

Die Bemessung von Stahlkaminen nach modernen Grundsätzen

Autor(en): **Frangi, Tullio / Koten, Henk van**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **106 (1988)**

Heft 38

PDF erstellt am: **26.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-85807>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Die Bemessung von Stahlkaminen nach modernen Grundsätzen

CICIND (Comité international des cheminées industrielles) ist eine internationale Expertengruppe auf dem Gebiet der industriellen Kamine. Im Mai 1988 wurde durch diese Gruppe eine Norm für Stahlkamine herausgegeben, die auf den neuesten Erkenntnissen der Aerodynamik basiert. Diese Norm wird kurz vorgestellt, wobei besonders die dynamischen Aspekte erläutert werden, die durch den Trend nach immer schlankeren Bauwerken ständig an Bedeutung gewinnen.

Die kürzlich veröffentlichte Übersicht über etwa 60 Stahlkamine [1] dokumentiert eindrücklich, dass die richtige Be-

VON TULLIO FRANGI,
WINTERTHUR,
UND HENK VAN KOTEN,
ZOETERMEER,
NIEDERLANDE

messung und Konstruktion von Kaminen vom Ingenieur ein grosses Mass an Wissen und Erfahrung erfordert. Bei einer zu grossen Anzahl der untersuchten Kamine entstanden Schäden, die eine Reparatur oder sogar den Ersatz der Konstruktion notwendig machten. Ursache war häufig eine falsche Einschätzung der dynamischen Effekte. Während in den meisten Fällen des Bauingenieurwesens der Wind als vorwiegend statisches Element betrachtet werden darf, sind für die Bemessung von schwingungsanfälligen Bauwerken – wie Kaminen – die dynamischen Eigenschaften der Belastungen als auch der Konstruktion selbst genau zu untersuchen.

Basis für einen guten Entwurf bildet die gründliche Kenntnis aller statischen wie dynamischen Kräfte, die auf einen Kamin einwirken. Zu den dynamischen Wirkungen der Windkräfte auf Kamine konnten in jüngster Zeit viele Erkenntnisse gewonnen werden, z.B. über Böeneffekte, Wirbelablösungen, Einfluss von Dämpfern und Wendeln, die sich nun in den modernen Normen – wie der CICIND-Norm – niederschlagen haben. Nachstehend soll die im Mai 1988 erschienene CICIND-Norm für Stahlkamine [2] in ihren Hauptzügen vorgestellt werden, wobei vor allem auf die dynamischen Probleme eingegangen wird.

Entwurfs-Philosophie

Ein Berechnungs-Modell soll die wirkliche Situation so gut wie möglich erfassen.

Vom Modell wird grundsätzlich gefordert, dass es genügend «sicher, einfach und zutreffend» sei. Selten jedoch lässt sich mit dem gleichen Modell sowohl die Bedingung «einfach» wie «zutreffend» erfüllen, so dass häufig ein Modell zur Anwendung gelangt, das einen optimalen Kompromiss zwischen «sicher, einfach und zutreffend» schliesst.

Während die Aussagen «genügend zutreffend» und «genügend einfach» rein objektbezogen sind, ist die Forderung «genügend sicher» rationaler Art. Die CICIND-Norm interpretiert «genügend sicher» aus der Sicht der wirtschaftlichen Konsequenzen eines Versagens der Konstruktion, wobei selbstverständlich die Forderung nach einer ausreichenden Tragfähigkeit ebenfalls erfüllt sein muss. Es wird von folgender Betrachtungsweise ausgegangen:

Die Erfahrung zeigt, dass Stahlkamine eine maximale Gebrauchsdauer von rund 20 Jahren aufweisen. Dabei wird angenommen, dass während der Gebrauchsdauer die Reparaturkosten bzw. die Kosten für einen allfälligen Ersatz des Kamins den 10fachen Betrag der ursprünglichen Kaminherstellungskosten ausmachen (inkl. Produktionsausfälle infolge Stilllegung des Kamins und Teuerung). Nach CICIND-Norm werden nun die Sicherheitsfaktoren derart festgelegt, dass während der 20jährigen Gebrauchszeit eine genügend kleine, auf ökonomischen Überlegungen basierende Versagenswahrscheinlichkeit gewährleistet ist.

Bemessungsgrundsätze und Sicherheitsfaktoren

Für ständige Lasten und Windkräfte in Windrichtung:

Nachzuweisen ist, dass sowohl die gesamte Konstruktion als auch die einzelnen Bauteile einen ausreichenden Trag-

widerstand aufweisen. Dazu sind die Gebrauchslasten mit partiellen Sicherheitsfaktoren (Lastfaktoren) zu erhöhen und die Spannungen nach der Elastizitätstheorie zu ermitteln. Der Nachweis geschieht durch Vergleich mit den Flie遢spannungen bzw. kritischen Beulspannungen, die durch einen Widerstandsfaktor zu dividieren sind.

Der totale Sicherheitsfaktor setzt sich demnach zusammen aus den partiellen Sicherheitsfaktoren in Tabelle 1.

Für Kaminbeanspruchungen in Wind-Querrichtung:

Hier ist besonders die Schwingungsanfälligkeit der Kamine zu beachten. Kamine müssen so ausgebildet werden, dass die Querschwingungsamplituden genügend klein bleiben, einerseits um ein Versagen durch Materialermüdung zu verhindern, andererseits sollen Betrachter durch die Kaminbewegungen nicht unnötig alarmiert werden.

- Widerstandsfaktor	1.10
- Lastfaktor	1.10

Die Windlast

Durch die Windbelastung werden im wesentlichen drei verschiedene Effekte hervorgerufen:

- Dynamische Windbelastung des Kamins in Windrichtung
- Schwingungen des Kamins quer zur Windrichtung
- Verformung des kreisförmigen Kaminquerschnittes zu einem Oval (ovalling)

Windkräfte in Windrichtung

Durch weltweite Forschungen werden die Wirkungsmechanismen der Windkräfte stets besser erfasst. Die Ansätze für die Windbelastung in der CICIND-Norm basieren auf diesen neuen Erkenntnissen der Aerodynamik. Zu beachtendes Merkmal ist, dass die rechnerischen Windkräfte durch die dynamischen Eigenschaften des Windes und der Baukonstruktion beeinflusst werden.

Für die Berechnung des Winddrucks wird von einem Ausgangswert v_b der Windgeschwindigkeit ausgegangen. v_b ist die durchschnittliche Windgeschwindigkeit, die während einer Stunde in 50 Jahren – 10 Meter über Boden gemessen – beobachtet wurde.

Hieraus werden die Bemessungs-Windgeschwindigkeit $v(2)$ und der Bemessungs-Winddruck abgeleitet (Tabelle 1).

Partielle Sicherheitsfaktoren für ständige Lasten und Windkräfte in Windrichtung

- Widerstandsfaktor (für das Material)	1,10
- Lastfaktoren	
• ständige Lasten	Kamin ohne Abspannung 1,10 Kamin mit Abspannung 1,35
• Windkräfte	in gemässigten Zonen 1,50 in Zonen mit tropischen Stürmen 1,60

Windkräfte in Windrichtung*Bemessungs-Windgeschwindigkeit $v(z)$*

$$v(z) = v_b \cdot k_t \cdot k_i \text{ [m/s]}$$

wobei:	z: Höhe über Boden [m]
	k_t : Faktor zur Berücksichtigung der Topographie
	k_i : Interferenzfaktor, berücksichtigt den Einfluss von benachbarten Objekten

Bemessungs-Winddruck $w(z)$

$$w(z) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v(z)^2 \cdot C_D \cdot d(z) \cdot G \text{ [N/m]}$$

wobei:	ρ : Dichte der Luft in h_1 m Höhe $\rho = 1,25 - h_1/8000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$
	C_D : Formfaktor (abhängig von der Reynoldszahl)
	d: Aussendurchmesser des Kamins [m]
	G: Böenfaktor

Kaminschwingungen quer zur Windrichtung*Reynoldszahl (Re) und Scrutonzahl (Sc)*

$$Re = v \cdot d / \mu = 69\,000 \cdot v \cdot d,$$

$$Sc = (4 \cdot \pi \cdot m_o \cdot D) / (\rho \cdot d^2),$$

wobei:	v: Windgeschwindigkeit an der Kaminspitze [m/s]
	d: Mittl. Durchmesser vom obersten Drittel des Kamins [m]
	μ : Kinematische Zähigkeit der Luft [m ² /s]
	m_o : Masse pro m des schwingenden Kaminteils [kg/m], $m_o = \int m(z) \cdot u(z) \cdot u(z) \cdot dz / \int u(z) \cdot u(z) \cdot dz$
	m(z): Masse pro m in der Höhe z [kg/m]
	u(z): Eigenformauslenkung in der Höhe z [m]
	D: Dämpfungsmass (vorh. Dämpfung c, dividiert durch die kritische Dämpfung c_{cr})

Kritische Windgeschwindigkeit v_{cr} (Resonanzfall)

$$v_{cr} = f \cdot d / St$$

wobei:	f: Eigenfrequenz des Kamins [s ⁻¹]
	d: Aussendurchmesser im Wirbelbereich [m]
	St: Strouhal-Zahl (St ≈ 0.2 für Kreiszylinder)

Reynoldszahlen und Scrutonzahlen für Stahlkamine

$$v = f \cdot d / St = v_{cr}$$

$$f = 1028 \cdot d / h^2$$

$$M = \pi \cdot d \cdot t_m \cdot 7800 \text{ kg/m}$$

$$D = 0,005$$

$$t_m = \text{Stärke einer Ersatz-Stahlwand, die dasselbe Gewicht hat wie die effektive Wand inkl. Futter [m]}$$

$$Re \approx 3,5 \cdot 10^8 \cdot d^3 / h^2$$

$$Sc \approx 1200 \cdot t_m / d$$

Querschnittsverformende Schwingungen*Maximalwert des Biegemomentes*

$$M_{\max} = 0,09 \cdot w_5(z) \cdot d(z) \text{ [N} \cdot \text{m/m]}$$

wobei:	$w_5(z)$: Winddruck auf Höhe z, gemittelt über 5 Sekunden $w_5(z) \approx 1,25 \cdot v_b^2 \cdot (z/10)^{0,28} \text{ [N/m}^2\text{]}$
--------	--

Kritische Windgeschwindigkeit

$$v_{cr} = 6500 \cdot t / d \text{ [m/s]}$$

wobei:	t: Durchschnittliche Schalendicke des obersten Kamindrittels [m]
	d: Kamindurchmesser [m]

Gebrauchsdauer des Kamins, ist aber gering. Aus diesem Grund wird für Windbelastung in Windrichtung kein Ermüdungsnachweis gefordert.

Kaminschwingungen quer zur Windrichtung

Das Ausmass der durch Windbelastung hervorgerufenen Kamin-Querschwingungen (verursacht durch Wirbelablösungen) hängt u.a. vom Dämpfungsmass der Konstruktion ab. Aus zahlreichen Messungen konnte ein empirisches Verhältnis zwischen einem oberen, auf der sicheren Seite liegenden Wert der Ausbiegung der Kaminspitze und zwei dimensionslosen Kennzahlen ermittelt werden, die nach Reynolds Re und Scruton Sc genannt werden (Tabelle 1).

Die Ausbiegung der Kaminspitze erreicht den grössten Wert im Resonanzfall, d.h. wenn die Wirbelablösefrequenz mit der Eigenfrequenz des Kamins übereinstimmt. Dies entsteht bei der kritischen Windgeschwindigkeit v_{cr} , die mit der Gleichung in Tabelle 1 bestimmt werden kann.

Keine wesentlichen Querschwingungen entstehen dann, wenn v_{cr} einen Wert annimmt, der grösser ist als 120% der Bemessungs-Windgeschwindigkeit in der Kaminspitze.

Bild 2 zeigt das Verhältnis Kaminspitzenausbiegung/Durchmesser (w/d) in Funktion der zwei Kennzahlen Re und Sc. Die Berechnung der Kurven erfolgte nach Lit. [4].

Die Kennzahlen von Reynolds und Scruton lassen sich für Kamine mit annähernd konstanten Querschnitten näherungsweise in Funktion der drei Kaminabmessungen d (Durchmesser [m]), h (Höhe [m]) und t_m (Ersatz-Wandstärke [m]) angeben. Die Werte für Stahlkamine sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Aus dem Bild 2 geht hervor, dass für eine Scruton-Zahl über 10 die Ausbiegung der Kaminspitze unter 5% des Kamindurchmessers bleibt. Dies ist erfüllt für Ersatz-Wandstärken t_m grösser als rund 1% des Kamindurchmessers. Wandstärken in dieser Grössenordnung sind aber oft unwirtschaftlich. In solchen Fällen kann durch Anordnung von aerodynamischen Massnahmen wie Wendeln oder mit Schwingungsdämpfern Abhilfe geschaffen werden.

Während durch die Windbeanspruchung der Kamin in Windrichtung lediglich eine kleine Anzahl von böeninduzierten Schwingungen erfährt, sind in Wind-Querichtung andauernde,

Tabelle 1. Sicherheitsfaktoren und Berechnungsformeln

Mit dem Böenfaktor werden die dynamischen Eigenschaften erfasst. Er ist im wesentlichen abhängig von der Kaminhöhe, von der Eigenschwingungszahl und vom Eigendämpfungsmass des Kamins sowie von der aerodynamischen Dämpfung.

Durch die Windbelastung erfährt der Kamin keine andauernde Schwingung in Windrichtung, wie das in Wind-Querichtung der Fall sein kann. Wohl können infolge von Turbulenzen Schwingungen entstehen. Die Anzahl der Schwingungen, betrachtet auf die

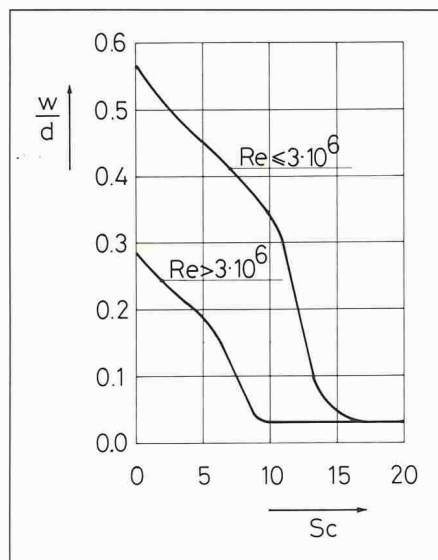


Bild 2. Verhältnis Kaminspitzenausbiegung zu Durchmesser in Funktion der Scruton-Kennzahl mit der Reynolds-Kennzahl als Parameter

wirbelinduzierte Schwingungen möglich. Aus diesem Grunde ist hier eine Überprüfung der Ermüdungsfestigkeit erforderlich.

Querschnittsverformende Schwingungen (ovalling)

Durch ungleichmässige Winddruckverteilung im Umfang verformt sich ein kreisförmiger Kaminquerschnitt unter den Biegemomenten zu einem Oval. In vertikalen Schnitten werden dadurch Biegespannungen hervorgerufen. Für den Maximalwert des Biegemomentes $M_{\max}$ gilt die Formel in Tabelle 1.

Bei kritischen Windgeschwindigkeiten kann der Querschnitt zusätzlich durch Wirbelablösungen dynamisch beansprucht werden (Vibrationen). Dies tritt dann auf, wenn die Frequenz der Wirbelablösung derjenigen des Kamins in Umfangrichtung entspricht. Die kritische Windgeschwindigkeit v_{cr} wird gemäss Tabelle 1 bestimmt.

Diese schädlichen Vibrationen können unterdrückt werden, indem z.B. mit Versteifungsringen das v_{cr} auf einen Wert erhöht wird, der über den Windgeschwindigkeiten an Ort und Stelle liegt.

Computerprogramm CHIMNEY

Das statische und dynamische Verhalten von Kaminen wird von einer grossen Anzahl von Parametern beeinflusst, wie Dämpfung in Längs- und Querrichtung, Isolationen und Verkleidungen, Aussteifungsringen, Flanschen, Öffnungen usw.

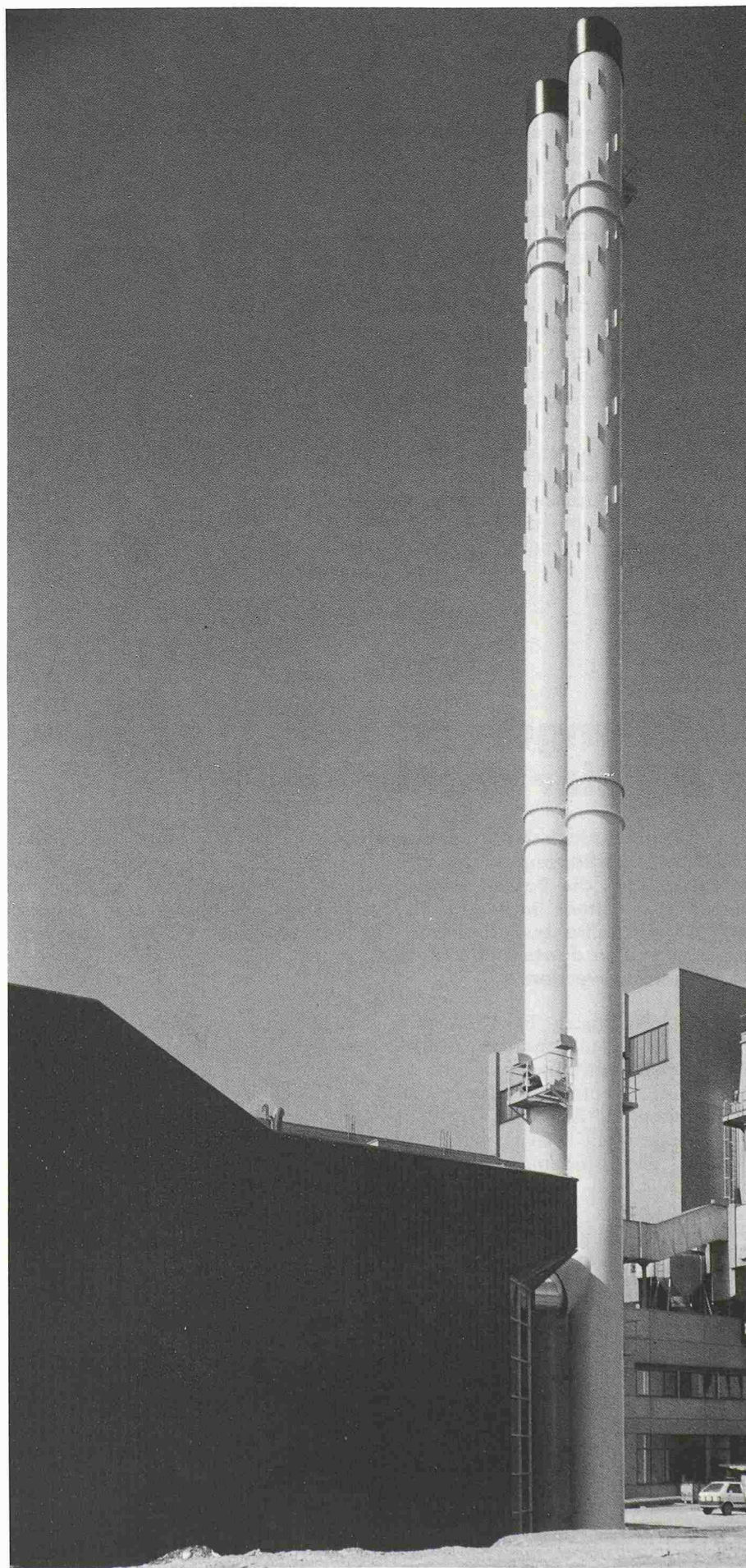


Bild 1. Stahlkamine der Kehrriichtverbrennungsanlage Winterthur

Ein effizienter Entwurf kann daher nur mit Hilfe eines Computerprogramms geschehen. Deshalb wurde das Programm CHIMNEY [5] entwickelt, das auf dem CICIND-Code [2] basiert. Durch kleine Änderungen in den Input-Daten sind aber auch Berechnungen nach DIN 4133 [3] möglich.

CHIMNEY – eingesetzt im Entwurfsmodus – bestimmt die optimalen Wandstärken in den einzelnen Kaminabschnitten bezüglich der Kriterien Spannungen, Ermüdung, Stabilität. Wegen der stark nichtlinearen Form einiger Mechanismen verläuft der Rechenprozess iterativ, wobei nach jeder Iteration die Resonanzfrequenz neu berechnet wird.

CHIMNEY – eingesetzt im Nachweismodus – berechnet die Beanspruchungen und die Grenzwerte bezüglich Tragfähigkeiten und Instabilitäten für einen bereits bestehenden oder konzipierten Kamin.

Beispiel

Der Einfluss von aerodynamischen Massnahmen soll an einem einfachen Beispiel gezeigt werden:

Gegeben sei ein unisolierter Kamin von 60,00 m Höhe und 1,60 m Durchmesser. Ohne aerodynamische Massnahmen ist im unteren Kaminende eine konstruktive Wandstärke von 11 mm erforderlich. Der Kamin benötigt eine Stahlmasse von 30 400 kg.

Werden aber im obersten Kamindrittel Wendeln angeordnet, so wird durch diese Massnahme wohl der Luftwiderstand in Windrichtung vergrössert, was zu einer Erhöhung der Wandstärke im unteren Kaminende auf 13 mm führt, im oberen Kaminteil lassen sich aber die Wandstärken stark reduzieren, so dass ein derart ausgebildeter Kamin nur noch eine Stahlmasse von 20 900 kg benötigt.

Literatur:

- [1] B.N. Pritchard: Steel Chimney Oscillations. Engineering Structures, 1984, Vol. 6, October
- [2] CICIND Model Code for Steel Chimneys, May 1988, CH-8001 Zurich, Switzerland
- [3] DIN 4133, Schornsteine aus Stahl, Statische Berechnung und Ausführung, August 1973
- [4] B.J. Vickery and A. Daly: Evaluation of Methods of the Across Wind Response of Chimneys, CICIND-Report, Vol. 2, 1986
- [5] CHIMNEY, A Program to Design Steel Chimney, H. van Koten and G.K. Verboom, NL-2714 PD Zoetermeer

Adressen der Verfasser: Dr. T. Frangi, Dipl. Bauing. ETH/SIA, Geilinger AG, Grüze-feldstrasse 47, CH-8401 Winterthur; Henk van Koten, Dipl. Bauing., Adviesbureau voor dynamisch belaste constructies, 2° Stationsstraat 232, NL-2718 AC Zoetermeer.

Windangeregte Schwingungen normaler Hochbauten

Gewöhnliche, statisch einwandfreie Hochbauten können unter normalen Umweltbedingungen vom Wind so stark zu Schwingungen angeregt werden, dass die Belästigungsgrenzwerte überschritten werden und sich die Bewohner ängstigen. Bei schwach ausgesteiften Rahmenkonstruktionen sollte deshalb neben dem normgemässen statischen Nachweis auch eine dynamische Überprüfung der Schwingungsanfälligkeit durchgeführt werden.

Klagen geängstigter Benützer eines SBB-Dienstgebäudes mitten in Zürich über Gebäudeschwingungen bei starkem Wind, leichten Erdbeben, nahen Bauarbeiten und Zugstoss gegen Prellbock haben die Bauabteilung des Kreis III der SBB veranlasst, das Ge-

bäude einer statischen und dynamischen Überprüfung zu unterziehen.

Die Untersuchung zeigte, dass es sich um eine schwach ausgesteifte Rahmenkonstruktion mit 5 Obergeschossen handelt (Bild 1). Sichtbare Schäden konnten nicht festgestellt werden. Die

VON ERWIN KESSLER,
TUTTIL

im vierten Obergeschoss bei nahen Bauarbeiten (Rammen von Spundwänden) gemessene Schwinggeschwindigkeit betrug 5,5 mm/s und 3 mm/s am sehr gut ausgesteiften Unterbau (Keller aus Stahlbeton mit vielen tragenden Wänden und einem Schutzraum). Gebäudeschäden sind bei solchen Erschütterungen noch nicht zu erwarten, hingegen sind sie deutlich wahrnehmbar und erschrecken in der Regel die Bewohner.

Eine Überprüfung der Windstabilität zeigte, dass das Tragwerk statisch in Ordnung war, sowohl aufgrund der al-

ten, noch gültigen SIA-Normen 160 und 162 als auch aufgrund der Gelbdrucke der Revisionsentwürfe (Ausgabe 1985). Andererseits zeigte eine dynamische Analyse, dass unter normgemässen Windlasten im fünften Obergeschoss rechnerisch Schwinggeschwindigkeiten bis 65 mm/s auftreten können, ohne dass hierfür besondere Resonanzerscheinungen nötig wären. Die damit verbundene Beschleunigung beträgt $0,80 \text{ m/s}^2$, und die Wahrnehmungsstärke nach DIN 4150 ist $KB = 17$. Eine solche Erschütterung ist sehr stark spürbar bis erschreckend und liegt weit über dem Belästigungsgrenzwert. Die rechnerisch abgeschätzte Gebäudegrundfrequenz liegt zwischen 1,8 und 2,2 Hz.

Beim hier dargestellten Fall ist nicht die Sicherheit, sondern die Gebrauchstauglichkeit ungenügend. Man wird im Rahmen der statischen Nachweise auch nach den neuen Normen – die ja primär die Tragwerksicherheit im Auge haben – einen solchen Mangel nicht entdecken. Wie der dargestellte Fall zeigt, können windangeregte Schwingungen nicht nur bei aussergewöhnlich hohen oder schlanken Bauwerken massgebend werden, sondern auch bei gewöhnlichen Hochbauten mit einem nur schwach ausgesteiften Rahmen-tragwerk.

Adresse des Verfassers: Dr. E. Kessler, Berater Bauingenieur SIA, 9546 Tutwil.



Bild 1. Gebäude-Ansicht. Die Stahlbetonstützen zwischen den Fensteröffnungen müssen auch den Stockwerk-Schub aus Windlasten aufnehmen. Diese Stützen bilden zusammen mit den Geschossdecken eine relativ biegeeweiche Rahmenkonstruktion