

# Neuere Erkenntnisse zum Entwurf und zur Qualitätssicherung bei Stahlschornsteinen

Dr.-Ing. Peter Knödel

Humboldtstr. 25a

D-76131 Karlsruhe

Haus der Technik e.V.

Seminar Auslegung und Werkstoffe im Apparate- und Rohrleitungsbau

Fachhochschule Offenburg, 05.02.2003

Das folgende Manuskript ist inhaltlich gleich mit

Mang, F., Knödel, P.: Neuere Erkenntnisse zum Entwurf und zur Qualitätssicherung  
bei Stahlschornsteinen.

Tagungsband der Arbeitstagung Freudenstadt 25.-26.06.93, Landesvereinigung der  
Prüfingenieure für Baustatik Baden-Württemberg.

Die Wiedergabe erfolgt hier mit freundlicher Genehmigung der Landesvereinigung der Prüfin-  
genieure für Baustatik, Baden-Württemberg.

Das Manuskript wurde von 1994 bis 1998 von Herrn Professor Mang (Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Karlsruhe) und mir im Rahmen von Haus-der-Technik-Seminaren vorgetragen. Ergänzungen, die aufgrund der Weiterentwicklung des *neuesten Standes von Wissenschaft und Technik* notwendig wurden, sind nach dem Literaturverzeichnis in einem gesonderten Abschnitt angefügt.

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2 Tragsicherheit</b>	<b>3</b>
<b>3 Detailgestaltung</b>	<b>14</b>
<b>4 Dauerhaftigkeit</b>	<b>15</b>
<b>5 Wärmeführung</b>	<b>17</b>
<b>6 Baurechtliche Aspekte</b>	<b>19</b>
<b>7 Qualitätssicherung</b>	<b>20</b>
<b>8 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>24</b>
<b>Literatur</b>	<b>25</b>
<b>9 Ergänzungen</b>	<b>29</b>

# 1 Einleitung

Unsere neuesten *Erkenntnisse zum Entwurf und zur Berechnung von Stahlschornsteinen* wurden 1992 auf zwei Fachtagungen vorgetragen [14]. Der Tagungsband [32] kann bei der *Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V.* bezogen werden.

Während damals eine allgemeine Darstellung des Kenntnisstandes in Berechnung und Konstruktion für Planer, Hersteller und Forscher angestrebt war, konzentrieren sich die folgenden Ausführungen auf die Belange der Prüflingenieure. Obwohl dies insgesamt unter dem Aspekt *qualitätssichernder Maßnahmen* gesehen werden kann, werden im folgenden Besonderheiten in der rechnerischen Ermittlung des Tragverhaltens, der konstruktiven Durchbildung, der Ausbildung des Korrosionsschutzes, der Wärmeführung, der baurechtlichen Behandlung und der Qualitätssicherung bei Fertigung und Montage angesprochen.

Begriffe und Formelzeichen werden möglichst nach DIN 4133 verwendet. Auf Absätze wird in der Form (x.y.z) verwiesen. Gleichungsnummern (A.nn) beziehen sich auf DIN 4133 Anhang A [38].

## 2 Tragsicherheit

### 2.1 Statisches System

Die „statische Berechnung“ des Stahlkamines ist in Wirklichkeit eine *dynamische Berechnung*, wenn auch manche Beanspruchungen quasi-statisch ermittelt werden können. Beispiel: Der *Böenreaktionsfaktor*  $\varphi_{B0}$  (früher: Stoßfaktor) beschreibt die dynamische Reaktion des Bauwerkes auf die gegenüber dem mittleren Wind regellos eintreffenden Böen (vgl. [24]). Mit dem Böenreaktionsfaktor wird die Beanspruchung des Kamines in Windrichtung quasi-statisch ermittelt.

Für die Beanspruchung des Kamines quer zur Windrichtung ist der aufgeschaukelte Resonanzzustand des schwingenden Kamins und der an ihm ablösenden *Kármánschen* Wirbel maßgebend. Die ermittelte Eigenfrequenz  $f$  geht nach Gl. (2.2) bzw. (A.21) quadratisch in die Beanspruchungen des Kamines ein. In der Regel führt daher eine möglichst niedrige Abschätzung der Eigenfrequenz zu günstigeren (aber möglicherweise auf der unsicheren Seite liegenden) Beanspruchungen des Kamins.

Zufällig korrespondiert dies mit den üblichen Gepflogenheiten des Statikers, Eigenlasten immer reichlich und *auf der sicheren Seite liegend* anzunehmen. In Tabelle 2.1 ist die mögliche Auswirkung dieser Vorgehensweise an einem Beispiel dargestellt.

		großzügige Rechnung		genauere Rechnung	
Bezeichnung	Abmessung	spez. Gew.	Gewicht	spez. Gew.	Gewicht
	[mm]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kN/m]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[kN/m]
Tragrohr	800 x 8	78.5	1.59	78.5	1.59
Innenzug	500 x 2	78.5	0.25	78.5	0.25
Wärmedämmung	100 mm	1.3	0.25	0.8	0.15
Steigleiter			0.20		0.08
Zwischensumme			2.29		2.07
Zuschlag für Kaminhaube, Bühne, Fuchs, usw.		+20%	0.46	+5%	0.10
Gesamt			2.75		2.17
Eigenfrequenz	$H = 25 \text{ m}$		1.01		1.13
Schnittgrößen			80%		100%

Tabelle 2.1: Mögliche Auswirkung unterschiedlich genauer Eigenlastermittlung

Der zu üppige Ansatz von Eigenlasten führt jedoch nicht in allen Fällen zu einem Unterschätzen der Schnittgrößen — manchmal ist auch das Gegenteil der Fall! Zur Erläuterung wird auf eine Darstellung aus [47] zurückgegriffen, die bereits in [14] veröffentlicht wurde. Sie wird in Bild 2.1 in abgewandelter Form wiedergegeben.

Dazu wird zunächst der Zusammenhang zwischen der Trägheitskraft  $F_i$  und den Systemgrößen hergeleitet:

Nach Gl. (A.20) und (A.19) ist

$$Re = \frac{d \cdot v_{crit}}{\nu} = \frac{d^2 \cdot f}{\nu \cdot S} \quad (2.1)$$

Bei festgehaltenen Tragrohrabmessungen des Kamines sind die Schnittgrößen und die daraus resultierenden Spannungsschwingbreiten  $\Delta\sigma$  proportional zur Trägheitskraft  $F_i$ .

Nach Gl. (A.21) ist

$$F_i = m_i \cdot (2\pi f)^2 \cdot \Phi_i \cdot \max y_F \quad . \quad (2.2)$$

Hierin ist nach Gl. (A.23) ist

$$\max y_F = KW \cdot K \cdot c_{lat} \cdot \frac{1}{S^2} \cdot \frac{1}{S_c} \cdot d \quad . \quad (2.3)$$

In Gl. (A.21) und (A.23) sind die Größen  $KW$  (nach A.26 bzw. A.27),  $K$  (nach A.28 bzw. A.29) und  $S$  konstant.

Die bezogene Masse  $M$  in der *Scroutonzahl*

$$S_c = \frac{2 \cdot M \cdot \delta}{\rho \cdot d^2} \quad (2.4)$$

läßt sich als

$$M = m_i \cdot \text{const.} \quad (2.5)$$

darstellen.

Unter Berücksichtigung der konstanten Größen wird dann aus gl. 2.2

$$F_i \sim m_i \cdot f^2 \cdot c_{lat} \cdot \frac{1}{m_i} \cdot \frac{1}{\delta} \quad . \quad (2.6)$$

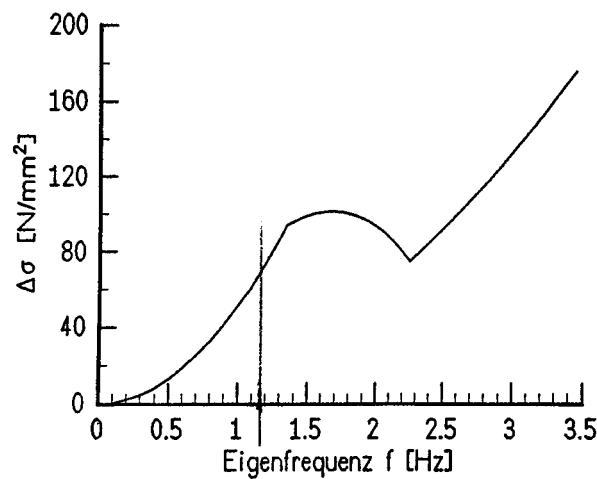
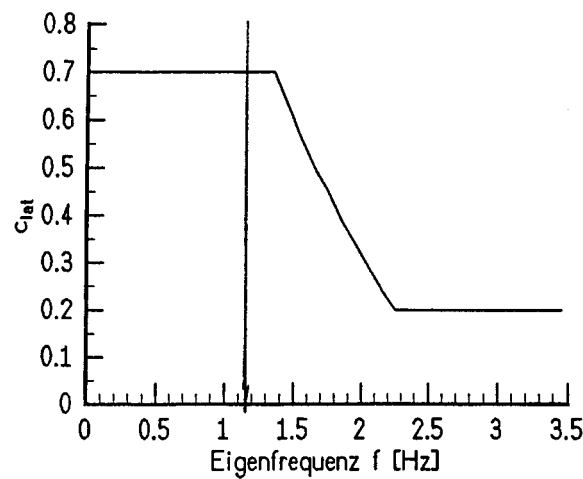
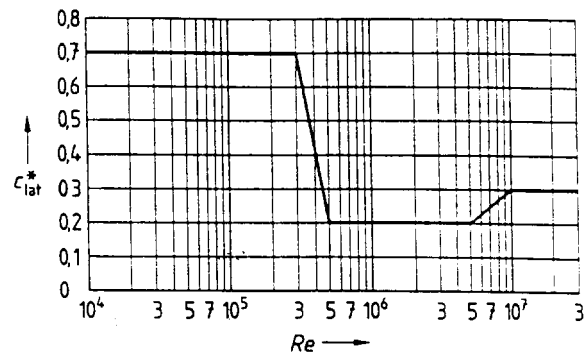
Setzt man auch die Dämpfungsziffer  $\delta$  als fest und gegeben voraus, so wird hieraus

$$F_i \sim f^2 \cdot c_{lat} \quad . \quad (2.7)$$

Die Trägheitskraft  $F_i$ , und damit auch die resultierenden Schnittgrößen und Spannungsschwingbreiten  $\Delta\sigma$ , sind bei festgehaltenen Kaminabmessungen nur zu  $f^2$  und  $c_{lat}$  proportional. Für die Bereiche der *Reynoldszahl*  $Re = 0.7 = \text{const.}$  und  $Re = 0.2 = \text{const.}$  (siehe Bild **2.1**) werden die Spannungsschwingbreiten daher durch eine Parabel über der Frequenz  $f$  beschrieben. Der Übergangsbereich zwischen  $Re = 3 \cdot 10^5$  und  $Re = 5 \cdot 10^5$  ist durch die Funktion

$$\begin{aligned} c_{lat} &= 0.7 - (\log Re - \log(3 \cdot 10^5)) \cdot \frac{0.7 - 0.2}{\log(5 \cdot 10^5) - \log(3 \cdot 10^5)} \\ &= 0.7 - 2.254 \cdot (\log Re - 5 - \log 3) \end{aligned} \quad (2.8)$$

beschrieben. Hier wirkt dem quadratischen Anstieg der Schnittgrößen mit der Frequenz die starke Abnahme des Quertriebsbeiwertes  $c_{lat}$  entgegen.



SGDYN I 23.6.1993

**Bild 2.1:** Verlauf der Quertriebsbeiwerte  $c_{lat}$  (mitte) und der Spannungsschwingbreiten  $\Delta\sigma$  (unten) für unterschiedliche Eigenfrequenzen bei gleichen Tragrohrabmessungen (vgl. [47]) — oben ist zum Vergleich das Diagramm aus DIN 4133 wiedergegeben

In dem genannten Beispiel ergibt sich bei einer Erhöhung der Eigenfrequenz von 2.0 Hz auf 2.2 Hz ebenso eine Verminderung der Schnittgrößen um ca. 20%, wie sich nach Tabelle 2.1 für eine Erhöhung der Eigenfrequenz von 1.01 Hz auf 1.13 Hz eine Erhöhung um 20% ergab.

*Anmerkung:*

Außer durch unterschiedlichen Ansatz der Eigenlasten läßt sich die rechnerisch ermittelte Eigenfrequenz auch dadurch beeinflussen, welche Einspannsteifigkeit man für den Kamin ansetzt. Der Ansatz der elastischen Bettung in der Fundamentsohle ist verbreitet und zumindest bei großen Kaminen üblich ([5], vgl. auch [17]). Kaum verbreitet ist der Ansatz der elastischen Flanschverformungen bei Stahlkaminen. Die Flanschverformungen bewirken eine „Aufweichung“ der sonst starr modellierten Einspannung, und somit eine Abnahme der Eigenfrequenz. Eine Studie hierzu [46] wurde bereits in [32] vorgestellt.

## 2.2 Dämpfungsziffern

Hinsichtlich der anzusetzenden Dämpfungsziffern (logarithmisches Dämpfungsdekrement  $\delta$ ) steht aus DIN 4133 nur eine grobe Abstufung unterschiedlicher Tragsysteme zur Verfügung (siehe Bild 2.2).

Konstruktionsart		$\delta$
Rohr,	ungestoßen, geschweißt oder mit GV-Verbindung geschraubt, ohne Innenrohr, ohne Isolierung	0,015
Rohr,	geschraubt oder genietet, ohne Innenrohr, ohne Isolierung	0,02
Rohr,	mit einem isolierten Innenrohr oder Außenisolierung	0,025
Rohr,	mit zwei oder mehreren isolierten Innenrohren	0,03
Rohr,	ausgemauert	0,07
Zweier-Rohr,	kraftschlüssig verbunden, ohne Isolierung	0,025
Dreier-Rohr-Gruppe,	kraftschlüssig verbunden, ohne Isolierung	0,03
Rohr,	abgespannt, ohne Innenrohr, ohne Isolierung	0,04

**Bild 2.2:** Dämpfungsziffern nach DIN 4133 [38]

Angaben zur möglichen Kombination dieser Dämpfungsziffern fehlen.

Beispiel:

Für eine Dreier-Gruppe mit jeweils einem isolierten Innenrohr wird die Dämpfungsziffer gesucht. Häufig wird hier so vorgegangen, daß die Dämpfungsziffern der einzelnen Merkmale addiert werden. In diesem Fall erhält man aus den Angaben

- Rohr, mit einem isolierten Innenrohr ...  $\delta = 0.025$
- Dreier-Rohr-Gruppe, kraftschlüssig verbunden, ohne Isolierung ...  $\delta = 0.030$

eine Dämpfungsziffer von  $\delta = 0.055$ .

Diesen Ansatz halten wir für unzutreffend hoch, da die Strukturdämpfung des Tragrohres doppelt in Rechnung gestellt wird. Nach unserer Meinung müsste man hier wie folgt vorgehen:

- Der Wert für die Dreier-Rohr-Gruppe, kraftschlüssig verbunden, ohne Isolierung bildet mit  $\delta = 0.030$  den Grundwert der Dämpfungsziffer.
- Für das „Rohr mit einem isolierten Innenrohr“ erhöht sich die Dämpfungsziffer gegenüber dem „Rohr, geschweißt, ohne Isolierung“ von  $\delta = 0.015$  auf  $\delta = 0.025$ . Diese Differenz der Dämpfungsziffern  $\Delta\delta = 0.010$  darf zu dem vorher bestimmten Grundwert addiert werden.

Man erhält auf diese Weise eine Dämpfungsziffer  $\delta = 0.040$ .

Wir möchten nun die Ergebnisse einer neuen Arbeit vorstellen, die sich mit lose gekoppelten Stahlkaminen befasste [45]. Ausgangspunkt war die Erkenntnis, daß die Anschlüsse von Koppelbühnen an das Tragrohr mindestens die zulässigen Lochspiele aufweisen, häufig aus praktischen Erwägungen heraus mit Langlöchern ausgeführt sind. Dies ist zwar eine kraftschlüssige Verbindung, die Verbindung weist aber beim Nulldurchgang der Relativbewegungen eine Lose auf. Es handelt sich damit um einen Zweimassenschwinger mit stark nichtlinearen Eigenschaften. Solche Systeme können in Einzelfällen analytisch behandelt werden [11].

Im vorliegenden Fall wurden schrittweise Zeitverläufe gerechnet. Die Kamine wurden als Einmassenschwinger modelliert (siehe Bild **2.3**), wobei jedem Kamin unterschiedliche Anfangsbedingungen  $x_0$  und  $\dot{x}_0$  aufgeprägt werden konnten.

In der Nähe der Schaltunkte zwischen den unterschiedlichen Systemzuständen

- Lose ist wirksam, jeder Kamin schwingt für sich

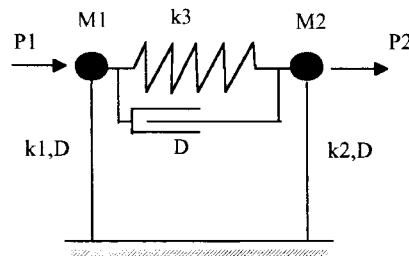




**Bild 2.3:** Modellierung der Kamine als Einmassenschwinger (aus [45])

- Bolzen liegt in der Leibung des Langloches an, beide Kamine schwingen gemeinsam als steif gekoppelter Zweimassenschwinger (siehe Bild 2.4)

wurde durch eine intelligente Schrittweitensteuerung sichergestellt, daß die Schaltpunkte genügend genau angenähert werden.



**Bild 2.4:** Modellierung der Kamine als steif gekoppelter Einmassenschwinger (aus [45])

Die Anregung der Kamine erfolgte durch eine periodische Horizontallast, die ungünstigstenfalls in der jeweiligen Eigenfrequenz der Kamine wirkt. Beispielhaft ist ein ermittelter Schwingungsverlauf in Bild 2.5 wiedergegeben.

Die Systemdaten hierzu lauten:

$$D = 727 \text{ mm};$$

$$t = 8 \text{ mm};$$

$$L = 20 \text{ m};$$

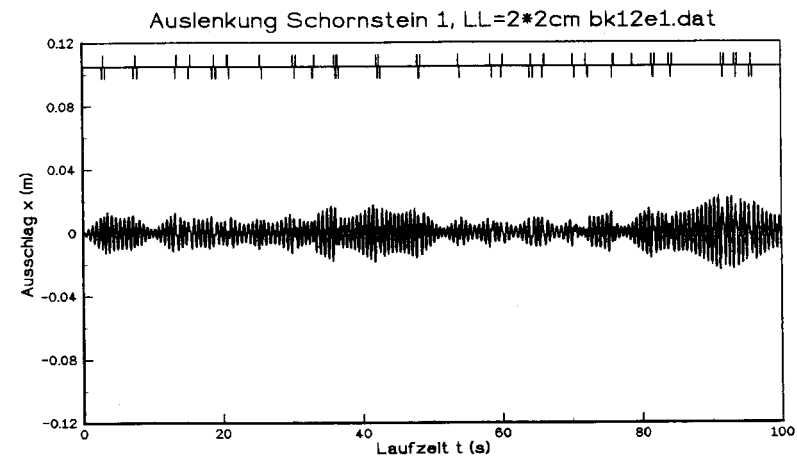
zusätzliche Massenbelegung aus Isolierung usw.  $m = 20 \text{ kg/m}$ ;

Kopfbühne 200 kg an Kamin 2 ohne Lose fixiert;

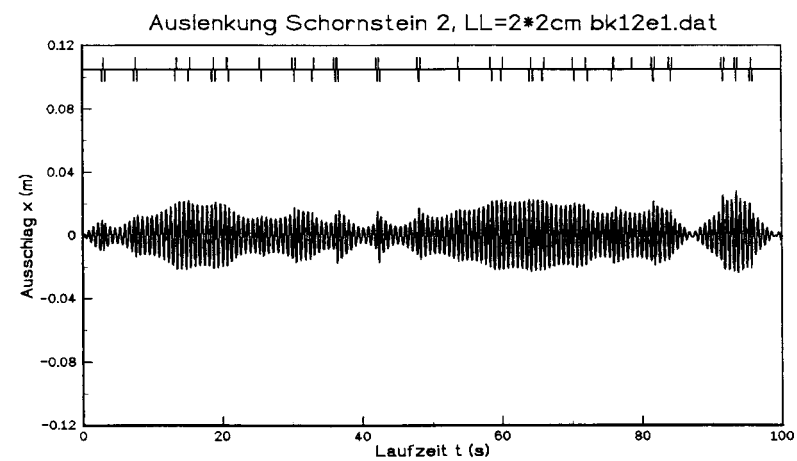
$$f_1 = 1,70 \text{ Hz};$$

$$f_2 = 1,52 \text{ Hz};$$

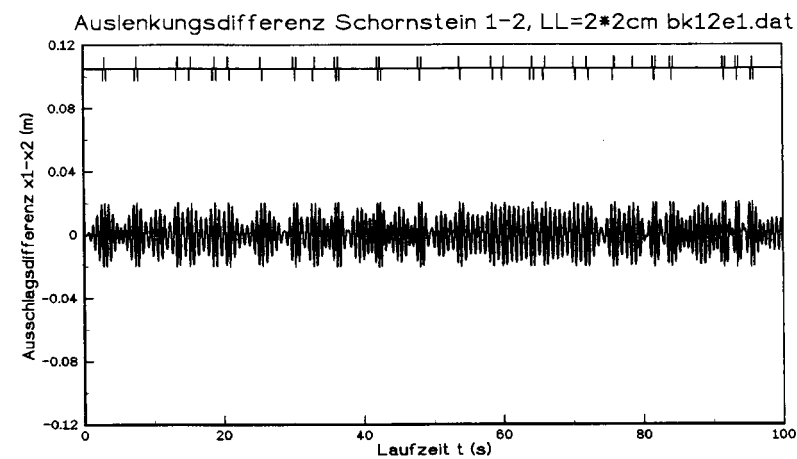
$$\max y_F(\text{ungekoppelt}) \approx 10 \text{ cm}.$$



BILDER 12.1.1993



BILDER 12.1.1993



BILDER 12.1.1993

Bild 2.5: Schwingungsverhalten lose gekoppelter Stahlkamine (aus [45])

Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Schlußfolgerungen ziehen:

- Durch geeignet abgestimmte Langlöcher kann die Amplitude schwingender Kamine wirksam begrenzt werden.
- Ob für die praktische Anwendung die Angabe einer effektiven Dämpfungsziffer möglich ist, wird von uns noch untersucht.
- Das „Langloch“ muß konstruktiv an Geräusentwicklung und an Verschleiß durch Ausschlagen gehindert werden. Gegebenenfalls ist die Konstruktion eines völlig andersartigen Kupplungsmechanismus erforderlich.
- Das Schwingverhalten bei Auslenkungen senkrecht zur Koppellebene muß mit Hilfe eines erweiterten Modells untersucht werden.

## 2.3 Ankerschrauben

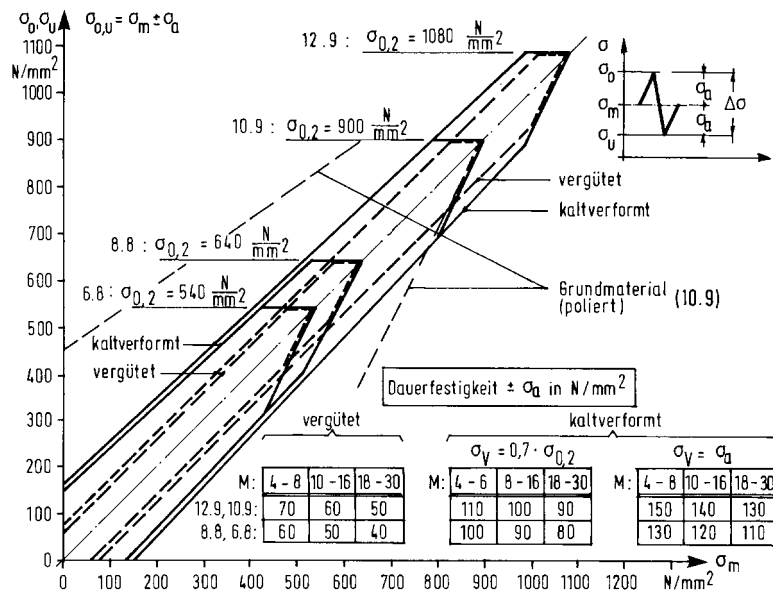
Schrauben unter zentrischer Zugbeanspruchung sind nach DIN 4133 in die ungünstigste Kerbklasse mit einer zulässigen Spannungsschwingbreite  $\Delta\sigma = 36 \text{ N/mm}^2$  eingestuft. Dies führt bei der Auslegung von Ankerkörben zu sehr unwirtschaftlichen Konstruktionen.

Nach unserer Ansicht lag hier bereits ein differenzierterer Kenntnisstand vor. Die von *Petersen* zusammengestellten Bemessungsregeln berücksichtigen z.B. die Herstellung des Gewindes (geschnitten oder gerollt), den Schraubenwerkstoff (St 37 bis StE 690) sowie die vorhandene Vorspannkraft (siehe Bild 2.6).

Man beachte, daß die von *Petersen* angegebenen Zahlenwerte die Schwing*amplituden* bezeichnen – die Schwing*breiten* wären doppelt so hoch!

### **Anmerkung:**

In der Diskussion zu diesem Vortrag wies Prof. Ruscheweyh darauf hin, daß auf Wunsch der Industrie Forderungen nach vorgespannten Ankerschrauben (zur Ausnutzung höherer Spannungsschwingbreiten) *nicht* in die Norm aufgenommen worden seien. Es entspräche gängiger Praxis, den Kamin bei der Montage auf Justiermuttern aufzusetzen; von einer Vorspannung der Anker könne somit keine Rede sein.



**Bild 2.6:** Dauerfestigkeit von Schrauben nach *Petersen* (Bild 71 Abs. 9.8 in [25])

## 2.4 Nachweisgrenze der Querschwingungen

Bei *Petersen* findet sich die Angabe, daß „... bei Schornsteinen geringer Bauhöhe nur selten Schwingungen festgestellt (wurden), auch wenn sie rechnerisch als gefährdet galten. ... Das gilt für Objekte bis etwa 20 m Höhe über Grund.“ (Abs. 23.3.4.7 in [25]).

Dieser Aussage kommt deshalb eine hohe Bedeutung zu, weil eine große Zahl der für Heizzentralen, Notstromversorgungsanlagen o.ä. gefertigten Stahlkamine im Bereich bis 20 m liegt. Eine Dimensionierung gegen eigenfrequente Querschwingungen im Resonanzzustand oder gar die Anordnung eines vermeintlich notwendigen Schwingungsdämpfers (Stückpreis ab ca. DM 10000,-) führt hier zu unnötig aufwendigen und damit teuren Konstruktionen.

Die Nutzbarmachung dieser Aussage führte nach Mitteilung von Prof. *Petersen* in der Vergangenheit häufig zu intensivem Schriftwechsel mit Prüfsingenieuren, der Erstellung vieler Gutachten usw. [26]. Wir wollen nachfolgend versuchen, diese Aussage zu rationalisieren.

Von *Petersen* wurde bereits die Vermutung ausgesprochen, daß die Ursache in der durch die Bodenrauigkeit bedingten, bodennahen Strömungsverhältnisse zu suchen ist. Wir betrachten den Wind als zusammengesetzt aus dem mittleren Wind mit der Geschwindigkeit  $\bar{v}$ , und den überlagerten Böen mit der Geschwindigkeit  $v_b$ . Aus den im Zeitverlauf ausgewerteten Böengeschwindigkeiten läßt sich die Standardabweichung  $\sigma$  gegenüber der mittleren Geschwindigkeit

$\bar{v}$  angeben. Die von der Höhe  $z$  abhängige Turbulenzintensität  $I(z)$  ist als Quotient aus Standardabweichung  $\sigma$  und mittlerer Windgeschwindigkeit  $\bar{v}$  definiert [22]):

$$I(z) = \frac{\sigma(z)}{\bar{v}(z)} \quad (2.9)$$

Die höhenabhängige Beschreibung der Turbulenzintensität erfolgt nach einem empirischen Ansatz von *Zilch* [35], die Parameter wurden in [22] an Meßdaten angepaßt. Damit ergibt sich

$$I(z) = I(10) \cdot \left( \frac{z}{10 \text{ m}} \right)^{\alpha_1 - \alpha_m} \quad (2.10)$$

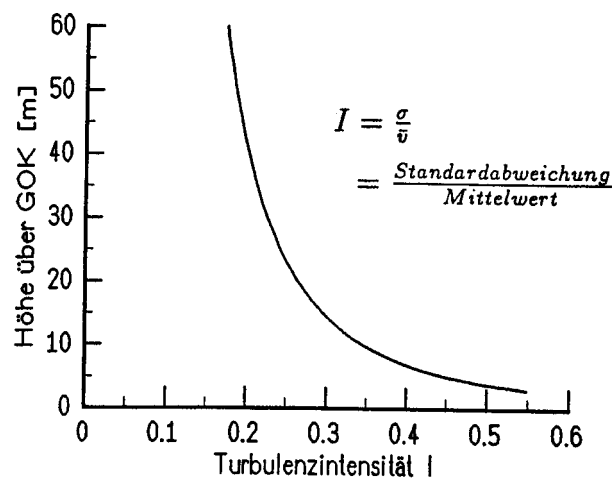
mit

$$I(10) = 0.9 \cdot \alpha_m + 0.12 \quad (2.11)$$

und

$$\alpha_1 = 0.9 \cdot \alpha_m - 0.36 \quad (2.12)$$

In Anlehnung an [22] wurde in der folgenden Auswertung  $\alpha_m = 0.250$  gesetzt. In Bild 2.7 ist die Turbulenzintensität  $I(z)$  über der Höhe  $z$  dargestellt.



WIND / 22.6.1993

**Bild 2.7:** Turbulenzintensität in Abhängigkeit von der Höhe

Man erkennt, daß die Intensität unterhalb ca. 20 m stark zunimmt. Zieht man in Betracht, daß die durch  $I(z)$  beschriebenen Schwankungen in der Windgeschwindigkeit gegenüber dem mittleren Wind sowohl positive, als auch negative Ausschläge darstellen, so liegen in 20 m Höhe ca. 95% aller Böen zwischen 48% und 152% der mittleren Windgeschwindigkeit, in 4 m

Höhe liegen ca. 95% aller Böen zwischen 0 und 200%. Dies veranschaulicht, daß der Wind in diesem Höhenbereich sehr böig ist, die überwiegend laminare Strömung, die zum Anregen der Querschwingungen notwendig ist, liegt nicht vor.

Diese Aussagen lassen sich nicht notwendigerweise verallgemeinern, da Windmessungen im allgemeinen durchgeführt werden, um Starkwindereignisse, und damit den Bemessungsfall zu erfassen. Bei schwachem Wind, der meistens für die Anregung von Querschwingungen maßgebend wird, können andere Windverhältnisse z.B. in Bezug auf die Schichtung herrschen, so daß auch der Verlauf der Turbulenzintensität anders sein kann [23]. Weiterhin gelten die bei der Auswertung verwendeten Parameter quantitativ nur für die Topologie in der Umgebung des Meßmastes in Höhbeck.

Wir schlagen vor, nach Bereitstellung und Auswertung geeigneter Windmeßdaten eine Regelung in der Weise anzustreben, daß Kamine bis 20 m Höhe in „Offenem Gelände mit einzelnen Hecken, Bäumen, dörflicher Bebauung“ (terrain type 2 in [9]) oder stärker strukturiertem Gelände nicht auf Querschwingungen nachgewiesen zu werden brauchen.

### 3 Detailgestaltung

Bei Kaminen, die aufgrund des Querschwingungsnachweises für eine hohe Lastspielzahl ausgelegt werden müssen, versteht sich von selbst, daß die Detailgestaltung den üblichen Regelschwingend beanspruchter Bauteile folgt (vgl. [13]):

- Vermeiden von Blechdickensprüngen  
→ Blechdickensprünge im Verhältnis 1:4 (entspricht ca. 15°) abschrägen;
- Vermeiden von Steifigkeitssprüngen  
→ Schaffen sanfter Übergänge, Rippenenden im Verhältnis 1:4 bis auf die Schale herunterführen;
- Vermeiden von in den Kraftfluß einspringenden Ecken  
→ Anordnen möglichst großer Ausrundungsradien;
- Vermeiden von Kehlnahtanschlüssen  
→ Ausbilden von Stumpfnahtanschlüssen;
- Vermeiden von Wölbnähten

- Ausbilden von Kehlnähten als Hohnnähte;  
(falls unvermeidlich oder in Verbindung mit (D)HV-Naht)
- Vermeiden unzugänglicher Nähte
  - Nähte so anordnen, daß sie nach dem Schweißen durchstrahlt werden können.

Hierbei treten im allgemeinen wenig Probleme auf, da allen Beteiligten bewußt ist, daß ein empfindliches Bauteil vorliegt.

Anders verhält es sich, wenn durch den Querschwingungsnachweis (ggfs. nach Anordnung eines Schwingungsdämpfers) belegt ist, daß es sich um ein *nicht schwingungsgefährdetes* Bauwerk handelt, dessen rechnerische Nachweise wie für ein Bauwerk unter ruhender Last geführt werden dürfen. Hier wird die Detailgestaltung häufig mit großer Sorglosigkeit vorgenommen.

Übersehen wird dabei, daß Windlasten allenfalls *vorwiegend* ruhend sind. Die durch die Richtungsänderung des Windes, die Änderungen der mittleren Windgeschwindigkeit und die überlagerten Böen auftretenden Beanspruchungsänderungen im Kamin brauchen nur deswegen nicht in einem Betriebsfestigkeitsnachweis nachgewiesen zu werden, weil sie ein sehr mageres Kollektiv bilden. Nach den Untersuchungen in [44] liegt es je nach Standort in den meisten Fällen noch unterhalb des in DIN 15018 definierten leichtesten Kollektives *S0* [40].

Hieraus folgt die Regel: in jedem Fall „dynamisch konstruieren“ auch wenn nur statisch gerechnet werden muß. Ähnliche Empfehlungen wurden von uns bereits in [12] und [14] ausgesprochen, sie finden sich aber auch an anderer Stelle [24].

## 4 Dauerhaftigkeit

Unter Dauerhaftigkeit werden hier die verschiedenen Aspekte des Korrosionsschutzes verstanden. Hier sind Betrachtungen zu folgenden Bereichen anzustellen:

- A: Korrosion (der Innenfläche) des Innenrohres durch die geführten Rauchgase;
- B: Korrosion (der Außenfläche) des Außenrohres durch Luftfeuchtigkeit und Niederschläge;
- C: Korrosion (der Außenfläche) des Außenrohres durch die Abgasfahne;
- D: Korrosion der Innenfläche des Außenrohres durch Luftfeuchtigkeit.

Vor der weiteren Diskussion sei noch einmal festgehalten, daß die hier angesprochenen Korrosionsformen nur dann stattfinden können, wenn die Oberfläche des Werkstückes durch einen Elektrolyten benetzt ist. Der elektro-chemische Korrosionsprozess findet dann unter Elektronenaustausch auf der einen Seite und Ionenwanderung auf der anderen Seite statt (Bildung eines *Lokalelementes*). Korrosion kann daher in den Fällen ausgeschlossen werden, in denen die Bildung eines Niederschlages auf der Werkstückoberfläche d.h. *Taupunktunterschreitung* ausgeschlossen werden kann.

Zu **A** :

Korrosion des Innenrohres durch die geführten Rauchgase wird dadurch begegnet, daß für das Innenrohr ein genügend widerstandsfähiger Werkstoff gewählt wird. Hierbei werden meistens Chrom-Nickel-Stähle verwendet, die bei schwererem Korrosionsangriff durch Molybdän stabilisiert werden. DIN 4133 enthält hierzu Vorschläge, weitere Ausführungen und Beispiele finden sich in [6].

Zu **B** :

Gegen Korrosion der Außenfläche des Außenrohres werden stahlbauübliche Korrosionsschutzmaßnahmen ergriffen. Die Vorbereitung der Oberflächen und der Aufbau der unterschiedlichen Schichten wird üblicherweise nach DIN 55928 [41] vorgenommen. Eine übersichtliche Zusammenstellung des Standes der Technik wird z.B. von *Klopfer* gegeben [10].

Zu **C** :

Gegen Korrosion des Außenrohres durch die Abgasfahne brauchen unter Beachtung des vorigen Absatzes im allgemeinen keine weiteren Maßnahmen ergriffen zu werden, da übliche Schichtaufbauten auch gegen die Abgasfahne genügend widerstandsfähig sind. Konstruktiv kann durch Anordnen einer *Abströmplatte* ein wirksamer Schutz gegen das Herunterziehen der Abgasfahne erreicht werden.

Zu **D** :

Korrosion der Innenfläche des Außenrohres durch Luftfeuchtigkeit ist ein strittiges Thema.

Fest steht einerseits, daß auf dieser Fläche Taupunktunterschreitungen bei kühler Witterung während einer Stillstandsphase und nach dem Anfahren nicht ausgeschlossen werden können. Damit besteht die Möglichkeit der Korrosion, und es sind Überlegungen anzustellen, welche angemessenen Gegenmaßnahmen zu ergreifen sind.

Andererseits steht ebenso fest, daß der Korrosionsangriff auf dieser Fläche sehr schwach sein wird. Sandstrahlen Sa 2 $\frac{1}{2}$  und ein mehrschichtiger Aufbau des Korrosionsschutzes (wie kürzlich



in einer Ausschreibung gefordert !) erscheint uns übertrieben und technisch nicht begründbar. Zudem ist fraglich, wie derartige Korrosionsschutzarbeiten in einem Rohr von z.B. 800 mm Durchmesser nicht nur ausgeführt werden können, sondern deren Bedingungsgemäßheit auch kontrolliert werden kann.

Zum Vergleich:

Aus der Angabe  $3 \text{ g/m}^2/\text{h}$  flächigem Abtrag bei unlegierten Stählen während der Zeit der Taupunktunterschreitung (Abs. 5.7.1.5.3. in [37]) läßt sich (für *ständigem* Korrosionsangriff) eine Waddickenabnahme von 3.3 mm/Jahr ermitteln. In freier Atmosphäre (Binnenland) rechnet man bei ungeschützten Stahlbauten mit einem jährlichen, flächigen Abtrag von ca. 0.1 mm.

Im Gegensatz dazu entfällt auf der Innenseite eines Tragrohres Regen, der die Oberfläche benetzt. Eine Taupunktunterschreitung täglich kann nur dann stattfinden, wenn der Kamin nicht in Betrieb ist, da sonst auch der Außenmantel etwas erwärmt wird. Wir sind daher der Meinung, daß der flächige Abtrag selbst ohne Korrosionsschutz deutlich unter 0.1 mm jährlich liegt. Nach unserem Dafürhalten ist es daher in den üblichen Fällen ausreichend, die Innenseite des Tragrohres mit einer üblichen Grundierung zu versehen.

## 5 Wärmeführung

Nach DIN 4133 8/73 [37] war gefordert „die chemischen und thermischen Betriebsverhältnisse ... in einem Erläuterungsbericht der statischen Berechnung voranzustellen“.

In der Praxis fühlte sich dadurch kaum ein Statiker angesprochen, der Begriff „voranzustellen“ wurde wohl als Abgrenzung gegenüber dem eigenen Leistungsumfang interpretiert.

Nach DIN 4133 11/91 ist gefordert (3.2): „Zur Erläuterung der chemischen und thermischen Betriebsverhältnisse müssen nach Angaben des Betreibers in der Baubeschreibung, in der statischen Berechnung bzw. auf den Übersichtszeichnungen enthalten sein:

...

d) die höchsten und niedrigsten Temperaturen der Abgase beim Eintritt in den Schornstein;

...

g) Temperaturen der von den Abgasen berührten Flächen;

- h) maximale und minimale Strömungsgeschwindigkeit des Abgases;
- i) Druckverhältnisse im Schornstein.“

In Abschnitt 3.4 „Standsicherheitsnachweis“ wird hierzu präzisiert: „... (Der Standsicherheitsnachweis) muß außerdem die Angaben des Abschnitts 3.2 f) bis i) enthalten.“

Eine genauere Ermittlung der thermischen Verhältnisse ist zum einen wichtig, um die Anzahl der Taupunktunterschreitungen und damit die geeignete Werkstoffwahl beurteilen zu können (siehe Abs. 4). Zum anderen wirken sich hohe Tragmanteltemperaturen auf die Festigkeitseigenschaften aus und müssen daher bei den Spannungs- und Stabilitätsnachweisen berücksichtigt werden. Schließlich gibt es Beschichtungssysteme, die nur begrenzt temperaturbeständig sind.

Eine umfassende Berechnung des Wärmehaushaltes nach DIN 4705 [39] ist in der Regel für den Bauingenieur unbekannt und/oder schwer nachzuvollziehen. Dies liegt zum einen daran, daß bei der Berechnung von An- und Abfahrvorgängen der Verlauf instationärer Prozesse zu ermitteln ist. Zum anderen sind wichtige Kenngrößen, wie z.B. die Wärmedurchgangszahl  $k$  für die oft komplizierten Querschnittsaufbauten bei Stahlkaminen nicht ohne weiteres abzuschätzen. Man denke z.B. an ein Innenrohr 450 x 2 aus 1.4571 mit 100 mm Wärmedämmung aus Mineralwolle, einem Luftspalt von 150 mm (der z.B. zur Kesselraumbelüftung genutzt wird). Für den umschließenden Tragmantel 980x8 ist die Temperatur bei stationärem Betrieb gesucht, die Abgastemperatur betrage am Fuchs noch ca. 300°C.

Natürlich gibt es inzwischen Software, mit der eine Wärmeberechnung nach DIN 4705 durchgeführt werden kann. Hier ist jedoch die gleiche Vorsicht geboten, wie bei der Anwendung von FEM Programmen in der Tragwerksanalyse durch einen Benutzer, der in Baustatik nicht ausgebildet ist. Da der Anwender über wenig Kenntnisse und keinerlei Erfahrungen verfügt wäre er gezwungen, die Rechenergebnisse ohne weitere Kontrollmöglichkeit zu glauben.

Möglicherweise ebenso ungeübt steht hier auch der Prüflingenieur in hoher Rollenerwartung, da von ihm in letzter Instanz erwartet wird, zu der vorgelegten Wärmeberechnung (einschließlich der darauf fußenden Annahmen in den Tragsicherheitsnachweisen) ein qualifiziertes Urteil abgeben zu können.

## 6 Baurechtliche Aspekte

Baurechtliche Aspekte aus der Sicht des IfBt wurden in einigen Artikeln von *Nieser* dargelegt [18], [19], [20]. Nachfolgend werden willkürlich einige Aspekte aufgegriffen.

DIN 4133 11/91 löst DIN 4133 8/73 ab. Sie ist inzwischen bauaufsichtlich eingeführt, galt aber bereits im Entwurfsstadium als *Stand der Technik*. Gegenüber der Fassung 8/73 wurden insbesondere der Querschwingungsnachweis, der Beulnachweis und die Angaben zur Werkstoffwahl verbessert.

Wichtig ist, daß nun detaillierte Angaben zu den thermischen und chemischen Betriebsverhältnissen *in der statischen Berechnung* vorhanden sein müssen (3.2) (vgl. Abs. 5).

Innenrohre sind in den Standsicherheitsnachweis einzubeziehen, d.h. Innenrohre sind unter Ansatz aller möglichen Einwirkungen (Längskraft, Biegung, Unterdruck, Überdruck) nachzuweisen. Dieser Nachweis stößt auf keine grundsätzlichen Schwierigkeiten, jedoch können genaue Angaben (z.B. hinsichtlich von Verpuffungsüberdrücken) oft weder vom Betreiber gemacht werden, noch sind hierzu in den Regelwerken Angaben enthalten.

Der Beulnachweis enthielt in DIN 4133 8/73 sehr restriktive Festlegungen hinsichtlich der anzusetzenden Imperfektionsamplitude. Die neue Regelung entspricht DIN 18800 Teil 4 und somit dem Stand der Technik.

Die zu verarbeitenden Werkstoffe sind zunächst eindeutig definiert: Die in der Norm aufgeführten Stähle bedürfen keines weiteren Brauchbarkeitsnachweises. Unsicherheit besteht häufig hinsichtlich der erforderlichen Qualifikation zur Verarbeitung dieser Werkstoffe. Desöfteren wird in Ausschreibungen nicht nur ein „Großer Eignungsnachweis“, sondern zusätzlich eine Verfahrensprüfung über die Verarbeitung von z.B. 1.4539 verlangt. Dies ist zwar im Sinne privatrechtlicher Forderungen des Bauherren zulässig, läßt sich jedoch nicht aus bauaufsichtlichen Forderungen ableiten, da der „Große Eignungsnachweis“ inzwischen in der *Grundanforderung* den Anwendungsbereich DIN 4133 (zumindest für vorwiegend ruhende Beanspruchung) enthält. Damit darf der Betrieb im Bereich dieser Norm uneingeschränkt und ohne weitere Eignungsnachweise tätig sein, also auch alle in DIN 4133 genannten Werkstoffe verarbeiten. Die Verantwortung für diese sehr weitreichende Qualifikation trägt die „Anerkannte Stelle“, die den Eignungsnachweis ausstellt.

### *Anmerkung:*

Der gleiche Betrieb darf z.B. Fassadenanker aus 1.4301 *nicht* schweißtechnisch fertigen, da der

Anwendungsbereich Fassadenelemente z.B. innerhalb der Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassung [43] geregelt wird. Dafür ist eine entsprechende Erweiterung des „Eignungsnachweises“ erforderlich.

## 7 Qualitätssicherung

(Nachfolgend wird der in [32] enthaltene Abschnitt „Qualitätssicherung“ S. 132 ff nahezu unverändert wiedergegeben.)

Das bisher im Baurecht verankerte und bekannte System zur Gtesicherung bei Stahlkaminen verlangt abhängig von der Höhe der Konstruktion den „Kleinen“ oder „Großen“ Eignungsnachweis zum Schweißen. Man kann annehmen, daß dies eine Abstufung nach dem zu erwartenden Risiko und nach der Schwierigkeit der Fertigungsaufgabe ist.

Von *Steidl* ([29], [30], weitere Hinweise in [32]) wurde ein Bewertungssystem vorgeschlagen, das es ermöglicht, in feinerer Abstufung die fr die jeweilige Aufgabe angemessenen Qualitätssicherungsmaßnahmen zu ermitteln.

Der Begriff *Qualität* wird — aus Grnden der im Zuge der Harmonisierung der Europäischen Normen erforderlichen Vereinheitlichung technischer Begriffe — hier und im folgenden synonym fr den im deutschen Sprachgebrauch geläufigen Begriff *Gte* verwendet.

Das vorhandene Risiko wird nach dem Schwierigkeitsgrad der Fertigungsbedingungen beurteilt. Hierbei wird die Bewährung der Fertigungsaufgabe danach unterschieden, ob es sich um eine *erprobte Großserie*, um eine *typisierte Bauweise*, um eine *erprobte Bauweise mit im Einzelfall festzulegender Fertigungsweise* oder um eine *neue Bauweise* handelt (siehe Bild 7.1). Fr die genannten Stufen werden Schwierigkeitspunkte vergeben. Das mit zunehmender Bauteildicke steigende Risiko eines Fertigungsfehlers oder Bauteilversagens (Sprödbruch) wird ebenfalls mit Schwierigkeitspunkten belegt, wobei St 37 und St 52 unterschiedlich eingestuft werden. Schließlich wird die Schwierigkeit beurteilt, die sich aus der vorgesehenen Nutzung des Bauteiles ergibt. Hier werden mit zunehmenden Anforderungen steigend von *vorwiegend ruhender Beanspruchung* bis zum *Bereich hoher Lastspielzahlen* und *großer Spannungsschwingbreiten* ebenfalls Punkte vergeben.

Die *mutmaßliche Akzeptanz eines Bauteilversagens* durch die Bevölkerung wird nach dem fr diesen Fall *anzunehmenden Schadensausmaß* beurteilt (siehe Bild 7.2). Auch hier wird in vier

Bauteilbeanspruchung	Bauteildicke					Bewährung
	P	St 37 mm	P	St 52 mm	P	
Vorwiegend ruhend $R \geq 0,7$ oder $N \leq 5.000$ LW	1	$\leq 16$	1	$\leq 10$	1	Erprobte Großserie mit genau festgelegter, bewährter Fertigungs- weise.
Zeitfestigkeit $R \geq 0,5$ oder $N \leq 50.000$ LW	2	$\leq 30$	2	$\leq 20$	2	Typisierte Bauweise mit genau festgelegter, bewährter Fertigungs- weise.
Zeitfestigkeit $R \geq 0$ oder $N \leq 200.000$ LW	3	$\leq 60$	3	$\leq 40$	3	Erprobte Bauweise mit im Einzelfall festzulegender Fertigungsweise.
Dauerfestigkeit $R \geq 0$ oder $N \geq 200.000$ LW	4	$> 60$	4	$> 40$	4	Neue Bauweise mit im Einzelfall festzulegender Fertigungsweise.

**Bild 7.1:** Beurteilung des Schwierigkeitsgrades der Nutzungs- und Fertigungsbedingungen (aus [29])

Stufen unterteilt, wobei die beiden unteren Stufen von keinen Personenschäden ausgehen, und die höchste Stufe besondere Gefährdung (z.B. durch einen GAU in einem KKW) und unkontrollierbares Schadensausmaß umfaßt.

Es werden vier *Level* an Qualitätssicherungsmaßnahmen definiert, für die im weiteren einzelne Forderungen festzulegen sind (siehe Bild 7.3). Hier wird vorgeschlagen, daß auf Level I geprüfte Schweißer und auf Level II ausgebildete Schweißaufsichtspersonen tätig sind. Auf Level III finden externe Kontrollen der Fertigungsmöglichkeiten statt, dies entspricht der Praxis der bisherigen Eignungsnachweise. Auf Level IV werden objektbezogen Fremdbewacher eingeschaltet, die eine Planungs-, Fertigungs- und Bauberwachung durchführen. Hierbei ist festgelegt, daß jeder Level die Forderungen der darunter liegenden Level umfaßt.

Die Zuordnung der für jede Aufgabenstellung angemessenen Qualitätssicherungsmaßnahme erfolgt in Bild 7.4. Auf der Abszisse sind die nach Bild 7.2 bewerteten Stufen des Schadensausmaßes aufgetragen, auf der Ordinate der nach Bild 7.1 bewertete Schwierigkeitsgrad der

Stufe 1	Keine Personenschäden, sehr geringer Sachschaden Akzeptanz hoch		↑ ↑ ↑
Stufe 2	Keine Personenschäden, Sachschaden Akzeptanz in gewissem Umfang		
Stufe 3	Personenschäden, Umweltschäden geringe Akzeptanz	↑	
Stufe 4	Besondere Gefährdung geringste Akzeptanz		
		Straf- recht	Zivil- recht

Rechtsfolgen

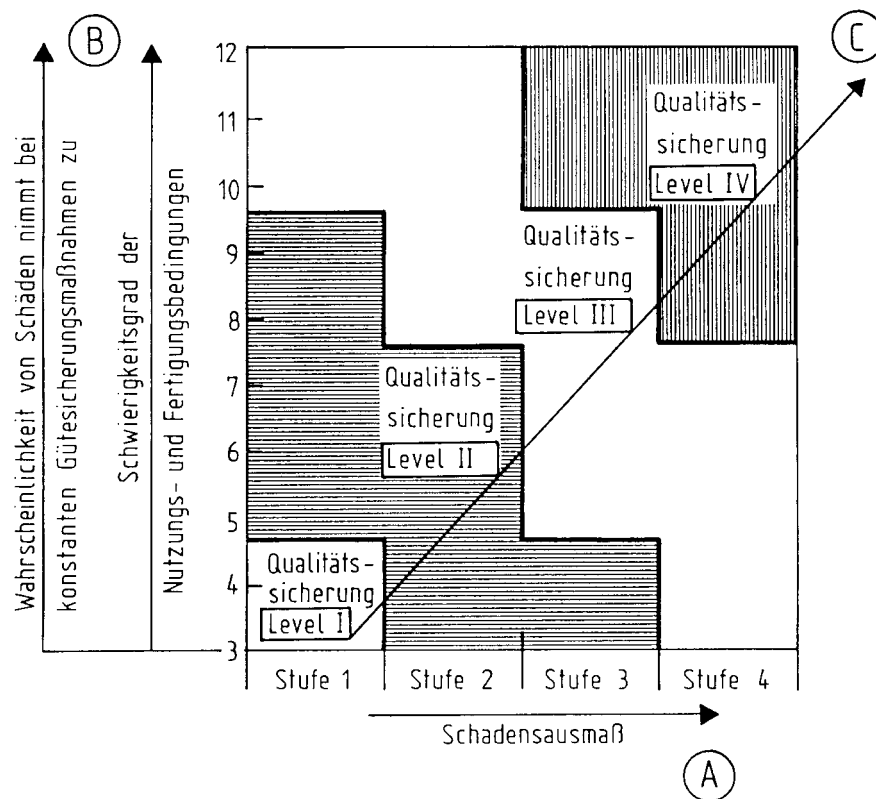
**Bild 7.2:** Beurteilung der wahrscheinlichen Akzeptanz nach dem Schadensausmaß (aus [30])

Level I	●	○	○	○
Level II	●	●	○	○
Level III	●	●	●	○
Level IV	●	●	●	●

↳ Externe objektbezogene Fremdkontrollen Bauüberwachung  
 ↳ Externe Kontrolle der Fertigungsmöglichkeiten (Eignungsnachweis)  
 ↳ Interne Kontrollen durch Schweißaufsichtspersonen  
 ↳ Geprüfte Schweißer

**Bild 7.3:** Zuordnen von Einzelforderungen zu verschiedenen Levels von Qualitätssicherungsmaßnahmen (aus [30])

Nutzungs- und Fertigungsbedingungen. Aus der Kombination beider Werte erhält man den angemessenen Level der Qualitätssicherungsmaßnahmen.



**Bild 7.4:** Ermitteln eines angemessenen Levels an Qualitätssicherungsmaßnahmen (aus [30])

Die Anwendung des Verfahrens wird an zwei Beispielen vorgestellt:

### Beispiel A:

Stahlkamin mit einfachem Querschnittsaufbau, an der Rückfront eines Betriebsgebäudes, freistehend, 20 m hoch, Fußplatte 30 mm St 37, laut Statik nicht querschwingungsgefährdet.

Aus Bild 7.1: Typisierte Bauweise 2 Punkte; Bauteildicke 2 Punkte; vorwiegend ruhend 1 Punkt.

Aus Bild 7.2: Durch die örtliche Lage sind im Versagensfall des Tragwerkes keine Personenschäden zu erwarten, Stufe 2.

Aus Bild 7.4: Fr 5 Punkte und Risikostufe 2 → Level II: Ausgebildete Aufsichtsperson, aber kein Eignungsnachweis erforderlich.

### Beispiel B:

Drei Kamine mit gemeinsamer Kopfbühne in „Reichweite“ einer öffentlichen Straße, 20 m hoch, Fußplatten 40 mm St 52, mit Schwingungsdämpfer,  $R = -1$ , laut Querschwingungsnachweis mehr als 200 000 LW.

Aus Bild 7.1: Erprobte Bauweise 3 Punkte; Bauteildicke 3 Punkte; Dauerfestigkeit 4 Punkte.

Aus Bild 7.2: Durch die örtliche Lage muß im Versagensfall des Tragwerkes mit Personenschäden gerechnet werden, Stufe 3.

Aus Bild 7.4: Fr 10 Punkte und Risikostufe 3 → Level IV: Eignungsnachweis plus objektorientierte Fremdbewachung erforderlich.

#### *Anmerkung:*

Läßt sich in diesem Fall z.B. die Bauweise begründet (!) auf 2,5 Punkte reduzieren, so ergibt sich Level III. Dann wäre eine objektorientierte Fremdbewachung nicht erforderlich, ein Eignungsnachweis wäre ausreichend.

Die objektbezogenen Fremdkontrollen haben sich bewährt, in der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine liegen hierzu umfangreiche Erfahrungen z.B. aus dem Straßen- und Eisenbahnbrückenbau vor. Dies hat sich in der Praxis eher als Hilfe für den engagierten SFI, denn als unangenehmes Kontrollieren erwiesen. Aktuelles Beispiel im Bereich Stahlkamine sind 150 Be- und Entlüftungsbauwerke aus Edelstahl für die Schleusen des Rhein-Main-Donau Kanals, deren Fertigung und Montage 1992 von uns betreut wurde.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Artikel wurden einige Problemfelder umrissen, die bei der Planung und beim Bau von Stahlkaminen auftreten. Die Ausführungen konnten zum Teil auf kurze Anmerkungen beschränkt werden, da der aktuelle Kenntnisstand bereits an anderer Stelle ausführlich diskutiert wurde [32].

Es wurde gezeigt, daß in einigen Bereichen eine durchgängige Regelung noch nicht erreicht werden konnte, dies betrifft z.B. die Wahl des statischen bzw. dynamischen Systems (Systemidentifikation), die Beulnachweise, die Einstufung in Kerbfälle, die Behandlung der Innenzüge als Teil der Tragkonstruktion, die Ermittlung des Wärmehaushaltes, usw.. Hier sind im jeweiligen Einzelfall Festlegungen zu treffen, die an die besonderen Gegebenheiten des Bauwerkes



angepaßt sind. Die hier und in [32] gegebenen umfangreichen Literaturhinweise — insbesondere auf neuere Seminar- und Diplomarbeiten — können dafür als Hilfestellung dienen.

Im Sinne der obigen Ausführungen besteht in vielen Punkten noch Forschungsbedarf. Es bleibt zu wünschen, daß nach Klärung weiterer Detailfragen das vorhandene Regelwerk weiterentwickelt werden kann, um zu möglichst lückenlosen, eindeutigen Vorschriften für die bautechnischen Nachweise von Stahlkaminen zu kommen.

## Literatur

- [1] Butzmann, G., Krull, B., Schneider, R.: Erläuterungen zum Zulassungsbescheid vom 1. Februar 1989 für Bauteile und Verbindungsmittel aus nichtrostenden Stählen. Mitteilungen des IfBt 6/1989.
- [2] Deutscher Stahlbau Verband (Hrsg.): Stahlbau Handbuch, Für Studium und Praxis, 2. Aufl., Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln. Band 1 (1982), Band 2 (1985).
- [3] Deutscher Stahlbau Verband (Hrsg.): Stahlbau Handbuch, Für Studium und Praxis, 3. Aufl., Stahlbau-Verlags-GmbH, Köln, erscheint demnächst.
- [4] DIN (Hrsg.): Türme, Maste, Schornsteine aus Stahl. Bemessung und Konstruktion am Beispiel der neuen Normen DIN 4131 und DIN 4133. Tagungsband, Fürth 12. Mai 1992.
- [5] Eibl, J., Henseleit, O., Schlüter, F.: Baudynamik. Betonkalender Teil 2, Ernst u. Sohn, Berlin 1988. (vgl. auch [17])
- [6] Fette, D.: Entwurf, Bemessung und Konstruktion freistehender Stahlschornsteine. Enthalten in [4].
- [7] Galemann, Th., Ruscheweyh, H.: Untersuchung winderregter Schwingungen an Stahlschornsteinen. S. 13–39 in [32].
- [8] Görlacher, R., Wenz, J. (Hrsg.): Sammlung der Veröffentlichungen anlässlich der Vollendung des 60. Lebensjahres von Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Ehlbeck. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Karlsruhe 1990.
- [9] IASS: Recommendations for guyed masts. Working group on guyed masts, Madrid 1981. (zitiert nach [22])
- [10] Klopfer, H.: Korrosionsschutz von Stahlbauten. Kapitel 15 in [2].
- [11] Klotter, K.: Technische Schwingungslehre. Bd. 1 Einfache Schwinger. Teil B. Nichtlineare Schwingungen. 3. Auflage. Springer, Berlin 1980.

- [12] Knödel, P., Schulz, U.: Spannungsverteilung in Zylindern mit randverstärkten Ausschnitten. S. 101–120 in [31].
- [13] Mang, F., Knödel, P.: Schweißen und Schweißverbindungen. Kapitel 9.3 in [2]. (vgl. [15])
- [14] Mang, F., Bucak, Ö., Knödel, P.: Neuere Erkenntnisse zum Entwurf und zur Berechnung von Stahlschornsteinen. S. 117–141 in [32].
- [15] Mang, F., Knödel, P.: Schweißen und Schweißverbindungen. Erweitertes und neu bearbeitetes Kapitel in [3]. (vgl. [13])
- [16] N.N.: Seminar- bzw. Diplomarbeiten bei Prof. Dr.-Ing. F. Mang, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Karlsruhe. (vgl. [44], [45], [46], [47] )
- [17] Müller, F.: Baudynamik. Betonkalender Teil 2, Ernst u. Sohn, Berlin 1988. (vgl. auch [5])
- [18] Nieser, H.: Bauaufsichtliche Anforderungen bei der Errichtung von Schornsteinen aus Stahl. S. 79–94 in [32].
- [19] Nieser, H.: Einführung in die neu erarbeiteten DIN 4131 und DIN 4133. Enthalten in [4].
- [20] Nieser, H.: Bauaufsichtliche Behandlung von Innenrohren (Futter) in freistehenden Schornsteinen. Mitteilungen des IfBt 5/1992.
- [21] Nölle, H.: Schwingungsverhalten abgespannter Maste in böigem Wind. Diss. Karlsruhe 1991.
- [22] Nölle, H., Peil, U., Roth, R., Schulze, O.: Beanspruchung abgespannter Maste infolge Windlast. Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben der Volkswagen-Stiftung. Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau der Universität Karlsruhe, Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover, Dezember 1992.
- [23] Nölle, H.: Persönliche Mitteilungen an P. Knödel, 1993.
- [24] Peil, U.: Entwurf, Bemessung und Konstruktion abgespannter Maste oder Schornsteine. Enthalten in [4].
- [25] Petersen, Chr.: Stahlbau. Vieweg, Braunschweig 1988.
- [26] Petersen, Chr.: Telefonische Mitteilung an P. Knödel, 1989.
- [27] Ruscheweyh, H., Verwiebe, C., Vorbrüggen, J.: Analyse des Dämpfungsverhaltens gekoppelter Stahlschornsteine. Bericht R291/0192 des Lehrstuhls für Stahlbau, Windingenieurtechnik, RWTH Aachen, Januar 1992.
- [28] Ruscheweyh, H.: Windlastannahmen für turmartige Bauwerke. Enthalten in [4].
- [29] Steidl, G., Mössinger, R.: Zur Sicherheit und Güte geschweißter Ingenieurkonstruktionen. S. 169–178 in [31].
- [30] Steidl, G., Mang, F.: Schweißtechnische Qualitätssicherungsmaßnahmen beim Bau der neuen Eisenbahnbrücke Maxau. In [8].

- [31] Steinhardt, O., Möhler, K. (Hrsg.): Der Metallbau im Konstruktiven Ingenieurbau. Festschrift Prof. tekn. dr R. Baehre zum 60. Geburtstag. Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Karlsruhe 1988.
- [32] Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V. (Hrsg.): Stahlschornsteinbau — fortschrittliche Lösungen. Tagungsband, Fachtagung Aachen 03.04.92, Dresden 08.05.92.
- [33] VPI Baden-Württemberg: Kurzinformation Nr. 121 zu DIN 4133, Kerbfallkatalog. Mannheim, 07.05.93.
- [34] Wilkesmann, F.W., Bucak, Ö.: Stahlschornsteine. Kap. 36 in [2].
- [35] Zilch, K.: Ein anschauliches Lastkonzept für Hochhäuser im böigen Wind. Habilitationsschrift Darmstadt 1983. (zitiert nach [22])
- [36] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VII - Division 2: Rules for Construction of Pressure Vessels, 1986.
- [37] DIN 4133: Schornsteine aus Stahl; Statische Berechnung und Ausführung. 8/73.
- [38] DIN 4133: Schornsteine aus Stahl; Statische Berechnung und Ausführung. 11/91.
- [39] DIN 4705: Berechnung von Schornsteinabmessungen.  
Teil 1: Begriffe; ausführliches Berechnungsverfahren. 9/79.  
Teil 2: Näherungsverfahren für einfach belegte Schornsteine. 9/79.  
Teil 3: Näherungsverfahren für mehrfach belegte Schornsteine. 7/84.  
Teil 10: Näherungsverfahren für einfach belegte Schornsteine; Ausführungsart IIIa ... 12/84.
- [40] DIN 15018: Krane. 11/84.
- [41] DIN 55928: Korrosionsschutz von Stahlbauten durch Beschichtungen und Überzüge.  
Teil 1: Allgemeines. 11/76.  
Teil 2: Korrosionsschutzgerechte Gestaltung. 10/79.  
Teil 3: Planung von Korrosionsschutzarbeiten. 11/78.  
Teil 4: Vorbereitung und Prüfung der Oberflächen. 1/77.  
Teil 5: Beschichtungsstoffe und Schutzsysteme. 3/80.  
Teil 6: Ausführung und Überwachung der Korrosionsschutzarbeiten. 11/78.  
Teil 7: Technische Regeln für Kontrollflächen. 2/80.  
Teil 8: Korrosionsschutz in tragenden, dünnwandigen Bauteilen (Stahlleichtbau). 3/80.  
Teil 9: Bindemittel und Pigmente für Beschichtungsstoffe.
- [42] EC3:Part 1:1990: Eurocode No 3 Design of Steel Structures; Part 1: General Rules and Rules for Buildings. Volume 1, Chapters 1 to 9. Edited draft Issue 5 November 1990.
- [43] Zulassungsbescheid „Bauteile und Verbindungsmittel aus nichtrostenden Stählen“, Z-30.44.1, IfBt, Berlin, 01.02.89.

- [44] Ibach, Detlev: Untersuchungen zur Windbelastung turmartiger Bauwerke, Seminararbeit 1988 [16].
- [45] Mensinger, Martin: Untersuchungen zum Schwingungsverhalten lose gekoppelter Stahlschornsteine, Seminararbeit 1993 [16].
- [46] Traub, Christine: Einfluß der Nachgiebigkeit des Fußflansches auf das Tragverhalten freistehender Stahlkamine, Diplomarbeit 1991 [16].
- [47] Zimmermann, Ulrich: Bemessungshilfen für den Entwurf von Stahlschornsteinen, Diplomarbeit 1990 [16].

## 9 Ergänzungen

Gegenüber der oben wiedergegebenen Fassung des Vortrages vor den Prüflingen in Freudenstadt 1993 sind folgende Hinweise und Ergänzungen angebracht (wird jährlich aktualisiert):

Hinweis: Die folgenden Hinweise auf Quellen (in eckigen Klammern) beziehen sich auf das ergänzte Literaturverzeichnis auf Seite 31 ff.

zu Abs. 2

Durch den *Industrieverband Schornsteinbau und Abgastechnik* e.V. (VSA) wurde eine Richtlinie herausgegeben, die Bemessungsdiagramme für den Beulsicherheitsnachweis von Stahlschornsteinen mit Fuchsöffnungen enthält [10].

Kontaktadresse:

VSA, Postfach 10 17 40, D-75117 Pforzheim  
(0 72 31) 35 10 78, Fax 31 42 71, [www.stv-bw.de](http://www.stv-bw.de)

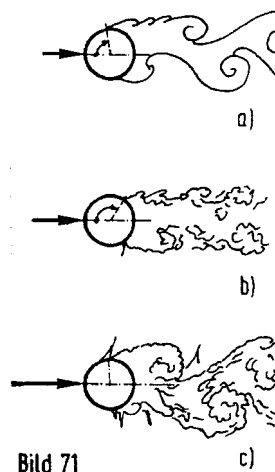
zu Bild 2.1 Seite 6

Eine Veranschaulichung der drei Reynoldszahlenbereiche — unterkritische Strömung, überkritische Strömung, transkritische Strömung — ist in Bild 9.1 gegeben.

zu Abs. 2.2 Seite 8 ff.

Zu dem von *Mensing* 1993 untersuchten Effekt (Ausnutzung des dämpfenden Effektes der hochgradigen Nichtlinearität, die durch Losen zwischen bewegten Kaminteilen entsteht) liegen inzwischen von Professor *Ruscheweyh* und Mitarbeitern ausführlichere Untersuchungen vor, die auch eine praktische Anwendung in der Bemessungsphase eines Kamins greifbar machen ([17], [18]).

Auf der anderen Seite wurde inzwischen ein Fall bekannt, bei dem ein Stahlschornstein starke Querschwingungen zeigte, obwohl er nach DIN 4133 ordnungsgemäß bemessen war [33]. Der Schornstein hatte eine zu kleine Lose zwischen Tragmantel und Innenrohr (d.h. er war zu



**Bild 9.1:** Ausbildung der Nachströmung in den drei Reynoldszahlenbereichen (Bild 71 in [25] Abs. 23.3.4.1)

genau gefertigt!), und hatte deswegen eine deutlich geringere Dämpfungsziffer, als nach DIN 4133 vorgegeben.

zu Abs. 2.4

Zu der hier diskutierten Problematik liegt auf Anfrage eines Prüflingenieurs eine Stellungnahme von Prof. *Ruscheweyh* vor.

Danach kann die Allgemeingültigkeit der Aussage von Prof. *Petersen* nicht bestätigt werden. Für Scrutonzahlen größer 12, geringe Schwingwegamplitude und umliegende Gebäude mit etwa gleicher Höhe wie der betrachtete Schornstein dürfte der Ansatz jedoch zutreffen.

zu den Beulnachweisen

Intensive Forschung hierzu wurde in den letzten Jahren an der Universität Leipzig durchgeführt (siehe [4], [5] ff, [20] ff, [28] ff). Hieraus ergeben sich neue Erkenntnisse über das Beulen von langen Kreiszyinderschalen in natürlichem Wind, wobei zum Teil andere Versagensmechanismen entdeckt wurden, als bisher beim Beulnachweis von Kreiszyinderschalen unter Biegung vorausgesetzt wurden.

Zur Bemessung der Ringsteifen liegt jetzt ein schlüssiger und praktikabler Vorschlag vor [27].

zu Abs. 6

- Das IfBt (Institut für Bautechnik) heißt im Zuge der Harmonisierung der europäischen Gesetzgebung inzwischen DIBt Deutsches Institut für Bautechnik DIBt.
- DIN 4133 ist bauaufsichtlich eingeführt, z.B. in Baden-Württemberg mit „Einführungserlaß“ vom 16. März 1993 – Az.: VI-2601.1/9. Gemeinsames Amtsblatt des Landes Baden-Württemberg 41 (1993) Nr. 13, S. 451. (vergleiche hierzu auch [2])
- Die inhaltlichen Arbeiten an der Normenreihe EN 13084 sind abgeschlossen. Die Norm heißt nicht mehr „Freistehende Industrieschornsteine“ sondern „Freistehende Schornsteine“. Zu allen Teilen liegen inzwischen deutsche Entwürfe vor, teilweise konnten diese schon in „Weißdrucke“ überführt werden [1].

## Literatur

- [1] DIN EN 13084: Freistehende Schornsteine.  
Teil 1: Allgemeine Anforderungen (2001-04).  
Teil 2: Betonschornsteine (2002-04).  
Teil 4: Futter aus Mauerwerk. Entwurf, Bemessung und Ausführung. (Entwurf 1999-03).  
Teil 5: Baustoffe für Futter aus Mauerwerk Produktfestlegungen (Entwurf 1999-03).  
Teil 6: Innenrohre aus Stahl. Bemessung und Ausführung (Entwurf 1999-10).  
Teil 7: Produktfestlegungen für zylindrische Stahlbauteile zur Verwendung in einschaligen Stahlschornsteinen und Innenrohren aus Stahl (Entwurf 2001-11).  
Teil 8: Planung und Ausführung von Tragmastkonstruktionen mit angehängten Schornsteinen (Entwurf 2001-11).
- [2] N.N.: Anpassungsrichtlinie Stahlbau – Herstellungsrichtlinie Stahlbau. Mitteilungen DIBt 27 (1996), Sonderheft Nr. 11/1, 2. Auflage.
- [3] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-30.3-6: Bauteile und Verbindungselemente aus nicht-rostenden Stählen. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 25.09.98. Geltungsdauer bis 30.09.2003.
- [4] Brede, A., Schneider, W.: Widersprüchliche Bemessungsempfehlungen für die Ringsteifen windbeanspruchter stählerner Kamine; Kenntnisstand und Lösungsvorschläge. S. 369–380 in Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (Hrsg.): Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER) Nr. 6, 2001.

- [5] Höhn, K., Schneider, W.: Schlanke windbelastete Kreiszyinderschalen mit quasi-kollapsaffinen Imperfektionen. Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (Hrsg.): Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER) Nr. 4, 1999.
- [6] Höhn, K., Schneider, W., Timmel, I.: Einfluss der Imperfektionsamplitude auf die maßgebende Versagensart stählerner Kamine. S. 395–407 in Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (Hrsg.): Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER) Nr. 6, 2001.
- [7] Höhn, K., Schneider, W.: Zur Bemessungssituation schlanker stählerner Kamine. S. 377–394 in Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (Hrsg.): Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER) Nr. 7, 2002.
- [8] Industrieverband Stahlschornsteine (IVS): Referatetag Göttingen, 30.09.98, Tagungsband. (mit Artikeln von Bazing, Berger, Dickel, Dierschke, Dormagen, Ruscheweyh, Verwiebe)  
Kontaktadresse:  
IVS, Bürgweg 12a, D-90482 Nürnberg  
(09 11) 54 68 85, Fax 54 69 80
- [9] Kármán, Th. v., Rubach, H.: Über den Mechanismus des Flüssigkeits- und Luftwiderstandes. Physikalische Zeitschrift 2/1912. (zitiert nach [45])
- [10] Knödel, P. (unter Mitwirkung von Schmidt, H. und Velickov, D.): VSA-Richtlinie 1.6-1a – Beulsicherheitsnachweise bei Stahlschornsteinen. Industrieverband Schornsteinbau und Abgas-technik e.V., Pforzheim 11/98.
- [11] Mucha, S., Wille, K., Schneider, W.: Entwicklung von Näherungsansätzen für die versagensrelevanten Schnittkräfte stählerner Kamine mit einfach abgestufter Wanddicke. S. 421–435 in Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (Hrsg.): Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER) Nr. 6, 2001.
- [12] Niederhoff, Selma: Untersuchungen zur Effektivität von Flüssigkeitsdämpfern bei Stahlkaminen. Vertieferarbeit 1994 [16].
- [13] Peil, U., Nölle, H.: Ermittlung der Lebensdauer hoher windbeanspruchter Bauwerke. Bauingenieur 70 (1995), H. 1, S. 21–33.
- [14] Peil, U., Nölle, H., Wang, Z.H.: Nonlinear dynamic behaviour of guys and guyed masts under turbulent wind load. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures 37 (1996), n. 2, August n. 121, pp. 77–88.
- [15] Petersen, Chr.: Chaotische Taumelschwingungen abgespannter Maste. Stahlbau 61 (1992), H. 6, S. 179–185.
- [16] Rasulewa, Olga: Temperaturbedingte Zwängungsspannungen in der Ringsteife eines Stahlkamins. Diplomarbeit I bei Prof. Dr.-Ing. F. Thiele, Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachgebiet Stahlbau, Universität Gesamthochschule Kassel 1997.



- [17] Ruscheweyh, H., Verwiebe, C., Kammel, Chr.: Untersuchungen über die schwingungsdämpfende Wirkung von Innenrohren bei Stahlschornsteinen. Forschungsbericht P235 im Auftrag der Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., Lehrstuhl für Stahlbau, RWTH Aachen, 1995.
- [18] Ruscheweyh, H., Verwiebe, C., Kammel, Chr.: Untersuchung zur dämpfenden Wirkung von Innenrohren bei Stahlschornsteinen. Stahlbau 65 (1996), Heft 1, S. 19–28.  
Siehe auch „Berichtigung“ in Stahlbau 65 (1996), Heft 7, S. 264.
- [19] Scheffczyk, Alexandra: Ermittlung der Längsspannungen in oberirdischen zylindrischen Flachbodentankbauwerken infolge Windlast für verankerte und unverankerte Tanks. Seminararbeit bei Prof. Dr.-Ing. H. Saal, Lehrstuhl für Stahl- und Leichtmetallbau, Universität Karlsruhe 1997.
- [20] Schneider, W., Thiele, R.: Beitrag zur nichtlinearen FE-Analyse der Tragreserven von nach DIN 4133 bemessenen stählernen Kaminen. Finite Elemente – Modellierung, Berechnung und Konstruktion – FEM '95, Ernst & Sohn, Berlin 1995.
- [21] Schneider, W., Thiele, R.: The Stress and Strain State in the Base Area of Wind-Loaded Steel Chimneys. Proc., 5th Int. Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE), The Hague, The Netherlands, June 11–15, 1995.
- [22] Schneider, W., Thiele, R.: Tragfähigkeit schlanker windbelasteter Kreiszyinderschalen. Stahlbau 67 (1998), Heft 6, S. 434–441.
- [23] Schneider, W., Thiele, R.: Eine unerwartete Versagensform bei schlanken windbelasteten Kreiszyinderschalen. Stahlbau 67 (1998), Heft 11, S. 870–875.
- [24] Schneider, W.: Numerische Simulierung von Versagensvorgängen schlanker windbelasteter Kreiszyinderschalen mit abgestufter Wanddicke. Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (Hrsg.): Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER) Nr. 4, 1999.
- [25] Schneider, W., Timmel, I., Höhn, K., Thiele, R.: Einfluss ringförmiger Vorbeulen im Fußbereich auf die Tragfähigkeit schlanker windbelasteter Kreiszyinderschalen. S. 405–423 in Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (Hrsg.): Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER) Nr. 5, 2000.
- [26] Schneider, W., Mucha, S., Wille, K.: Anstrengungszustand stählerner Kamine mit einfach abgestufter Wanddicke. S. 437–454 in Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (Hrsg.): Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER) Nr. 5, 2000.
- [27] Schneider, W., Brede, A., Thiele, R.: Bemessung der Ringsteifen stählerner Kamine. Stahlbau 71 (2002), Heft 9, S. 670–677.
- [28] Timmel, Ingo: Untersuchung des Einflusses der Wanddickenabstufung stählerner Kamine auf deren Eigenfrequenz und den Betriebsfestigkeitsnachweis. Diplomarbeit bei Prof. Dr.-Ing. habil. R. Thiele, Lehrstuhl für Statik und Festigkeitslehre, Technische Hochschule Leipzig, Oktober 1995.

- [29] Timmel, I., Schneider, W., Höhn, K.: Einfluss des Imperfektionsortes auf die Tragfähigkeit stählerner Kamine. S. 381–393 in Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (Hrsg.): Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER) Nr. 6, 2001.
- [30] Timmel, I., Schneider, W.: Einfluss geometrischer Imperfektionen auf das luvseitige Beulen stählerner Kamine. S. 395–410 in Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (Hrsg.): Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER) Nr. 7, 2002.
- [31] Ummenhofer, T., Knoedel, P.: Modelling of Boundary Conditions for Cylindrical Steel Structures in Natural Wind.  
In Papadrakakis, M., Samartin, A., Onate, E. (eds.): Proceedings, 4th International Conference on Computational Methods for Shell and Spatial Structures. IASS–IACM 2000, Chania, Crete, Greece, 04.–07.06.2000.
- [32] Verwiebe, C.: Grundlagen für den baupraktischen Einsatz von Schwingungsdämpfern auf Flüssigkeitsbasis. Dissertation RWTH Aachen 1998. Schriftenreihe Stahlbau – RWTH Aachen, Heft 40, 1998. ISBN 3-8265-3418-2
- [33] Verwiebe, C., Burger, W.: Unerwartet starke wirbelerregte Querschwingungen eines 49 m hohen Stahlschornsteins. Stahlbau 67 (1998), Heft 11, S. 876–878.
- [34] VSA: I. Schornsteinbau–Symposium, Bad Hersfeld, 31.10.95, Tagungsband.  
(mit Artikeln von Ernst, Knödel, Krämer, Nieser, Roth, Schmitt)
- [35] VSA: II. Schornsteinbau–Symposium, Bad Hersfeld, 23.01.97, Tagungsband.  
(mit Artikeln von Bischoff, Knödel, Peil, Sedlacek, Verwiebe)
- [36] VSA: III. Schornsteinbau–Symposium, Bad Hersfeld, 22.01.98, Tagungsband.  
(mit Artikeln von Gerasch, Grimme, Knödel, Ruscheweyh, Schneider/Thiele, Schneider)
- [37] VSA: IV. Schornsteinbau–Symposium, Bad Kissingen, 29.04.99, Tagungsband.  
(mit Artikeln von Knödel, Pries, Ruscheweyh, Saal, Verwiebe, Viehöver)
- [38] VSA: V. Schornsteinbau–Symposium, Würzburg, 05.10.00, Tagungsband.  
(mit Artikeln von Habeck, Krämer, Ruscheweyh, Schröder, Thelen)
- [39] VSA: VI. Schornsteinbau–Symposium, Brehna/Leipzig, 23.05.02, Tagungsband.  
(mit Artikeln von Kasperski, Knödel, Schmidt, Schneider/Thiele, Ruscheweyh, Verwiebe)
- [40] Walz, Thomas: Der Einfluß von Ringsteifen auf das Tragverhalten von Stahlkaminen, Vertiefearbeit 1995 [16].
- [41] Waßmuth, Carl–Friedrich: Untersuchungen zum Schwingungsverhalten eines zweigeteilten Stahlkamins bei loser Koppelung der beiden Teilsysteme. Seminararbeit bei Prof. Dr.–Ing. U. Schulz, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Universität Karlsruhe 1996.