ = logarithmisches Dekrement der Dämpfung

ρ = Luftdichte (1,25 kg/m³)

$$S = \text{Strouhalzahl} = \frac{D \cdot f_W}{u_\infty}$$

f_W = Wirbelablösefrequenz [Hz]

u_∞ = Windgeschwindigkeit [m/s] am oberen Drittel des Schornsteins

λ = Schlankheit
 $\lambda = h_F / D$

h_F = Höhe der Abgasanlage über dem Fußpunkt

2.3 Die Strouhalzahl

Die Strouhalzahl S ist abhängig vom Abstandsverhältnis s/d_{sat} , vom Durchmesser- verhältnis $d_{\text{sat}}/d_{\text{trag}}$ und von der Anzahl der Satellitenrohre.

Folgender mathematische Ansatz für S beschreibt die Abhängigkeit von s/d_{sat} näherungsweise:

$$S = S_0 + k \left(\frac{s}{d_{\text{sat}}} \right)^m \quad (2.2)$$

Die Tabelle 2 im Anhang gibt die Werte für S_0 , k und m wieder.

3. Galloping

3.1 Allgemeines

Außer zu wirbelerregten Schwingungen können Tragmastkonstruktionen mit

angebauten abgasführenden Elementen aus nichtrostendem Stahl auch zu Querschwingungen infolge von Gallopinginstabilität angeregt werden. Dabei handelt es sich um einen Erregungsmechanismus, der durch die Schwingbewegung selbst erzeugt wird (Selbsterregung). Das hier vorgeschlagene Berechnungsmodell entspricht dem Verfahren des Eurocode 1, Teil 2.4 (1994) „Wind Actions“.

3.2 Berechnungsmodell

Beim Galloping beschränken sich die Berechnungen auf die Ermittlung der Einsetzgeschwindigkeit. Oberhalb dieser Windgeschwindigkeit können Galloping-schwingungen auftreten. Sie ergibt sich zu:

$$v_0 = \frac{2 \cdot Sc}{\sigma^*} \cdot f_c \cdot D \geq v_{\text{grenz}} \quad (3.1)$$

Hierin bedeuten:

v_0 = Einsetzgeschwindigkeit

Sc = Scrutonzahl

f_c = Biegeeigenfrequenz der Abgasanlage

D = umhüllender Durchmesser

σ^* = Stabilitätskriterium

v_{grenz} = Grenzgeschwindigkeit

in Windzone I, II: $v_{\text{grenz}} = 30 \text{ m/s}$

in Windzone III, IV: $v_{\text{grenz}} = 40 \text{ m/s}$

3.3 Stabilitätskriterium σ^*

Tragmastkonstruktionen mit zwei Satellitenrohren zeigen keine Gallopinginstabilität. Die Konfigurationen mit drei oder vier Satellitenrohren können hingegen Galloping-schwingungen aufweisen. Das Stabilitätskriterium läßt sich wie folgt darstellen:

3 Satellitenrohre:

für

$$0 \leq \frac{s}{d_{\text{sat}}} \leq 0,67 \Rightarrow \sigma^* = 0,4 - 0,6 \frac{s}{d_{\text{sat}}}$$

$$\text{für } \frac{s}{d_{\text{sat}}} > 0,67 \Rightarrow \sigma^* = 0$$

4 Satellitenrohre:

$$\text{für } 0 \leq \frac{s}{d_{\text{sat}}} \leq 0,23 \Rightarrow \sigma^* = 0,7 - 3 \frac{s}{d_{\text{sat}}}$$

$$\text{für } \frac{s}{d_{\text{sat}}} > 0,23 \Rightarrow \sigma^* = 0$$

4. Logarithmisches Dämpfungsdekrement

4.1 Allgemeines

Das logarithmische Dämpfungsdekrement δ ist eine maßgebliche Einflußgröße für die Größe der Amplitude im Querschwingungsfall. Unterscheidungsmerkmal ist hierbei die Verbindungstechnik der Elemente:

Typ 1: formschlüssig (Bajonettverschluß und profiliertes Klemmband)

Typ 2: kraftschlüssig (Steckmuffe mit Überlappung)

4.2 Berechnungsmodell

Das Dämpfungsdekrement des Tragmastes ohne Satelliten beträgt lt. DIN 4133:

$$\delta_0 = 0,015$$

Die Dämpfung der gesamten Abgasanlage mit Satellitenrohren errechnet sich zu:

$$\delta = \delta_0 + n \cdot \Delta\delta_S \quad (4.1)$$

Hierin ist:

n = Anzahl der Satellitenrohre

$\Delta\delta_S$ = Dämpfungszuwachs infolge der montierten Satellitenrohre

Der Zuwachs der Dämpfung infolge von Elementzügen kann für Elemente mit formschlüssigen Verbindungen (Typ 1) mit

$$\Delta\delta_{S1} = 0,006$$

und für Elemente mit überwiegend kraftschlüssigen Verbindungen (Typ 2) mit

$$\Delta\delta_{S2} = 0,008$$

angesetzt werden.

Vereinfacht darf das logarithmische Dämpfungsdekrement wie folgt angenommen werden:

Tragmastkonstruktion mit 2 Satellitenrohren:

$$\delta = 0,02$$

Tragmastkonstruktion mit 3 Satellitenrohren:

$$\delta = 0,03$$

Anhang

Tabelle 1

Konstante a für die Ermittlung der bezogenen Schwingwegamplitude y/D . Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.

Abstands- verhältnis	2 Satellitenrohre $d_{\text{sat}}/d_{\text{trag}} =$			3 Satellitenrohre $d_{\text{sat}}/d_{\text{trag}} =$			4 Satellitenrohre $d_{\text{sat}}/d_{\text{trag}} =$		
	0,42	0,56	0,80	0,42	0,56	0,80	0,42	0,56	0,80
s/d_{sat}	0,42	0,56	0,80	0,42	0,56	0,80	0,42	0,56	0,80
0,0	0,11	0,33	0,44	0,22	0,45	0,55	0,45	0,45	0,45
0,1	0,055	0,17	0,28	0,55	0,66	0,77	0,45	0,45	0,45
0,2	0,055	0,17	0,28	0,45	0,50	0,55	0,45	0,45	0,45
0,3	0,055	0,055	0,17	0,17	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
0,4	0,055	0,055	0,055	0,17	0,33	0,33	0,22	0,22	0,22
0,5	0,055	0,055	0,055	0,17	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
0,6	0,055	0,055	0,055	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
0,7	0,055	0,055	0,055	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
0,8	0,055	0,055	0,055	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17

Tabelle 2

Parameter S_0 , k und m für die Ermittlung der Strouhalzahl

Anzahl der Satellitenrohre	$d_{\text{sat}}/d_{\text{trag}}$	S_0	k	m
2	0,42	0,16	0,18	1,0
	0,56	0,16	0,53	1,7
	0,80	0,16	0,82	2,0
3	0,42	0,13	0,15	1,0
	0,56	0,13	0,21	1,0
	0,80	0,13	0,33	1,0
4	0,42	0,17	0,24	1,0
	0,56	0,17	0,27	1,0
	0,80	0,17	0,27	1,0