

Zeitschrift:	Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber:	Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band:	96 (1978)
Heft:	9
Artikel:	Untersuchungen über das statische Verhalten einer Kühlturmschale im Windkanal-Modellversuch
Autor:	Hertig, Jacques-André
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-73635

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 30.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Untersuchungen über das statische Verhalten einer Kühlturmschale im Windkanal-Modellversuch

Von Jacques-André Hertig, Lausanne

Bei der Erzeugung elektrischer Energie in konventionell thermischen oder nuklearen Kraftwerken fällt 59 bis 67 Prozent der verwendeten Primärenergie als Abwärme von niedriger Temperatur an, die in geeigneter Weise an die Umgebung abzuführen ist. Die direkte Einleitung der Abwärme in öffentliche Gewässer (Frischwasserkühlung) wirkt sich bei den stark abwasserbelasteten Flüssen und Seen nachteilig aus und ist aus Gründen des Gewässerschutzes für neue Kraftwerke nicht mehr zulässig.

Etwas problemloser ist die Wärmeabgabe an die Umgebungsluft, wofür prinzipiell zwei Verfahren anwendbar sind. Das am weitesten verbreitete Verfahren ist der sogenannte Nasskühlturm mit Rezirkulation des Kühlwassers im Kreislauf. Nasskühltürme haben aber zur Deckung der Verdunstungsverluste und zur Abflutung für die Begrenzung der Aufsalzung bei einer elektrischen Kraftwerkleistung von 1000 MW einen Wasserbedarf von etwa 0,8 bis 1,2 m³/s. Mit zunehmenden Einschränkungen in der Standortwahl neuer Kraftwerke wird auch die Wasserbeschaffung für Kühlzwecke immer schwieriger und aufwendiger. Umweltauswirkungen und umweltpolitische Grenzwerte bilden zukünftig weitere Einschränkungen in der Anwendung von Nasskühlturen.

Das zweite Kühlverfahren, bei dem die Abwärme ohne Verdunstungsverluste an die Umgebungsluft abgegeben wird, ist das völlig geschlossene Kühlsystem mit dem umweltfreundlichen Trockenkühlturm. Höhere Austrittsgeschwindigkeiten der trockenen Warmluft und der grosse Luftdurchsatz sorgen für eine bessere und raschere Verteilung der Abwärme in höheren Regionen der Atmosphäre. Die Nachteile des Systems liegen vor allem bei den höheren Investitionskosten, bedingt durch die am Turm angebauten Wasser-Luft-Wärmetauscher. Außerdem sind die Durchmesser der Trockenkühltürme bei gleicher Bauhöhe grösser als bei Nasskühlturen, weil die Wärmetauscher einen grösseren Platzbedarf und einen höheren Luftdurchsatz erfordern.

Die im Kühlturm aufsteigende Warmluft hat einen niedrigen relativen Feuchtigkeitsgehalt, was die Verwendung anderer Werkstoffe als Beton für die Kühlturmschale zulässt. Als Beispiel sind die Trockenkühltürme in Stahlfachwerk- und Seilnetzkonstruktion mit Aluminiumverkleidung aufzuführen [1].

In einer Studie des Eidgenössischen Institutes für Reaktorforschung (EIR) in Würenlingen über «Die atmosphärische Kühlung von Kernkraftwerken» wurde im Jahre 1973 der damalige Stand der Technik und die bisherigen Erkenntnisse über die Konstruktion grosser Naturzug-Trockenkühltürme unter Mitwirkung der Industrie und verschiedener Institute erfasst und im Dezember 1974 publiziert [2].

Einleitung

Die Studie enthält unter anderem auch Beiträge der ALESA und des Institutes für Energieerzeugung (IPEN) der Eidg. Technischen Hochschule (ETH) Lausanne [3]. IPEN führte eine Studie für den Entwurf, die statische Berechnung und die Kostenbestimmung eines Stahlfachwerkgerüstes für einen Trockenkühlturm durch. Die Wind- und Schneelastbelastungen sowie die thermischen und seismischen Einwirkungen wurden ebenfalls berücksichtigt. ALESA (Alusuisse Engineering AG) lieferte auch die Unterlagen über die luftdichte Verkleidung des Stahlfachwerkes mit Aluminium-Wellbändern. Die allgemeine Untersuchung von IPEN über die Windeinwirkung auf einen Kühlturm eines 900-MW-Kraftwerkes zeigte, dass bei sehr grossen Bauwerken zusätzliche Untersuchungen nötig sind, da die allgemeine Definition der Windlastannahmen nach der gegenwärtig gebräuchlichen Norm SIA 160 nur bedingt gültig ist, besonders im Falle dynamischer Wirkungen der Windlast. Ferner ist bekannt, dass zwischen deutschen und angelsächsischen Fachleuten für den Kühlturm *unterschiedliche Auffassungen* bestehen hinsichtlich der Notwendigkeit der *Anordnung von Windrippen auf der äusseren Turmschalenfläche*. Das Problem hat seinen Ursprung im *aerodynamischen Verhalten eines Zylinders in Abhängigkeit der Oberflächenrauhigkeit*. Im Bereich relativ kleiner Reynolds-Zahlen vermindern die Windrippen die auf das Bauwerk einwirkenden Windlasten durch die erleichterte Wirbelablösung der turbulenten Grenzschichten. Im Bereich grösserer Reynolds-Zahlen scheint dieser Effekt zu verschwinden.

Es wurde bald erkannt, dass solche Fragen, die sich bei der Projektierung grosser Kühltürme ergeben, nur durch *Modellversuche* geklärt werden können. Bei der Festlegung der Modellmasse wurden Kühlturmproportionen gewählt, wie sie für ein 700 MW konventionell thermisches oder für ein 1200 MW HHT- oder LWR-Kernkraftwerk zur Anwendung kommen würden.

Mit den Modellversuchen im *grossen Windkanal des Eidg. Flugzeugwerkes Emmen* (EFW) sollten folgende Fragen geklärt werden:

- Wie gross sind die Druckbeiwerte auf der Turmoberfläche in Abhängigkeit der Turmgeometrie?
- Wie gross ist der Einfluss der Windrippen auf die Wirbelablösung?
- Wie gross ist der Einfluss der Windturbulenz unter Betrachtung einer turbulenten Windströmung?
- Welchen Einfluss haben benachbarte Bauwerke (Kraftwerkblock, Reaktorgebäude, Kamine, andere Kühltürme usw.) auf den Kühlturm?

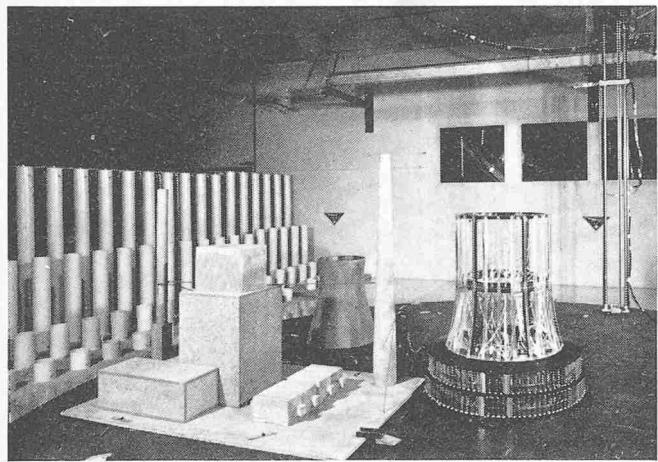


Bild 1. Kühlurm und 700-MW-Kraftwerkmodell, M 1:150 im grossen Unterschall-Windkanal des Eidg. Flugzeugwerkes (EFW) Emmen/Schweiz. Trockenkühlungssystem «Heller», Turmtyp A. Links im Bild, in Luftanströmrichtung, sind die Turbulatoren erkennbar

Bild 1 zeigt das Kühlurmmodell mit den zugehörigen Kraftwerkgebäuden.

Die durchzuführenden Modellversuche deckten sich weitgehend mit der Aufgabenstellung im Rahmen des deutsch-schweizerischen Entwicklungsprojektes für einen Hochtemperaturreaktor mit Heliumturbine (HHT) und trockenen Kühlürmen.

Die Aufgabenteilung wurde unter Berücksichtigung bereits vorliegender Erfahrungen auf den einzelnen Teilgebieten wie folgt vorgenommen: IPEN übernahm die Durchführung der Untersuchungen über die statischen Windeinwirkungen mit entsprechender Auswertung der Resultate. Das EIR stellte das universell und äusserst präzise Modell her. ALESA als Industriepartner und Anbieter von Trockenkühlürmen «System Heller» führte die statischen und dynamischen Berechnungen des Stahlfachwerkerturmes durch und wird die Auswertung der Versuche in der Konstruktion bei Grosskühlürmen entsprechend berücksichtigen.

Die in Vorbereitung befindliche Analyse der dynamischen Windeinwirkungen mit den entsprechenden Modellversuchen werden im Verlaufe dieses Jahres durchgeführt, worüber dann in einem separaten Artikel berichtet wird.

Der vorliegende Bericht behandelt die Resultate und Erkenntnisse aus den Windkanal-Modellversuchen über die statische Windwirkung auf einen Trockenkühlurm in Stahlfachwerkbauweise.

Ähnlichkeitsgesetze

Physikalische Modellversuche, wie z.B. die aerodynamischen Windkanalversuche an Modellen in verkleinertem Massstab, setzen eine gute Kenntnis der Ähnlichkeitsgesetze zwischen den Vorgängen im Modellversuch und den natürlichen Vorgängen am Original voraus. Die Ähnlichkeitsgesetze müssen in beiden Fällen die genau gleichen Erscheinungen garantieren und eine Übertragbarkeit der am Modell erhaltenen Resultate auf die Grossausführung erlauben.

Auf dem Gebiete der Flüssigkeitsmechanik laminarer oder schwach turbulenten Strömungen sind die Ähnlichkeitsgesetze seit Beginn dieses Jahrhunderts bekannt. Andererseits, im Falle der stark turbulenten Strömungen, zu denen auch die Windvorgänge zählen, waren die Ähnlichkeitsgesetze erst in neuerer Zeit Thema von Ähnlichkeitsstudien [5, 6, 7, 8]. Sie haben gezeigt, dass die Grundturbulenz der Strömungen eine wichtige

Rolle spielt auf den Vorgang einer Strömung um ein Hindernis. Die Grundturbulenz ist jene Turbulenz, die in einer Strömung vorhanden ist ohne Einfluss des als Hindernis wirkenden Studienobjektes.

Es erweist sich daher als unumgänglich, die Grundturbulenz zu berücksichtigen und sie bei aerodynamischen Modellversuchen im Windkanal ebenfalls zu erzeugen. Es ist deshalb notwendig, die künstlich erzeugte Grundturbulenz im Windkanal der des natürlichen Windes ähnlich zu halten.

Die Ähnlichkeitsgesetze zwischen turbulenten Strömungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Alle Dimensionen der Objekte (Original und Modell) sowie die Grösse der Turbulenz müssen geometrisch ähnlich sein.
- Für den Fall, dass die Einflüsse der Schwerkraft auf die Strömung vernachlässigbar sind, müssen die Geschwindigkeiten im Modellversuch und in der Natur gleich sein. Daselbe gilt für die Intensität der Turbulenz (Bild 2).

Das Verhältnis zwischen den grossen atmosphärischen Wirbeln und den grossen Modellwirbeln, d.h. die Abmessungen der energiereichsten Wirbel muss im Verhältnis zum Modellmassstab stehen. Der mittlere Durchmesser grosser Wirbel beträgt in der Natur z.B. 100–500 m und im Windkanal 0,2–1,5 m.

Das Verhältnis zwischen den kleinsten Wirbeln in der Natur und am Modell, d.h. die bezüglich ihrer Abmessung kleinsten vorhandenen Wirbel einer Strömung müsste ebenfalls im Verhältnis zum Modellmassstab stehen. Man weiss jedoch schon seit längerer Zeit, dass dies nicht möglich ist, weil die kleinsten Wirbel in ihren Abmessungen in der Quadratwurzel von den ursprünglich erzeugten Wirbeln im Flüssigkeitsstrom abhängen, die aber ihrerseits im Grössenverhältnis des Modells stehen. Die kleinsten Wirbel entstehen also in ihren Abmessungen proportional zur Quadratwurzel der Modelldarstellung. Der mittlere Durchmesser der kleinsten Wirbel beträgt in der Natur z.B. 20–100 mm und im Windkanal 0,5–3 mm.

Trotz der Unmöglichkeit, eine vollständige Ähnlichkeit zu erreichen, ist es notwendig, die Versuche in turbulenten Strömung auszuführen, indem man voraussetzt, dass der Einfluss der kleinsten Wirbel gering ist. Zur praktischen Durchführung der Versuche wird ein Turbulenzgeber installiert, der es erlaubt, eine turbulente Grenzschicht zu erzeugen, welche die erforderliche Charakteristik aufweist. Die turbulente Grenzschichtdicke misst in der Natur z.B. 100–1000 m, im Windkanal mit turbulenten Strömung 1,5–2 m. Die laminare Grenzschichtdicke, die in der Natur eigentlich nicht vorkommt, betrug über der Grundplatte des Windkanals im vorliegenden Fall etwa 10 cm.

Beschreibung der Versuche

Die Modellversuche wurden im grossen Unterschall-Windkanal des Eidg. Flugzeugwerkes (EFW) in Emmen durchgeführt.

Untersuchtes Modell

Die im Projektstadium befindlichen Trockenkühlürme haben je nach Kraftwerkleistung und Auslegungsbedingungen recht unterschiedliche Ausmasse. Bei der Festlegung der Modellbemessungen musste einerseits auf die Abmessungen und Betriebsbedingungen des Windkanals Rücksicht genommen werden. Andererseits war die Aufgabe gestellt, aus dem breiten Spektrum der Kühlurmprojekte eine geeignete Referenzgrösse festzulegen.

Mit einem zweiteiligen Modell gelang es, die typischen Bemessungen folgender Trockenkühlürme zu erfassen:

Kraftwerktyp Turm	fossil Typ A	HHT Typ H
Kraftwerkleistung (MW _e) ca.	650	1250
Abzuführende Wärme- menge (MW) ca.	850	1700
Kühlwassermenge (t/h)	30000–40000	25000–35000
Warmwassertemperatur (°C)	42–50	60–90
Kaltwassertemperatur (°C)	23–26	14–15
Lufttemperatur (°C)	5–10	10

Die bei der HHT-Anlage (el. Nettowirkungsgrad >40 Prozent) systembedingte kleine Grädigkeit ($t_{\text{Kühlwasser}} - t_{\text{Luft}}$) des Kühlturms erfordert eine relativ grosse Wärmetauscherfläche am Turm mit entsprechend grossen Kühlurmdimensionen, insbesondere bei einer kostenoptimalen Auslegung der Gesamtanlage.

Die typischen Dimensionen für Kühlürme vorgenannter Kraftwerke sind folgende:

Bezeichnung	Modell Massstab	Original Dimensionen in mm	
		Dimensionen in mm	in m
Typ A	1:150	H = 986,7 $\varnothing_u = 904$ $\varnothing_o = 540$	H = 148 $\varnothing_u = 135$ $\varnothing_o = 81$
Typ H	1:252	H = 610 $\varnothing_u = 904$ $\varnothing_o = 540$	H = 154 $\varnothing_u = 228$ $\varnothing_o = 136$

H = Turmhöhe ab Boden \varnothing_o = Kronendurchmesser
 \varnothing_u = Basisdurchmesser

Mit dem höheren Modell Typ A und dem verkürzten Modell Typ H ist es möglich, die Versuchsergebnisse auf andere, geometrisch ähnliche Türme zu übertragen und somit praktisch alle in Frage kommenden Turmbemessungen zukünftiger Kraftwerkprojekte abzudecken.

Beschreibung des Modells

Mit dem Modell wird ein *Trockenkühlurm System Heller* mit der dafür charakteristischen vertikalen Anordnung der Aluminium-Wärmetauscher am äusseren Basiskreis des Turmes nachgebildet. Vorwiegend aus optischen Gründen ist der Übergang vom oberen zylindrischen Teil zum kegelförmigen unteren Teil der Kühlurmschale paraboloidförmig gekrümmmt. Das Modell ist beim Übergang vom paraboloidförmigen auf den zylindrischen Teil trennbar. Die Messleitungen sind durch Steckkupplungen verlustlos miteinander verbunden.

Damit die *Strömung im Turminnern* gemessen werden konnte, musste das Modell *doppelschalig* hergestellt werden, wobei die Messleitungen zwischen die Schalen zu liegen kamen. Der *Auftrieb* wurde mittels einer eingebauten elektrischen Heizung von 4 kW und durch Einblasen von Helium aus Ringleitungen, die unmittelbar über den Kühlelementen im Turminnern angeordnet sind, erzeugt.

Für den Anschluss der 176 Druckmessstellen wurden 600 m Kunststoffschläuche benötigt.

Aussenseitig der Kühlurmschale wurden demontierbare Längssuppen aufgeschraubt. Als Werkstoff kamen Plexiglas, Aluminium und Eisen (Drahtgeflecht) zur Anwendung. Der Querschnitt durch den Kühlurmschlot stellt ein 24-Eck dar.

Für die statischen Versuche musste das Modell völlig steif ausgeführt werden.

Für die Untersuchungen des Modells Typ H wurde angenommen, dass es möglich ist, dieselbe Grundturbulenz bei-

zubehalten, das heisst, dass die gleichen Turbulenzgeber bei gleicher Positionierung, im Windkanal verwendet werden können wie für das Modell Typ A. Diese Hypothese stimmt jedoch nicht ganz mit der Wirklichkeit überein, da der Typ-H-Turm im Original grösser ist als der Typ-A-Turm und deshalb einer etwas anderen Windturbulenz ausgesetzt ist. Da 1973 mit einem dem Typ-H-Turm ähnlichen Modell analoge Windkanalversuche gefahren wurden, war es möglich, den Einfluss des Windgeschwindigkeitsprofils durch Vergleich mit früheren Resultaten einwandfrei zu bestimmen.

Ausrüstung des Modells

Das Versuchsmodell wies die folgenden *technischen Ausstattungen* auf:

- Druckmessstellen auf der Aussen- und Innenseite des Turmantels;
- Vorrichtung um Rauch einzublasen, vor allem zur Beobachtung der Strömungsverhältnisse im Turminnern;
- Temperaturfühler;
- thermoanemometrische Sonden zur Messung der Strömungen innerhalb des Schlotes.

Die Druckmessstellen wurden auf einer Erzeugenden in der Höhe auf 17 Punkte verteilt, die den Knoten des Stabfachwerkes entsprechen. Druckmessstellen wurden auf drei Horizontalebenen auf der Turmaussenfläche vorgesehen, wobei bei jeweils auf einer Facettenfläche drei Messstellen installiert waren, um den detaillierten Druckverlauf über eine Facettenfläche festzustellen. Auf der Schlottinnenseite war ebenfalls eine Anzahl Druckmessstellen angeordnet.

Das Modell wurde mit der Fussplatte zentrisch auf eine 6-Komponenten-Präzisions-Waage montiert zur Messung der global wirkenden Kräfte und Momente.

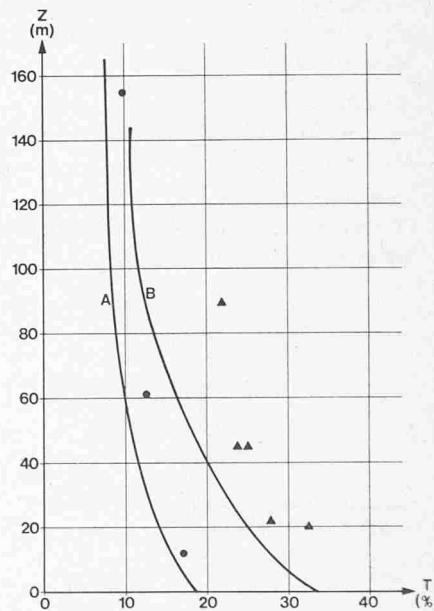


Bild 2. Profil der Turbulenz-Intensität in Funktion der Höhe
 Z = Höhe über Boden

$$T = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{\overline{u_z}} = \text{Turbulenzintensität der Höhe } Z \text{ (dimensionslos)}$$

$$\sqrt{\overline{u'^2}} = \text{Standardabweichung der Geschwindigkeitsschwankung}$$

▲ = Messungen Brookhaven, USA [10]

● = Messungen Sale, Australien

A = Messungen im Windkanal EFW M 1:150

B = Messungen im Windkanal ETH M 1:200

Turbulenzgeber

Die Turbulenzgeber dienen zur Erzeugung einer turbulenten Grenzschicht, die mit der in der natürlichen Atmosphäre vorkommenden turbulenten Grenzschicht vergleichbar ist. Bei der Gestaltung der Turbulenzgeber konnte auf die Erfahrung von IPEN aus früheren Studien und Versuchen zurückgegriffen werden.

Geeignete Turbulenzgeber erlauben es, in einem klassischen Windkanal, der hauptsächlich für Versuche an Flugzeugmodellen mit laminarer Strömung eingerichtet ist, eine vollständig turbulente Grenzschicht zu erzeugen. Die Turbulenzgeber bestehen aus PVC-Rohren von 113 mm Durchmesser, die in fünf Reihen aufrecht stehend und quer zur Strömungsrichtung angeordnet sind (Bild 1, links / Bild 2, rechts). Die beiden ersten Reihen werden durch 1,50 m hohe Rohre gebildet und stehen im Abstand von 113 mm hintereinander. Die Rohre der ersten Reihe sind gegenüber der zweiten Reihe um den halben seitlichen Abstand versetzt. Der seitliche Abstand beträgt 200 mm. Die drei folgenden Rohrreihen weisen zueinander eine treppenförmige Abstufung auf (600, 200 und 100 mm Höhe), stehen im Abstand von 226 mm voneinander entfernt, mit einem seitlichen Abstand von Rohr zu Rohr von 300 mm. Die Anordnung der Turbulenzgeber ist auch aus Bild 3 ersichtlich.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass der Entwurf dieser Art von Turbulenzgebern durch Arbeiten von J. Armitt und J. Counihan [6] angeregt worden ist, die zur Turbulenzerzeugung dreiflächige, parabolisch abgerundete Vertikalstäbe benutzt.

Anordnung der Versuche

Man kann *drei Hauptanordnungen* der durchgeföhrten Windkanalversuche unterscheiden:

1. Anordnung:

Windkanal mit einer Bodenplatte, die den Erdboden darstellt, mit eingebautem Turbulenzgeber und beweglicher Mess-Sonde.

2. Anordnung (Bild 3):

Gleiche Ausrüstung wie unter 1, jedoch mit installiertem Modell.

3. Anordnung (Bild 1):

Gleiche Ausrüstung wie unter 2, aber zusätzlich mit modellierter Umgebung (Gebäude).

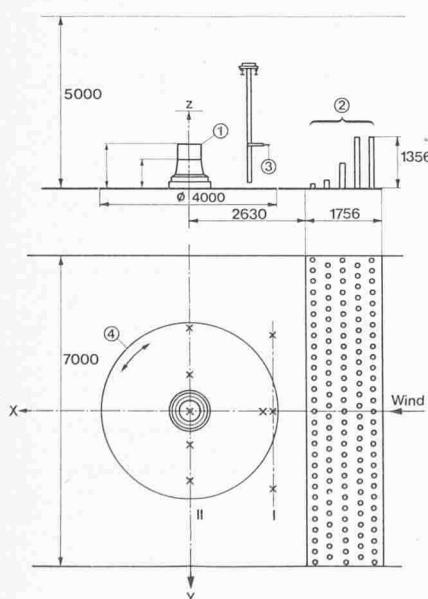


Bild 3 (links). Versuchsanordnung im Windkanal. 1 Kühlturmmodell, 2 Turbulenzgeber, 3 Mess-Sonde, 4 Drehtisch, I. Messebene I, II. Messebene II, x, y, z Koordinatenachsen

Bild 4 (rechts). Mittleres Windgeschwindigkeitsprofil in Funktion der Höhe

- $\tilde{u}_0 = \frac{\tilde{u}_z}{\tilde{u}_{z_0}}$ Dimensionslose Windgeschwindigkeit
- \tilde{u}_z : Mittlere Windgeschwindigkeit in Höhe Z
- Z_0 : Referenzhöhe 148 m = Turmhöhe
- A: (Davenport) Stadtzone
- B: (Davenport) Landzone
- C: (Davenport) Küstenzone
- D: Norm SIA 160 mit $u_z = \sqrt{16 \cdot q}$
- E: Geschwindigkeitsprofile im Windkanal

Windcharakteristik

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erläutert, wäre es wünschenswert, für jedes auf Windlast zu untersuchende Bauwerk folgende Angaben zu haben: Geschwindigkeitsprofil, Turbulenz-Intensität, Ausdehnung der gross- und kleinräumigen Wirbel.

Falls zusätzlich noch eine Windrose mit Angabe der vorherrschenden Windrichtungen samt zugehörigen Windgeschwindigkeiten, eine Geschwindigkeitsverteilung sowie eine Windstatistik verfügbar wären, könnten die extremen Windbelastungen für jeden Standort des Kühlturns definiert werden. Derart umfangreiche Angaben sind jedoch in den meisten Fällen nicht vorhanden. Da die beschriebenen Windkanalversuche nicht für ein standortabhängiges Projekt, sondern für die Entwicklung eines neuen Kühlturn-Typs (Trockenkühlturn in Stahlfachwerk) durchgeführt werden sollten, konnte von allgemein bekannten Durchschnittswerten ausgegangen werden.

Wenn, wie im vorliegenden Fall, das *Geschwindigkeitsprofil nicht bekannt* ist, so kann für die Statik standortsunabhängiger Projekte für das mittlere Geschwindigkeitsprofil die von A.G. Davenport [7] für die freie Landzone vorgeschlagene Kurve B im Bild 4 verwendet werden. Beziiglich *Profil der Turbulenz-Intensität* (gross- und kleinräumig) sind keine allgemein gültigen Angaben möglich (vgl. Bild 2).

Messresultate

Geschwindigkeitsmessungen

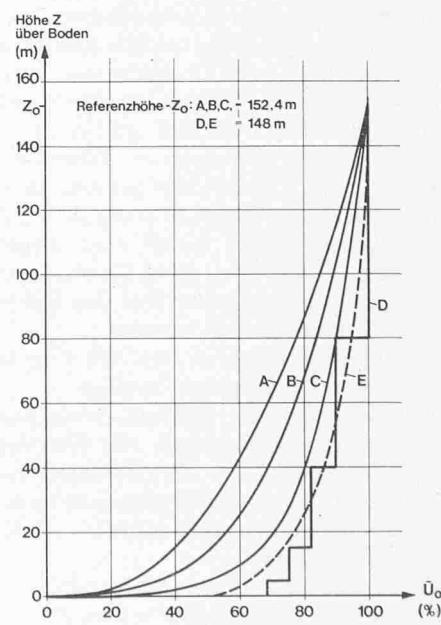
Messungen in turbulenten Strömung

Die Profile der mittleren Geschwindigkeit wurden über neun Stellen im Windkanal erfasst (Bild 3). Diese Stellen sind auf zwei Ebenen verteilt.

Das gemessene Profil der mittleren Geschwindigkeit in der Achse des Windkanals, bezogen auf die Geschwindigkeit in der Höhe von 1,50 m (Oberkante des Turbulenzgebers) über der Grundplatte, ist vergleichbar mit Windprofilen, die in der Natur gemessen wurden (Bild 4, Kurve A bis C).

Die Profile der Turbulenz-Intensität wurden an denselben Stellen und gleichzeitig wie die Geschwindigkeitsprofile aufgenommen.

Wie die Profile der mittleren Geschwindigkeit (Bild 4), so stimmen auch die Profile der mittleren Turbulenz-Intensität (Bild 2) gut mit jenen Werten überein, die aus Messungen in



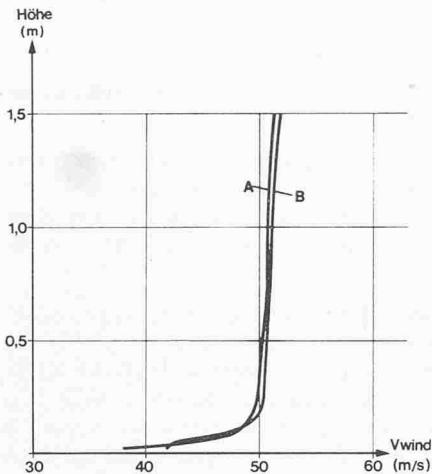


Bild 5 (links). Geschwindigkeitsprofil bei laminarer Strömung. A: Hitzdrahtanemometer. B: Prandtl-Rohr

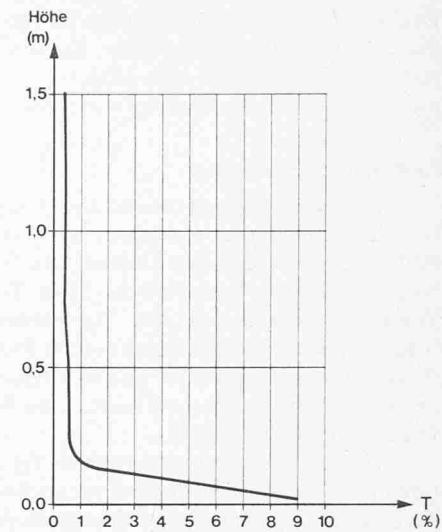


Bild 6 (rechts). Profil der Turbulenzintensität bei laminarer Strömung

der natürlichen Atmosphäre bekannt sind oder mit früheren Versuchen, die mit dem gleichen Typ Turbulenzgeber gemacht wurden.

Messungen in laminarer Strömung

In diesem Fall ist das Profil der mittleren Windgeschwindigkeit und der dynamische Druck zeitlich und über die Höhe konstant. Die Grenzschichtdicke der Strömung über der Grundplatte (entspricht dem Umgebungsgelände) beträgt etwa 10 cm (Bild 5). Das Profil der Turbulenz-Intensität zeigt ebenfalls, dass die Grenzschichtstärke der Strömung gering ist (Bild 6).

Der Windkanal allein (ohne irgendwelche Einbauten) ist sehr wenig turbulent, etwa 3 bis 4 Promille der mittleren Geschwindigkeit.

Druckmessungen am Turm Typ A

Definitionen:

Der Beiwert c_p des *lokalen Drucks* wird wie folgt definiert:

$$c_p = \frac{p}{q}$$

wobei p dem gemessenen Druck entspricht und q der dynamische Vergleichsdruck darstellt.

Im Falle der *laminaren Strömung* bleibt q über dem ganzen Windkanal-Messbereich konstant und wird am Anfang der

Messstrecke mit einem Prandtl-Rohr gemessen. Im Falle der *turbulenten Strömung* variiert der dynamische Staudruck über die Höhe des Windkanals. Eine vorangegangene Messung zeigte, dass der dynamische Staudruck, gemessen in einer Höhe, die der Oberkante des Kühlturms entspricht, sich zum Grundstaudruck im Unendlichen wie 1:1,96 verhält.

Zur Ermittlung der c_p -Werte wurde deshalb

$$q = \frac{1}{2} \cdot q_{\text{gemessen}}$$

angenommen.

Der Beiwert für den *resultierenden globalen Windwiderstand* wird definiert als

$$c_x = \frac{F}{S \cdot q}$$

wobei F die gemessene Kraft in x -Richtung (Windrichtung) und S die Anströmfläche (entspricht der Ansichtsfläche) des Versuchsmodeells und q ($= \frac{1}{2} q_{\text{gemessen}}$) der dynamische Staudruck bedeutet.

Beim Typ A-Turm beträgt $S = 0,641 \text{ m}^2$

Beim Typ H-Turm beträgt $S = 0,435 \text{ m}^2$

Bemerkung über den Einfluss des Windprofils. Verschiedene frühere Versuche haben gezeigt, dass es für die Ermittlung der

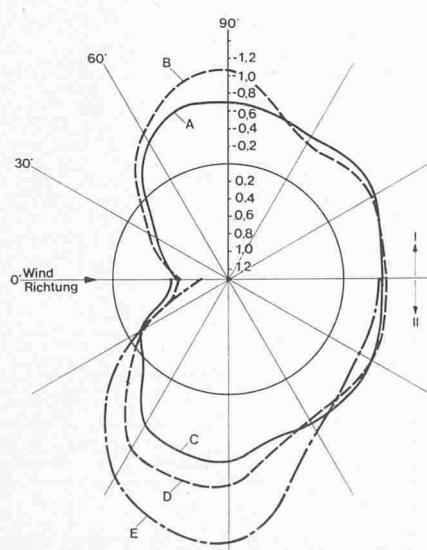
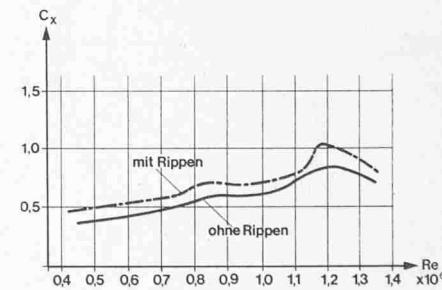


Bild 7 (links). Druckbeiwerte c_p am Turmumfang, mit und ohne Windrippen, in mittlerer Turmhöhe, Turm Typ A
A: Messung IPEN, mit Rippen
B: Messung IPEN, ohne Rippen
C: Messung EFW, mit Rippen
D: Messung EFW, ohne Rippen
E: Norm SIA 160 (mässig rauhe Oberfläche)

Bild 8 (rechts). Einfluss der Windrippen auf den Formwiderstandsbeiwert c_x bei turbulenten Strömung (Turm Typ A)

$$c_x = \frac{P_x}{q F}$$

P_x = Gesamtkraft in x -Richtung
 q = Staudruck
 F = Projizierte Anströmfläche
 Re = Reynoldszahl $= \frac{d \cdot \bar{u}_{zo}}{\nu}$
 d = oberer Turmdurchmesser
 \bar{u}_{zo} = Mittlere Windgeschwindigkeit in Referenzhöhe
 ν = Kinematische Zähigkeit



Druckbeiwerte einfacher ist, wenn für das gesamte Modell nur mit einem einzigen dynamischen Staudruck gerechnet werden muss. Daraus ergeben sich jedoch am Fusse des Versuchssturms sehr grosse negative Druckbeiwerte.

Einfluss der Windrippen

Hier handelt es sich um *eine der Hauptfragen*, die sich dem Konstrukteur bei der Festlegung des Versuchsablaufs stellte. Bild 7 zeigt deutlich den Einfluss der Windrippen auf einer Kote im oberen Turmbereich. Beim Turm mit montierten Windrippen ergab sich eine Verminderung des maximalen Soges in der Größenordnung von 30 Prozent, wobei sich die Extremalstelle um etwa 10° luvwärts verschiebt. Dagegen wird der Formwiderstandsbeiwert durch die Windrippen um etwa 15 Prozent erhöht (Bild 8).

Die Ergebnisse stimmen mit den Versuchen von H.J. Niemann [4] überein. Die Verminderung scheint sehr beträchtlich, doch ist es empfehlenswert, die Erhöhung der lokal auf die Rippen wirkenden Drücke sowie die Schwingungsanregung infolge der Rippen zu beachten. Es kann festgestellt werden, dass im Bereich des Druckmaximums und des Nachstromsoges kein wesentlicher Unterschied zwischen Facettenoberfläche mit und ohne Rippen besteht.

Einfluss der Turmform

Im oberen, zylindrischen Turmteil sind die Resultate vergleichbar mit jenen, die bereits in der Literatur publiziert worden sind. Der *luftdurchlässige Turmunterbau* bewirkt eine erhebliche Verminderung des Windstaudruckes auf die Turmbasis. Der Bereich des *Vordaches* verhält sich wie ein Schrägdach in der Sogzone.

Es ist interessant zu bemerken, dass der Staudruck im Scheitel der Luvzone positiv ist. Ein übliches Schrägdach mit gleicher Neigung weist Sog über der ganzen Dachfläche auf. Dieses unterschiedliche Verhalten kann dem Einfluss der oberen Turmpartie zugeschrieben werden.

Es kann ferner festgestellt werden, dass sich die Druckbeiwerte über dem Turmumfang im Bereich des veränderlichen Durchmessers nicht von der Druckverteilung über einen Zylinder unterscheiden. Für diesen Versuch wurden die Druckbeiwerte für den Typ A- und den Typ H-Turm ermittelt und miteinander verglichen (Bild 9). Eine *Veränderung des Durchmessers* hat offenbar keinen Einfluss auf die Form der Druckverteilung und nur einen geringen Einfluss auf die extremalen Druckbeiwerte. Der Formwiderstandsbeiwert scheint vom Verhältnis Turmhöhe/Turmdurchmesser unabhängig zu sein (vgl. Bild 8 mit Bild 10). Am unteren Turmbereich wird eine

Abnahme der positiven Druckbeiwerte bemerkt, jedoch ein gleichbleibender Wert im Bereich des maximalen Soges.

Einfluss der turbulenten Strömung

Etwas allgemein ausgedrückt, kann der Einfluss der turbulenten Strömung in *zwei Anteile* aufgeteilt werden:

- Einfluss der natürlich vorhandenen Turbulenz einer Strömung im Gegensatz zu einer rein laminaren Strömung.
- Indirekter Einfluss der turbulenten Strömung infolge einer turbulenten atmosphärischen Grenzschicht, die sich in Bodennähe bildet.

Diese Aufteilung erlaubt es, den dreidimensionalen Aspekt einer Strömung um ein Hindernis vom Verhalten der Grenzschicht um den Gegenstand (im vorliegenden Fall der Kühlturn) infolge der Turbulenz zu trennen. In Wirklichkeit sind die beiden Gesichtspunkte miteinander verbunden, wobei die vorgenommene Aufteilung nur zum besseren Verständnis des Strömungsvorganges dient.

Der Einfluss der turbulenten Strömung äußert sich in der gleichen Größenordnung der Druckbeiwerte, die in verschiedenen Versuchen an Modellen von vieleckigen Turmschloten mit glatten Facettenflächen gemessen worden sind. Frühere Versuche haben gezeigt, dass in einer turbulenten Strömung die Druckbeiwerte unabhängig von der Reynoldszahl sind. Die Druckbeiwerte hängen nur noch von der *relativen Grösse* des Versuchssturms, der Turbulenz und von der Form des Bauwerks ab.

Der Einfluss einer *mittleren* Strömung, d.h. einer *Grenzschicht*, welche die wesentlichen Merkmale des Windes aufweist, ist dagegen sehr wichtig. Der Einfluss kommt wie folgt zur Geltung:

- Wenn die Abmessungen des Bauwerks in einem konstanten Verhältnis bleiben oder konstant sind im Verhältnis zur Grenzschichtdicke, sind die Resultate vergleichbar. Zudem variiert die Grösse des Staudrucks mit der Höhe.
- Wenn Bauwerke miteinander verglichen werden, deren Abmessungen im Verhältnis zur Grenzschichtdicke variieren, so sind die erhaltenen Resultate sehr verschieden.

Betrachten wir zuerst einmal einen grossen Kühlturn, der in eine turbulente Grenzschicht gestellt wird, deren Dicke wenig höher ist als die Turmhöhe. Alle Versuche, die unter dieser Bedingung ausgeführt werden, zeigen (Bild 11), dass der im Scheitelpunkt gemessene positive Druck in Abhängigkeit der Höhe proportional zum dynamischen Staudruck variiert. Dies deckt sich mit den Annahmen, die in den meisten Normen und Vorschriften enthalten sind. Es entspricht auch der ersten

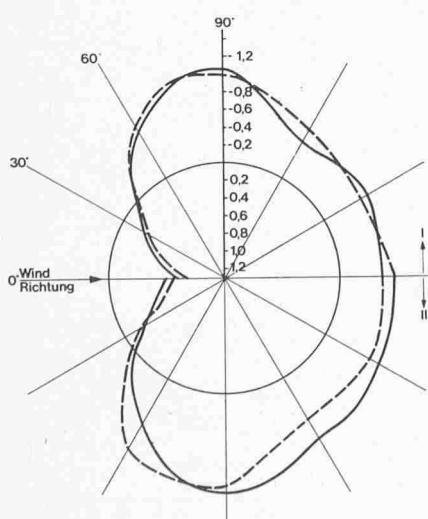
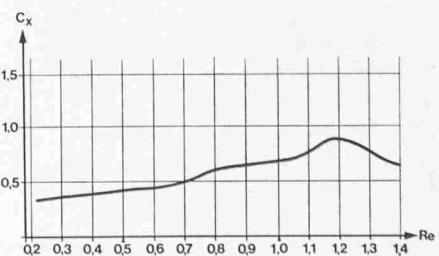


Bild 9 (links). Druckbeiwerte c_p am Turmumfang in mittlerer Modellhöhe. Vergleich zwischen Typ A (ausgezogene Linie) und Typ H (gestrichelte Linie). Beide ohne Längsrippen. I: Messungen IPEN, II: Messungen EFW

Bild 10 (rechts). Formwiderstandsbeiwert c_x bei turbulenten Strömung für einen Turm mit sehr grossem Durchmesser (Typ H ohne Wandrippen).
Definition von c_x und Re siehe Bild 8



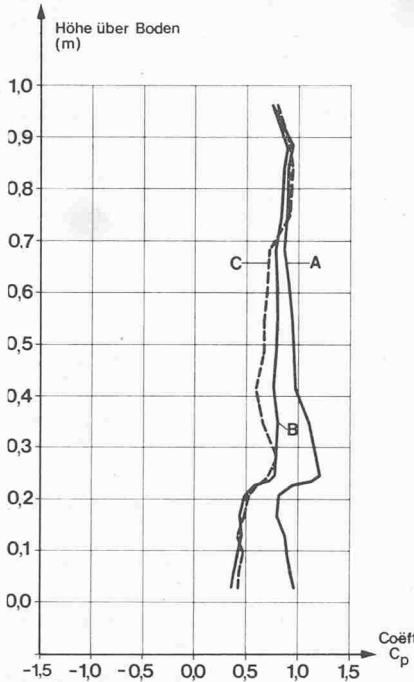


Bild 11 (links). Vertikales Profil der Druckbeiwerte c_p bei 0° Windanströmrichtung (Turm Typ A ohne Rippen)
A: Messungen IPEN, $q \infty = f(H)$
B: Messungen IPEN, $q \infty = \text{konstant}$
C: Messungen EFW, $q \infty = \text{konstant}$

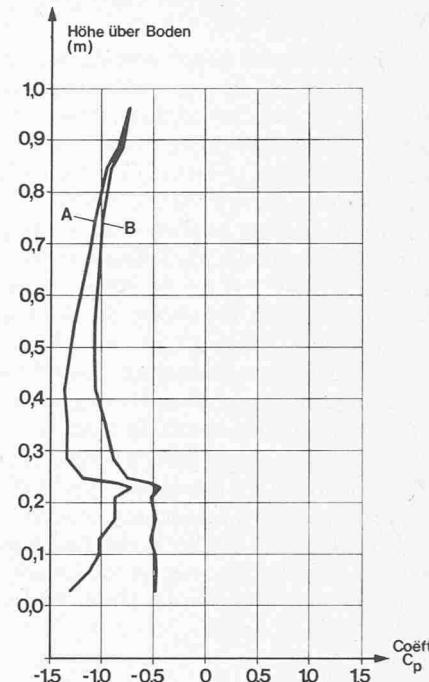


Bild 12 (rechts). Vertikales Profil der Druckbeiwerte c_p bei 90° Windanströmrichtung (Turm Typ A ohne Rippen)
A: Messungen IPEN, $q \infty = f(H)$
B: Messungen IPEN, $q \infty = \text{konstant}$

Vorstellung, die man vom Einfluss einer solchen Strömung hat. Jedenfalls sind die erhöhten Drücke im Bereich des Soges (Bild 12) ungefähr konstant und gleich gross wie die erhöhten Druckwerte am oberen Schlotende.

Es sei noch bemerkt, dass die Erhöhung der statischen Windlasten deswegen nicht stark ins Gewicht fällt, da der Ausgleich der negativen Drücke an der Turmbasis und symmetrisch zur Windrichtung stattfindet. Bezuglich der dynamischen Wirkungsweise sind die Verhältnisse wahrscheinlich anders.

Einfluss der Umgebung

Im Rahmen der vorliegenden Studie war es von Interesse zu erfahren, von welcher Größenordnung der Einfluss der in der Nähe des Kühlturms stehenden Gebäude auf die Winddruckverteilung und der Betrag der Beiwerte sein würde. Der Einfluss müsste mit jenem der Grundturbulenz verglichen werden.

Der globale Windwiderstand hängt stark von der Windrichtung bezüglich der Lage der Hindernisse ab. Bei der vorgegebenen Situation (Bild 1 und 13) ergaben sich folgende ungünstigen Gesichtspunkte:

1. Der Kühlurm liegt in bezug auf das Kesselhaus in der Windrichtung West.

2. In bezug auf einen bestehenden Kühlurm in der Windrichtung Nordwest.

3. Und in bezug auf Wind aus West-Nordwest in der Ziellinie der sich tangential an den Flanken von bestehendem Kühlurm und Kesselhaus loslösenden Windgeschossen (Windwirbel begrenzter Größe), wobei zu bedenken ist, dass die bestehenden Anlageteile sich in einem Abstand von nur etwa 140 m von der Turmoberfläche befinden.

Nach der für das betreffende Gebiet vorliegenden Windstatistik ist der Wind aus Richtung West bis Nordwest unterdurchschnittlich häufig. Es muss jedoch die Möglichkeit ins Auge gefasst werden, dass ein extrem heftiger Wind auch aus einer für den Kühlurm ungünstigen Richtung weht. Die ermittelte Winddruckverteilung für diesen Fall ergibt eine sehr unsymmetrische Kurve (Bild 13). Der globale Windwiderstand wird jedoch kleiner durch die abschirmende Wirkung der Gebäude.

Es ist anzunehmen, dass durch die bestehenden Anlageteile ein starker dynamischer Einfluss (Impulsgeber) auf die neue Turmkonstruktion ausgeübt wird. Der Einfluss der benachbarten Anlageteile ist also von gleicher Größenordnung wie die Grundturbulenz. Eine detailliertere Abklärung ist nur mit Hilfe eines dynamischen (d.h. elastisch deformierbaren) Versuchsmodeells möglich. Da die Anordnung der Gebäude für jedes Kraftwerk wieder anders ist, rechtfertigt sich eine Untersuchung des dynamischen Einflusses von Nachbarbauten nur für ein Ausführungsprojekt.

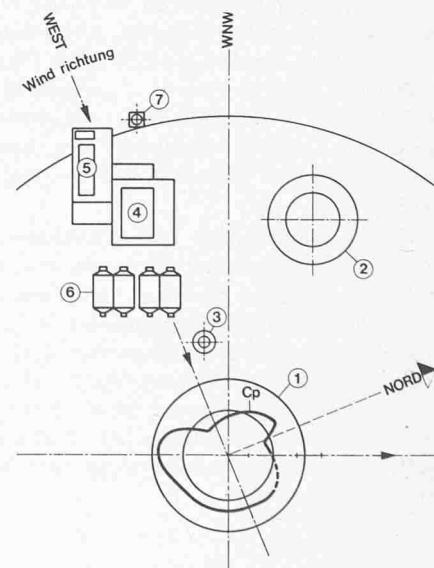


Bild 13. Druckbeiwerte c_p am oberen Turmumfang unter Einfluss benachbarter Bauten

- 1: Kühlurm Typ A $\varnothing = 130$ m, $H = 146$ m
- 2: Bestehender Kühlurm $\varnothing = 80$ m, $H = 100$ m
- 3: Hochkamin $H = 200$ m
- 4: Kesselhaus $H_{\max} = 120$ m
- 5: Maschinenhaus $H = 30$ m
- 6: Elektrofilter $H = 35$ m
- 7: Kamin $H = 170$ m

Schlussfolgerung

Die Versuche haben gezeigt, dass durch die Anordnung von Windrippen die extremalen, negativen Druckbeiwerte um etwa 20 Prozent vermindert werden. Die Verminderung ist jedoch verbunden mit einer Zunahme des globalen Windwiderstandes um etwa 15 Prozent infolge der erhöhten Rauigkeit.

Der Einfluss der relativen Grösse eines Bauwerks und der Grenzschichtdicke ist noch nicht völlig geklärt. Die Versuche haben jedoch gezeigt, dass diese relativen Parameter einen sehr grossen Einfluss auf die Winddruckverteilung haben.

Grösse und Verteilung der Druckbeiwerte sind unabhängig davon, ob der Kühlurm in Betrieb ist oder nicht.

Benachbarte Anlageteile beeinflussen die Winddruckverteilung sehr stark. Obwohl durch die abschirmende Wirkung eine Verminderung der extremalen Winddrücke erfolgt, muss die dynamische Beeinflussung sorgfältig abgeklärt werden. Der Einsturz von Kühlürmen des Kraftwerks bei *Ferrybridge* in *England* sei hier in Erinnerung gerufen.

In bezug auf die Wahl des Bezugspunktes für den dynamischen Staudruck sowie für die Druckverteilung entlang des Turmumfangs konnten die früher bei IPEN gemachten Versuche bestätigt werden.

Danksagung

Der Autor dankt der ALESA, die es ihm ermöglichte, diese Untersuchung durchzuführen und zu veröffentlichen, dem Eidg. Institut für Reaktorforschung (EIR) für seine aktive Mitwirkung an der Vorbereitung der Versuche, und Herrn Kunz, der den Text gestaltet und ins Deutsche übertragen hat.

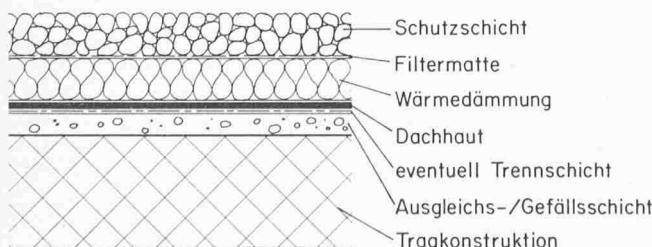
Das Umkehrdach

Von R. Sagelsdorff und H. Preisig, Dübendorf

Einleitung

Das Umkehrdach (als «Irmadach» bezeichnet) ist ein neuerer Flachdachaufbau (vgl. Abbildung). Das Umkehrdach ist in der SIA-Empfehlung 271 (1976) Flachdächer als eine der möglichen Konstruktionen aufgeführt. Erfahrungen der EMPA mit Versuchsdächern und Beobachtungen an ausgeföhrten Dächern veranlassen uns, unsere Auffassung hier bekanntzugeben. Sie weicht leicht von den Empfehlungen des SIA ab.

Das Umkehrdach mit Wärmedämmplatten aus extrudiertem Polystyrol-Hartschaum ist eine seit etwa 1968 in der Schweiz bekannte Konstruktion. Schon vor 1970 wurden Messungen an Versuchsdächern im Ausland und 1971 bis 1976 auch an der EMPA durchgeführt. Dabei wurden vor allem Temperaturverlauf, Wasserabfluss und Wasseraufnahme der Wärmedämmplatten systematisch fortlaufend gemessen. Es wurde ein so umfangreiches Datenmaterial zusammengetragen, dass die Auswertungen zum Teil heute noch nicht abgeschlossen sind.



Literaturverzeichnis

- [1] Kollar L. und Marosi I.: «Naturzug-Trockenkühlürme in Stahl-fachwerk-Konstruktion.» Schweiz. Bauzeitung, Heft 50, 1976.
- [2] Mayor J.-C.: «Die atmosphärische Kühlung von Kernkraftwerken», Bd. 1. EIR-Bericht, Würenlingen 1974.
- [3] Hertig J.-A.: «Tour sèche de réfrigération pour une centrale de 900 MWe. Etude des effets aérodynamiques sur une variante en construction métallique.» Note destinée à l'Institut Fédérale de Recherche en Matière de Réacteurs EIR, Lausanne, le 18 décembre 1973.
- [4] Niemann H.-J.: «Zur stationären Windbelastung rotationssymmetrischer Bauwerke im Bereich transkritischer Reynoldszahlen.» Mitteilung Nr. 71-2. März 1971, Ruhr-Universität, Bochum.
- [5] Armit J.: «Report of the Committee of Inquiry into Collapse of Cooling Towers at Ferrybridge.» Monday 1 November 1965.
- [6] Armit J. und Counihan J.: «The Simulation of the Atmospheric Boundary Layer in a Wind Tunnel.» Atmospheric Environment, 1st August 1967. Pergamon Press, 1958, Vol. 2, p. 49-76.
- [7] Davenport A.-G.: «Wind Effects on Buildings and Structures.» Teddington 1963, paper 2.
- [8] Hertig J.-A.: «Similitude entre écoulements turbulents» (Dissertation EPFL, No 288, 1977).
- [9] Ebner E. H. und Ruscheweyh H.: «Windlasten an hyperbolischen Kühlturnschalen.» Westdeutscher Verlag, 1974.
- [10] Davenport A.-G.: «Wind Effects on Buildings and Structures.» Toronto 1967, paper 7.

Adresse des Verfassers: Dr. J.-A. Hertig, dipl. Ing. ETH, Institut de production d'énergie (IPEN), EPFL, 17, av. Dapples, 1006 Lausanne.

Übersetzung und Ergänzungen: H. Kunz, ALESA, 8048 Zürich.

Aufbau

Beim Umkehrdach liegt die Dachabdichtung unter der Wärmedämmung. Die Dachabdichtung wird auf einer Unterlage mit ausreichender Wärmespeicherfähigkeit (z. B. normale Stahlbetondecke) verlegt. Sie befindet sich dadurch im Bereich geringerer Temperaturschwankungen und wird vor mechanischer Beschädigung bei der Ausführung und Nutzung geschützt.

Als Schutz gegen UV-Strahlen und gleichzeitig als Sicherung gegen die Sogwirkung des Windes und Aufschwimmen müssen die Dämmplatten mit einer Kiesschüttung (16/32 mm gewaschen ohne Feinteile) in ausreichender Dicke abgedeckt werden. Es wird empfohlen, zwischen Wärmedämmplatten und Kiesschüttung eine wasser dampfdurchlässige, unverrottbare Trennlage (z. B. Kunststoff-Vlies) anzubringen, um ein eventuelles Aufschwimmen der Wärmedämmplatten und ein Eindringen von Kieskörnern in die Fugen der Wärmedämmplatten zu verhindern.

Der Dachwasserablauf muss so angeordnet sein, dass das Wasser sowohl auf der Ebene der Dämmplattenoberseite und der Dachabdichtung abgeführt werden kann. Das Gefälle kann auch weniger als 3% (bis 0%) betragen, wobei bei Gefällen unter 1½% gemäss SIA-Empfehlung 271 für die Dachabdichtung besondere Massnahmen erforderlich sind. Die Platten werden in der Regel lose und stumpf gestossen oder mit Stufenfalte verlegt. Über die Vor- und Nachteile einer vollflächigen Verklebung können noch keine Aussagen gemacht werden, da darüber zu wenig Erfahrungswerte vorliegen.

Wird im Falle einer bituminösen Dachhaut diese vollflächig auf der Unterlage aufgeklebt, können mögliche Fehl-