

Aufstellung von Regeln für aerodynamische
Beiwerte, insbesondere für Baukörper mit
gekrümmten Oberflächen

T 537

T 537

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

AUFSTELLUNG VON REGELN FÜR AERODYNAMISCHE BEIWERTE
insbesondere für
BAUKÖRPER MIT GEKRÜMMTEN OBERFLÄCHEN

Dipl.-Ing. Walther Pieckert
7000 Stuttgart
Fichtelbergstr. 36

November 1979

Aufstellung von Regeln für aerodynamische Beiwerte
insbesondere für Baukörper mit gekrümmter Oberfläche

Inhaltsübersicht

- A. Einführung
- B. Besonderheiten bei der Ermittlung des Strömungs-
widerstandes von Kreiszyllindern und Kugeln
- C. Hinweis zur näherungsweise Erfassung anderer Formen
von Widerstandskörpern mit gewölbten Außenflächen
- D. Hinweise zur Auswertung von Messungen und Berechnungen
von Beiwerten
- E. Zusammenstellung der Beiwerte
- F. Literaturübersicht

Aufstellung von Regeln für aerodynamische Beiwerte insbesondere für Baukörper mit gekrümmter Oberfläche

A. Einführung

Aerodynamische Beiwerte sind dimensionslose Werte, die multipliziert mit Bezugsflächen, Bezugsdrücken und Bezugslängen, die Luftkräfte- und Momente an einem im Luftstrom stehenden Körper angeben.

Sie werden u.a. zur Bestimmung von Windlasten an Bauten verwendet (DIN 1055 Blatt 4). Mit ihnen sollen die auf Bauwerke und ihre Teile anzusetzenden Kräfte und Drücke möglichst wirklichkeitsnah erfaßt werden und damit eine den geltenden bautechnischen Bestimmungen entsprechende sichere Bemessung ermöglicht werden.

Die Beziehung

$$F = c \cdot q \cdot A, \text{ wobei}$$

F = Kraft

c = Beiwert

q = Dynamischer Druck der Anströmung (Geschwindigkeitsdruck, Staudruck)

A = Bezugsfläche

erweist sich bei genauerer Untersuchung als komplizierter als in früheren Windlastannahmen angenommen wurde.

Die Wahl der Bezugsflächen A ist das Ergebnis von Vereinbarungen. Im Bauwesen wird man praktischerweise bei Kraftbeiwerten die Fläche einer Projektion in einer der Hauptachsrichtungen des Bauwerkes nehmen. Zur besseren Übersichtlichkeit wird diese definierte Fläche auch für die

anderen möglichen Anströmrichtungen beibehalten. Hier wird man sich nach den praktischen Bedürfnissen des Anwenders richten müssen auch wenn dem Aerodynamiker andere Definitionen richtiger erscheinen.

Bei Momentenbeiwerten wählt man eine Länge am Bauwerk, die zu den Momenten in eindeutiger Beziehung steht.

Nachdem die Beiwerte c und die Art der auftreffenden Windanströmung bzw. -umströmung eng miteinander verknüpft sind, können die c -Werte immer nur für eine bestimmte Art der Anströmung definiert sein, z.B. für eine gleichförmige, homogene, turbulenzarme Anströmung.

Für eine solche Anströmung gelten bis heute die in in- und ausländischen Normen, Richtlinien, Standards usw. angegebenen Werte. Schätzungsweise 95% aller vorliegenden Meßergebnisse sind unter diesen eindeutigen und reproduzierbaren Bedingungen gewonnen worden. Nicht zuletzt aus Gründen der Sicherheit (auch der Rechtssicherheit) blieb man auch hier bei einer Zusammenstellung solcher Werte. Die Probleme und Fehlermöglichkeiten bei Übertragung auf die Großausführung sind bekannt, aber zum großen Teil erfaßbar und einzugrenzen.

Die Veränderlichkeit der mittleren Anströmgeschwindigkeit mit der Höhe ist bekannt, seitdem es überhaupt brauchbare Windlastnormen gibt. Man berücksichtigte dies dadurch, daß man gedanklich das Bauwerk in horizontale Scheiben unterteilte, deren Teilflächen man jeweils mit dem der Höhe entsprechenden Staudruck und dem eigentlich nur für das Gesamtbauwerk in der homogenen Anströmung festgestellten Kraftbeiwerte multiplizierte also

$$F = c_b \cdot \sum_1^n \Delta A_i \cdot q_i \text{ setzte.}$$

Messungen an Baukörpern üblicher Proportionen in Windkanälen mit einem etwa simulierten Geschwindigkeitsprofil zeigten, daß dies mindestens für die Kraftbeiwerte durchaus vertretbar ist.

Tatsächlich kann ein solches Geschwindigkeitsprofil nicht ohne die Bodenreibung, die topographischen Verhältnisse und die Turbulenzverteilung gesehen werden. Wollte man aber diese Bedingungen in jedem Einzelfall in einer "geschlossenen" speziellen Windlastannahme berücksichtigen, so entstünde eine schwierige und unsichere Lage für alle Beteiligten.

Je nach Bodenreibung besteht eine andere Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit (10 Min. Mittelwert) von der Höhe über Gelände und auch der Turbulenz, die ihrerseits wieder die Größe der Spitzenböen und deren Abhängigkeit von der Höhe bedingt. Die Einhüllende dieser Spitzenwerte entspricht im allgemeinen der in den geltenden Normen angegebenen Geschwindigkeitsverteilung $v(z)$, die man in einigen Fällen durch gerade Linien oder auch durch Stufenlinien angenähert hat.

Es gelingt jedoch mit noch tragbarem Fehler die Festlegung einer einheitlichen Bezugslinie für $v(z)$ insofern, als zwar die 10 Min.-Geschwindigkeiten mit zunehmender Reibung kleiner werden aber die Turbulenz und die durch sie bedingten zusätzlichen fluktuierenden Geschwindigkeitsanteile, die der 10 Min.-Geschwindigkeit überlagert werden stark zunehmen. Damit werden die Spitzenwerte v unabhängig von der Bodenreibung wieder annähernd gleich in ihrer Höhenabhängigkeit (siehe Abbildung S. 5). Dieser vereinfachende Ansatz vermeidet bereits einen großen Teil der Komplikationen. Andernfalls müßten in einer Beiwertsammlung jeweils 3 oder 4 Beiwerte für die verschiedenen Rauigkeitsklassen angegeben werden, deren Verwendung dann mehr oder weniger dem Benutzer überlassen bleibt.

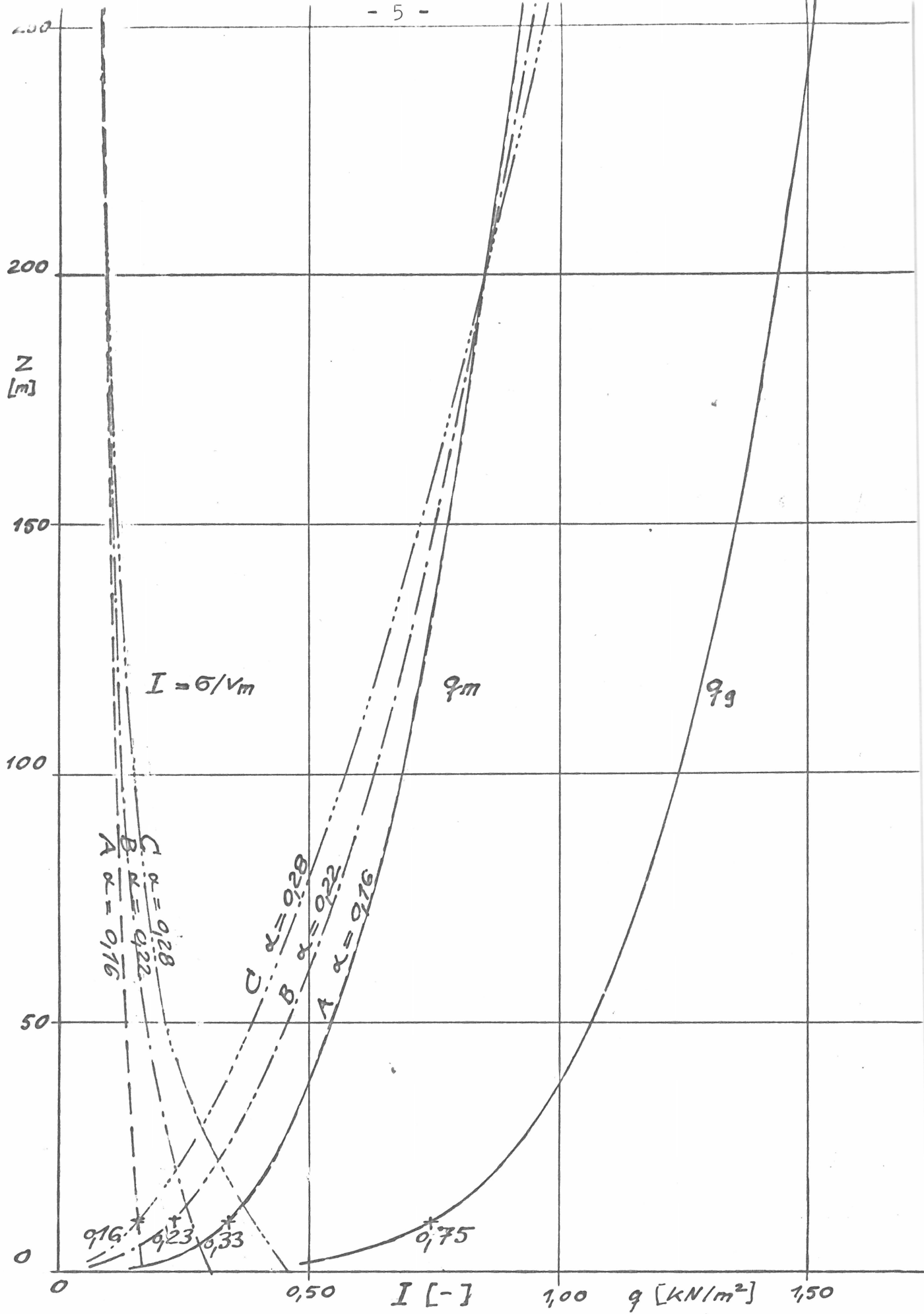


Abb 1 Begründung einheitlicher q_m bzw. q_g -Werte unabhängig von der Rauigkeit

Ebenso kann der Einfluß der unterschiedlichen Topographie oder auch der Bebauung in der Nachbarschaft nicht in praktischer Weise durch spezielle Beiwerte erfaßt werden sondern bestenfalls durch eigene Zusatzfaktoren zur Verteilung der Geschwindigkeitsdrücke mit der Höhe. Diese Einflüsse gehen also nicht in die Beiwertsammlung ein.

Während die Kraftbeiwerte aus den verschiedenen vorliegenden Windkanalversuchen sich mit geeigneten Überlegungen auf einen Nenner bringen lassen (Hinweise werden später noch gegeben), ist dies bei den Druckbeiwerten nicht immer möglich, wie die späteren Ausführungen zeigen. Auch hier können jedoch Grenzwerte und Tendenzen angegeben werden.

Die vielfältigen sogen. Grenzschichtkanäle sind eine gelegentlich sehr nützliche Sonderentwicklung, erleichtern aber nicht die Lösung der hier angeschnittenen Probleme. Eindeutigkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen sind bis heute nicht gegeben und wohl auch gar nicht möglich wegen der Vielzahl der zu berücksichtigenden Parameter. Problematisch sind vor allem zu kleine Modellgrößen (Reynoldszahleinfluß), das Verhältnis von Grenzschichtdicke je nach Grenzschichttyp zu den Bauwerksabmessungen, unterschiedliche Energiespektren und Korrelationswerte, Nichtberücksichtigung der thermodynamisch bedingten Turbulenz, die in größeren Höhen (über 50 m) nicht mehr zu vernachlässigen ist sowie die erhöhte Laufgeschwindigkeit der extrem großen Wirbel. Immerhin konnten die bisherigen Versuche in den sogen. Grenzschichtkanälen einige wichtige Hinweise auf das unterschiedliche Verhalten im Modellversuch und in der Großausführung geben.

Das Ziel dieser Arbeit ist aber dem praktisch tätigen und Verantwortung tragenden Bauingenieur soweit wie möglich eindeutige und sichere Werte für die Konstruktions- und Bemessungsarbeit zu geben. Nachdem heute in vielen Fällen die Windlasten die Hauptlasten am Bauwerk darstellen, andererseits die Werkstoffausnutzung nach genaueren Messungen und verfeinerten Sicherheitskonzepten sehr weit geht, mußte bei allen hier angegebenen Windlastangaben und vor allem den Beiwerten jeweils die Zuverlässigkeit der Aussagen kritisch überprüft werden mit Fehlerabschätzung und Untersuchungen, wie bei anderen Grundbedingungen sich solche Werte verändern können. In Zweifelsfällen mußten die "auf der sicheren Seite" liegenden Werte genommen werden. Dem bemessenden Bauingenieur können normalerweise eigene kritische Literaturstudien und die Überprüfung der Messbedingungen der ihm vorliegenden Versuchsergebnisse für spezielle Einzelfälle vor allem wenn sie besonders günstige Werte geliefert haben nicht zugemutet werden. Die ihm jetzt angegebenen Werte muß er unmittelbar übernehmen können. Dasselbe gilt natürlich für die kontrollierenden und prüfenden Stellen, z.B. der Bauaufsicht.

Die im letzten Abschnitt zusammengestellten Beiwerte sind also "sichere Werte", die aus kritisch untersuchten Modellversuchen entommen wurden bzw. unter Verwendung der neusten Literatur umgerechnet oder auch extrapoliert wurden. Diese gewisse Probleme enthaltenden Umrechnungen sind speziell erforderlich für die in diesem Bericht angesprochenen Körper.

Aus Kostengründen und aus Gründen der Modelltechnik decken die Versuche nur eine geringe Zahl von Formen und vor allem Kennzahlbereichen ab. Es erschien richtiger für die Bereiche, die die Praxis braucht und für die keine unmittelbar verwendbaren Messwerte vorlagen im einzelnen begründete

Extrapolationen und Abschätzungen vorzunehmen. Andernfalls würde man alle Festlegungen in diesen Bereichen dem "freien Spiel der Kräfte" überlassen. Der Schaden wäre erfahrungsgemäß unvergleichlich größer. Es bleiben ohnehin noch sehr große Lücken, die nur durch viele systematische Versuche noch zu füllen sind. Teure Einzelversuche an Großausführungen unter ganz bestimmten Bedingungen, die vielfach nicht einmal reproduzierbar und damit umrechenbar ermittelt wurden, sind hier weniger brauchbar, da sie sich meist nicht auf andere Situationen übertragen lassen und nicht überprüfbar sind.

Die im Abschnitt E angegebenen Beiwerte sind Teil einer größeren Beiwertsammlung und beziehen sich auf Widerstandskörper mit gekrümmten Oberflächen, deren aerodynamische Eigenschaften sich meist stark unterscheiden von denen scharfkantiger Körper mit ebenen Flächen ebenso aber auch von Gitter- und Fachwerkstrukturen.

Im Abschnitt B wird auf diese Besonderheiten vor allem die Umrechnung auf höhere Reynoldszahlen am Beispiel der Zylinder und der Kugeln eingegangen. Diese Ausführungen gelten auch größtenteils für andere Formen dieser Klasse, während sie für scharfkantige ebenflächige Körper kaum eine Rolle spielen.

B. Besonderheiten bei der Ermittlung des Strömungswiderstandes an Kreiszyllindern (elliptischen Zylindern) und Kugeln (Ellipsoiden).

Nachstehende Hinweise sollen zum besseren Verständnis der Bewertungen und Extrapolationen von Messungen an derartigen Widerstandskörpern dienen.

Die ersten Windlastannahmen (Widerstandsannahmen) gingen davon aus, daß die rechtwinklig zur gleichförmig angenommenen Anströmung liegende Projektionsfläche eines Wider-

standskörper A die kinetische Energie der dort auftreffenden Luftmassen übernimmt, d.h. auf den Spitzenstaudruck q bezogen wäre der Widerstand nach dieser Überlegung

$$F_w = c_f \cdot q \cdot A \text{ mit } c_f = 1,0.$$

Diese Ansätze wurden später (Helmholtz) dadurch verfeinert, daß man als wirksamen Körper auch das innerhalb der Ablösestromlinien liegende Nachlaufgebiet einsetzte und damit bei kantigen Widerstandskörpern zu $c_w > 1,0$ gelangte und bei Widerstandskörpern mit gebogenen Außenflächen (Stromlinienkörpern usw.) zu $c_w < 1,0$.

Der Widerstand eines Körpers ergab sich bei weiteren Überlegungen aus der Resultierenden aller auf seine Oberflächen wirkenden Normaldrücke (Druckwiderstandsanteil) und aus der Oberflächenreibung. Die Druckverteilung am Körper aber hängt größtenteils von der Form und Lage des Gebietes ab, in dem sich die wandnahe Strömung von der Körperoberfläche abgelöst hat. Die am Ablösepunkt herrschenden Strömungsverhältnisse bestimmen weitgehend den Unterdruck im Ablösegebiet ("Rückseitendruck") und damit den im allgemeinen größeren Anteil des Druckwiderstandes (Tanner, Kolscher, Bearman, Roshko, Hsu, Achenbach, Flachsbart u.a.). Die Form der Umströmung eines Widerstandskörpers gibt einen ersten guten Beurteilungsmaßstab bei der rechnerischen Widerstandsermittlung vor allem bei Körpern mit gebogenen Oberflächen.

Bei prismatischen Widerstandskörpern, wie z.B. sehr langen dreikantigen Prismen (Keilen) liegen die Abrißkanten fest, d.h. mit einer den Nachlaufbereich (Ablöseblase) simulierenden angenommenen Verlängerung des Widerstandskörpers, die in mehreren Schritten zu ermitteln ist, lassen sich die Potentialströmungen im Außenbereich sehr gut rechnerisch erfassen (Quell-Senken-Methode) und damit auch die Strömungsverhältnisse am Ablösepunkt und an der Körperrückseite (Walz, Kolscher, Weiß, Betz, Kraemer, Taylor, Simmons, Durand).

Während bei den scharfkantigen Körpern z.B. den Dreikantprismen die Ablöselinien und damit der Widerstandsbeiwert für verschiedene Anströmgeschwindigkeiten sich mit guter Näherung allein aus den geometrischen Verhältnissen ableiten läßt, ist bei Widerstandskörpern mit gebogenen Oberflächen der Ablösepunkt stark abhängig von den Verhältnissen in der wandnahen Schicht. Mit der von Prandtl eingeführten Abtrennung dieses Bereiches (der sogen. "Grenzschicht") von der vorerst näherungsweise als Potentialströmung angesehenen Außenströmung ergaben sich erst die Möglichkeiten einer theoretischen Erfassung der Verhältnisse in dieser Grenzschicht vor allem ihrer Stabilitätsverhältnisse. Ermittlungen der Lage des Umschlages von der laminaren (geschichteten) zur turbulenten (verwirbelten) Grenzschichtströmung (Schlichting, Mangler, Pretsch) waren jetzt ebenso möglich, wie die theoretische Bestimmung des laminaren bzw. turbulenten Ablösepunktes an einem Widerstandskörper (Gruschwitz, Buri, Schultz-Grunow, Wieghardt).

Für Zylinder aber auch für Ellipsoide und für Kugeln und andere ähnliche ebene und räumliche Probleme ergab sich eine Reihe guter Iterationslösungen wobei ähnlich wie für die Umströmung eines prismatischen Keiles das Ablösegebiet zur Körperkontur hinzugenommen werden konnte. Damit aber waren wieder für den "Gesamtkörper" die Druckverteilungen zu ermitteln (Moriya, Riegels, Weiß, Bearman).

Die Stabilität der Reibungsgrenzschicht hängt bei gleichförmiger Anströmung ab von den Druckgradienten an der Wand und den Weglängen sowie von der Zähigkeit der Luft. Die den Einfluß dieser Größen zusammenfassende Reynoldszahl $Re = v \cdot D/\nu$ wird damit die maßgebende Kenngröße. D kennzeichnet hierin nicht nur die Weglängen sondern

auch die Krümmungsverhältnisse und damit den Druckgradienten in der Außenströmung. Dies ist wichtig bei Versuchsauswertung an elliptischen Zylindern, Prismen mit abgerundeten Ecken usw., wo man besser die Krümmungsradien in die Reynoldszahl einsetzt.

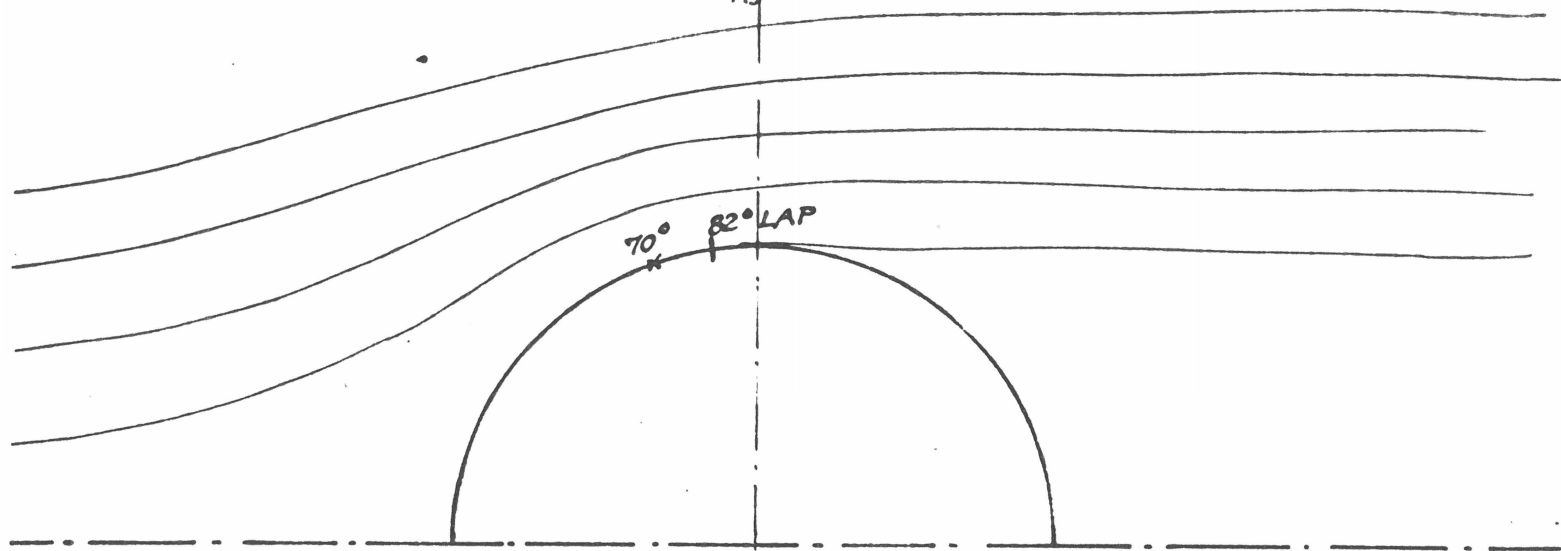
Für den unendlich langen Kreiszyylinder (im Windkanal dargestellt durch Modelle mit sehr großen Endscheiben oder mit durch die geschlossene Meßstrecke durchgestreckten Modellen) zeigte sich, daß bei glatten Zylindern bis $Re \sim 0,35 \cdot 10^6$ die laminare Grenzschicht ohne Umschlag bis zur Ablösung erhalten blieb. Die laminaren Ablöselinien lagen dann zwischen $\varphi = 75^\circ$ und 85° . Bei einem Ablösepunkt in dieser Lage ist, wenn man hier den Gesamtwiderstandskörper durch die Einbeziehung der Nachlaufschleppe vervollständigt, der größte seitliche Unterdruckbeiwert etwa $-1,00$ bis $-1,20$ und liegt zwischen 65° und 80° . Am Ablösepunkt selbst ist der Unterdruckbeiwert etwa $-0,75$ bis $-0,90$ mit entsprechend hohen Rückseitendrücken c_{p180} . Hiermit ergibt sich ein Widerstandsbeiwert $c_w = 1,20$ für den sehr langen Zylinder im "unterkritischen Zustand" (laminare Ablösung).

Bei höheren Reynoldszahlen schlägt die laminare Grenzschicht wegen ihrer Instabilität bereits vor der Ablösung um zur Turbulenz. Die turbulente Grenzschicht mit ihren starken Energiezuführungen durch die Außenströmung löst sich dementsprechend erst bei einem weiter zurückliegenden größeren positiven Druckgradienten ab, d.h. beim quer angeströmten Zylinder nicht mehr bei $\varphi = 80^\circ$ sondern etwa $\varphi = 120^\circ - 142^\circ$. Entsprechend wird auch der Unterdruck an der Ablösestelle wesentlich kleiner mit einem Beiwert $c_p \sim -0,35$. Das Volumen des Ablösungsbereiches wird gegenüber den unterkritischen Werten auf etwa 35% verkleinert. Die Umströmung bei dieser Reynoldszahl wird damit fast ähnlich der der wirbelfreien Potentialströmung wie sie sich auch ungefähr bei sehr schnell angefahrenen Strömungen ausbilden kann. Mit höheren Re-Zahlen

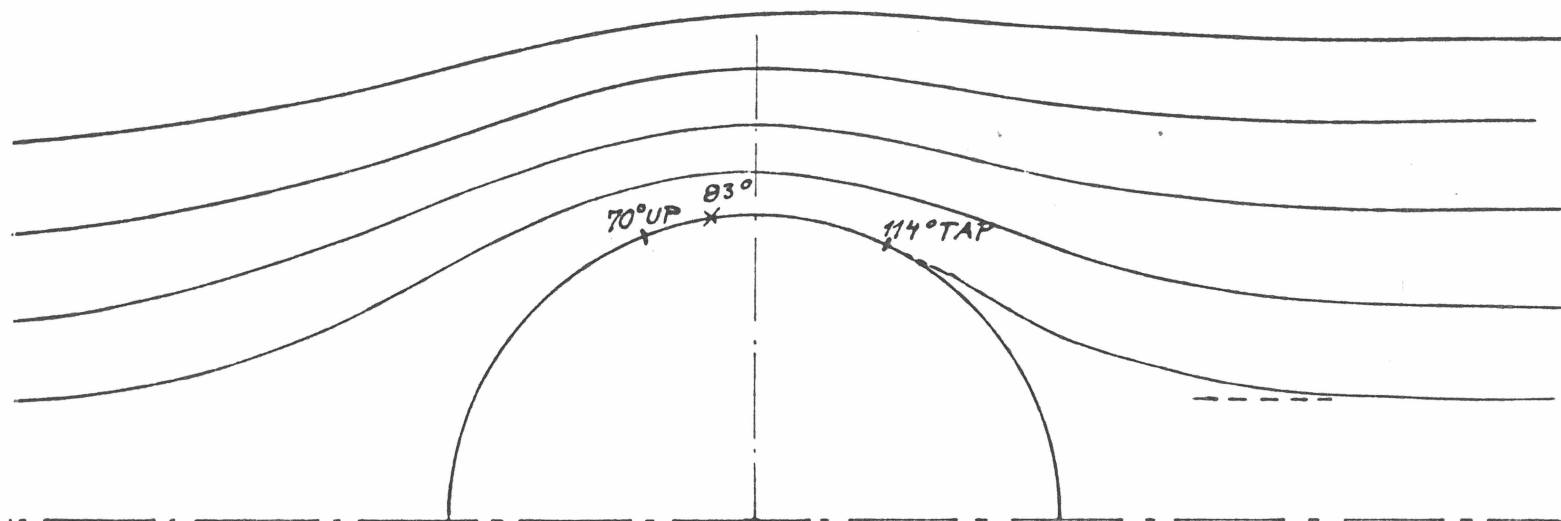
rückt in der gleichförmigen Anströmung der Umschlagpunkt und der Ablösepunkt wieder weiter nach vorn bis etwa 65° . Bei sehr großen Reynoldszahlen, d.h. über 2×10^7 liegen die Ablösepunkte (turbulent) rechnerisch bei etwa 80° bis 90° , d.h. etwa wieder dort wo der laminare Ablösepunkt im unterkritischen Zustand gelegen hatte. Entsprechend sind auch die Druckverteilungen sehr ähnlich und die Rückseitendrücke steigen wieder an auf $-0,86$ bis $-0,94$ (Achenbach). Diese Überlegungen weisen auf einen oberen Grenzwert $c_w = 1,20$ für Zylinder bei sehr großen Reynoldszahlen hin.

Bei rauhen Oberflächen (die meisten technischen Bauwerke sind mehr oder weniger rau) nimmt die Grenzschichtdicke schneller zu als am glatten Zylinder. Damit rücken Umschlagpunkte und Ablösepunkte auch wesentlich früher nach vorne. Dies ist schematisch in Abbildung 2 aufgetragen. Die Abbildung S. 14 gibt einen Teil der vielfältigen Meßwerte und die daraus zu entnehmenden Tendenzen wieder.

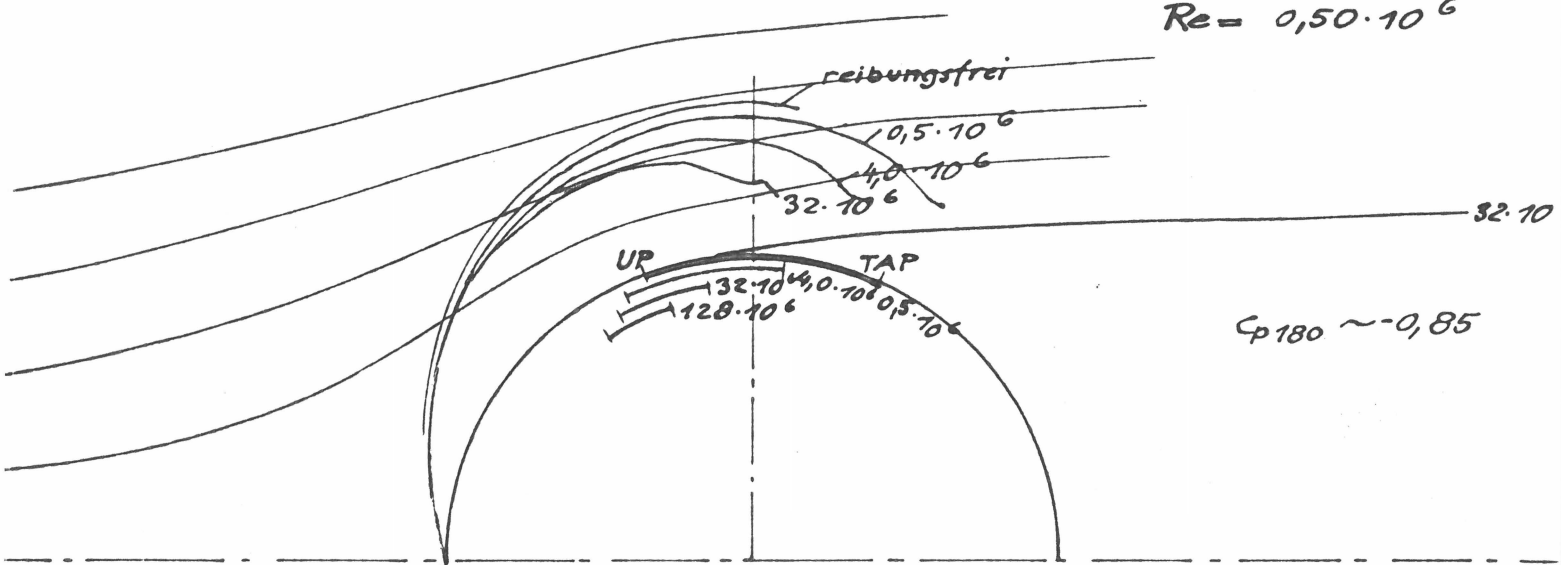
Über die Strömungsverhältnisse im Nachlauf sagen diese Überlegungen noch nichts aus. Die schon frühzeitig beobachteten Wirbelerscheinungen im Nachlauf langer Prismen und Zylinder (Bénard) erfaßte von Kármán erstmals theoretisch 1911 und stellte fest, daß hierbei mindestens 2 ziemlich stabile Konfigurationen von Wirbeln auftreten können. Seine mathematischen Ansätze zur sogen. Wirbelstraße, die übrigens keine Reibungswirkungen enthalten, zeigten daß auch bei turbulenzfreier homogener und gleichförmiger Anströmung die Energie im Nachlauf umgesetzt wird in Wirbelenergie und dies einen erheblichen Impulsverlust und damit "Widerstand" bedingt, abhängig von der Lage der Ablösepunkte am Zylinder, Unmittelbar oberhalb der kritischen Reynoldszahl wo die Ablösepunkte sehr weit zurückliegen, ist eine geordnete Wirbelanordnung kaum noch feststellbar. Bei sehr hohen Reynoldszahlen mit wesentlich



$Re = 0,16 \cdot 10^6$



$Re = 0,50 \cdot 10^6$



$C_{p180} \sim -0,85$

Geschwindigkeitsverteilungen $v(\vartheta)$, Umschlagpunkte UP und turbulente Ablösepunkte TAP, abhängig von $Re = \frac{v_{\infty} \cdot D}{\nu}$

Abb 2. Zylinder $\Lambda = \infty$. Grenzschichtdaten und Strömungsformen abhängig von Re .

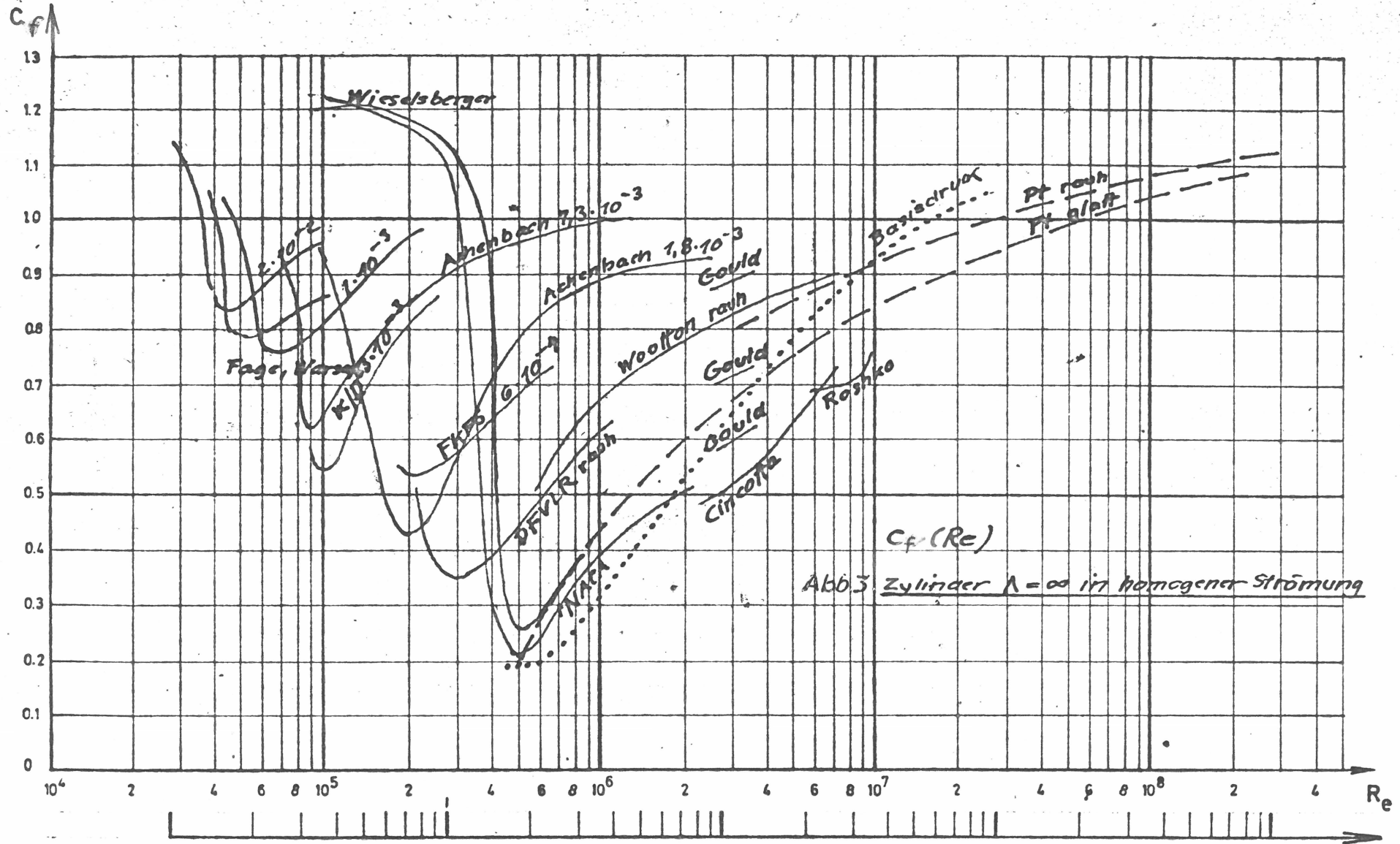


Abb. 3 Zylinder $\lambda = \infty$ in homogener Strömung

breiterer Nachlaufschleppe und Strouhalzahl $S = 0,25$ zeigen sich wieder sehr stabile Wirbel, die auch bei turbulenter Anströmung kaum beeinflusst werden (Naumann, Ruscheweyh). Dies ist nicht eine notwendige aber eine hinreichende Vorbedingung für hohe Widerstandsbeiwerte. Selbstverständlich beeinflussen die wechselseitigen Wirbelablösungen auch die Strömungsverhältnisse vor der Ablösung und bedingen eine wechselseitig periodische Verschiebung der Ablösepunkte. Bei sehr großen Reynoldszahlen schwanken diese Ablöselinien zwischen 75° und 95° .

Bis heute nicht befriedigend erfaßt sind die Verhältnisse bei turbulenter Anströmung und dies ist die für Bauwerke geltende Anströmungsform. In den bodennahen Luftschichten in denen unsere Bauwerke stehen ist die Turbulenz abhängig von der Bodenreibung, der Wetterlage und dem Starkwindtyp. Über 50 - 100 m tritt neben der Bodenreibung die Thermodynamik als Ursache der Turbulenz wesentlich in Erscheinung. Die Anströmung ist nicht mehr gleichförmig und stationär.

Die Windgeschwindigkeit setzt sich etwa zusammen aus einem über einige Minuten konstant anzunehmenden Grundgeschwindigkeitsanteil (10 Min.-Mittelwert) \bar{v} und einem fluktuierenden Anteil v' mit den Komponenten v_x' , v_y' und v_z' , die untereinander verknüpft sind durch die Wirbelnatur der Turbulenzerscheinungen (Taylor, Bradshaw, Townsend u.a.). Man erfaßt diese zufallsverteilten Erscheinungen statistisch über die Verteilungen der Schwankungsgrößen v_x'/\bar{v} , v_y'/\bar{v} und v_z'/\bar{v} und die entsprechenden Standardabweichungen σ_x/\bar{v} usw. Sie bezeichnet man als Turbulenzintensitäten. Insgesamt kann man nach dem Vorschlag von Davenport durch Herausnahme bestimmter Zeiträume im Starkwind gewisse Frequenzdichtespektren eingrenzen und normieren. Diese sind natürlich abhängig von der Höhe über Gelände, Richardsonzahl usw. Für praktische Zwecke konnte

jedoch ein einheitliches Frequenzdichtespektrum angesetzt werden (hierzu auch Wyatt, Kaimal, Panofsky u.a.).

Erst damit war ein mathematischer Zugang zu den praktischen Problemen möglich geworden. In Bodennähe und bei sehr großen Störungen und Bodenrauhigkeiten kann der Turbulenzgrad sehr hoch werden (0,30 und mehr) doch nimmt die Turbulenz mit der Höhe stark ab. Mit kleinerer Turbulenz wird andererseits der Einfluß auf die vorher genannten Strömungserscheinungen kleiner. Beispielsweise wird durch die Turbulenz der Aufbau der Wirbelstraße nicht grundsätzlich verändert, doch verändert sich die Qualität der Druckverteilungen durch Erhöhung der seitlichen Unterdrucke und Abbau des Basisdrucks.

Für Körper mit gewölbten Oberflächen bedeutet eine sehr starke Turbulenz, daß die vorstehenden Überlegungen zum Einfluß der Reynoldszahl auf die Beiwerte modifiziert werden müssen.

Bei der in Höhen über 50 - 100 m bei etwa 0,08 liegenden Turbulenzintensität werden die Hypothesen über ihren Einfluß auf Druckverteilungen und Beiwerte schon schwierig. Andererseits erwartet der Bauingenieur, daß ihm in seinen technischen Baubestimmungen glaubhafte und auf der sicheren Seite liegende Werte zur Verfügung gestellt werden und nicht nur eine Liste ungelöster Probleme auf dem Gebiete der turbulenten Strömungen. Solche Überlegungen und Festlegungen von Werten sind also notwendig, doch sieht der Verfasser etwa bei einer Turbulenzintensität über 0,10 auch bei sehr hohen Reynoldszahlen über 2×10^7 derzeit eine Grenze. In Anbetracht dessen, daß sich, wie auch sämtliche Vorschriften annehmen, die Bebauung der Umgebung erheblich ändern kann und damit auch der Turbulenzgrad, ist eine solche Beschränkung auf niedrige Turbulenzgrade nicht besonders hinderlich oder unwirtschaftlich.

Die Forschungsergebnisse, Messungen und Hypothesen zum Widerstand angeströmter Zylinder aus den letzten 40 Jahren erscheinen teilweise widersprüchlich. Selbst wenn man grobe Meßfehler ausschließt oder ausgleicht, zeigen die Messungen an Großausführungen zylindrischer Baukörper (Kamine, Fernmeldetürme, Kühltürme) c_f -Werte zwischen 0,55 und 1,00, seitliche Unterdrücke zwischen -2,00 und -1,10 und Rückseitendrücke zwischen -0,40 und -0,94 (Mittelwerte, bei Schwankungen bis -1,60), auch wenn man überall als Bezugsgröße einen Spitzenstaudruck mit 5 sec. Mittelwertbildungszeit einsetzt. Bei Berücksichtigung der verschiedenen Streckungsverhältnisse, Interferenzen, Turbulenzintensitäten und Rauigkeiten wird diese Streuung erheblich herabgesetzt, doch bleibt der Einfluß der Turbulenz auf die Beiwerte schwer erfaßbar. Versuche mit "geteilten Beiwerten" für die nach Wellenzahl aufgeteilten Anteile in der Anströmung zu rechnen, erscheinen in mehrfacher Hinsicht zweifelhaft. Auftragungen von c_f (T) führten zu recht unterschiedlichen Ergebnissen. Einmal wurde behauptet, daß mit abnehmendem T diese Teilbeiwerte von 1,20 auf 0 monoton abnahmen, doch ermittelten andere Forscher (Yang) noch Zwischenmaxima mit $c_f = 1,25$ für eine Mittelwertbildungszeit von etwa $T = 1,4 D/v$, d.h. bei einem großen Kamin etwa bei 0,5 sec. Dies legt nahe nicht besonders niedrige einmalige Werte auszusuchen, sondern die auf der sicheren Seite liegenden im Teil E angegebenen Werte.

Nicht-reversible Vorgänge, die größtenteils durch die akkumulierenden Wirkungen der Reibung bestimmt sind, lassen sich nicht in Anteile zerlegen und dann wieder überlagern auch wenn in manchen Fällen dadurch gewisse Zuordnungen besser erkennbar werden. Nur bei extrem kurzen Einwirkungen erscheint es verständlich, daß sich Umströmungen ähnlich wie in einer Potentialströmung, d.h. mit

geringen Widerstandsbeiwerten ausbilden (Prandtl, Föttinger). Bei höherer Turbulenz ergeben sich also im allgemeinen kleinere c_f -Werte als bei schwacher Turbulenz, kleinere Rückseitendrücke aber gleichzeitig auch höhere seitliche Unterdrücke und gelegentlich auch erhöhte Überdrücke auf der Frontseite.

Diese bekannten Tendenzen wurden in den gegebenen Diagrammen für den unendlich langen glatten bzw. rauhen Zylinder dadurch berücksichtigt, daß für $I = 0,08$ eine Verschiebung der c_f (Re)-Kurve auf 75% - 85% der Werte vorgenommen wurde, die für die homogene turbulenzarme Strömung rechnerisch gelten würden. Die Begründung liegt in der stärkeren Verschiebung der Ablösepunkte und Energiezufuhr in das Nachlaufgebiet. Es erschien nicht vertretbar, die in manchen Sonderfällen (Fernsehtürme und Leuchttürme in sehr starker turbulenter Anströmung) ermittelten noch wesentlich niedrigeren Widerstandsbeiwerte für alle bei der Bemessung von Bauwerken auftretenden Fälle zu übernehmen. Neuere ausländische Normen und Richtlinien haben für unendlich lange glatte Zylinder bei sehr hohen Reynoldszahlen $c_f = 0,90$ und bei rauhen Zylinder $c_f \sim 1,20$ eingesetzt (CP 3 (1972), Önorm B 4014 u.a.).

Der Einfluß der Rauigkeit auf die c_f -Werte ist am stärksten im Bereich $0,10 \cdot 10^6 < Re < 4 \cdot 10^6$. Für sehr hohe und sehr niedrige Reynoldszahlen laufen diese Werte für die verschiedenen Rauigkeiten weitgehend zusammen, wie sich aus dem ungünstiger werdenden Verhältnis von Rauigkeitshöhe zur Grenzschichtdicke (nimmt nur mit $Re^{0,80}$ zu) bei größeren Re-Zahlen ergibt. Für $Re = 10^8$ ist bereits $K/D \geq 10^{-5}$ als rau anzusprechen. Weiterhin darf nicht vergessen werden, daß die Druckverteilungen an den Seiten der Zylinder bei kleineren c_f -Werten auch größere Unterdruckbeiwerte zeigen, die für eine wirtschaftliche Bemessung gleich wichtig werden können wie der Gesamtwiderstand.

Der Einfluß der Streckung wird entsprechend den Untersuchungen von Flachsbart, Wieselsberger, Kraemer u.a. in ähnlicher Weise erfaßt wie bei langen Platten und Prismen. Dabei ist zu berücksichtigen welcher Art der obere Abschluß ist. Offene Mündungen bei Kaminen und Kühltürmen können die Ergebnisse ähnlich beeinflussen wie eine größere Streckung. Abgesehen von den Eigenarten der Ablösevorgänge bei den Zylindern sind die Umströmungen und der Einfluß der "Anteile" an räumlicher und ebener Strömung durchaus vergleichbar mit denen an Prismen und Plattenstreifen.

Für die Kugeln stehen noch weniger Untersuchungen bei höheren Reynoldszahlen zur Verfügung als für die langen Zylinder. Bei kleinen Re-Zahlen und homogener turbulenzarmer Anströmung findet auch bei der Kugel eine laminare Ablösung statt, die etwa bei $\varphi = 90^\circ$ liegt, da verglichen mit der ebenen Strömung die räumliche Strömung bei der Kugel auf der Vorderseite noch bis zum Äquator stark beschleunigt wird. Mit dem Umschlag zur turbulenten Grenzschicht rückt auch der turbulente Ablösungspunkt nach hinten mit Verkleinerung der Rückseitenunterdrücke und stärkerer Verringerung des Nachstromvolumens als bei der ebenen Strömung. Damit treten bei der Kugel unmittelbar oberhalb der kritischen Grenze $c_f \leq 0,10$ auf (Hoerner, Wieselsberger, Hsu u.a.). Bei höheren Re-Zahlen rückt der turbulente Ablösepunkt wieder nach vorne und liegt bei sehr großen Re-Zahlen wie die Rechnung ergibt wieder bei etwa 90° . Nachdem bei der räumlichen Umströmung die größten Übergeschwindigkeiten nur etwa 75% der bei der ebenen Strömung betragen (Potentialströmung zum Vergleich) liegen die Unterdrücke an der Ablösestelle und die Rückseitendrücke bei etwa 55 - 60% der Werte am Zylinder. Die Widerstandsbeiwerte der freistehenden Kugel liegen bei $c_f = 0,55$ bis $0,65$ unterkritisch und bei sehr hohen Reynoldszahlen jedenfalls unter der Grenze $c_f = 0,60$. Aus

den gleichen Gründen wie bei den Zylindern erscheint eine weitere Abminderung dieses Wertes zur Berücksichtigung der Turbulenz auf etwa 70% - 85% möglich. Geregelt große Wirbel im Nachlauf von Kugeln sind zwar bisher nicht beobachtet worden, doch kann vermutet werden, daß bei homogener Anströmung und sehr hohen Re-Zahlen auch an Kugeln mindestens 2 ziemlich stabile (bei zäher Strömung) Wirbelkonfigurationen möglich sind, d.h. einmal nach innen drehende Wirbelringe mit etwa 3,0 D bis 3,5 D Abstand zum anderen ein gewendelter Wirbel mit periodisch umlaufender Ablösestelle und etwa 5 D Ganghöhe. Grundsätzlich erscheinen auch für Kugeln und Rotationsellipsoide geregelte Wirbelablösungen mit allen Folgeerscheinungen (Querschwingungen, Längsschwingungen, Taumelschwingungen) möglich. Für die Praxis, in der Kugeln bisher nur als Großbehälter oder als Radome eingesetzt werden, dürften diese Erscheinungen vorerst ohne Bedeutung sein.

Aus den für die Grundformen des Kreiszyllinders und der Kugeln geltenden Regeln lassen sich für elliptische Zylinder und Ellipsoide entsprechende Werte ableiten, die mit den wenigen vorhandenen Messungen gut übereinstimmen. Auch für Kleeblatt-Querschnitte oder Dreikant- oder Vierkantprismen mit stark abgerundeten Kanten lassen sich aus diesen Überlegungen mit ausreichender Genauigkeit Werte ermitteln.

Für solche Sonderformen ergeben sich jeweils ähnliche Strömungsbilder im äußeren Strömungsfeld wie für elliptische Zylinder gleicher Breite, wenn deren Krümmungsradien denen des Widerstandskörpers an den Außenseiten entsprechen. Bei Umrechnung auf andere Re-Zahlen muß der doppelte Krümmungsradius und nicht die Körperbreite eingesetzt werden. Auf diese Weise ergibt sich auch eine richtige Einordnung der wenigen an elliptischen Zylindern gemessenen Werte. Für sehr große Re-Zahlen ergeben sich wieder Werte $c_f \sim 1,1$.

C. Hinweise zur näherungsweise Erfassung anderer Formen von Widerstandskörpern mit gewölbten Außenflächen

Nicht in allen Fällen ist es möglich Windkanal-Modellversuche im richtigen Maßstab rechtzeitig durchzuführen. Häufig ist es aber möglich, sich ein ungefähres Bild der Strömung im weiteren Außenbereich des betreffenden Widerstandskörpers zu machen.

Der Widerstandskörper drängt die anströmenden Luftmassen seitlich ab. In hinreichender Entfernung hinter ihm sind die Strömungsverhältnisse etwa wieder die gleichen wie davor. Damit ist ein Rahmengebiet abzustecken in dem jetzt die Vorgänge durch mehrfache Iteration des Stromlinienbildes zu erfassen sind (Riegels, Deardorff, Deaves u.a.). Je kleiner die Ablösezone sind, desto enger kann dieser Rahmen gefaßt werden. Aus dem ersten Bild der Verdrängung lassen sich grob Stromfäden und Übergeschwindigkeiten abschätzen und aus ihnen wieder Ablöselinien und die Größe der Ablöseblase, die dann zum Körpervolumen hinzuzunehmen ist. Für die neuen Gesamtkonturen werden dann die Überlegungen wiederholt. Die Praxis kann allerdings sehr schwierig sein. Solche Rechnungen waren für homogene Anströmungen für verschiedenste Zwecke seit Jahrzehnten mit Erfolg durchgeführt worden.

Für turbulente Anströmungen erwiesen sich die Verhältnisse wesentlich komplizierter. Sie wurden von Deaves und Deardorff in einigen einfachen Sonderfällen erfolgreich erfaßt. Interessant war, daß bei turbulenter Anströmung die größten Übergeschwindigkeiten neben dem Widerstandskörper gegenüber denen in einer homogenen Anströmung zunahm und damit auch die Größe der Ablösegebiete beeinflussten. Die bisherigen Untersuchungen galten für einfache glatte Zylinderabschnitte, Sinus-Wellen, Kugelabschnitte, Kegel. Die Ergebnisse konnten in die Zusammenstellung der Beiwerte z.T. aufgenommen werden. Solche Rechnungen liegen auf der sicheren Seite.

Es wurde versucht so weit wie möglich leere Stellen in der Übersicht der Beiwerte und in den Tabellen auszufüllen. Andernfalls treten hier zwangsläufig falsche Schätzwerte ein oder Ergebnisse fehlerhafter Messungen ohne sachgerechte Auswertung.

D. Hinweise zur Auswertung von Messungen und zur Berechnung von Beiwerten

Eine Zusammenstellung von Messungen an unendlich langen Zylindern mit unterschiedlichen Rauigkeiten, Reynoldszahlen, mit und ohne Stolperdrähte und mit unterschiedlichen Turbulenzen in der Anströmung zeigt, daß durch eine unübersichtliche Koppelung verschiedener Beeinflussungsmethoden in verschiedenen Re-Zahl-Bereichen irreführende Ergebnisse erzielt und falsche Schlüsse gezogen werden können.

Wie im vorangehenden Abschnitt erwähnt wurde, wird der Eintritt des Umschlages laminar/turbulent und die turbulente Ablösung beeinflußt durch Oberflächenrauigkeiten (Fage, Warsap, Schultz u.a.), Stolperdrähte vor dem laminaren Ablösepunkt zur Erzwingung des Umschlages (Wieselsberger, Scruton u.a.) und turbulente Anströmungen die auf verschiedene Weise hergestellt werden, z.B. durch Gitter, Siebe, Hindernisstrecken usw. (Fage, Warsap, Armitt, Davenport u.a.). Die kritische Reynoldszahl wird damit stark nach unten verschoben (bis etwa $1/5$), die Widerstandswerte bei niedrigen Re-Zahlen werden vorzeitig herabgesetzt und erst bei den großen Reynoldszahlen vorzeitig heraufgesetzt. In großen Bereichen und zwar gerade in denen, wo in unseren üblichen Windkanälen gearbeitet werden kann, werden die Widerstandsbeiwerte herabgesetzt. Die gleichzeitige Verwendung dieser Mittel, mit denen immer wieder versucht wurde die Vorgänge im Gebiet der höheren Re-Zahlen soweit wie möglich bei kleineren Re-Zahlen zu simulieren führt häufig zu großen Fehlern vor allem an

aus mehreren Elementen verschiedener Durchmesser zusammengesetzten Widerstandskörpern, z.B. Wassertürmen usw. Bei den relativ niedrigen für die einzelnen Teile geltenden Reynolds-Zahlen im Windkanal weist ein Teil noch unterkritisch höhere Widerstandsbeiwerte auf, ein anderer liegt schon überkritisch bei sehr niedrigen Widerstandsbeiwerten. Bei wachsenden Windgeschwindigkeiten und Reynoldszahlen können die dann unterschiedlichen Tendenzen der einzelnen Anteile sich soweit kompensieren, daß bei einer "Geschwindigkeitsreihe" im Windkanal sich scheinbar ein etwa konstanter Gesamtwiderstand zwischen 0,40 und 0,65 ergibt. Solche Widerstandsbeiwerte darf man keinesfalls unmittelbar auf die Großausführung mit ihren etwa 100-fach größeren Reynoldszahlen übertragen. Ein solcher Fehler könnte zu einer bis zu 50% unzureichenden Bemessung der Bauwerke führen. Auch aus diesem Grunde erschien es unumgänglich, wo bei größeren Reynoldszahlen aus den bekannten Gründen bis heute keine Meßwerte vorliegen, in die Beiwertsammlung sinnvoll extrapolierte Zahlenwerte einzusetzen.

Die Berechnung der Widerstandsbeiwerte von zylindrischen Bauwerken allein aus den Druckverteilungen ist ebenfalls kritisch zu betrachten. Meist werden die Abschlüsse (Platten, Mündungen, Tankdecke), nicht ausreichend berücksichtigt und in fast allen Fällen wird die Reibung vernachlässigt. Die Reibungsanteile am Gesamtwiderstand wurden zwar nur selten gemessen, sie liegen aber bei rauhen Flächen je nach Lage der Ablöselinien zwischen 8% und 12% des Gesamtwiderstandes. Der Einfluß der häufig stark profilierten, gewellten, rauhen Abschlußflächen gibt zusätzlich Widerstände vor allem bei hohen Reynoldszahlen und nicht mehr ganz rechtwinklig zur Zylinderachse liegender Anströmung. Diese ist vor allem

in größeren Höhen wegen der Turbulenz immer gegeben. Bei den kurzen Zylindern und Halbzylindern war hierfür in den Beiwerten ein Zuschlag von etwa 10% - 16% zu berücksichtigen.

Die meisten Widerstandsbeiwerte beziehen sich auf eine oder zwei ausgezeichnete Anströmrichtungen, die im allgemeinen rechtwinklig zur Zylinderachse liegen. Bei kurzen Zylindern führt bereits eine leichte Schräganströmung zu erheblich höheren Widerstandsbeiwerten vor allem zu starken Verschiebungen der Resultierenden. Die diesbezüglichen Modelluntersuchungen sind noch nicht abgeschlossen.

Bei aus mehreren einfachen Teilkörpern mit gewölbten Oberflächen zusammengesetzten Widerstandskörpern ist nur in Ausnahmefällen eine unmittelbare Addition der Teilwiderstände möglich, da die Umströmungsformen (eben und räumlich) durch stärkere rückseitige Erweiterungen und Interferenzen meist grundsätzlich verändert werden. Der Gesamtwiderstand liegt allgemein höher als die Summe der Teilwiderstände.

E. Zusammenstellung der Beiwerte

Wegen der vorher erwähnten Einflüsse des Grenzschichtverhaltens auf den Widerstand und die Druckverteilung ist in jedem Falle zuerst festzustellen, in welchem Reynoldszahlenbereich und Rauigkeitsbereich das Bauwerk bzw. die Bauteile ungünstigstenfalls liegen. Der Einfluß der Rauigkeit wird bei höheren Reynoldszahlen stärker. Rauigkeiten können örtliche Druckspitzen zwar abbauen, erweitern jedoch die Zonen höherer Unterdrücke und vergrößern in den für Bauwerke interessierenden Re-Zahl-Bereichen die Widerstände.

Die Gliederung der Beiwerte erfolgt entsprechend der Geometrie.

Zur leichteren Umsetzung in den üblichen Normenaufbau wird getrennt nach Kraftbeiwerten C_F und Druckbeiwerten C_p . Damit ergibt sich die Gliederung:

1. Kraftbeiwerte c_F

- 1.1 Zylinder mit kreisförmigen oder annähernd kreisförmigen Querschnitten
- 1.2 Elliptische Zylinder
- 1.3 Prismatische Baukörper mit abgerundeten Kanten
- 1.4 Zylinderabschnitte (offene und geschlossene)
- 1.5 Kegelförmige Körper
- 1.6 Baukörper mit zweifach positiv gekrümmten Außenflächen
- 1.7 Baukörper mit zweifach negativ gekrümmten Außenflächen
- 1.8 Kombination der gewölbten Baukörper mit prismatischen oder zylindrischen Unterteilen

2. Druckbeiwerte c_p

- 2.1 Baukörper mit einfach gekrümmten Außenflächen
- 2.2 Abschnitte von einfach gekrümmten Außenflächen
- 2.3 Kombination von einfach gekrümmten Außenflächen mit prismatischen oder zylindrischen Unterteilen
- 2.4 Baukörper mit zweifach positiv gekrümmten Außenflächen
- 2.5 Abschnitte von zweifach positiv gekrümmten Außenflächen
- 2.6 Kombinationen von zweifach positiv gekrümmten Außenflächen mit prismatischen oder zylindrischen Unterteilen
- 2.7 Baukörper mit zweifach negativ gekrümmten Außenflächen
- 2.8 Abschnitte von zweifach negativ gekrümmten Außenflächen
- 2.9 Kombinationen von zweifach negativ gekrümmten Außenflächen mit prismatischen oder zylindrischen Unterteilen

.1. Kraftbeiwerte c_f

- 1.1 Zylinder mit kreisförmigen oder annähernd kreisförmigen Querschnitten

a) Für stehende Zylinder mit Höhe h und Durchmesser d und für liegende Zylinder in mindestens $3d$ Abstand über Grund mit der Länge l und Durchmesser d ist die Bezugsfläche $A = h \cdot d$ bzw. $l \cdot d$. Bei Anströmung rechtwinklig zur Zylinderachse ergibt sich der Kraftbeiwert

$$c_f = \frac{F}{A \cdot q} \quad \text{abhängig von der Reynoldszahl, der Rauigkeit der Oberfläche und der Streckung } \lambda = h/d \text{ bzw. } l/d.$$

Für die Reynoldszahl gilt

$$\text{Re} \sim \frac{v \cdot d}{1,4 \cdot 10^{-5}} \quad \text{mit } v = 40 \sqrt{q} \quad \text{mit } q \text{ in kN/m}^2$$

und d = Durchmesser in m

Die Rauigkeit ist das Verhältnis der Höhe der Unebenheiten zum Durchmesser. Die Beiwerte des unendlich langen glatten Kreiszyinders in homogener Anströmung ($I \leq 0,08$) können sofort für die verschiedenen Rauigkeiten angegeben werden (Bild 4). Anhaltswerte für solche k/d -Werte gibt die Tabelle 1. Für Stahlbetonbauten liegen die Unebenheiten zwischen 5 und 10 mm. Einzelne Absätze und Stufen können den Widerstand erheblich heraufsetzen.

Der für $\Lambda = \infty$ geltende Wert ist mit λ (nach Bild 5) zu multiplizieren.

Bild 4 Grundbeiwert C_{fo} in Abhängigkeit von der Reynoldszahl Re und von der Rauigkeit k/d

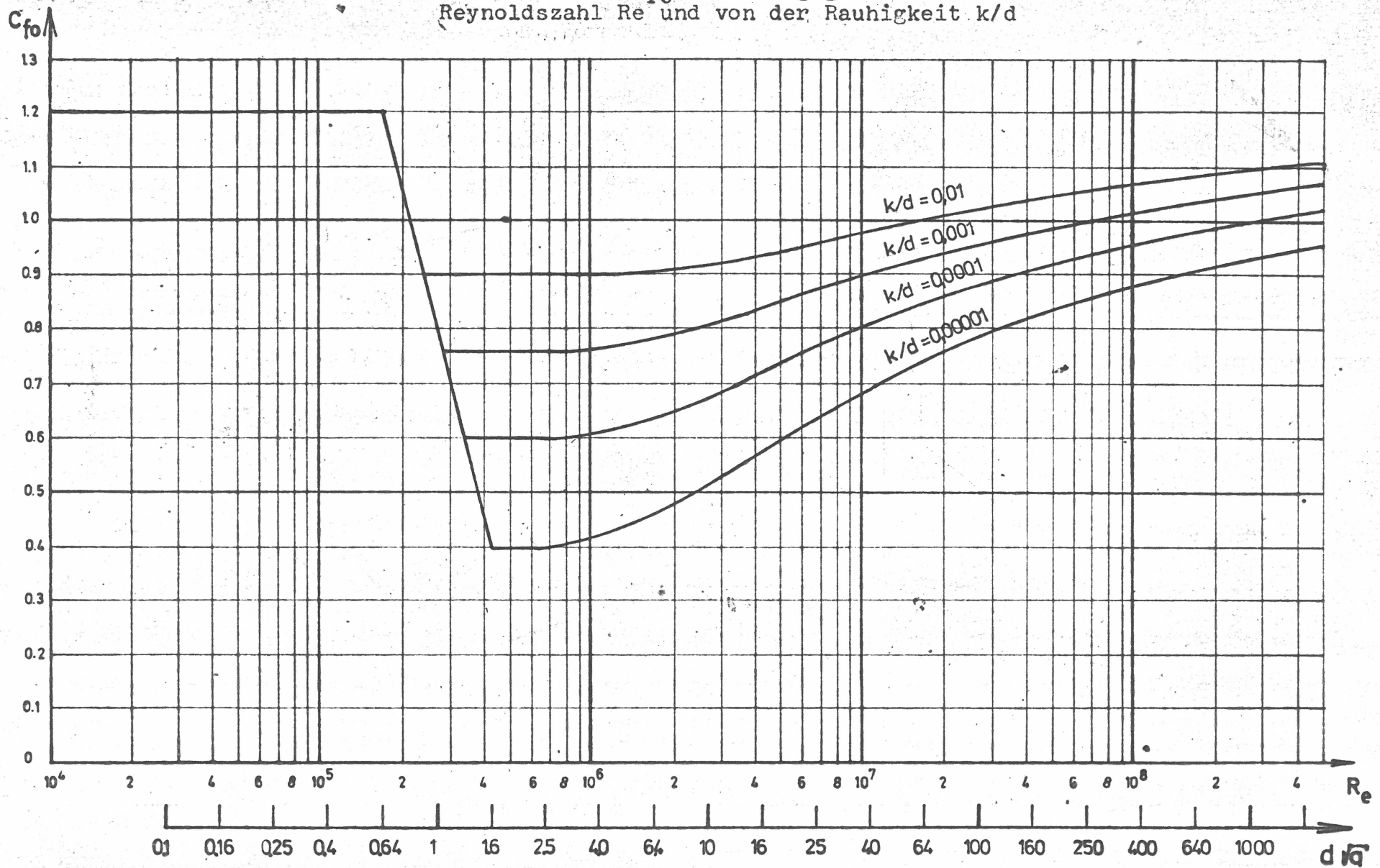
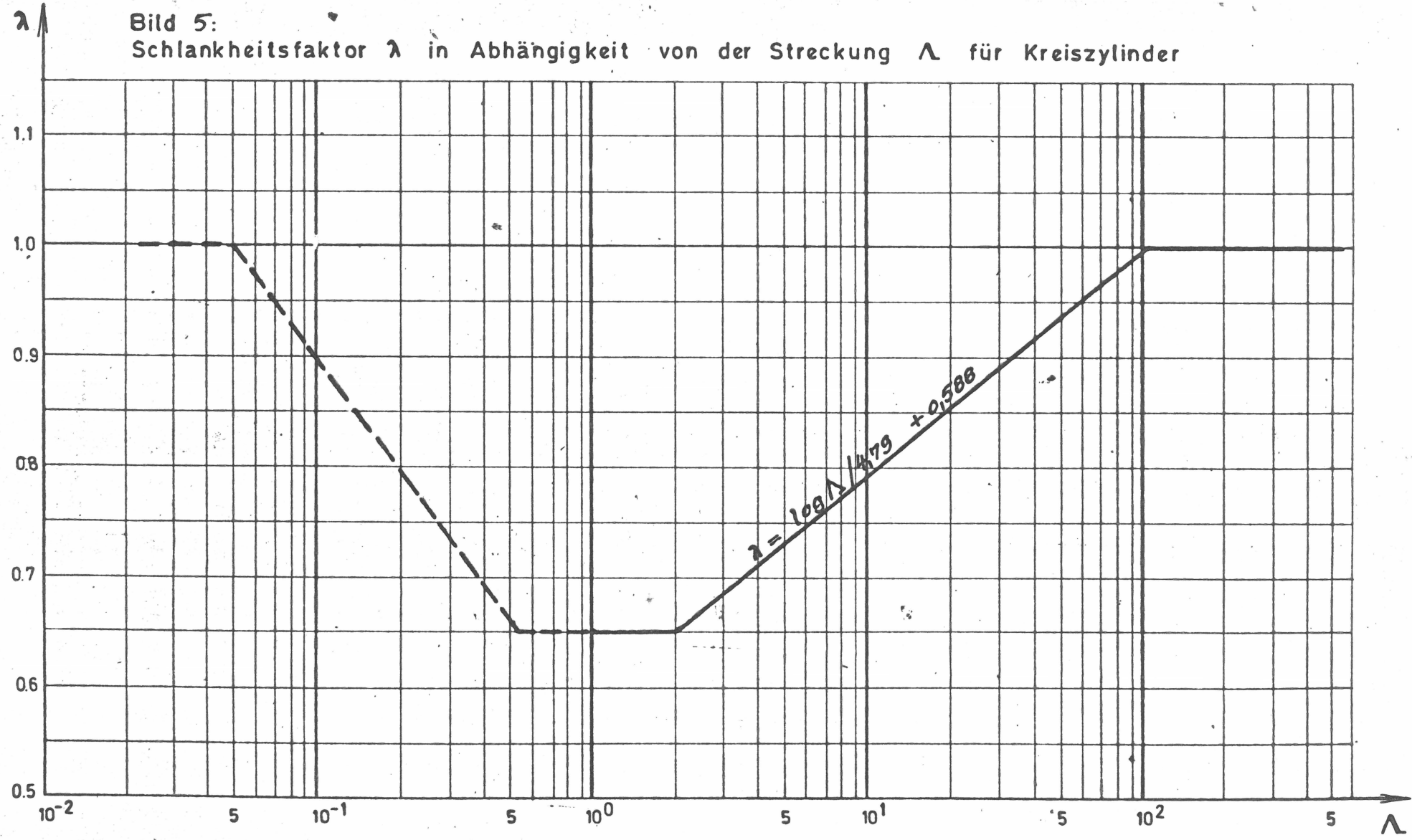


Bild 5:
Schlankheitsfaktor λ in Abhängigkeit von der Streckung Λ für Kreiszyylinder



Für einen Kamin mit $d = 10$ m mittlerem Durchmesser und 150 m Höhe ist für $\Lambda = 30$, $\lambda = 0,88$ und mit $v = 40$ m/s, $Re = 28 \cdot 10^6$. Bei $k/d = 5/10000 = 5 \cdot 10^{-4}$ wird damit der Grundkraftbeiwert $c_{f0} = 0,94$ und der für die Bemessung einzusetzende Beiwert $c_f = 0,88 \cdot 0,94 = 0,83$.

Die Streckung Λ in Abhängigkeit von der Lage des Baukörpers ist in Tabelle 2 angegeben. Die Werte für $\Lambda < 1$ gelten für flachere Körbformen bis zu Kreisscheiben. Bei $h < 0,1 d$ ist der größere Reibungsanteil an Ober- und Unterseite gesondert zu berücksichtigen.

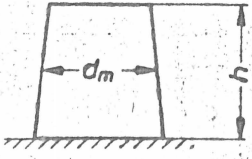
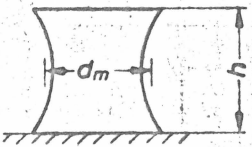
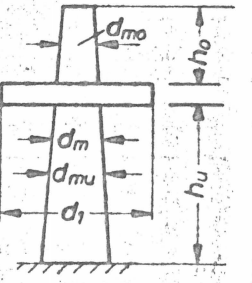
Tabelle 1. Unebenheiten k für verschiedene Oberflächenbeschaffenheiten

Oberfläche	k in m
Holz	
ungehobelt	0,004
gehobelt	0,002
Mauerwerk	
unverputzt	0,006
verputzt	
rauh	0,010
glatt	0,004
Beton in	
Gleitschalung	0,020
Kletterschalung	0,010
Normalschalung	0,005
verputzt	(wie bei Mauerwerk)
Stahl gewalzt (walzrauh)	
unbehandelt mit Rostansatz	0,002
verzinkt	0,001
gestrichen	0,001

Tabelle 2 Streckung λ in Abhängigkeit von der Lage des Baukörpers

	Lage des Baukörpers	Streckung λ
1		$\frac{h}{d}$ bzw. $\frac{l}{d}$
2		$\frac{2h}{d}$
3		> 100

b) Die für Kreiszyylinder angegebenen Werte gelten auch für konische oder verjüngte Formen, wenn die Durchmesseränderung mit der Höhe kleiner als $\Delta d / \Delta h = 0,20$ bleibt. Für die Definition der Schlankheiten und Bezugsflächen dieser Formen gilt Tabelle 3. Die auftretenden Interferenzen bei der Form \ominus erfordern einen Zuschlag zur Summe der Teilwiderstände, der von Proportionen und Topografie der Umgebung (Aufwind) abhängt.

Tabelle 3			
Aus Zylindern zusammengesetzte Baukörper und zylinderähnliche Baukörper			
a)		$\Lambda = \frac{2h}{d_m}$	$A = h \cdot d_m$
b)		$\Lambda = \frac{2h}{d_m}$	$A = h \cdot d_m$
c)		für $d_1 \geq 2,5 d_m$ $\Lambda_u = \infty$ $\Lambda_o = \frac{2h_o}{d_{m0}}$	$A_o = h_o \cdot d_{m0}$ $A_u = h_u \cdot d_{mu}$

c) Für Drähte, Stangen mit $l/d > 100$ ist unterhalb $d\sqrt{q} = 0,4$ der Kraftbeiwert c_f nach Tabelle 4 zu ermitteln.

Tabelle 4

c_f -Beiwerte für Drähte, Stangen, Seile, Rohre bei $Re < 1,1 \cdot 10^6$ $l/d > 100$, Bezugsfläche $A = l \cdot d$

Beschaffenheit der Oberfläche	$d\sqrt{q} \leq 0,7$	$0,7 < d\sqrt{q} = 0,15$	$0,15 < d\sqrt{q} = 0,4$
	c_f - Beiwerte		
glatte Drähte, Stangen u. Rohre			0,5
mäßig rauhe Drähte u. Stangen	1,2	1,2	0,7
feindrahtige Leitungs- u. Tragseile			0,9
grobdrahtige Leitungs- u. Tragseile		1,3	1,1

- d) Bei an den Enden offenen zylindrischen Baukörpern treten Abweichungen in der Endumströmung gegenüber durch Platten verschlossenen Körpern nur auf etwa $D/2$ Länge auf. Bei Kaminen wirkt sich eine hohe Austrittsgeschwindigkeit (Größenordnung von \bar{v}) der Abgase wie eine Vergrößerung der Streckung aus.

Bei Kühltürmen ist der Einfluß der auf die Innenseite eingreifenden Randwirbel gesondert zu beachten. Hier addieren sich im oberen Bereich auf der Leeseite innere Überdrücke und äußere Unterdrücke.

- e) Für die gegenseitige Beeinflussung zweier achsparalleler glatter Zylinder in homogener Anströmung liegen nur systematische Meßergebnisse für $d \sqrt{q} = 0,15 d \cdot h$ $Re < 0,4 \cdot 10^6$ vor. Stehen die Zylinder genau hintereinander so ergeben sich bei kleinen Abständen a günstigere Ablösekonturen als für den einzelnen Zylinder. Bei größeren Abständen steht der zweite Zylinder im turbulenten Nachlauf des ersten mit relativ geringen Widerstandsbeiwerten. Bei höheren Re -Zahlen und schwach turbulenter Ausströmung dürften diese Ungleichheiten verschwinden. Kritisch dürften dann Verhältnisse $a/d \sim 3$ bis 6 werden wegen der Wirbelablösungen am luvseitigen Zylinder mit gegenseitiger Anregung der Umströmungen.

Setzt man den Gesamtwiderstand beider Zylinder mit $c_{f2} = \xi c_{f1}$ ins Verhältnis zu dem des Einzelzylinders so wird für $a =$ Mittelabstand und $d =$ Zylinderdurchmesser der Wert ξ für $Re < 0,4 \cdot 10^6$:

a/d	Zylinder hintereinander $\beta = 0^\circ$	Zylinder nebeneinander $\beta = 90^\circ$
1	0,70	1,92
2	0,94	1,80
4	1,16	1,94
8	1,37	2,20
10	1,44	2,18
20	1,56	2,00

Für sehr große Re-Zahlen und kleine a -Werte muß für die leeseitigen Zylinder mit dem mehr oder weniger regelmäßigen Auftreffen der Übergeschwindigkeiten am Rande der Ablösebereiche gerechnet werden, d.h. örtlich bis zum doppelten Wert von q_{∞} auf der Luvseite und entsprechend höheren Widerstandswerten am leeseitigen Zylinder.

Für solche engen Anordnungen sollten genauere Modelluntersuchungen herangezogen werden, wobei wegen gewisser Ähnlichkeiten im Strömungsbild auch Rauchkanalversuche bei niedrigen Re-Zahlen nützlich sein können.

Diese Erscheinungen können mit Beiwerten nur unzureichend erfaßt werden, da erst das wiederholte Auftreffen der beschleunigten Anströmung die erhöhten Wirkungen ergibt. Wegen der starken Abhängigkeit vom Anströmwinkel β sind auch dynamische Instabilitäten solcher Zylinderpaare und Zylinderreihen möglich.

1.2 Elliptische Zylinder

Der Widerstandsbeiwert, auf $A = b \cdot l$ bezogen, kann in Beziehung gesetzt werden zu den für den Kreiszylinder geltenden Werten nach Abb. 4 und 5 für alle Re-Zahlbereiche und Rauigkeiten. Die Umrechnungsfaktoren $K = c_{fel} / c_{fzyl}$ sind in Abb. 6 für verschiedene Verhältnisse der Länge a zur quer zur Anströmung liegenden Breite b angegeben.

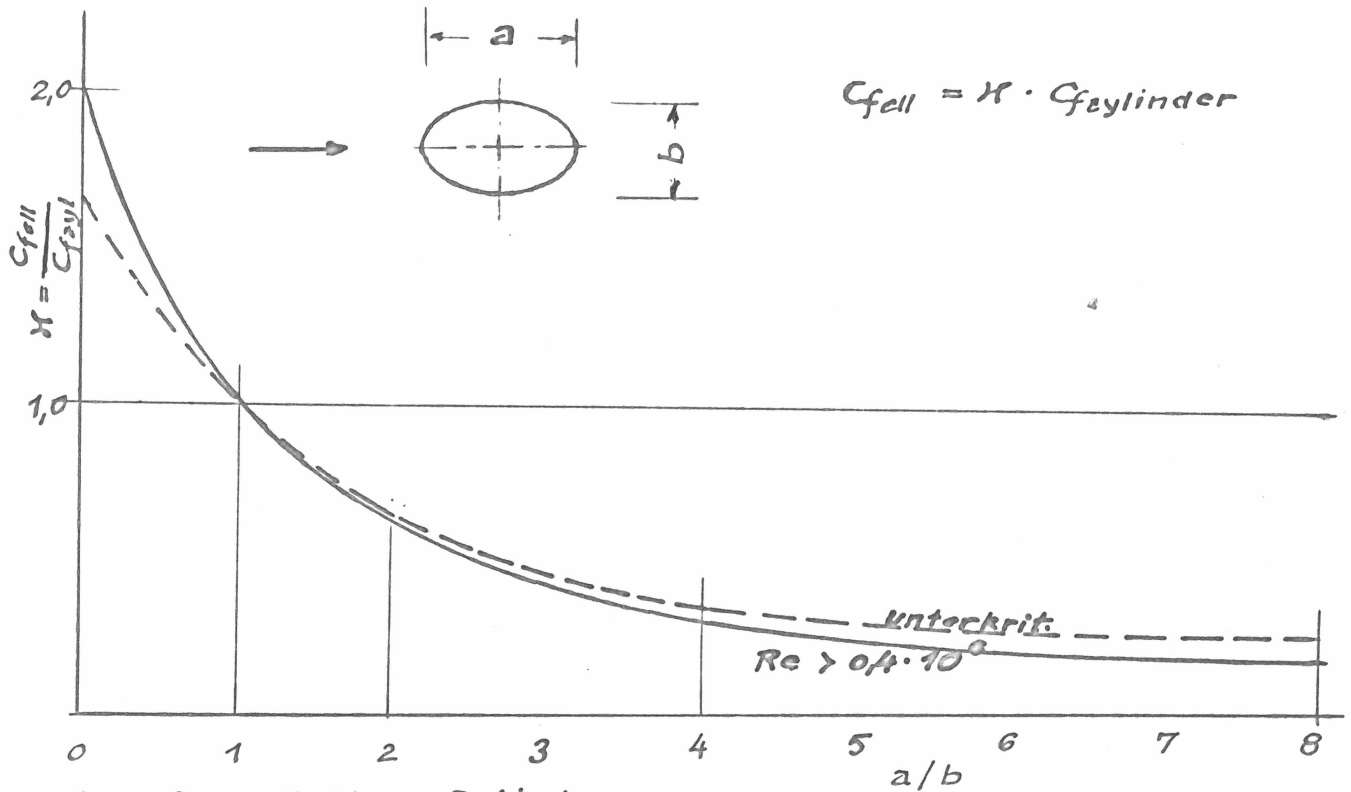

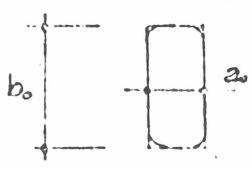
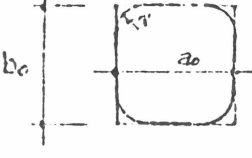
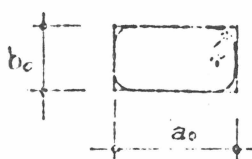
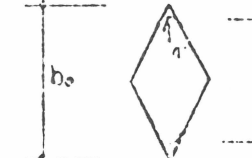
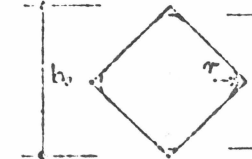
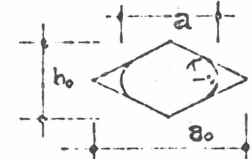
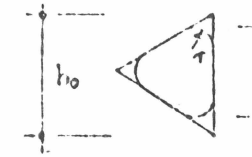
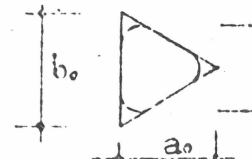


Abb. 6 Elliptische Zylinder

1.3 Prismatische Baukörper mit abgerundeten Kanten

Für glatte Prismen ($k/b_0 \sim 10^{-5}$) mit unterschiedlich stark abgerundeten Kanten, mit $\Lambda = \infty$ ergeben sich durch Beziehung auf vergleichbare Umströmungsformen bei elliptischen Zylindern nachstehende Werte, die über Abb. 4 und 5 auf andere Λ und Re-Zahlen umzurechnen sind und erforderlichenfalls auch auf andere Rauigkeitswerte.

 Wind	$b_0:a_0$	$r:b_0$	c_f			
			$Re=1 \cdot 10^5$	$Re=0,5 \cdot 10^6$	$Re=1 \cdot 10^6$	$Re=10 \cdot 10^6$ *
 1	2:1	0,021 0,083 0,25	2,00 1,90 1,80	2,00 1,50 0,50	1,80 0,60 0,50	0,85 0,85 0,80
 2	1:1	0,027 0,167 0,333	2,00 1,40 1,00	2,0 1,15 0,40	1,60 0,55 0,48	0,85 0,85 0,77
 3	1:2	0,042 0,167 0,500	1,50 0,80 0,40	1,5 0,65 0,40	1,25 0,60 0,40	0,90 0,80 0,70
 4	2:1	0,021 0,083 0,167	1,80 1,70 1,70	1,70 1,60 1,00	1,60 0,60 0,53	0,85 0,85 0,85
 5	1:1	0,015 0,118 0,235	1,60 1,60 1,50	1,50 1,40 1,20	1,50 0,60 0,48	0,85 0,85 0,80
 6	1:2	0,042 0,167 0,333	1,1 1,1 1,1	1,00 1,10 0,93	1,10 1,00 0,40	0,90 0,90 0,85
 7	1:1	0,021 0,083 0,250	1,3 1,3 1,1	1,35 1,25 1,05	1,35 0,60 0,42	0,75 0,75 0,70
 8	1:1	0,021 0,083 0,250	2,00 1,90 1,50	2,00 2,00 0,75	1,80 0,60 0,50	0,85 0,85 0,80

+) Die Spalte $Re = 10 \cdot 10^6$ enthält extrapolierte Werte

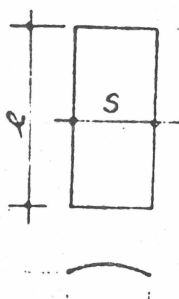
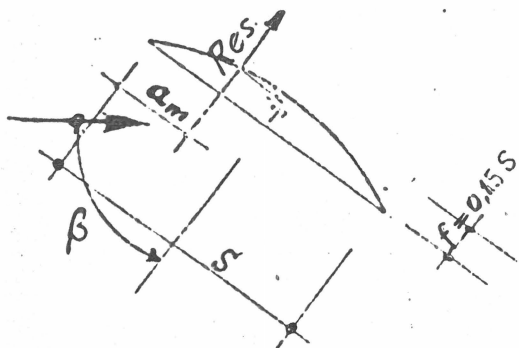
1.4 Zylinderabschnitte

- a) Halbkreisförmige geschlossene Zylinderabschnitte (D-Profile) haben bei Anströmung auf die runde Seite wegen der bei 90° liegenden Ablösestelle überkritisch höhere Rückseitendrücke (Basisdrücke c_{p180}) als ein voller Kreiszylinder, d.h. für $\Lambda = \infty$ und $Re > 0,5 \cdot 10^6$ gilt $c_f = 1,20$ ohne größeren Einfluß der Rauigkeit. Auf andere Λ wird nach Abb. 5 umgerechnet. Für Anströmung auf die ebene Seite ($\beta = 180^\circ$) gelten die Werte des Plattenstreifens mit $c_f = 2,00$.

Für andere Anströmrichtungen können c_f -Werte nicht interpoliert werden, da der Querauftrieb mit gleichen Größenordnungen wie der Widerstand entscheidend werden kann. Beim kleinsten $c_f = 0,65$ für $\beta = \pm 115^\circ$ wäre gleichzeitig $c_A \sim 1,00$. Zu beachten sind die negativen $d_{c_A}/d\beta$ -Werte in größeren Bereichen wegen aerodynamischer Instabilitäten.

- b) Halbkreisförmige offene Zylinderabschnitte zeigen bei mittlerer Anströmung auf die runde Seite ($\beta = 0^\circ$) praktisch die gleiche Anströmung wie geschlossene Halbzylinder, d.h. für $\Lambda = \infty$ und $Re > 0,5 \cdot 10^6$ $c_f = 1,20$ und für andere Λ umzurechnen nach Abb. 5. Bei $\beta = 180^\circ$ und $\Lambda = \infty$ ist wegen der teilweisen Rücklenkung der Anströmung $c_{f_\infty} = 2,30$ und für andere Λ Werte $c_f = \lambda c_{f_\infty}$ nach Abb. 5. Bei anderen β -Werten treten zusätzlich sehr hohe Auftriebskräfte und Momente auf, die abhängig von Re sind.
- c) Zylinderabschnitte mit 63° Öffnungswinkel ($f/s = 0,15$). Für verschiedene Streckungsverhältnisse $\Lambda = l/s$ und verschiedene Anstellwinkel β ergeben sich folgende Beiwerte der Luftkraftresultierenden (nicht Widerstandsbeiwerte), die etwa rechtwinklig zur Bogensehne liegt und zwischen $0,30$ und $0,40$ s von der Vorderkante entfernt ist.

Die Bezugsfläche ist $A = s \cdot l$



c_R -Werte	für beidseitig freie Enden						
Verhältnis $l:s$:	1:20	1:10	1:3	1:1	3:1	10:1	20:1
$\beta = 0 - 10^\circ$	1,61	1,50	1,32	1,35	1,30	1,37	1,55
$\beta = 10 - 20^\circ$	1,58	1,62	1,36	1,38	1,33	1,34	1,50
$\beta = 36 - 39^\circ$	1,20	1,30	1,98	1,42	1,13	1,30	1,45
$\beta = 48 - 50^\circ$	0,95	1,03	1,68	1,80	1,09	1,25	1,60
$\beta = 52 - 54^\circ$	0,88	0,91	1,60	1,72	1,10	1,21	2,05
$\beta = 68 - 70^\circ$	0,59	0,46	1,05	1,20	1,34	1,38	1,65

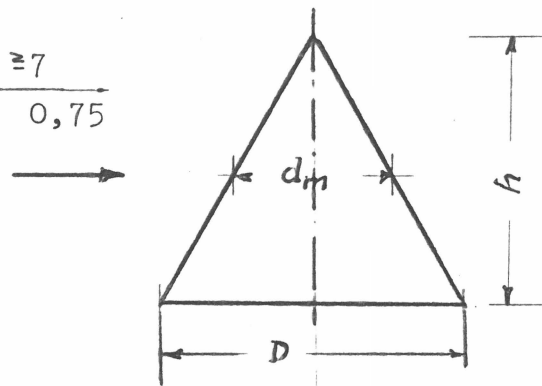
d) Elliptische Zylinderabschnitte mit verschiedenen Achsverhältnissen a/b zeigen abhängig von Λ Zwischenwerte zwischen dem halbkreisförmigen offenen Zylinderabschnitt nach 1.4 b und dem Plattenstreifen. Die Λ -Abhängigkeit entspricht Abb. 5.

Elliptische Zylinderabschnitte homogene stationäre Ausströmung	b/a	Beiwerte c_f		
		$\Lambda > 50$	$\Lambda = 14$	$\Lambda = 2$
	∞	2,00	1,30	1,20
	8:1	2,10	1,40	1,30
	4:1	2,20	1,45	1,35
	2:1	2,30	~ 1,50	~ 1,40
	1:1	2,30	~ 1,50	~ 1,40
	∞	2,00	1,30	1,20
	8:1	1,60	1,10	1,00
	4:1	1,40	0,95	0,80
	2:1	1,20	0,80	0,60
	1:1	1,20	0,80	0,60

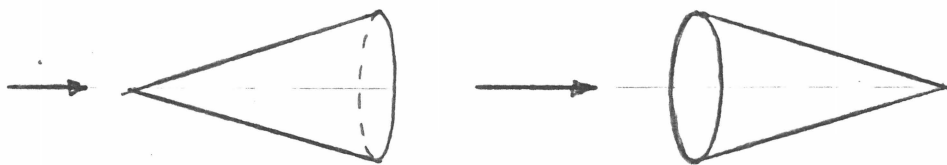
1.5 Kegelförmige Körper

- a) Quer zur Achse angeströmte auf dem Boden stehende Kreiskegel. Für die Bezugsfläche $A = D/2 \cdot h = d_m \cdot h$ ist für $Re < 10^5$ und $Re > 10^7$ zu rechnen für verschiedene Verhältnisse h/D ($\sim 1/2$) mit

h/D	$\leq 0,20$	1,0	≈ 7
c_f	0/40	0,60	0,75

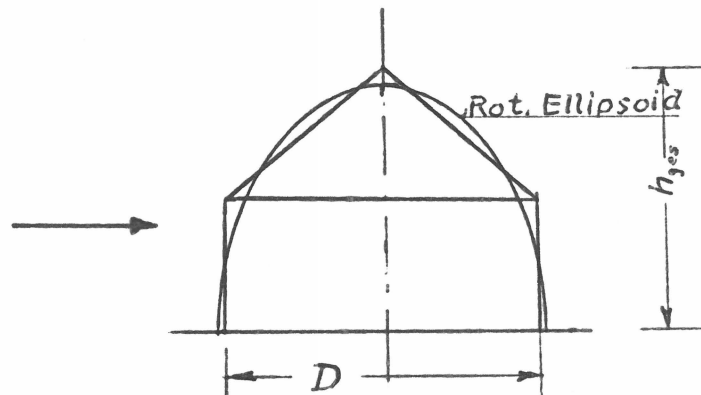


- b) In Längsrichtung von der Spitze her angeströmte Kegel haben bezogen auf $A = \pi \cdot D^2 / 4$ einen geringeren c_f -Wert als eine Kugel mit Durchmesser D , so lange der Spitzwinkel $< 60^\circ$ ist, d.h. $c_f = 0,50$ unterkritisch ($Re = 10^5$) und für $Re > 10^7$.



Kegel, die von der Bodenseite her angeströmt werden, verhalten sich bei geschlossenem Boden wie rechtwinklig angeströmte Kreisscheiben, d.h. $c_f = 1,20$ und bei offenem Boden wie offene Kugelabschnitte, d.h. $c_f = 1,40$ bis $1,55$. Bei geringen Winkelabweichungen von der Achsrichtung können sich bis 10 % höhere resultierende Beiwerte ergeben.

- c) Kombinationen von Kegeln auf zylindrischen Unterbauten. Der Kraftbeiwert kann hier aus der Summe der Kräfte am Kegel und am Zylinder ermittelt werden. Der Wert liegt auf der sicheren Seite, da bei flachen Kegeldächern (mit Neigung $<30^\circ$) ohnehin die Strömung am Zylinderrand abgerissen ist. Nur bei Kegeln mit $<90^\circ$ Öffnungswinkel also $>45^\circ$ Mantelneigung kann die abgerissene Strömung sich wieder anlegen. Damit gibt in solchen Fällen auch ein Vergleich mit einem halben Rotationsellipsoid mit gleichem Volumen und etwa gleichem Verhältnis h_{ges}/D richtige Beiwerte c_f .



- 1.6 Baukörper mit zweifach positiv gekrümmten Außenflächen. Hierzu gehören Kugeln, Ellipsoide, Rotationsparaboloide und aus Abschnitten solcher Körper zusammengesetzte Baukörper.

- a) Für die freistehende glatte Kugel, bei der der Mittelpunkt mehr als $1,5 D$ über Gelände liegt, gilt unter $Re \sim 0,25 \cdot 10^6$ $c_f = 0,50$ in homogener Anströmung. Zwischen $Re = 0,30 \cdot 10^6$ und $0,60 \cdot 10^6$ fällt der Wert ab auf $0,09$ bis $0,18$ und steigt oberhalb $Re = 10^6$ an mit $c_f = 0,25 \log Re - 1,30$ bis etwa $Re = 2 \cdot 10^7$. Der Rauigkeitseinfluß ist nur größer im Bereich der kleinen c_f -Werte und kann für $k/D > 10^{-3}$ $\Delta c_f = +0,15$ ergeben und für große Re -Zahlen etwa $\Delta c_f \sim +0,10$.

Für Kugeln unmittelbar über dem Boden vergrößern sich die Beiwerte glatter Kugeln um $\Delta c_f \sim 0,20$ bis $0,35$ mit einem

gleichzeitig auftretenden Auftriebswert
 $c_a \sim +0,55$.

- b) Rotationsellipsoide mit Anströmung in Richtung der Rotationsachse liegen je nach Verhältnis Länge/Durchmesser in ihren Werten zwischen Kreisscheibe, Kugel und sehr langen Ellipsoiden, bei denen dann der Reibungswiderstand überwiegt (Anstieg über $l/D = 5$).

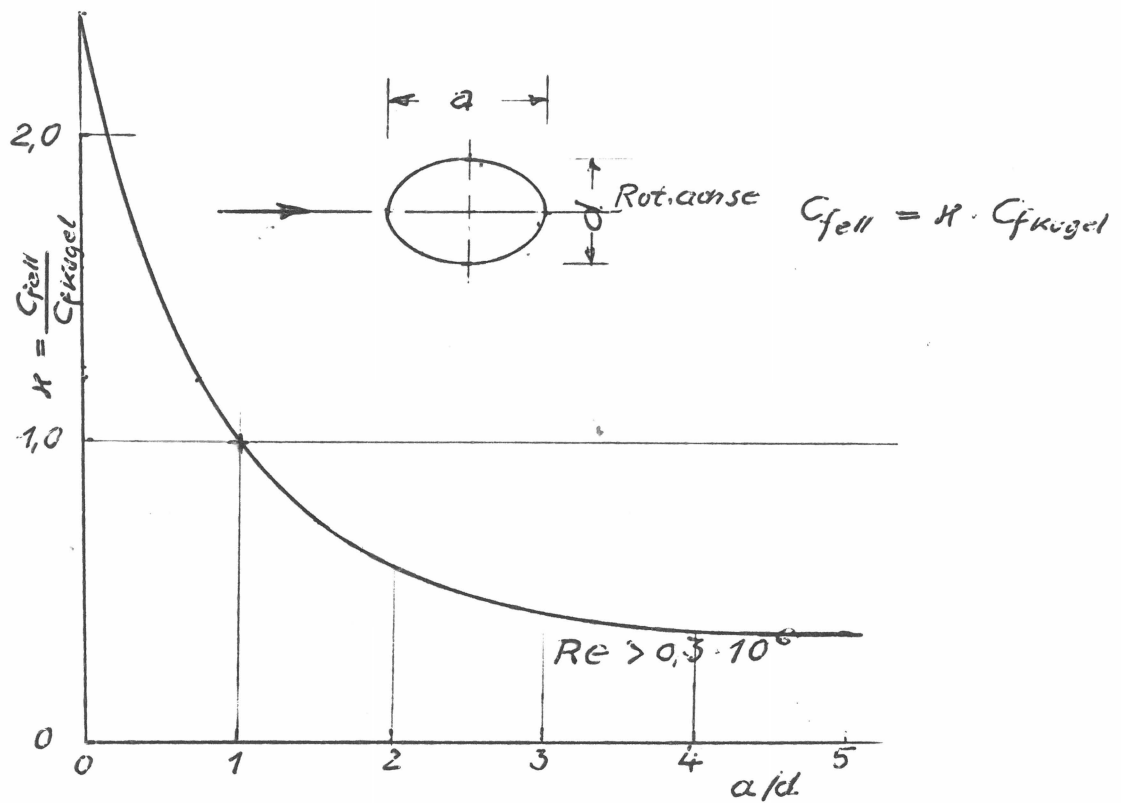


Abb 7. Rotationsellipsoide

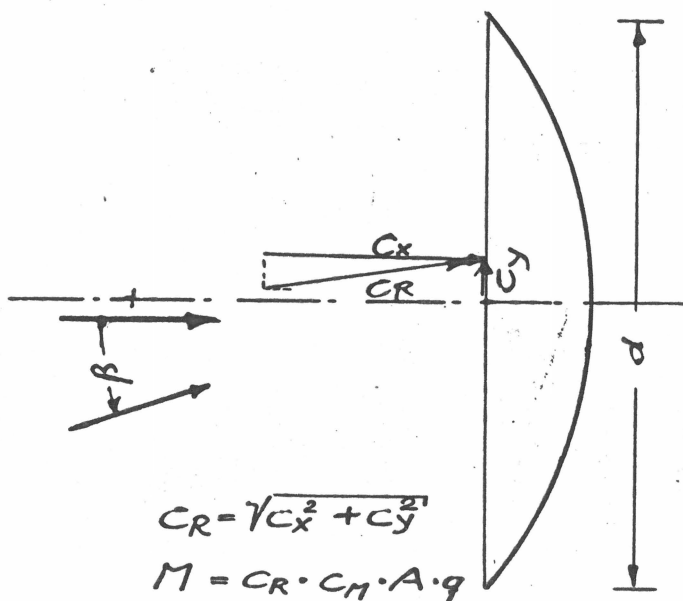
Entsprechend Abb. 7 können aus den in 1.6a gegebenen Werten für die Kugel die c_f -Werte für Rotationsellipsoide abgeleitet werden. Für den Bodeneinfluß gilt dasselbe wie in 1.6a, d.h. für auf dem Boden aufstehende Körper mit Stützen und Anbauten wachsen die c_f -Werte erheblich an. Für nicht-axiale Anströmrichtungen können keine allgemeinen Angaben gemacht werden.

- c) Für freistehende Halbkugeln gelten fast unabhängig von der Reynoldszahl die an Kugeln für sehr hohe Re-Zahlen ($> 5 \cdot 10^6$) angegebenen Werte, wobei für eine von der runden Seite angeströmte Hohlkugelhälfte die c_f -Werte um 10% höher liegen.

Bei Anströmung von der Rückseite ($\beta = 180^\circ$) hat die Halbkugel mit Boden praktisch den gleichen Wert wie die Kreisscheibe mit $c_f = 1,17$ und ohne Boden $c_f = 1,42$, wieder unabhängig von Re. Für andere Anströmrichtungen ändern sich von $\beta = 135^\circ$ bis 225° diese Werte nur wenig.

- d) Für offene Kugelabschnitte mit etwa 90° Öffnungswinkel liegen bezogen auf $A = \frac{\pi d^2}{4}$ Beiwerte c_x (hier in Richtung der Mittelachse und nicht in Anströmrichtung), c_y (rechtwinklig zur Mittelachse) und Momentenbeiwerte $c_m = \frac{M}{A \cdot q \cdot d}$ vor.

Die nachstehenden Werte gelten für eine dichte Kugelkalotte. Durch eine Perforation in den Randbereichen sind die c_x - und vor allem die c_m -Werte wesentlich zu verkleinern.



Beiwerte			
β	C_x	C_y	C_m
0°	1,31	0	0
15°	1,29	-0,05	-0,005
30°	1,31	-0,04	-0,014
45°	1,41	-0,02	-0,027
60°	1,29	0,15	-0,136
75°	0,55	0,25	0,008
90°	-0,10	0,21	0,075
105°	-0,24	0,25	0,008
120°	-0,30	0,36	-0,047
135°	-0,49	0,36	-0,088
150°	-0,64	0,28	-0,019
165°	-0,76	0,15	-0,048
180°	-0,82	0	0

1.7 Baukörper mit zweifach negativ gekrümmten Außenflächen. Bei diesen Flächen haben die beiden Hauptkrümmungen verschiedene Vorzeichen, d.h. die Hauptkrümmung nach Gauß $K = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{1}{R_2} < 0$ ist negativ. Beispiele sind Rotationshyperboloide, Pseudosphären (Trompetenflächen), Torusflächen, Hyperbolparaboloide. Die Rotationshyperboloide der Kühltürme können noch größtenteils wie Zylinder angesehen werden.

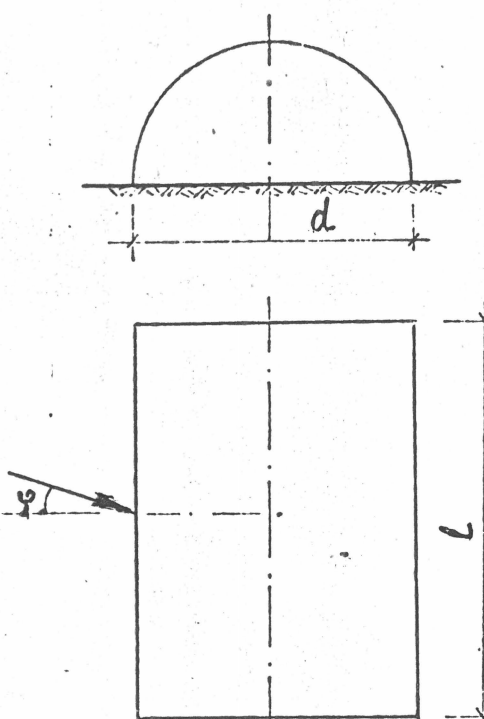
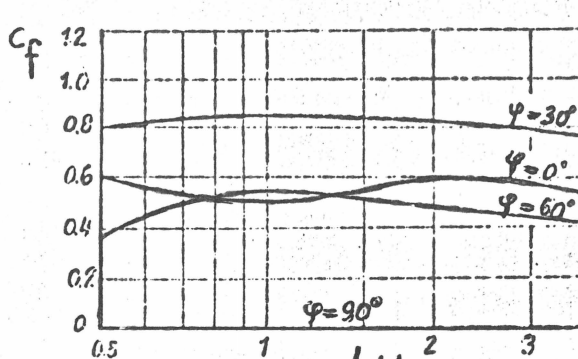
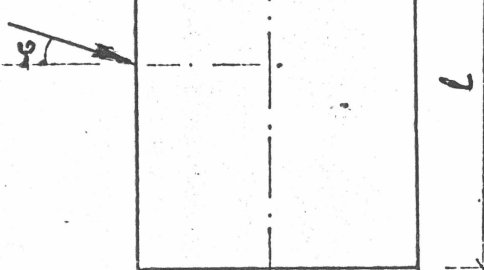
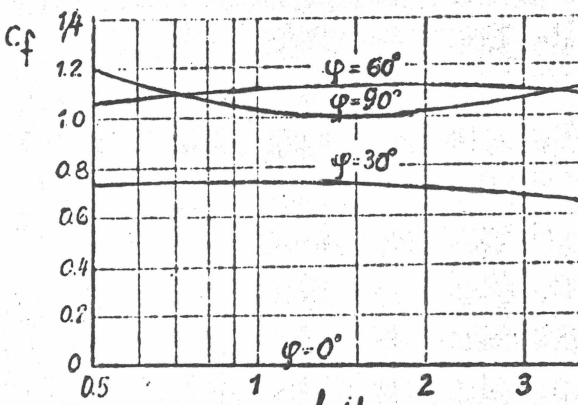
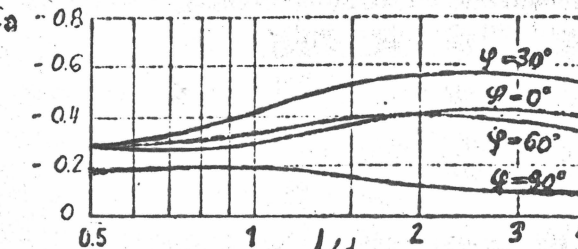
- a) Bei anderen geschlossenen Bauwerken mit derartigen Außenflächen ist keinerlei Systematik erkennbar, die zu einer Ordnung in den Kraftbeiwerten führen könnte trotz einer großen Anzahl von Einzelmessungen. Bei Anströmung über die konvexe Hauptkrümmungsrichtung sind Rückbeziehungen auf Zylinderflächen möglich in anderen Fällen auf Messungen an ebenen Dachflächen mit und ohne Überstände, wo bei Ausbildung großer konischer Randwirbel hohe Auftriebsbeiwerte bis $c_A = -0,90$ festgestellt wurden. Hier empfehlen sich meist Windkanalversuche zur Feststellung der Druckverteilungen und damit der antimetrischen Windlastanteile.
- b) Bei offenen und teilweise offenen Bauwerken mit solchen Außenflächen werden die Verhältnisse gegenüber geschlossenen Bauten ungünstig verändert. Bei frei durchströmten Hypar-Schalenkonstruktionen ist zu beachten, daß sich bei diesen Formen Überdruck- und Unterdruck-Bereiche auf Ober- und Unterseite meist derart ergänzen, daß sie die effektiven Flächenbelastungen um 40 % bis 60 % gegenüber geschlossenen Bauwerken heraufsetzen. Wegen der Empfindlichkeit der Strömungen an stetig gekrümmten Flächen gegen kleine Krümmungsänderungen sollten gegebenenfalls Windkanalversuche am elastischen Modell ausgeführt werden.

1.8 Kombinationen von Baukörpern mit gewölbten Oberflächen mit prismatischen oder zylindrischen Unterteilen.

- a) Bei einfach gekrümmten Dachflächen handelt es sich vorwiegend um Zylinderabschnitte über Rechteckgrundriß als Tonnenschalen, Schmetterlingsschalen, Sheddächer. Der Fall der einfach gekrümmten Kegelschale auf zylindrischem Unterbau war in 1.5c behandelt worden.

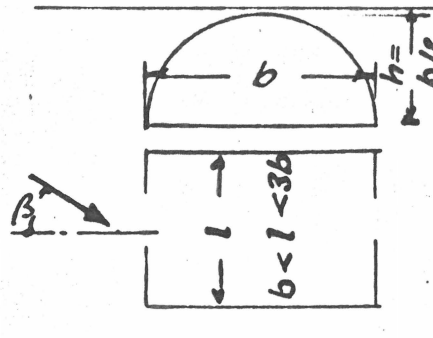
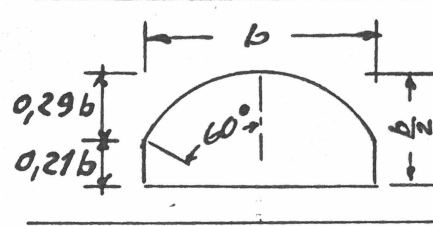
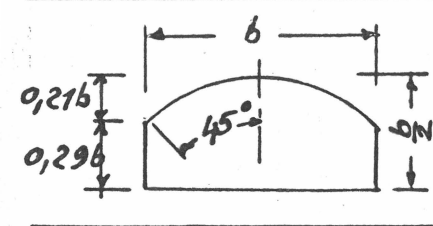
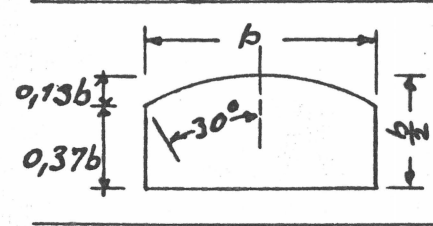
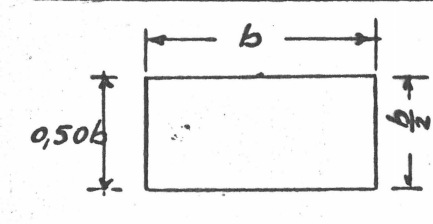
Ein Sonderfall der Zylinderabschnitte über rechteckigem Unterbau ist der Halbkreiszyylinder. Um die c_f und c_a -Werte unabhängig vom Streckungsverhältnis des Grundrisses l/d zu halten, wurden die Bezugsflächen in den beiden Hauptachsen verschieden angesetzt. Für den Auftrieb ist $A = l \cdot d$.

Die Werte gelten für $0,5 < l/d < 4,0$ und rechtwinkelige Abschlußwände. Die Werte sind ebenfalls für Kappenabschlüsse und Viertelkugelabschlüsse zu verwenden mit entsprechend angepaßten Bezugsflächen.

Bankkörper	Bezugsfläche A	Beiwerte c_f
	$A = \frac{d}{2} \cdot l$	<p>1 c_f-Werte \perp zur Achse</p> 
	$A = \frac{\pi d^2}{8}$	<p>2 c_f-Werte \parallel zur Achse</p> 
	$A = d \cdot l$	<p>3 c_a-Werte (Auftrieb)</p> 

Die Werte der Diagramme 1, 2, 3 sind mit ausreichend guter Näherung auch für nachstehende Formen verwendbar mit Umrechnungsfaktoren. Im Bereich $1 < l/d < 3$ werden hierbei Mittelwerte eingesetzt. Dies führt zu nachstehender Tabelle, deren letzte Form der aus vielen Messungen bekannte Quader mit $h/b = 1:2$ ist.

Für $h \geq 1,5 b$ sind die c_f -Beiwerte für geschlossene Baukörper mit Rechteckgrundriß und Flachdach zu nehmen mit Auftriebsbeiwerten c_a zwischen $-0,60$ und $-0,80$.

	$\beta =$	C_f ⊥ zur Achse $A = 0,5 b l$	C_f ∥ zur Achse $A = 0,392 b^2$	C_a Auftrieb $A = b l$
		0	0,60	0
	30°	0,85	0,75	-0,60
	60°	0,50	1,10	-0,45
	90°	0	1,10	-0,30
	$\beta =$	$A = 0,5 b l$	$A = 0,408 b^2$	$A = b l$
	0	0,70	0	-0,50
	30°	1,00	0,75	-0,65
	60°	0,60	1,10	-0,55
	90°	0	1,15	-0,35
	$\beta =$	$A = 0,5 b l$	$A = 0,420 b^2$	$A = b l$
	0	0,75	0	-0,50
	30°	1,05	0,75	-0,70
	60°	0,65	1,10	-0,60
	90°	0	1,20	-0,40
	$\beta =$	$A = 0,5 b l$	$A = 0,445 b^2$	$A = b l$
	0	0,80	0	-0,55
	30°	1,05	0,75	-0,75
	60°	0,70	1,10	-0,65
	90°	0	1,20	-0,45
	$\beta =$	$A = 0,5 b l$	$A = 0,500 b^2$	$A = b l$
	0	0,90	0	-0,60
	30°	1,10	0,75	-0,80
	60°	0,75	1,10	-0,65
	90°	0	1,20	-0,50

Bei der Kombination von Zylindern mit Kugelhappen sind die c_f -Werte eines um $2/3$ der Kappenhöhe längeren Zylinders zu nehmen. Die Auftriebsbeiwerte liegen zwischen $c_a = -0,60$ für Kappen von 0° bis 45° Randneigung und $c_a = -0,75$ für Halbkugelabschlüsse bei hohen Re-Zahlen.

2. Druckbeiwerte C_p

Die Verteilung der Drücke auf den gewölbten Außenflächen hängt, wie in B dargestellt wurde, stark von Grenzschichtverhältnissen ab und diese wieder von den Druckgradienten der wandnahen Strömungen und den Störungen und Rauigkeiten vor allem in den instabileren Bereichen. Bei Bauwerken treten überwiegend Re-Zahlen über $1 \cdot 10^6$ auf (0,40 m ϕ -Rohr bei $q = 0,80 \text{ kN/m}^2$) bis $Re = 2 \cdot 10^8$ bei Behältern und Kühltürmen und an technisch rauhen Oberflächen mit k/D zwischen 10^{-2} und 10^{-5} . Da durch große Rauigkeiten von vornherein die Ablösepunkte erheblich stromaufwärts verschoben werden, ändern sich die Druckverteilungen mit höheren Reynoldszahlen weit weniger als für glatte Zylinder.

2.1 Baukörper mit einfach gekrümmten Außenflächen

Für den Kreiszyylinder zeigte Bild 1 Geschwindigkeitsverschiebungen für glatte Zylinder in turbulenzarmer Anströmung bei verschiedenen Re-Zahlen. Die höchsten Übergeschwindigkeiten und damit seitlichen Unterdrücke ergab $Re \sim 0,5 \cdot 10^6$. Da die Turbulenz im Wind immer $I \geq 0,08$ sein dürfte, wurden hierfür die extremen Druckverteilungen in Abb. 8 und 9 aufgezeichnet.

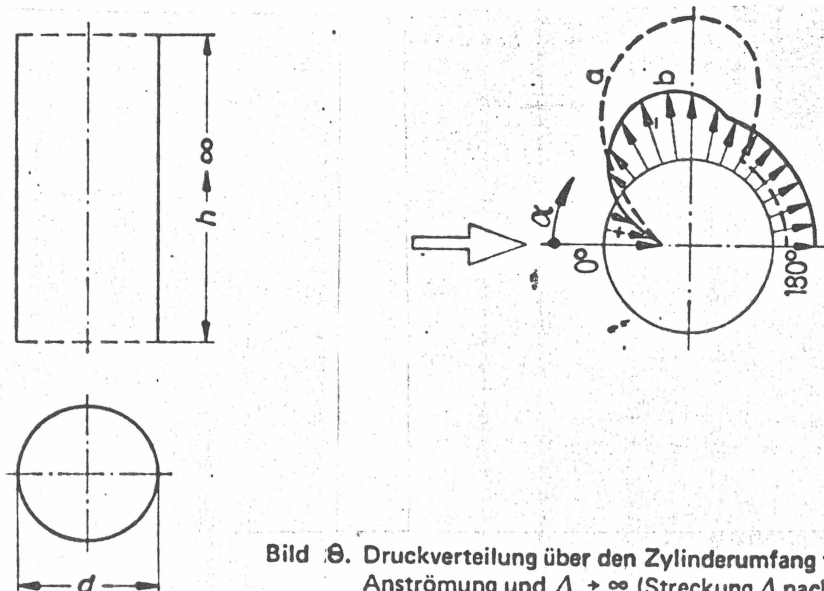


Bild 8. Druckverteilung über den Zylinderumfang für turbulente Anströmung und $\Lambda \rightarrow \infty$ (Streckung Λ nach Abb. 5)

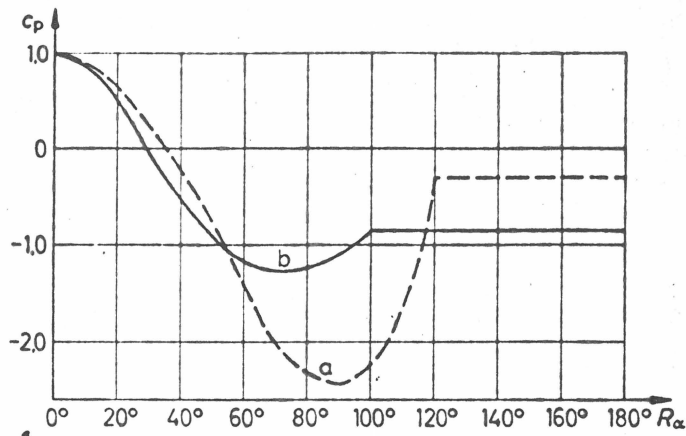


Bild 9. Beiwerte c_p über den abgewickelten Zylinderumfang für turbulente Anströmung und $\Lambda \rightarrow \infty$

a) $k/d \leq 10^{-5}$

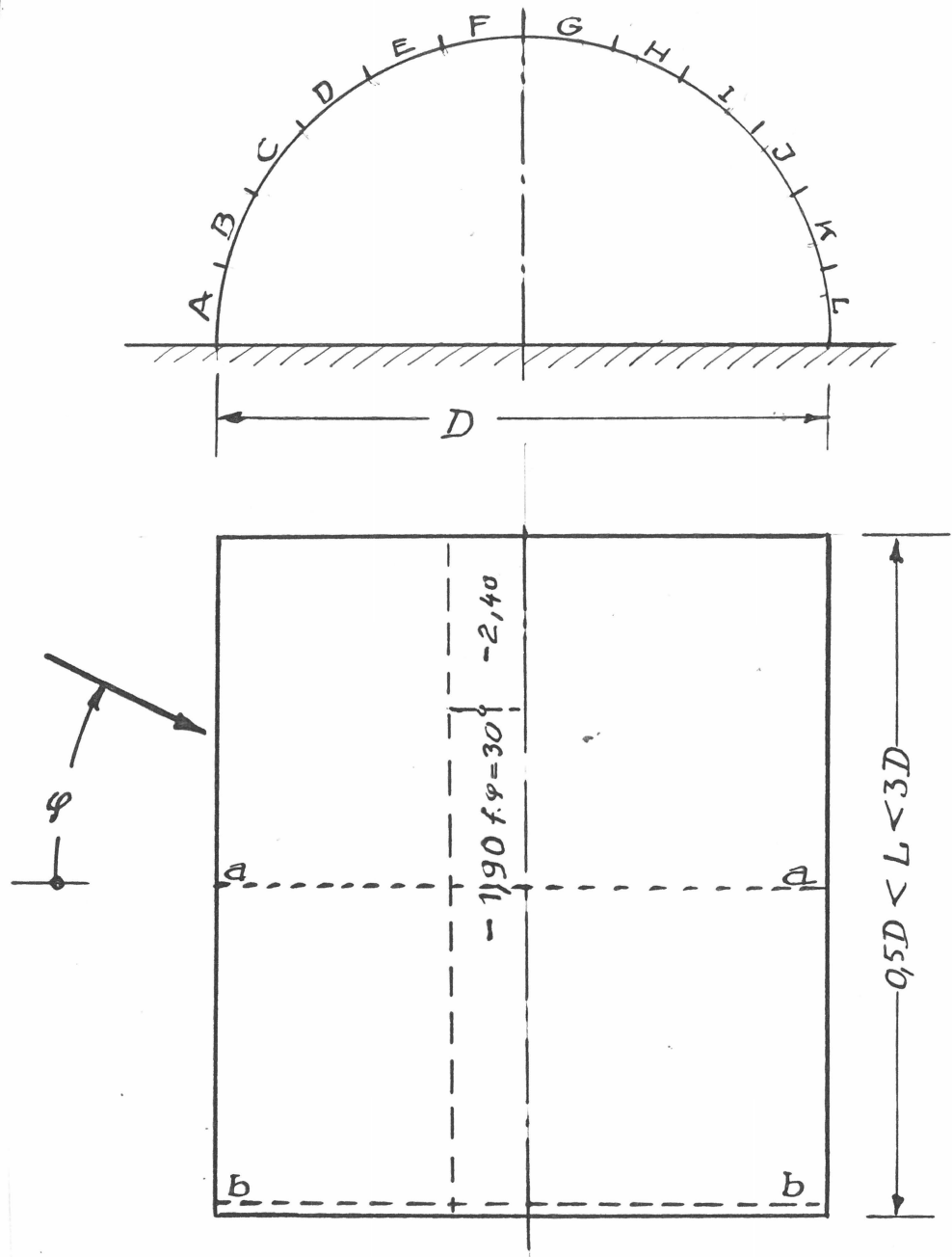
b) $k/d \geq 10^{-3}$

Zwischenwerte dürfen interpoliert werden.

Die Druckverteilungen an Kühltürmen können hiervon abweichen einmal durch die endliche Streckung (für sehr kurze Zylinder gelten auch andere Druckverteilungen, insbesondere an der Leeseite) zum anderen durch die Einziehung des Rotationshyperboloids, die dort zu einer Unterdruckerhöhung führt und weiterhin durch die Ein- und Ausströmungen an der oberen Öffnung. Für die Biegemomente um die Hochachse sollte der ungünstigste Fall eingesetzt werden, d.h. kleinste Rauigkeit und kleinster Rückseitendruck.

2.2 Abschnitte von einfach gekrümmten Flächen treten meist als Teile von Hallendächern auf. Für den beidseitig geschlossenen Halbkreiszylinder ohne ein Rechteckprisma als Unterbau gelten für verschiedene Anströmrichtungen und Verhältnisse $L/D (=l/b)$ folgende Druckverteilungen: Es sind Mittelwerte aus dem ungünstigsten $1/4 L$ langen Abschnitt für die eingezeichneten Längsstreifen. Die

ungünstigsten Fälle bei $\varphi = 30^\circ$ treten hinter den luvseitigen Giebelwänden auf mit bis zu 30 % höheren Spitzenwerten in etwa $D/4$ breiten Streifen.



Druckbeiwerte für den Halbzylinder

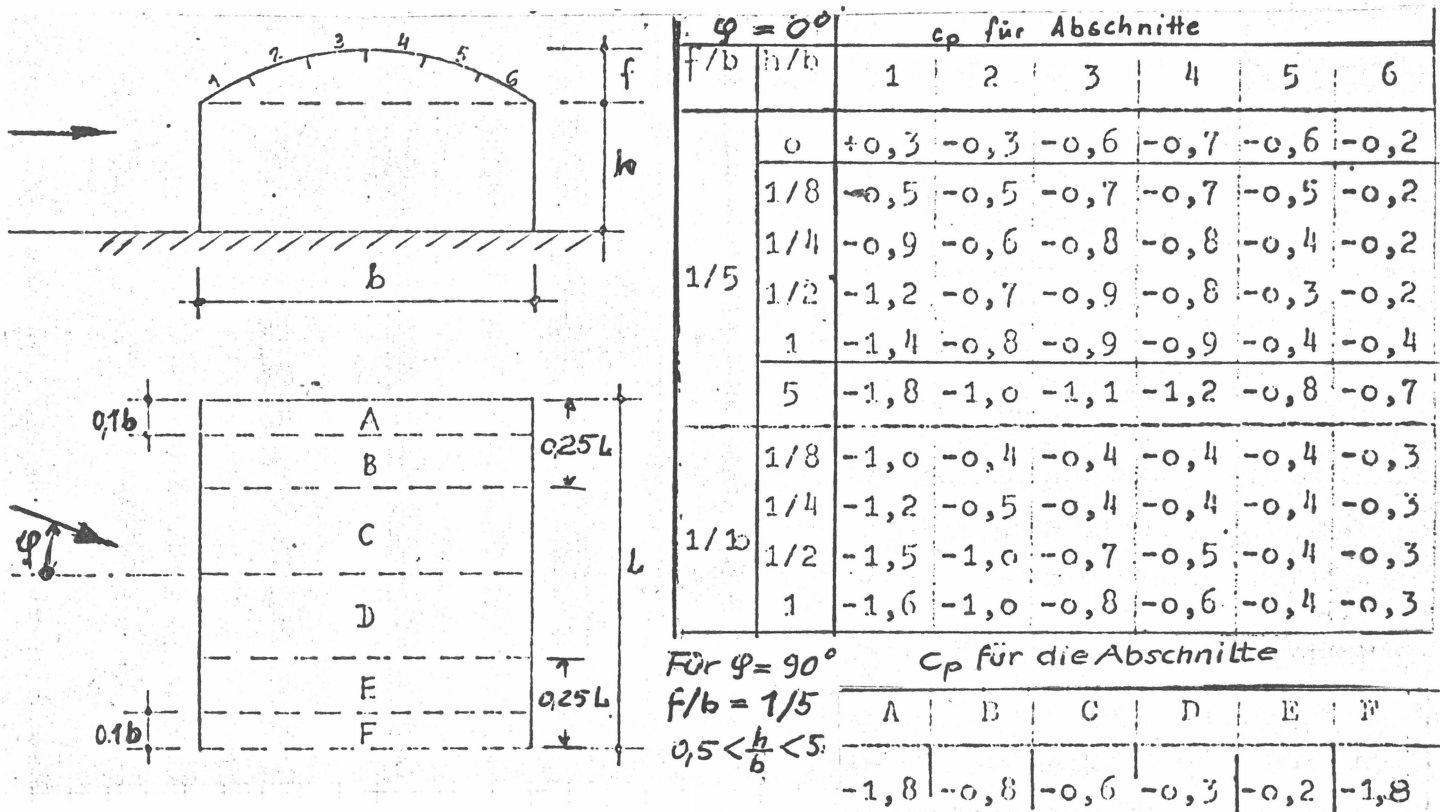
L/D	φ	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1/2	0°	+1,0	+0,8	+0,3* -0,2	-0,5	-0,9	-1,5	-1,1	-0,9	-0,7	-0,6	-0,4	-0,3
	30°	+1,0 -0,2**	+0,7 -0,2**	+0,5 -0,4**	-0,5	-0,3	-1,9	-1,4	-0,9	-0,9	-0,8	-0,8	-0,7
	60°	-0,8	-0,9	-0,8	-0,8	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7
	90°	-0,8	-0,8	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,8
1	0°	+0,6* -0,4	+0,7	-0,4	-0,8	-1,3	-1,3	-0,9	-0,7	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5
	30°	+0,9 -0,4**	+0,8 -0,2**	+0,5 -0,5**	-0,7	-1,1	-2,0	-1,4	-1,2	-1,0	-0,9	-0,7	-0,7
	60°	-0,6	-0,9	-1,0	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,8	-0,8
	90°	-1,2	-1,1	-1,0	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-1,0	-1,2	-1,2
2	0°	+0,4* -0,6	+0,5	-0,7	-1,0	-1,6	-1,6	-1,1	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8
	30°	+0,8 -0,5**	+0,8 -0,3**	+0,4 -0,5**	-1,5	-2,0	-2,5	-2,2	-1,8	-1,3	-1,2	-1,2	-0,8
	60°	-1,2	-1,2	-1,0	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-0,9	-1,0	-1,2	-1,2
	90°	-0,7	-0,9	-1,3	-1,2	-1,0	-1,1	-1,2	-1,0	-0,9	-0,8	-0,8	-0,8
4	0°	+0,5* -0,5	+0,5	-0,6	-1,0	-1,5	-1,4	-1,1	-0,9	-0,7	-0,6	-0,6	-0,6
	30°	+0,9 -0,4**	+0,7 -0,2**	+0,4 -0,5**	-1,3	-2,1	-2,5	-2,5	-2,1	-1,5	-1,2	-1,3	-1,2
	60°	-0,8	-1,0	-1,2	-1,2	-1,0	-1,0	-1,1	-1,1	-0,9	-0,9	-0,8	-0,8
	90°	-1,0	-1,0	-0,9	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,8	-0,9	-1,0

* = Schnitt a-a

** = Schnitt b-b

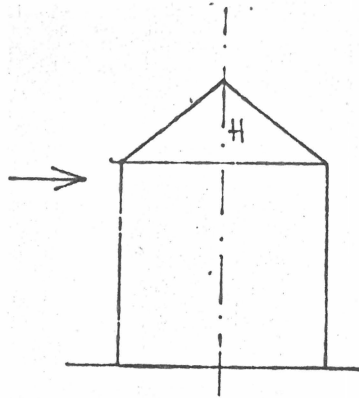
2.3 a Kombination von Kreiszyylinderabschnitten mit rechteckigem Unterbau für verschiedene Anströmrichtungen und überkritisch mit rauhen Oberflächen. Die flachen Abschnitte mit $f/b = 0,20$ (entspricht einer Dachrandneigung von $\sim 45^\circ$) und $f/b = 0,10$ (Randneigung $\sim 22,5^\circ$) zeigen in den mittleren Streifen für $\varphi = 0^\circ$ etwa 60 % kleinere Werte als der Halbkreiszyylinder des Abschnittes 2.2 wegen des um etwa 50 % größeren Krümmungsradius.

Nachstehende Werte gelten für $0,5b < l < 3b$



Für zwischen $\varphi = 0^\circ$ und 90° liegende Richtungen können im Scheitelbereich und im luvseitigen Kantenbereich bis 50 % höhere Spitzenwerte auftreten.

2.3 b Kegeldach als Überdachung eines Kreiszylinders mit senkrecht stehenden Achsen.



Die Druckbeiwerte für den Zylinder ergeben sich nach Bild 9 und Bild 5.

Druckbeiwerte für den Kegel:

Bei den auf zylindrischen Unterbauten stehenden flachen Kegeln bis zu 20° Neigung gegen die Horizontale gelten ähnliche Unterdruckverteilungen wie für eine Abschlußplatte auf einem Zylinder (Ablösegebiet).

Bei auf Zylindern stehenden steileren Kegeln zwischen 30° und 50° Neigung entsprechen die Druckverteilungen in der Nähe der 90° Linie und in $1/3$ der Kegelhöhe praktisch denen auf einem Kugelschalenabschnitt gleichen Volumens in den entsprechenden Schnitten.

Druckspitzen in kleinen Bereichen auf den 90° Linien nahe der Kegelspitze können $c_p = -3,0$ erreichen.

2.4 Baukörper mit zweifach gekrümmten Außenflächen

a) Kugel

Im Widerstandsminimum bei $Re \sim 0,3 \cdot 10^6$ ist bis $c_f \sim 0,20$ bei rauher Oberfläche auf der Rückseite $c_{p180} \sim + 0,30$; bei hohen Re-Zahlen (siehe Abschn. 1.6a)

mit $c_f \sim 0,50$ ist $c_{p180} = -0,50$.

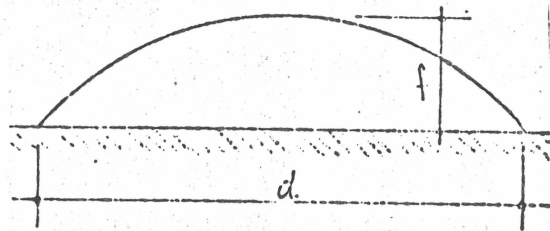
c_p -Werte

φ	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
$Re = 0,3 \cdot 10^6$	+1,0	+0,9	+0,5	-0,1	-0,7	-1,1	-1,2	-1,0	-0,6	-0,2	+0,1	+0,3	+0,4
$Re = 2 \cdot 10^7$	+1,0	+0,9	+0,4	-0,2	-0,9	-1,2	-1,0	-0,6	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5

Die Werte gelten für freistehende Kugeln, d.h. der Mittelpunkt liegt mehr als $1,5 D$ über Gelände. In Bodennähe vergrößern sich die seitlichen und oberen Unterdrücke und die Rückseitendrücke.

2.5 Abschnitte von zweifach gekrümmten Außenflächen

a) Kugelabschnitt am Boden aufliegend.



Verhältnis f/d	Maximalwerte		Abheband c_a
	pos. c_p	c_p Mitte	
1/15	+0,1	-0,3	0,15
1/10	+0,2	-0,3	0,20
1/8	+0,2	-0,4	0,25
1/6	+0,3	-0,5	0,30
1/4	+0,4	-0,6	0,35
1/2	+0,6	-1,0	0,55

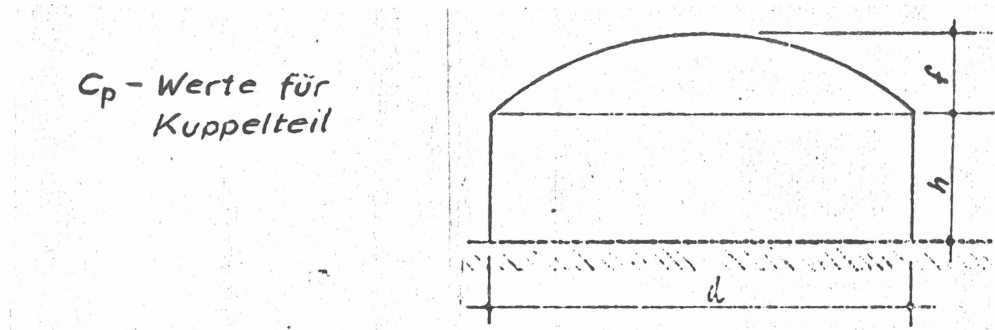
- b) Für freistehende Kugelkalotten können bei genügendem Bodenabstand d.h. $e > d/2$ die maximalen Drücke etwa aus den Kraft- und Momentenbeiwerten des Abschnittes 1.6d abgeschätzt werden.

2.6 Kombinationen von zweifach positiv gekrümmten Außenflächen mit prismatischen und zylindrischen Unterteilen.

Druckverteilungen und Kräfte am gekrümmten Teil sind vorwiegend durch die Krümmung der Schale und das Verhältnis Höhe/Breite des Gesamtbauwerkes bestimmt, doch spielt letzteres eine geringe Rolle, solange die Gesamthöhe kleiner als $3/4$ des Bauwerksdurchmessers ist. Hier können die für Kugelabschnitte entsprechender Größe abzulesenden Werte für die Kuppel näherungsweise eingesetzt werden, wenn die Randneigung größer als 30° bei Unterbauhöhe $D/2$ und größer als 45° bei Unterhöhe $h > D$ ist. Andernfalls tritt Ablösung ohne Wiederanlegen der Strömung an der luvseitigen Kante ein. Da die Beiwerte und die Druckverteilungen stark abhängig von der Reynolds-Zahl sind, ist für die Großausführung mit Strömungsabriß zwischen 80° und 90° (Äquator) zu rechnen und mit Druckverteilungen ähnlich wie im unterkritischen Bereich. Dies ergibt sich auch aus der Abhängigkeit $c_f(Re)$. Für die Kugel gelten für $Re \gtrsim 0,3 \cdot 10^6$ die in Tabelle 2.4a angegebenen Werte. Bei höheren Re-Zahlen verändern sich die leeseitigen Werte in Richtung auf die der dritten Zeile.

Für den Übergangsbereich können nach einem Vergleichs-ellipsoid Abschätzungen vorgenommen werden. Für den zylindrischen bzw. prismatischen Unterbau können c_p -Werte aus den früheren Abschnitten abgeleitet werden.

2.6 a Kugelabschnitt als Überdachung eines stehenden Zylinders.



Verhältnis		Maximalwerte c_p		
f/d	h/d	Luvseite	Spitze	Leeseite
1/2	1/4	+0,9	-1,5	-0,4
	1/2	+0,8	-1,7	-0,4
	1	+0,8	-1,7	-0,5
1/6	1/4	-1,0	-0,9	-0,4
	1/10	-1,2	-0,6	-0,3
	1/15	-1,4	-0,5	-0,3
	1/20	-1,4	-0,4	-0,2
1/6	1	-1,4	-1,1	-0,4
	1/10	-1,7	-0,8	-0,4
	1/15	-1,5	-0,5	-0,4
	1/20	-1,4	-0,5	-0,4

Die c_p -Werte für den Zylinderteil sind nach Bild 9 und Bild 5 zu ermitteln. Die Anpassung an die für kleinere \wedge geringeren c_f -Werte erfolgt dabei durch Abbau des Rückseitendruckes der Kurve b in Bild 9 und auf der Luvseite durch Abbau der Überdrucke bis zur Dachkante auf den Wert ~ 0 .

2.6 b Bei Kugelabschnitten über Rechteckprismen sind für die Kuppel die Werte aus 2.6 a sinngemäß zu übernehmen und für das Prisma unter Einrechnung einer zusätzlichen Höhe $f/2$. Hier werden erst Versuche ausreichend genaue Ergebnisse liefern.

2.7 Baukörper mit zweifach negativ gekrümmten Außenflächen.

Hierzu gehören Rotationshyperboloide (Kühltürme) ebenso wie die Pseudosphäroidflächen (Trompetenflächen) und die Hyperbol-Paraboloide (Sattelflächen). Bei diesen Flächen treten stärkere stetige Zusammendrängungen der Strömung in der "Taille" ein, d.h. hohe Übergeschwindigkeiten und Unterdrücke und relativ weit vorverlegte Ablösezonen mit hohen c_p ~~180~~-Werten im Nachlaufbereich, gelegentlich auch starke Ablösewirbel.

Kühltürme normaler Proportionen können näherungsweise als kurze Zylinder betrachtet werden mit gegenüber diesen um $\sim -0,1$ erhöhten Unterdrücken im Nachlauf.

Die Sattelflächen weisen erhebliche Unterdrücke und Auftriebsbeiwerte in großen Zonen auf, wobei die Spitzenwerte bis $c_p \sim -8,0$ gehen können. Wesentlich sind allerdings die sehr großen Bereiche mit Beiwerten zwischen $-1,0$ und $-2,0$. Die Druckverteilungen entsprechen etwa denen an Flachdachbauten mit großen Dachüberständen bei Anströmung über Eck mit konischen Randwirbeln großer Reichweite.

Trompetenflächen, z.B. an den Spitzen von Hängekonstruktionen, weisen ebenfalls sehr hohe Unterdruckwerte bis $-4,0$ in großen annähernd windparallelen Abschnitten auf. Diese Werte liegen höher als bei Kegeln.

Große obere oder seitliche Öffnungen können eine starke Änderung in der Verteilung der Windlasten bringen und vor allem Unterdruckspitzen abbauen.

Bei frei durchströmten Hypar-Schalenkonstruktionen, wie Stadionsdächern usw. ist zu beachten, daß sich bei diesen Formen Überdruck- und Unterdruck-Bereiche auf Ober- und Unterseite meist derart ergänzen, daß sie die effektiven Flächenbelastungen um 40 bis 60 % gegenüber geschlossenen Bauwerken heraufsetzen.

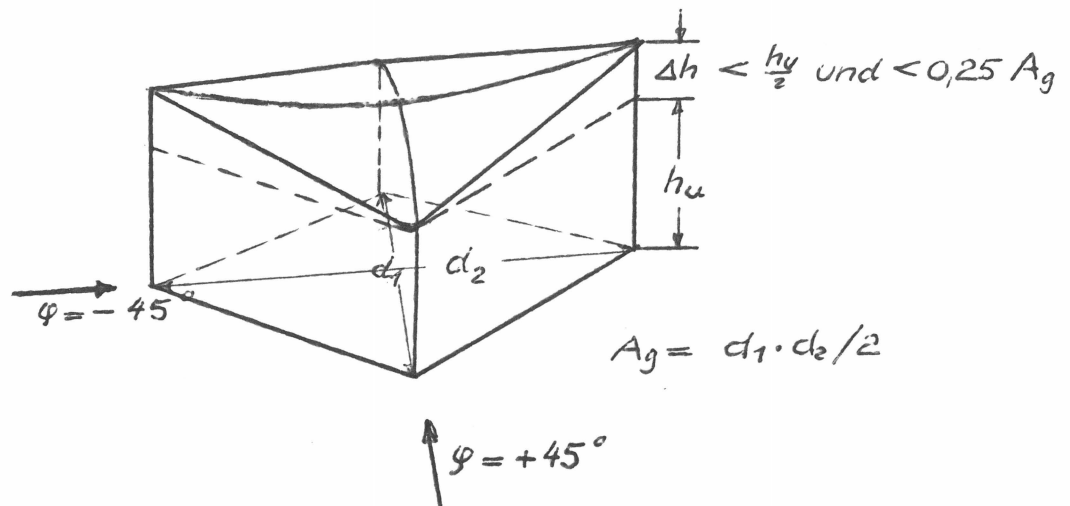
Die Höhe des Unterbaues, Dachüberstände, Krümmungsverhältnisse, Rauigkeit, Dachkantenausbildung sind hier entscheidend. Wegen der geringen Zahl einwandfreier Messungen einerseits und der Zahl der Einflußparameter können keine allgemein verbindlichen Diagramme angegeben werden.

Wegen der Empfindlichkeit der Strömungen an stetig gekrümmten Flächen gegen kleine Krümmungsänderungen müssen gegebenenfalls Windkanalversuche am elastischen Modell ausgeführt werden.

2.8 Abschnitte von zweifach negativ gekrümmten Außenflächen.

Solche Flächen werden noch vorwiegend als Membrandächer ausgeführt. Dort konnten Abschätzungen aufgrund der in Abschnitt C dargestellten Iterations-Methoden vorgenommen werden. Beiwerte zur allgemeinen Anwendung können nicht genannt werden.

2.9 Kombinationen von zweifach negativ gekrümmten Außenflächen mit prismatischen oder zylindrischen Unterteilen.



Auf prismatischen oder zylindrischen Unterbauten liegende Dächer deren Gesamthöhe Δh (Höhendifferenz zwischen höchsten und tiefsten Punkten) kleiner ist als die halbe Höhe des Unterbaues am Tiefpunkt und kleiner als $0,25 \cdot \sqrt{\text{Grundfläche}}$ können mit den Druckverteilungswerten bemessen werden für ein Flachdach über gleichem Grundriß, wenn hinter den luvseitigen Hochpunkten bei Anströmung über die Hochpunkte die Spitzenwerte um 50 % erhöht und vor den leeseitigen Hochpunkten die Beiwerte auf 0 herabgesetzt werden.

Bei Anströmung über die Tiefpunkte hinweg können die luvseitigen Unterdruckspitzen einer Flachdach-Druckverteilung um 25 % abgemindert werden bei gleichzeitiger Erhöhung der Unterdrücke auf der leeseitigen Hälfte um etwa 50 %. In der Mitte ergeben sich die Unterdruckwerte aus der konvexen Krümmung etwa zu $c_p \approx -0,70$,

bis zu den Hochpunkten herüber, d.h. etwa der gleiche Wert wie für den Auftriebsbeiwert c_a . Bei stärker gekrümmten Dachflächen und/oder niedrigeren Unterbauten sind brauchbare Näherungsregeln nicht zu geben. Hier sind gegebenenfalls Versuche durchzuführen.

F. Literaturangaben

Die nachstehenden Arbeiten wurden sämtlich bei Auswertung und Beurteilung sowie Festlegung von Beiwerten verwendet. Die einschlägige Literatur ist inzwischen etwa 10 bis 20-fach umfangreicher und größtenteils aus den Übersichten der Lehrbücher, Kongreßberichte usw. zu entnehmen. Die Literaturkartei der British Hydraulic Research Association, Cranfield gibt besonders umfangreiches Material.

1. Bücher (Monographien, Lehrbücher)

Betz	"Konforme Abbildung" Springer, Berlin 1964
Drechsel	"Turmbauwerke" Bauverlag Wiesbaden 1964
Durand	"Aerodynamic Theory" Vol. I - VI Springer, Berlin 1935
Eck B.	"Technische Strömungslehre" Springer, Berlin 1966
Försching	"Grundlagen der Aeroelastik" Springer, Berlin 1974
Fuchs-Hopf-Seewald	"Aerodynamik" Bd. I u. II Springer 1935
Gebelein	"Turbulenz. Physikalische Statistik und Hydrodynamik" Springer, Berlin 1935
S. Hoerner	"Fluid Dynamic Drag" Selbstverlag 1958
M.Jensen + N. Franck	"Modellversuche im turbulenten Wind", Teil I u. II The Danish Technical Press, Kopenhagen 1963 und 1965

- Kaufmann "Angewandte Hydromechanik"
Band I u. II
Springer Verlag 1934
- Lamb "Lehrbuch der Hydrodynamik"
Leipzig 1931, Neudruck N.Y. 1945
- W. Müller "Einführung in die Theorie der
reibenden Flüssigkeiten"
Leipzig 1932
- Newberry u. Eaton "Windloading handbook" 1974
BRE Report
HMSO London 1974
- L. Prandtl "Führer durch die Strömungslehre"
Vieweg Braunschweig 1944
- Prandtl "Führer durch die Strömungslehre"
Oswatitsch
Wieghardt Vieweg, Braunschweig 1969
- Prandtl u. Tietjens "Hydro- und Aeromechanik"
Springer, Berlin 1931
- Prandtl "Ergebnisse der AVA Göttingen"
Wieselsberger, Betz 2. u. 4. Lieferung
R. Oldenbourg 1923
- Rotta "Turbulente Strömungen"
BG Teubner, Stuttgart 1971
- Schlichting "Grenzschichttheorie"
C. Braun, Karlsruhe 1951
- Sommerfeld "Vorlesungen über theoretische
Physik" II
Akad. Verlags Ges. Leipzig, 1945
- Townsend "The structure of turbulent
shear flow"
Cambridge Univ. Press, 1976
- Trukenbrodt "Strömungsmechanik" 1.u.2. Teil
TU München 1963
- Zuranski "Windbelastung von Bauwerken
und Konstruktionen"
Verl. R. Müller, Köln 1969

2. Tagungsberichte

Die hierin enthaltenen Beiträge zu den im Bericht behandelten Fragen sind nicht mehr bei den Einzelberichten aufgeführt.

IASS	"IASS Colloquium" Paris 1962 North Holland Publ. Co.
NPL	"Proc. of the International Conference of the wind effects on buildings and structures" Teddington 1963
Hansen	"Symposium on Fully Separated Flows" ASME Conference Philadelphia 1964
IASS	"Proceedings of the symposium on tower-shaped structures" Preßburg 1966
NRC	"Windeffects on buildings and structures" Int. Res. Sem. Ottawa Univ. of Toronto 1967
Johns, Scruton Ballantyne NPL	"Proceedings of a Symposium on Wind Effects on Buildings and Structures" Loughborough 1968
IASS	"Proceedings of the conference on tower-shaped structures" Delft 1969
AGARD	"Berichte vom Symposium München" München 1969
IVBH	"Proceedings of the 3 rd Int. Conf. on Wind Effects on Buildings and Structures" Tokio 1971
Univ. of Western Ontario	"Symposium an full-scale measurements of wind effects on buildings and other struc- tures" 1974, Journ. of Ind. Aerody- namics

K.J. Eaton "Proceedings of the 4. Intern. Conf. on wind effects on buildings and structures" 1975 Heathrow, BRE

DFG "Berichte zum DFG Schwerpunktprogramm" Bauwerke unter aerodynamischer Belastung" TU München 1976

3. Einzelberichte

Achenbach "Einfluß der Oberflächenrauigkeit und der Tunnelversperrung auf die Nachlaufströmung hinter Kugeln" Journ. Fluid Mech. 1974, S.113ff

Achenbach "Örtliche Druckverteilungen und Reibungsbeiwerte an einem quer angeströmten Zylinder bis $Re = 5 \cdot 10^6$ " Journ. Fluid Mech. 1968/40

Ackeret "Der Winddruck auf Schornsteine mit Kreisquerschnitt" SBZ 1936 S. 25 ff

Ackeret "Anwendungen der Aerodynamik im Bauwesen" ZFW 1965, S. 109 - 122

Ackeret + Egli "Über die Verwendung sehr kleiner Modelle für Winddruck-Versuche" SBZ 1965

Allen + Perkins "A study of effects of viscosity on flow over slender inclined bodies of revolution" NACA Rep. 1048 (1951)

Armitt + Counihan "The simulation of the atmospheric boundary layer in a wind tunnel" Atmosph. Environment 2/49-71 u. 3/197 - 214

Barth "Windkanaluntersuchungen an einem 2 m Ø Spiegelmodell" FKFS Ber. 21/57

- Barth "Dreikomponentenmessung am Modell eines Parabolspiegels"
FKFS Stuttgart Ber. 26/1961
- Barth "Bestimmung der Windlasten am Dach einer Wagenhalle. Modellversuche im Windkanal"
FKFS Stuttgart 24/1963
- Baumert "Modellversuche zu den Windbelastungen an einem Radioteleskop"
AVA Göttingen 67 A 33
- Baumert "Messungen der Windbelastung am Dach eines Modelles der Gleishalle Pakum München"
AVA Göttingen 66 A 25
- Bearman + Fackrell "Die Berechnung einer zweidimensionalen und einer rotationssymmetrischen Strömung um einen breiten Körper"
Journ. Fluid Mech. 1970 S. 229 ff
- Beutler "Zur statischen Windbelastung von Seilnetzwerken"
Deutsche Bauakademie, Ostberlin 1974
- Bloor "The transition to turbulence in the wake of a circular cylinder"
Journ. Fluid Mechanics 1964
S. 290 ff
- Bradshaw "Zum Verständnis und zur Bestimmung turbulenter Strömungen"
Jahrbuch 1972 der DGLR S. 51 ff
- Bradshaw "Über die Arbeitsrichtungen der verschiedenen Rechenmethoden für komplizierte turbulente Strömungen"
I.C. Aero Report 73-05, London
- Bruniak + Sockel "Widerstandsmessungen an Rohren und Gerüstteilen"
Österr. Ing. Zeitschrift 1961

- Buri "Eine Berechnungsgrundlage für die turbulente Grenzschicht bei beschleunigter und verzögerter Strömung"
Dissertation ETH Zürich 1931
- Cincotta, Jones Walker "Versuche über winderregte Schwingungen an Zylindern in zweidimensionaler Strömung der hohen Re-Zahlen"
NASA TR-R300, 1969
- Cohen + Vellozzi "Böen-Reaktionsfaktoren für Bauwerke und Konstruktionen"
ASCE-Konferenz Dallas Februar 1967
- Cohen + Vellozzi "Wind forces and pressures on antennas"
Annales New York Acad. Sciences 1964
- Cowdrey + Lawes "Force measurements on square and dodecagonal section cylinders at high Reynolds numbers"
NPL Aero 351 (1959)
- Davenport "The Application of Statistical Concepts to the wind loading of structures"
Proc. Instn. Civ. Engrs. 1961
S. 449 - 472
- Davenport "Gust loading factors"
ASCE-Journ. ST 3 1967
- Davenport "The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high speed winds"
Quart. Journ. Royal Met. Soc. 1961
S. 194
- Davenport "A rationale für the determination of design wind velocities"
Proc. ASCE ST 5 S. 39-68
- Deacon "Wind gust speed"
Austr. Met. Mag 1965, S. 11-14
- Deardorff "A numerical study of three-dimensional channel flow at large Reynolds numbers"
Journal of Fluid Mech. 1970
S. 453 - 480

- D.M. Deaves "Wind über Bergen"
Journ. of Ind. Aerodyn 1976
S. 371 - 391
- Delaney, Sörensen "Low-Speed-Drag of Cylinders of
various shapes"
NACA-TN 3038 (1953)
- Delage + Labbé "Compartement dynamique des
cheminées en acier"
Essais et mesures 1968
Nr. 251 S. 1583 - 1597
- Dierks "Windbeanspruchung einer hyper-
bolischen Paraboloidschale"
Der Bauingenieur 1962 S.258-262
- U. Domm "Ein Beitrag zur Stabilitätstheorie
der Wirbelstraßen unter Berück-
sichtigung endlicher und zeitlich
wechselnder Wirbelkerndurchmesser"
Ingenieur Archiv 1954 S. 49
- Dryden + Hill "Windpressure on circular cylinders
and chimneys"
N.B. Stand. Journal Res. 1930
S. 653
- Eßlinger, Ahmed "Stationäre Windbelastung offener
Schröder und geschlossener Kreiszyliner-
Silos"
Der Stahlbau 1971, Seite 361
- Ebner-Ruscheweyh "Windlasten an hyperbolischen Kühl-
turmschalen"
Forschungsberichte NRW Nr. 2428
1974
- Fage + Falkner "Further experiments on the flow
around a circular cylinder"
ARC R + M 1369
- Fage, Warsap "The effects of turbulence and
surface roughness on the drag of
circular cylinders"
ARC R + M 1283
- Farell, Given, Maisch "Die mittlere Windbelastung auf
Kühltürmen mit rauhen Wänden"
Proc. ASCE 12547 EM 6 1976
S. 1059 - 1089

- Fischer "Modellversuche zur Bestimmung der Winddruckverteilung an Kühltürmen"
SBZ 1953 S. 15
- Flachsbart "Der Widerstand von Kugeln in der Umgebung der kritischen Reynold'schen Zahl"
AVA Ergebnisse IV. Lieferung 1932
- Flachsbart "Winddrücke auf Gasbehälter"
AVA Göttingen III. Lieferung
- Frühwald "Widerstandswerte für kurze Zylinder und deren Kombinationen"
Inst. für Strömungsmech. d. TU München A 60/11 u. A 64/11
- Fuhrmann "Theoretische und experimentelle Untersuchungen an Ballonmodellen"
Dissertation Göttingen 1910
- Fung "Fluctuating lift and drag acting on a cylinder in a flow at supercritical Reynolds numbers"
Journ. Aeron. Sci 1960
S. 801 - 814
- Gould, Raymer, Ponsford "Windtunneltests on chimneys of circular section at high Reynolds numbers"
NPL Aero Rep. 1266 (1969)
- Gould + Sykes "Das Verhalten von Bauwerksmodelle in turbulenter Luftströmung"
Proc. Inst. Civ. Engrs. 1978
S. 189 - 197
- Gruschwitz "Die turbulente Reibungsschicht in ebener Strömung bei Druckabfall und Druckanstieg"
Ingenieur-Archiv 1931, S. 321
- Hartree "On an equation occurring in Falkner and Skan's approximate treatment of the equations of the boundary layer"
Proc. Cambr. Phil. Soc. 1935

- d'Havé "L'action du vent sur les bâtiments"
Annales des Travaux publics de Belgique 1965 Nr. 6
- Helmholtz "Zwei hydrodynamische Abhandlungen"
Ostwalds Klassiker Nr. 79, Leipzig
- Herzog "Realistische Näherungsberechnung hyperbolischer Kühltürme"
Bautechnik 1975, S. 48 ff
- Herzog "Der Einfluß der Windreibung auf hyperbolische Kühltürme"
The Structural Engineers 1974
S. 417 ff
- van der Hoven "Power spectrum of horizontal wind speed"
Journ. Met. 1957, S.160 - 164
- Hsu, Makowsky "Messung des Umschlagspunktes an einer Kugel bei hohen Reynolds-zahlen"
BHRA-Report 1110, Juli 1957
- Johns "Wind excited behaviour of cylindrical structures"
AGARD Conf. Proc. 48, München 69
- Jones "Unregelmäßige Auftriebskräfte bei Wirbelablösungen an einem großen feststehenden oder schwingenden Zylinder bei hohen Re-Zahlen"
NASA ASNE 68 - FE - 3
- v. Kármán "Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erfährt"
Nachr. d. Wiss. Ges. Göttingen Math. Phys. Klasse (1911 + 1912)
- Keulegan + Carpenter "Forces on Cylinders and Plates in an Oscillating Fluid"
Journal of Res. NBS May 1958
Paper 2857

- Kolscher "Unstetige Strömungen mit endlichem Totwasser"
Lufo 1940, Seite 154
- van Koten "Windbelastung"
1973 TNO - Rijswijk (Z.H.)
- K. Kraemer "Druckverteilungsmessungen an Kreiszyklindern mit Beachtung dreidimensionaler Randstörungen"
AVA Göttingen 165/32
- K. Kraemer "Die Druckverteilung am Keil bei inkompressibler Strömung"
AVA Göttingen Mitt. 30/1964
- Krätzig, Peters, Zerna "Naturzug-Kühltürme aus Stahlbeton"
Beton- und Stahlbetonbau 1978
- Leutheusser "The effects of eaves on the roof pressure coefficients of block-type and cylindrical structures"
Univ. Toronto 1965, T.P. 6503
- Lindsey "Drag of Cylinders of simple shapes"
NACA Rep. 619 (1937)
- Maher "Wind loads an Dome-Cylinder and Dome-Cone Shapes"
ASCE Proc. Struct.Div. Oct. 1966
- Mauermayer "Beschreibung des natürlichen Windes im Hinblick auf die Gebäudeaerodynamik"
TU München Inst. f. Strömungsmechanik Ber. 73/21
- Maxworthy "Turbulente Wirbelringe"
Journ. of Fluid Mech. 1974
S. 227 - 239
- M.V. Morkovin "Strömung um einen Kreiszyklinder"
ASME Symposium on fully separated flows, 1964

- Naumann,
Quadflieg "Wirbelbildung an zylindrischen
Bauteilen und ihre Darstellung
in Windkanälen"
IUTAM-Symposium Karlsruhe 1972
- Newberry, Eaton,
Mayne "Windpressure and strain measure-
ment at the Post Office Tower"
BRA CD 30/73
- Niemann "Zur stationären Windbelastung
rotationssymmetrischer Bauwerke
im Bereich transkritischer Rey-
noldszahlen"
Mitt. 71-2 v. Inst. f.konstr.
Ing.-Bau, Bochum
- Niemann, Peters,
Zerna "Naturzugkühltürme im Wind"
Beton- und Stahlbetonbau 1972
S. 121 - 129
- Niemann + Pröpper "Wirkungen veränderlicher Wind-
drücke auf einen Kühlturm"
Journ. of Ind. Aerodyn. 1976
S. 349 - 359
- Nikuradse "Untersuchungen über die Geschwin-
digkeitsverteilungen in turbu-
lenten Strömungen"
VDI-Forschungsheft 281
- Ning-Chien u.a. "Wind Tunnel studies of pressure
distribution on elementary buil-
ding forms"
Iowa Inst. of Hydr. Res. 1951
- Normann, Morsbach,
Kramer "Über die Bedingungen der Ab-
lösung und der Wirbelbildung
hinter Zylindern"
AGARD-Bericht CP 4 S. 539-574
(1965)
- Österr. Stahlbau-
verband Forschungsarbeit "Oberirdische
Tankbauwerke" 1976
- Panofsky "Die atmosphärische Grenzschicht
unter 150 m Höhe"
Annual Review of Fluid Mechanics
1974 S. 147 - 177
- Panofsky "Windstruktur von Starkwinden unter-
halb 150 m"
Wind Engg. 1977 S. 91
- Panofsky + Townsend "Change of terrain roughness at the
windprofile"
Journ of the Royal Met. Soc. 90
S. 147 - 155

- Pechstein "Der natürliche Wind und seine Wirkung auf einen größeren Kreis-Zylinder"
Dissertation TH Hannover 1941
- Pohlhausen "Zur näherungsweise Integration der Differentialgleichung der laminaren Reibungsschicht"
ZAMM 1921 S. 235
- Pothoff "Druckverteilungsmessungen am Modell 1:175 des Hallenbades Schlingenspforte, Hamburg"
FKFS Ber. 3/69
- Pothoff "Messungen am Modell des FMT Berlin"
FKFS 1966
- Pretsch "Über die Stabilität der Laminarströmung um eine Kugel"
Lufo 1941 S. 341
- Pretsch "Die laminare Reibungsschicht an elliptischen Zylindern und Rotationellipsoiden bei symmetrischer Umströmung"
Lufo 1941 S. 397
- Pretsch "Die Anfachung instabiler Störungen in einer laminaren Reibungsschicht"
Jahrbuch Dt. Lufo 1942 S. 54
- Pris M.R. "Résistance de Cylindres à base polygonale, à base circulaire et à surface rugueuse" III u. IV
Inst. Techn. du Bâtiment et des Trav. Publ. 1961
- Pris M.R. "Studien an Zylindern in Bodennähe"
Études aérodynamiques.
Annales ITBTP 1966
- Relf + Simmons "The frequency of the eddies generated by the motion of circular cylinders through a fluid"
ARC R + M 917
- Rogler + Reshotko "Der Zerfall einer räumlichen Wirbelanordnung"
The Physics of Fluids, 1976
S. 1843 - 1850

- Ropelefsky
Tennekes
Panofsky "Horizontale Kohärenzen von Windfluktuationen"
Boundary Layer Meteorology 1973
S. 353 - 363
- A. Roshko "Struktur turbulenter Grenzschichtströmungen, ein neuer Ausblick"
AIAA-Journal 1976, S. 1349-1357
- A. Roshko "Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds numbers"
Journ. of Fluid Mech. 1961, S. 345
- A. Roshko "A new hodograph for free-stream-line-theory"
NACA TN 3168 .
- Ruscheweyh "Windlasten am Fernsehturm Hamburg"
Journ. of Ind. Aerodyn. 1976
S. 315 - 333
- Ruscheweyh "Beitrag zur Windbelastung hoher kreiszylinderähnlicher schlanker Bauwerke im natürlichen Wind bei Reynoldszahlen bis $Re = 14 \times 10^6$ "
Diss. Aachen 1974
- J.F. Sageau "Untersuchung eines stationären und instationären Strömungsfeldes an einem 240 m-Kamin"
Journ. of Ind. Aerodyn. 1978
S. 361 - 383
- D.W. Sallet
R.S. Widmayer "Eine experimentelle Untersuchung von laminaren und turbulenten Wirbelringen in der Luft"
ZFW 1974, S. 207
- Salter + Raymer "Druckverteilungsmessungen bei hoher Reynoldszahl an einem Kühlturmmodell im Windschatten eines zweiten"
NPL Aero Report 1027 (1962)
- Savitzky "The wind load on structures" 1972
Aus dem Russischen übersetzt von BRS, Garston
- Schlichting "Zur Berechnung des Umschlages laminar/turbulent"
Jahrbuch Dt. Lufo 1942, I 8

- Schlichting "Zur Entstehung der Turbulenz bei der Plattenströmung" Göttingen AVA 1933
- Schlichting-Baumert "Modellmessungen der Windbelastung an der Parabolantenne Raisting II" AVA Göttingen 68 A 05
- Schnabel-Trinkl "Strömungstechnische Untersuchungen an einem Modell der Erdefunkstelle Raisting II" BLGA München A 3/68
- Schubauer "Air flow in the boundary layer of an elliptic cylinder" NACA Rep. 652
- G. Schulz "Der Windwiderstand von Fachwerken aus zylindrischen Stäben" CIDECT-Bericht 69/29 G, Düsseldorf 1970
- Schulz + Hayn "Widerstandsmessungen an Systemteilen von Rohrkonstruktionen" Teil 3 (1968) DVL 1-NK-I-68-34
- Schultz-Grunow "Turbulente Ablösung bei Druckanstieg" Luftfahrtforschung 1939, S. 425
- Schwarz "Messungen am Korbmodell des FST Mannheim" Ber. IAGS Stuttgart 1973
- Schwarz "Messungen am Korbmodell des FMT Koblenz" Ber. IAGS Stuttgart 1974
- Scanlan, Sollenberger "Druckdifferenzen in der Schale eines hyperbolischen Naturzug-Kühlturms" Symp. Heathrow 1975, Cambr. Univ. Press.
- Scruton + Newberry "On the estimation of wind loads" Inst. of Civ. Engrs. London 1972
- Scruton + Newberry "Über die Bestimmung von Windlasten für den Entwurf von Baukonstruktionen" Proc. Inst. Civ. Engrs. 1963 S. 97 - 136

- Sherlock + Stout "Picturing the structures of the wind"
Civ. Engg. 1932 Nr. 6
- Simiu, Marshall
Haber "Abschätzung der Bauwerksreaktion in Windrichtung"
ASCE Journ. of the Struct. Div 1977, S. 1327
- Simmons "Similarities between two-dimensional and axial-symmetric vortex wakes"
AIAA February 1977
- Simmons "Der Zusammenhang von Basisdruck und Ablösegeschwindigkeit bei stumpfen Widerstandskörpern"
Aeron. Journ. 1974 Juli
- Simmons "Der Einfluß des Ablösewinkels auf Wirbelstraßen"
ASCE Okt. 1975, S. 649 - 661
- Széchenyi "Zur Simulation höherer Reynoldszahlen an einem Zylinder im Windkanal"
Récherche Aerospatiale 1974
S. 155 - 164
- Tanner "Zur Bestimmung des Totwasserwiderstandes mit Anwendung auf Totwasser hinter Keilen"
DFVLR 64/39 und AVA 31/64
- Taylor + Gent "Modell der atmosphärischen Grenzschichtströmung über einer einzelnen Bodenwelle"
Boundary Layer Met. 1974,
S. 349 - 362
- A. Timme "Über die Geschwindigkeitsverteilung in Wirbeln"
Ing. Archiv 1957, S. 205
- Tollmien "Grenzschichten" u. "Turbulente Strömungen"
Im Handbuch der Exp. Physik IV Teil I, S. 274 u. S. 291
- Tollmien "Über die Entstehung der Turbulenz"
Göttingen AVA 1929

- Trinkl u. Schnabel "Die Olympiadächer im Windkanal"
Der Bauingenieur 1972, S. 11
- E. Truckenbrodt
u. G. Lusch "Windkräfte an Bauwerken"
Berichte aus der Bauforschung
Heft 41, 1964
- Tsinober, Shtern
Shcherbinin "Der Einfluß der Re-Zahl auf die
Lage des Ablösepunktes"
Ing.Phys. Journ. 1965, S. 121-123,
Riga
- M.S. Uberoi "Struktur eines turbulenten Wirbel-
fadens"
Physics of Fluids 1977 S. 719
- Vickery "On the reliability of gust loading
factors"
Civ. Engg. Transactions 1971
- Weigmann, Heyde,
Rothe "Hyperbolische Kühltürme und Kühl-
turmgruppen unter Windbelastung"
Bauplanung-Bautechnik 1970, S.319
- Weiß "Kármán-sche Wirbelstraßen"
Journal of Fluid Mech. 1973
S. 199 - 205
- Weiß "Die gerichtete Quelle und ein
neuer Typ von Singularitäten in
einer Potentialströmung"
Israel Journal of Technology 1976
S. 3 - 8
- Whitbread "Wind forces on a model of a
radiotelescope für the NRC of
Canada"
NPL Aero-Report 1023
- Whitbread + Packer "Druckverteilung an einem Hyperbol-
Paraboloid-Dach"
NPL Aero-Report 425/1960
- Wieghardt "Zusammenfassender Bericht über
Arbeiten zur statistischen Turbu-
lenztheorie"
Luftfahrt-Forschung 1941 S. 1
- Wieghardt "Über einen Energiesatz zur Berech-
nung laminarer Reibungsschichten"
Ing. Archiv 1948, S. 231

- R. Wille "Kármán-sche Wirbelstraßen"
ZWF 1961, S. 150
- Williams, Nixon
Skelton "Tests on Models of Parabolic
Reflectors"
NPL Aero Rep 250 (1961)
- Wittmann,
Panggabian
Schüeller "Bemessung schlanker Bauwerke
gegen Windlasten auf Grund eines
Zuverlässigkeitskonzeptes"
4. Konferenz über Windlasten
London 1975
- R. Wootton "Drag of towers and guyed masts"
IASS, Prag 1971
- Wyatt "The aerodynamics of shallow para-
boloid antennas"
Ann. of the N.Y. Acad. Sci. 1964
- H.T. Yang u. Bar-Lev "Modell einer Potentialströmung
für einen plötzlich verschobenen
Zylinder"
Journ. of Appl. Mech. 1976
S. 213 ff
- Zerna "Auswertung der Windkanalmessungen
der DVL für das Kraftwerk Schol-
ven"
Bericht 13 Inst. f. Massivbau
TH Hannover (1967)

4. Ausländische Windlastbestimmungen

- ANSI "Am. St. Building Code Require-
ments for Minimum Design Loads
in Buildings and other Struc-
tures"
A 58-1 (1972)
American National Standards
Institution
- SAA "Australian Standard CA 34/II
1971 Wind forces"
Standards Assoc. of Australia
Sydney
- IBN "Action du vent sur les Construc-
tions NBN 460 01-0"
Brüssel 1960, Inst. Belge de
Normalisation

NBC	"National Building Code of Canada, Wind loads 1969" NRC, Ottawa
DS 410	"Code of Practice for Wind Loads for Denmark" Draft 1978, Teknisk Förlag Kopenhagen
BSI	"British Standard Code of Practice for Loading. Wind loads CP 3/V" British Standards House, London W1
SDTBTP	"Règles N.V 65 1965, 1967" Paris, Rue la Pérouse
NNI	"Technische Grundlagen für die Be- rechnung von Baukonstruktionen TGB" NEN 3850, Nederlands Normalisatie Instituut
SIA	"Norm für die Belastungsannahmen die Inbetriebnahme und die Über- wachung von Bauten. SIA 160 (1970)" Schweiz. Ing. und Arch. Verein Zürich