

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 84 (1966)
Heft: 1

Artikel: Über die Verwendung sehr kleiner Modelle für Winddruck-Versuche
Autor: Ackeret, J. / Egli, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-68800>

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: 28.04.2026

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

zitierte Wort von Kant Zielschnur sein müsse. Neben den Anwendungen der Mathematik verlangt er vor allem, dass die Schüler die axiomatische Methode handhaben und verstehen lernen. Daneben sind ihnen neue Begriffe wie Gruppe, Ring, Körper, Äquivalenzrelationen, Strukturfragen von Mengen, Abbildungen usw. zu erklären und geläufig zu machen. Entsprechend dem Alter der Schüler sieht er den folgenden *Aufbau des Unterrichtes* vor:

Unter 14 Jahren: Experimenteller Unterricht in Algebra und Geometrie, Gleichungen ersten Grades mit einer und mehreren Unbekannten. In der Geometrie sollen Begriffe wie Vektor, Translation, Rotation, Symmetrie, Ähnlichkeit erklärt werden; das Dreieck soll überhaupt aus dem ganzen Geometrie-Unterricht verschwinden.

14–15 Jahre: Weiterführung des vorigen Stoffes. Graphische Darstellung einfacher Funktionen, Erklärung des ersten Axiomensystems, nämlich dasjenige der natürlichen Zahlen.

15–16 Jahre: Anfangsgründe der Differentialrechnung: Kalkül der Ableitungen, der Tangenten, der Maxima und Minima usw. Axiome der Körper der reellen Zahlen. – Der Beginn des Unterrichts über Differentialrechnung in diesem Alter ist ganz entschieden zu früh. Er dürfte auf etwa 1 bis 2 Jahre später verlegt werden, wie dies auch im Lehrgang Suter vorgesehen ist.

16–17 Jahre: Fortsetzung der Differentialrechnung, Behandlung ebener Kurven in Parameterform (Vordiplom-Stoff an der ETH!). Lineare Transformationen, lineare Algebra für 2 Dimensionen und ihre axiomatische Begründung. Matrizenkalkül der Ordnung 2. Vektorrechnung im zweidimensionalen Fall, zweidimensionaler Vektorraum, affine und metrische analytische Geometrie.

17–18 Jahre: Benützung von Polarkoordinaten in der Ebene, Exponentialbegriff. Studium der Drehungsgruppe der Ebene und daraus Herleitung der Trigonometrie und des Kalküls der komplexen Zahlen. Dreidimensionale, lineare Algebra im dreidimensionalen Vektorraum. Einführung in die Theorie der linearen und quadratischen Formen an Stelle des Unterrichtes über Kegelschnitte und Quadriken.

Die angewandte Mathematik, die Wahrscheinlichkeitsrechnung und insbesondere die darstellende Geometrie wurden im obigen Programm nicht berührt.

Vergleichsweise sei nun der *Lehrplan gemäss den Büchern Suter* für die letzten 3 Unterrichtsjahre der Oberrealschule zusammengestellt:

1. Band: Sektion A, Algebra

Einfache Begriffe der Mengenlehre. Axiomatischer Aufbau der Zahlen, beginnend bei den natürlichen Zahlen bis zur Menge aller reellen Zahlen, komplexe Zahlen. Polynome. Einfache Gleichungen, insbesondere Gleichungen 2. Grades.

Sektion B, Geometrie

Zweidimensionaler Vektorraum, affine und metrische zweidimensionale Geometrie. Trigonometrische Funktionen. Dreidimensionaler Vektorraum samt Anwendungen.

2. Band: Noch nicht erschienen.

Beschreibung der axiomatischen Methode, algebraische Strukturen, affine, projektive und metrische Geometrie. Beginn der Analysis.

3. Band: Lineare Algebra und Analysis.

Ergänzungs-Heft: Wahrscheinlichkeitsrechnung, Statistik und angewandte Mathematik.

Gegenüber dem bisherigen traditionellen Lehrprogramm sollen in Zukunft fast die ganze Planimetrie, erhebliche Teile der Geometrie, ausführliche Darstellung des logarithmischen Rechnens wegfallen. An ihre Stelle träte eine Einführung in die Mengenlehre, axiomatischer Aufbau des Zahlbegriffes und der damit verbundenen Algebra, axiomatischer Aufbau der Vektorrechnung und der damit verbundenen

zwei- und dreidimensionalen Geometrie, weitere Behandlung der Analysis als bisher sowie eine Einführung in die Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik. Wie weit noch andere Gebiete der angewandten Mathematik berücksichtigt werden sollen, ist aus der vorliegenden Dokumentation nicht ersichtlich, insbesondere wird die bisherige darstellende Geometrie überhaupt nirgends erwähnt.

Gegenüber dem Plane Dieudonné wurde die zeitliche Behandlung der einzelnen Gebiete teilweise leicht geändert, beispielsweise die Einführung in die Analysis mindestens um ein Jahr hinausgeschoben. Im übrigen entspricht das Stoffprogramm und insbesondere seine Darstellung ziemlich genau dem Plan Dieudonné.

Würdigung der Reformpläne

Wie bereits gesagt, befindet sich die geplante Reform in allen Ländern noch vollkommen im Fluss. Auch wenn wir im folgenden gewisse Kritiken anbringen, so müssen die Pionierleistungen von Prof. Pauli und seinen Kollegen des Gymnasiums Neuchâtel voll und ganz und mit Dankbarkeit anerkannt werden. Dieses Kollegium hat anlässlich einer Aussprache nach einem Vortrag Dieudonné in der Universität Zürich erklärt, dass sich die geplante Reform gemäss den vorliegenden Erfahrungen an der Neuenburger Schule durchführen lasse.

Wir werden im folgenden unsere Ansicht über die Reform in *Thesen* zusammenfassen.

1. Mit der Streichung der bereits erwähnten Stoffgebiete im bisherigen Programm der Mittelschulen sind wir im wesentlichen einverstanden.

2. Wir befürchten, dass mit der Aufnahme der neu vorgesehenen Gebiete und ihrer axiomatischen Darstellung, unter gebührender Berücksichtigung der Bedürfnisse der angewandten Mathematik, die für den Mathematikunterricht verfügbare Zeit nicht ausreichen wird, selbst unter der Voraussetzung, dass sie gegenüber heute noch etwas erweitert würde.

3. Der Plan Dieudonné und seine Realisierung in den Büchern Suter-Calame würde zweifellos für Mathematikstudenten einen reibungslosen und stetigen Übergang vom Mittelschul- zum Hochschulunterricht ermöglichen. Für die Anfänger-Vorlesungen in Mathematik würde dadurch Zeit gewonnen. Hingegen glauben wir nicht, dass er für die übrigen Studenten der Naturwissenschaften und der Technik, ganz abgesehen vom grossen Haufen der restlichen 80% der Schüler, ohne gehöriges Abstreichen der abstrakten Darstellung für den Unterricht geeignet sei. Beispielsweise müssen die Ingenieurstudenten vor allem lernen, die Resultate der Mathematik anzuwenden, ohne stets ihre Wurzel zu kennen. Bekanntlich gibt es heute ausgezeichnete Lehrbücher für sog. «Ingenieur-Mathematik», die sich genau an das erwähnte Ziel halten.

4. Der Plan Dieudonné ist vollständig auf der axiomatischen Methode aufgebaut; er wirkt deshalb imponierend geschlossen, aber auch einseitig. Das «Erfinden», das «Suchen» nach Lösungen und die Wege dazu sind ebenso wichtige gedankliche Prozesse wie das logische Schliessen. Gerade diese in den Büchern von G. Polya meisterhaft dargestellte Art des mathematischen Denkens kommt in den vorliegenden Lehrbüchern für Schüler zu kurz.

Ich betrachte die Auftauung des bisherigen, erstarrten Mathematikunterrichts an der Mittelschule als eine sehr erfreuliche Tat. Zweifellos wird sie auf den allgemeinen Unterricht bei Lehrern und Schülern befruchtend wirken. Hingegen sollte man bei der Verwirklichung der Reform eine bessere Synthese zwischen Anschauung und Abstraktheit finden, als dies bei den gegenwärtigen Vorschlägen der Fall ist.

Über die Verwendung sehr kleiner Modelle für Winddruck-Versuche

DK 624.042.41.001.5

Prof. Dr. F. Stüssi, ETH, zum 65. Geburtstag freundlichst gewidmet von J. Ackeret und J. Egli, Institut für Aerodynamik ETH, Zürich

Der Winddruck auf Bauwerke ist schon vor langer Zeit als ein wichtiges, in einzelnen Fällen sogar entscheidendes Element der Vorausberechnung erkannt worden. Der Wunsch nach einer Universalformel für die Druckverteilung erwies sich bald als illusorisch; (die früher mehr oder weniger explizit verwendete Newton-Eulersche Formel gab z. B. die Windbeanspruchung eines Flachdaches als Null an!). Es war somit naheliegend, sich durch Modellversuche brauchbare Werte

zu verschaffen; *G. Eiffel* war hier ein Pionier; er hat als einer der ersten den Windkanal dafür benützt und zahlreiche Messergebnisse veröffentlicht. Freilich zeigte sich bald, dass man zwar das allgemeine Verhalten verschiedener Körperformen im Windstrom qualitativ gut verstehen kann (hier wäre vor allem *L. Prandtl* zu nennen), dass aber die Mannigfaltigkeit der baulichen Anordnungen sehr gross ist und daher schon die Darstellung der Versuchsergebnisse Mühe macht.

So ist zwar die S.I.A.-Norm Nr. 160 die vielleicht ausführlichste hinsichtlich des Zahlenmaterials; aber auch hier gibt es Lücken, und es muss immer wieder interpoliert und extrapoliert werden, wenn die Bauformen von den dort zugrunde gelegten stärker abweichen. – Bei den heute im Vordergrund des Interesses stehenden Hochhäusern sind die Kosten für Untersuchungen am Modell im Windkanal relativ zur Bausumme klein. Der Wunsch ist deshalb naheliegend, einfach ein

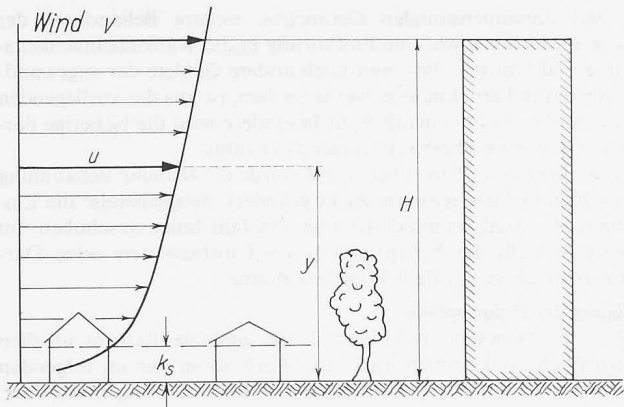


Bild 1. Zur Definition der Ähnlichkeitsbedingungen. Bei exakter geometrischer Ähnlichkeit wären auch die umgebenden Hindernisse (k_s) modellähnlich auszuführen

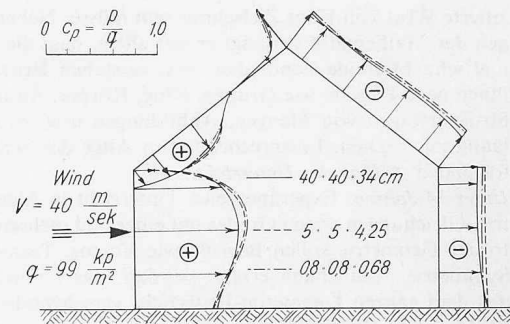


Bild 3. Alte Messungen von G. Eiffel zeigen, dass bei eckigen Formen die Druckverteilung (dimensionslos) bei grossen und kleinen Modellen praktisch gleich ist

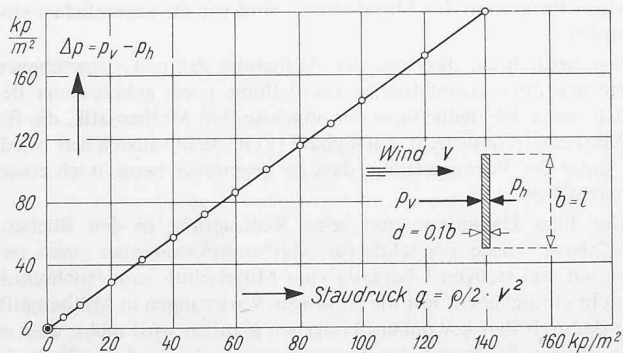


Bild 2. Die Druckdifferenz ($p_v - p_h$) geht bei einer senkrecht angeströmten Platte mit dem Staudruck proportional. Der entsprechende dimensionslose Koeffizient ist von der Reynoldszahl unabhängig

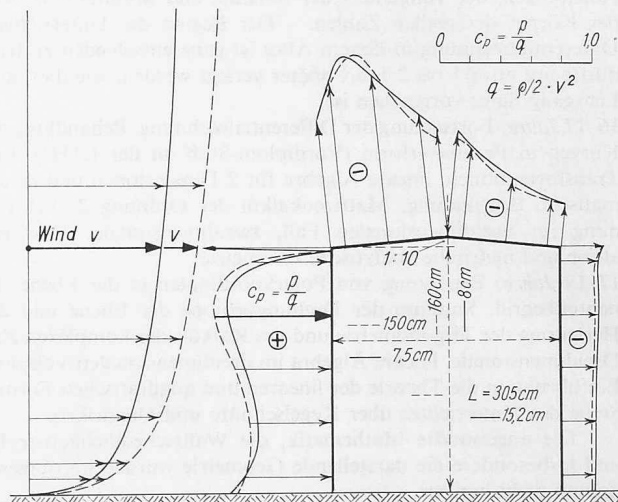


Bild 4. Messungen von M. Jensen in natürlichem Wind (grosses Modell) und im Windkanal (kleines Modell) zeigen gute Übereinstimmung. Hier ist darauf geachtet worden, dass die Windverteilung mit der Höhe geometrisch ähnlich ist: $u/V = f(y/H)$; Bezeichnungen siehe Bild 1

Modell auszumessen. Eine Schwierigkeit bildet vorläufig der dazu erforderliche Zeitaufwand, da ja nur wenige Kanäle zur Verfügung stehen und die Auswertung meistens umständlich ist.

Man kann zwei Fragestellungen unterscheiden:

- die Ermittlung der *Gesamtkräfte* und *Gesamtmomente*,
- Angaben über die *lokal* wirkenden Drücke, die oftmals zeitlich schwanken, auch wenn der Luftstrom selbst zeitliche Konstanz aufweist.

Glücklicherweise sind die Genauigkeitsansprüche vorläufig nicht so scharf wie etwa bei Flugzeugmodell-Untersuchungen. Das erscheint schon deshalb zulässig, weil ja Geschwindigkeit, Richtung und Turbulenzzustand der am Bauort zu erwartenden Stürme nur verhältnismässig roh geschätzt werden können. Was man verlangen muss, ist das richtige *Vorzeichen* und eine *Betragsangabe* der Drücke und der resultierenden Kräfte mit 5 bis 10 % Genauigkeit.

Es ist zu erwarten, dass in Zukunft auch hier mehr gefordert werden wird. Dann wird es nötig werden, diesem Zweck sehr viel besser angepasste Laboratorien zu schaffen. Das Interesse der Aerodynamiker, bisher ziemlich einseitig auf die (allerdings auch dringenden) Bedürfnisse der Flugtechnik abgestellt, richtet sich zwar neuerdings mehr dem Winddruck-Problem zu; es ist aber

zweifellos noch eine recht umfangreiche Entwicklungs- und Forschungsarbeit nötig – besonders auch, wenn dynamische Probleme wie Brückenschwingungen, Einflüsse der Windböigkeit und der Störungen durch die Umgebung experimentell und theoretisch genügend zuverlässig erfasst werden sollen.

Einstweilen wird man versuchen müssen, mit einfachen Mitteln schnell zum Ziel zu

kommen. Über einen solchen Weg soll im folgenden kurz berichtet werden. – Falls es nämlich zulässig wäre, mit *kleinen* Modellen zu arbeiten, könnte man auch kleinere Windkanäle verwenden, die zahlreicher sind. Die Herstellung der Modelle, deren Montage, Veränderung der Einstellung, Modifikationen der Formen usw. würden weniger Zeit beanspruchen und billiger ausfallen. Freilich

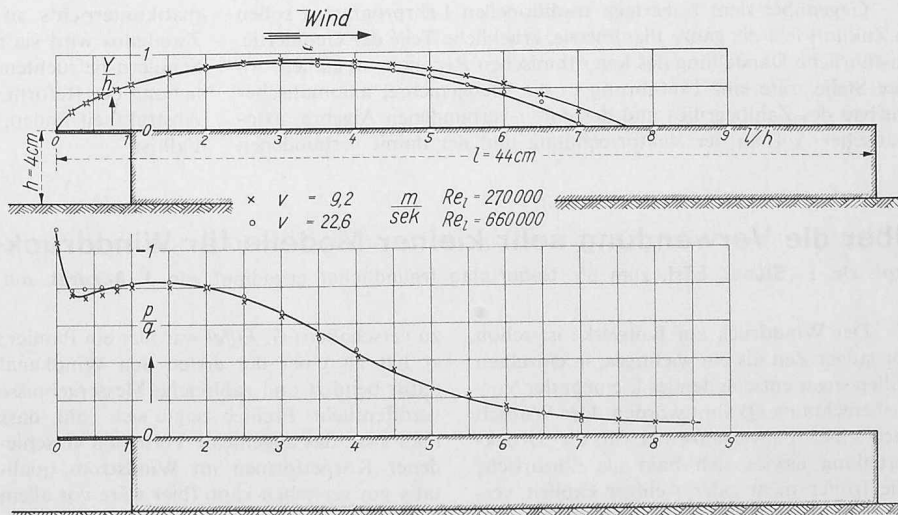


Bild 5. Wieder-Anliegen einer abgelösten Strömung auf einem Flachdach (mit Vordach). Sowohl die Grenzen der Ablösungszone (oben) als auch die Drücke (unten) zeigen nur geringe Änderungen mit der Reynoldszahl $Re = V l / \nu$

muss dann sorgfältig geprüft werden, ob eine solche Verkleinerung die Genauigkeit und vor allem auch die Übertragbarkeit der Ergebnisse ins Grosse nicht unzulässig beeinträchtigt.

Zunächst muss man beachten, dass ja auch grössere Modelle (von z. B. 500 mm Höhe) immer noch sehr viel kleiner sind als die Originale. Ein Masstab-Faktor von 1:200 wird also toleriert. Die Frage ist somit die, ob etwa 1:1000 nicht auch noch zulässig sei. Die Antwort muss ausgehen von den *Ähnlichkeitsbedingungen* für solche Versuche – Bild 1.

Die für uns wichtigsten sind:

1) Das Modell muss *geometrisch* ähnlich dem Original sein. Auch die unmittelbare Umgebung sollte mindestens näherungsweise geometrisch ähnlich sein.

2) Die *Reynolds-Zahl* $Re = (V \cdot H / \nu)$ soll für Modell wie Original gleich gross sein.

[V = ungestörte Windgeschwindigkeit in der Höhe H über Grund,

ν = kinematische Zähigkeit der Luft

= dynamische Zähigkeit/Dichte = μ/ρ .]

3) Die *Mach-Zahl* V/a soll gleich sein (a = Schallgeschwindigkeit).

Während Punkt 1) sozusagen selbstverständlich ist und bei genügender Sorgfalt auch eingehalten werden kann und Punkt 3) im Geschwindigkeitsbereich auch starker Stürme noch unwesentlich ist, wie durch Versuche in unserem Hochgeschwindigkeitskanal gezeigt werden konnte, scheint die Reynolds-Bedingung zunächst ein unüberwindbares Hindernis zu sein. Sie ist nämlich praktisch nie erfüllbar. Nun hat man aber im Lauf der Zeit mehr und mehr verstehen gelernt, warum dennoch in vielen Fällen vernünftige Resultate gewonnen werden können. Gerade die Bauformen der Hochhäuser, die sich durch grosse ebene Flächen, ausgesprochen scharfe Kanten, flache Dächer, eckige Aufbauten auszeichnen, erweisen sich hier als glücklicher Umstand. Sie sind sozusagen das Gegenteil der Stromlinienform. Diese ist geeignet, die sogenannten Ablösungen der Strömung zu vermeiden. Bei Vierkantformen sind solche immer vorhanden, und zwar, und dies ist der günstige Umstand, bei grossen und *kleinen* Objekten in praktisch gleichem Masse. Wir können dies schon mit sehr einfachen Versuchen zeigen.

Bild 2 gibt für eine ebene, senkrecht angeströmte Platte den Druckunterschied zwischen den Mittelpunkten der Platte auf der Vorderseite p_v und auf der Hinterseite p_h , also $p_v - p_h$, in Abhängigkeit des Staudruckes $\rho/2 \cdot V^2$ an. Es besteht exakte Proportionalität, d. h. der dimensionslose Beiwert dieser Differenz

$$\Delta c_p = \frac{p_v - p_h}{\rho/2 \cdot V^2}$$

ist bis zu den kleinsten Staudrücken konstant. Da die linearen Dimensionen der Platte und die kinematische Zähigkeit beim Versuch konstant bleiben, können wir auch sagen, dass Δc_p von $Re = Vb/\nu$ in diesem Fall *unabhängig* ist. Der strömungsphysikalische Grund liegt in drei Umständen:

a) Auf der Vorderseite ist die Strömung, von einer dünnen «Grenzschicht» abgesehen, praktisch reibungsfrei, also von der Reynolds-Zahl unabhängig.

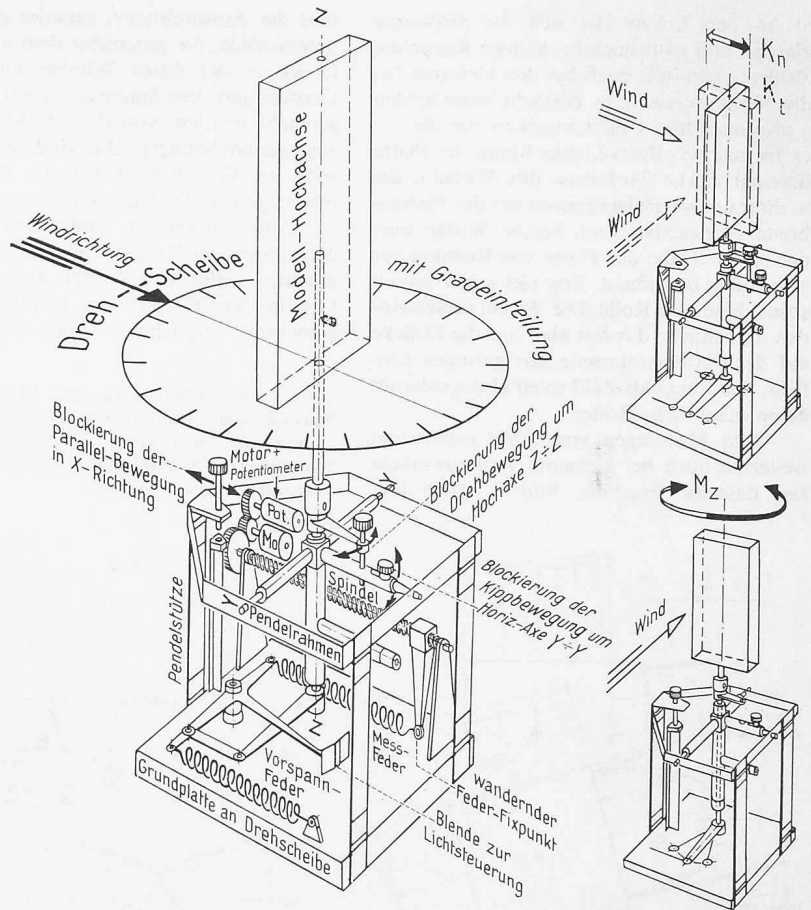


Bild 6. Schema der Kleinwaage. Die Waage misst zur gleichen Zeit nur eine Komponente (Kraft oder Moment), kann aber leicht umgestellt werden, um die übrigen Komponenten zu messen. In den folgenden Beispielen werden nur die Gesamtkräfte K_n und K_t und das Moment M_z in dimensionsloser Form in Abhängigkeit vom Anströmwinkel φ angegeben

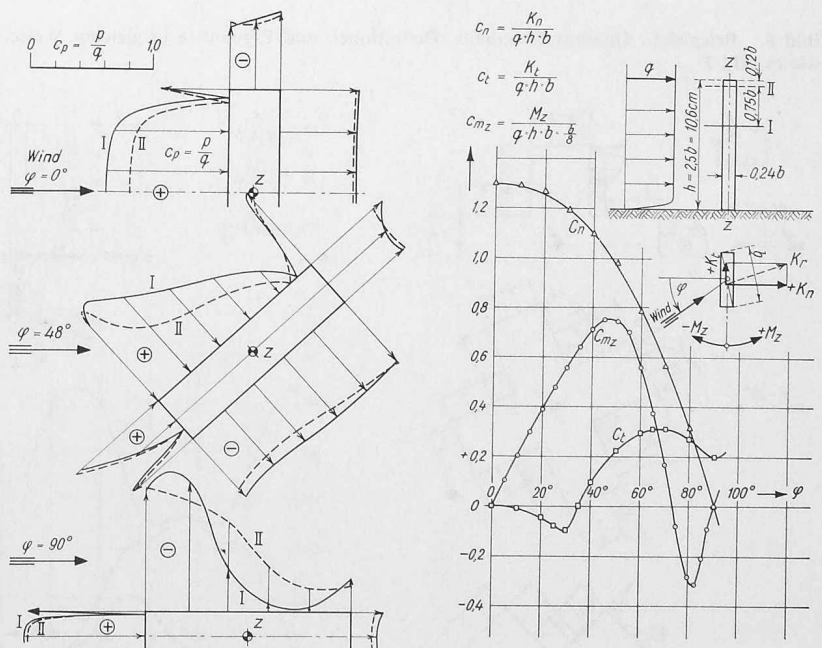


Bild 7. Beispiel a: Scheibenhochhaus. Links: Druckverteilung ($p/q = c_p$) in den Ebenen I und II bei drei verschiedenen Anstellwinkeln φ ; rechts oben: Definitionen und Geschwindigkeitsverteilung des ungestörten Windes. Dimensionen des Modells. Die Bezugbreite b ist hier die Rechteckdiagonale; rechts unten: c_n , c_t , c_{mz} in Funktion des Anströmwinkels φ . Die eingetragenen Messpunkte zeigen, dass der teilweise komplizierte Verlauf der Kurven recht genau aufgenommen werden kann

b) An den Ecken löst sich die Strömung *glatt* ab und zwar auch bei kleinen Reynolds-Zahlen, jedenfalls noch bei den kleinsten für die Modellversuche in Betracht kommenden – also auch hier Unabhängigkeit von *Re*.

c) Im sog. «Totluft»-Gebiet hinter der Platte herrscht starke Turbulenz mit Wirbeln, die in ihrer Grösse einigermassen mit der Plattenbreite vergleichbar sind. Solche Wirbel werden in der Nähe der Platte von Reibung nur sehr wenig beeinflusst. Erst viel weiter hinten spielt diese eine Rolle. Die Wirbel verschwinden allmählich; das hat aber auf die Drücke auf der Plattenhinterseite nur geringen Einfluss. Die Reynolds-Zahl spielt also wiederum keine wesentliche Rolle.

Alte Messungen von *Eiffel* geben nun weiterhin auch bei kleineren Kantenwinkeln fast dasselbe Ergebnis, Bild 3. Auch hier

sind die Aussendrucke, genauer die Druckunterschiede, die gegenüber dem ungestörten Druck in der freien Windströmung durch Division mit dem Staudruck *q* dimensionslos gemacht wurden, von der Modellgrösse sozusagen unabhängig. Die Modellgrösse variierte im Verhältnis 1:50; die Modell-Abmessungen sind zuletzt geradezu winzig.

Sehr interessant sind schliesslich die Messungen der Druckverteilung, die *Jensen*¹⁾ machte – Bild 4. Ein sehr grosses Modell (1,6 m hoch) wurde im natürlichen Wind gemessen; verglichen wurden die *c_p*-Werte

mit den an einem 20mal kleineren Modell im Windkanal gewonnenen. Da *Jensen* im letzteren Falle die Windgeschwindigkeitsverteilung über dem Boden künstlich der natürlichen anpasste (siehe auch Bild 1), so ist der Vergleich recht zuverlässig und zeigt auch hier eine sehr gute Übereinstimmung. Man kann daher kaum mehr im Zweifel darüber sein, dass bei relativ eckigen Formen auch kleine Modelle für praktische Zwecke ausreichen.

Sind nun die Gebäudeflächen nicht mehr eben, die Kanten stark gerundet, so ergeben sich bei kleinen Reynolds-Zahlen Abweichungen, die nicht mehr ohne weiteres vernachlässigt werden dürfen. Wohl gibt es etwa bei stark gewölbten Dächern auch Ablösungen, aber die Lage der Ablöselinie kann noch von der Reynolds-Zahl abhängen in dem Sinne, dass bei sehr kleinen Reynolds-Zahlen die Ablösung weiter vorne erfolgt als bei grösseren. Damit wird dann auch die Druckverteilung geändert. Das Kriterium ist im wesentlichen der Turbulenzzustand der Grenzschichten. Ausgeprägt zeigt sich das bei senkrecht zur Axe überströmten Kreiszyklindern, wo die Ablöselinie bei laminarer Grenzschicht (kleine Reynolds-Zahl) nahe beim Äquator liegt, bei turbulenter (grosse Reynolds-Zahl) aber auf der Hinterseite.

Immerhin lässt dieser Umstand auch die Hoffnung zu, den von Prandtl gefundenen Trick anzuwenden, der darin besteht, bei kleinen Reynolds-Zahlen die sonst laminare Grenzschicht durch sog. «Stolperdrähte» künstlich turbulent zu machen und damit sozusagen höhere Reynolds-Zahlen zu imitieren. Bei Schiff-Schleppmodellversuchen, bei denen ähnliche Diskrepanzen zwischen den Modell- und Original-Reynolds-Zahlen vorliegen, wird dieser Kunstgriff viel angewendet. Zweifellos könnte ähnliches auch bei gewölbten Gebäudeflächen im Modell nützlich sein. Es liegen darüber vorderhand noch keine systematischen Untersuchungen vor.

Ein weiteres Problem ist das Verhalten nach der Ablösung, sofern weiter hinten noch längere Gebäudeflächen folgen. Hier kommt es vor, dass, anders als bei der ebenen Platte von Bild 2, ein *Wieder-Anliegen* der Strömung erfolgt. Die Frage ist, ob dieses Phänomen von der Reynolds-Zahl stark abhängt.

In Bild 5 sind für zwei verschiedene Reynolds-Zahlen die Grenzen der Ablösezone und die Druckverteilung über dem Vordach und der anschliessenden horizontalen Dachfläche aufgetragen. Es zeigt sich kein Einfluss der Reynolds-Zahl auf den Druck und nur eine kleine Verschiebung der Stelle des Wieder-Anliegens. Würde man die grössere Geschwindigkeit (22,6 m/s) anwenden, so könnte die Tiefe des Modelldaches von 44 cm auf 18 cm verringert werden, bei 45 m/s sogar auf 9 cm, ohne dass sich die Resultate ändern würden.

Zusammenfassend dürfen wir wohl den Schluss ziehen, dass mindestens im Falle *eckiger* Formen der Versuch gerechtfertigt erscheint, *kleine* Modelle (Grössenordnung 10 cm) zu verwenden. Selbstverständlich ist hier immer etwas Vorsicht am Platz. Man wird wenn immer möglich höhere Windgeschwindigkeiten anwenden, die ja auch den Vorteil grösserer Ausschläge der Druckmesser ergeben. Nur bei der Messung der zeitlichen

¹⁾ The Model-Law for Phenomena in Natural Wind. Reprint from «Ingeniøren» – International Edition – Volume 2, No 4; November 1958. Published by Dansk Ingeniørforening.

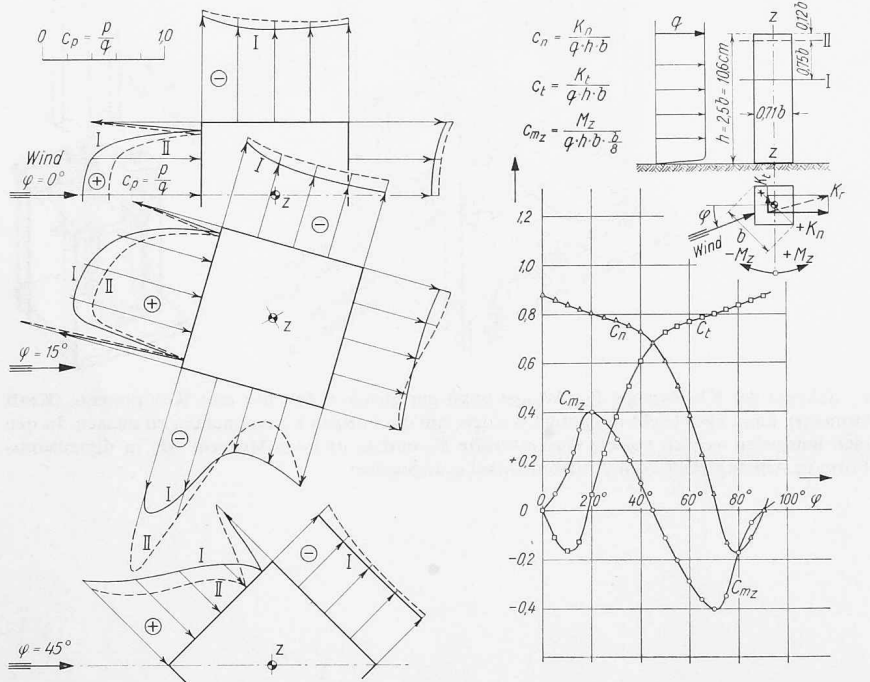


Bild 8. Beispiel b: Quadrat-Turmhaus. Definitionen und Ergebnisse in gleicher Weise dargestellt wie in Bild 7

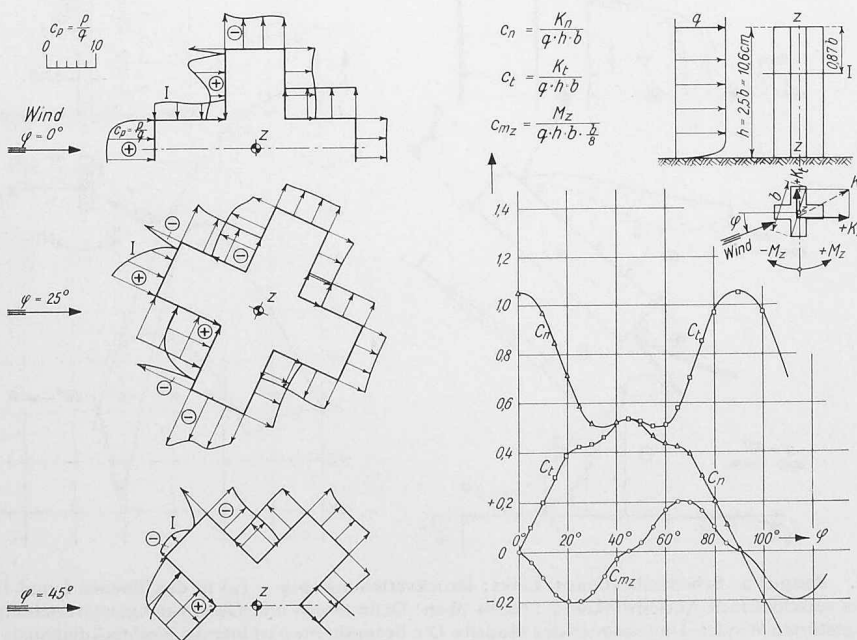


Bild 9. Beispiel c: Viertrakt-Hochhaus

Druckschwankungen, die dann gemäss der Ähnlichkeitsregel für nicht-stationäre Vorgänge bei kleinen Modellen rascher erfolgen, können möglicherweise Schwierigkeiten auftreten, die aber überwindbar zu sein scheinen.

Im nachfolgenden soll an Hand einiger Beispiele die Durchführung solcher «miniaturisierter» Versuche und eine Anzahl Messergebnisse gezeigt werden. Als Windkanal wurde eine konvergente Düse benützt. Der freie Luftstrahl, der durch ein vorhandenes Axialgebläse erzeugt wurde, hatte einen Durchmesser von 40 cm, und die Windgeschwindigkeit betrug maximal 13 m/s – entsprechend rd. 10 kp/m² Staudruck. Die verwendeten Hochhaus-Modelle ragten rd. 10 cm über eine den Grund darstellende ebene Platte (x, y-Ebene). Sie waren auf einer kleinen Mehrkomponentenwaage (Bild 6) montiert, die gestattet, Kraft- und Momenten-Komponenten zu messen²⁾. Freilich kann immer nur eine dieser Grössen auf einmal ermittelt werden; die Umstellung der Waage ist aber einfach. Da die Waage mit dem Modell um die z-Achse dreht, erhält man bei festem Luftstrom und vorgegebener Windrichtung relativ zum Modell direkt die Kraftkomponenten nach körperfesten Axen (Normalkraft K_n , Tangentialkraft K_t). Das ist aber für die statische Berechnung gerade erwünscht. Das Moment M_z um die Hochaxe z ist natürlich auch abhängig vom relativen Anströmwinkel φ . In den Bildern 7 bis 11 sind die dimensionslosen Kraft- und Momentenbeiwerte (c_n , c_t und c_{mz}) jeweils definiert. Das Wägeprinzip ist folgendes:

Durch die Luftkräfte wird das durch Hebel und Federzüge parallel geführte Modell zunächst etwas verschoben, bzw. gedreht. Diese Ausschläge werden durch einen mit Photozellen gesteuerten Servomotor rückgeführt, wobei ein Potentiometer den Rückführweg anzeigt und der Betrag des so gewonnenen Federaussschlages an einem Fein-Ampèremeter abgelesen werden kann, natürlich nach entsprechender Eichung.

Auf verschiedene Verfeinerungen, wie Anzeige des erreichten Gleichgewichtes und Verminderung der Reibung durch einen Vibrator, soll hier nicht eingegangen werden. Es hat sich ein gut linearer Verlauf der Eichkurve eingestellt; die Messgenauigkeit beträgt rd. 2%, was für unseren Zweck durchaus genügt. Es ist übrigens möglich, durch passende Umstellung der Waage auch die dritte Kraftkomponente K_z und ebenso die anderen Momente zu messen. – An entsprechenden Modellen mit Druckanschlüssen kann weiterhin die Druckverteilung bei allen Winkeln φ aufgenommen werden.

In den Bildern 7 bis 11 sind die Ergebnisse für fünf verschiedene Grundrissformen dargestellt. Die Verteilung der Windgeschwindigkeit mit der Höhe ist bis auf eine dünne Plattengrenzschicht rechteckig; es ist aber durchaus auch möglich, durch geeignete Hindernisse (Siebe) Verteilungen herzustellen, wie sie in Bild 4 (Jensen) zu sehen sind. Die Drücke sind für zwei Messebenen I und II und drei Winkel φ dimensionslos eingetragen; sie zeigen durch ihre komplizierten Verläufe, wie hoffnungslos der Versuch einer formel-

²⁾ Eine detaillierte Beschreibung der Waage mit Eichkurven usw. soll später erscheinen.

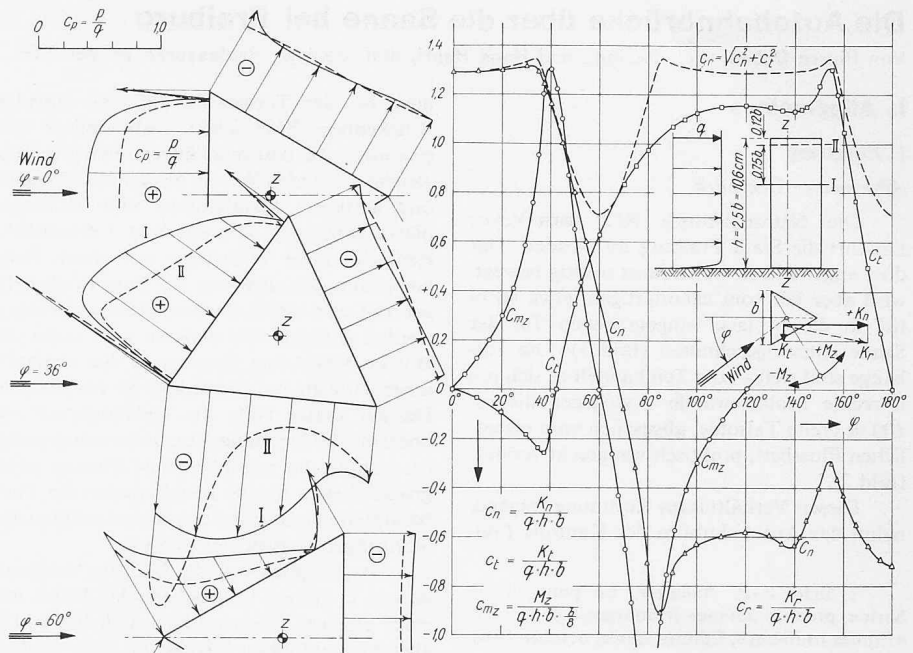


Bild 10. Beispiel d: Dreieck-Turmhaus

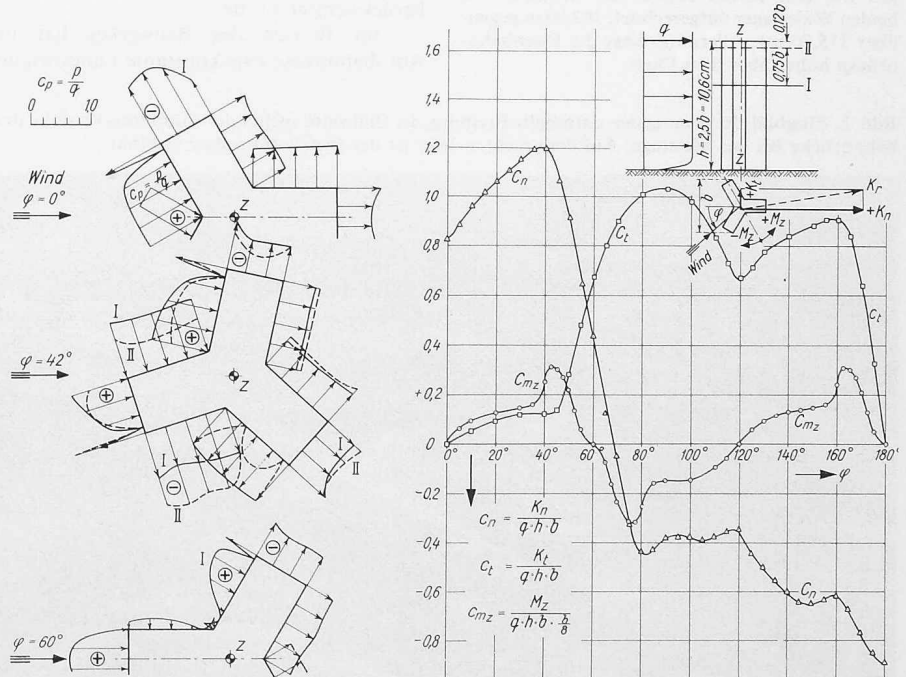


Bild 11. Beispiele: Dreirakt-Hochhaus

mässigen Darstellung ist. Dementsprechend zeigen auch die Koeffizienten der Kraftkomponenten und des z-Momentes einen starken Gang mit dem relativen Anströmwinkel φ .

Nachdem die kleine Versuchsanlage in zahlreichen weiteren Versuchen sich bewährt hat, und nachdem es möglich scheint, die Messdauer durch relativ einfache Massnahmen noch weiter zu verringern, dürfte es sich lohnen, diese Miniaturversuche weiter

zu prüfen und zu entwickeln. – Wir möchten freilich nicht verhehlen, dass auch bei diesen Messungen ein gewisses Mass von aerodynamischer und messtechnischer Erfahrung unbedingt erforderlich ist und dass vor einem dilettantischen Drauflosmessen mit allzu einfachen Apparaturen gewarnt werden muss.

Adresse der Verfasser: Prof. Dr. J. Ackeret und J. Egli, Institut für Aerodynamik ETH, Sonneggstrasse 3, 8006 Zürich.