

Die Entwicklung der Theorie thermischer Turbomaschinen: Antrittsvorlesung

Autor(en): **Traupel, W.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **73 (1955)**

Heft 8

PDF erstellt am: **26.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-61856>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

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

Die Entwicklung der Theorie thermischer Turbomaschinen

DK 621-135

Antrittsvorlesung, gehalten von Prof. Dr. W. Traupel, am 4. Dezember 1954 im Audit. III der ETH

Die Turbomaschine war seit jeher ein bevorzugtes Betätigungsfeld des wissenschaftlich arbeitenden Maschineningenieurs. Sie ist in der Tat der theoretischen Behandlung leichter zugänglich als viele andere Maschinengattungen.

Die Strömungsvorgänge in solchen Maschinen sind, von Sonderfällen abgesehen, im wesentlichen stationär, d. h. zeitlich unveränderlich. Ein solcher Vorgang ist mathematisch leichter erfassbar als etwa derjenige in einer Kolbenmaschine mit ihrem intermittierenden Öffnen und Schliessen von Steuerquerschnitten und den damit unvermeidlicherweise verhältnismässig regellosen und schwer überblickbaren Strömungsvorgängen und sonstigen Effekten. Verglichen mit der Kolbenmaschine ist die Arbeitsweise der Turbomaschine einfacher, dafür aber der unmittelbaren Anschauung weniger leicht verständlich. Abstrakt theoretische Ueberlegungen sind bei ihr daher nicht nur leichter möglich, sondern waren auch von Anfang an für die technische Verwirklichung unumgänglicher als bei der Erstgenannten.

Um die wissenschaftliche Erforschung der Arbeitsvorgänge in der thermischen Turbomaschine — worunter wir Dampfturbinen, Gasturbinen und Turbokompressoren verstehen — in ihrer Entwicklung zu verfolgen, müssen wir versuchen, die Grundprobleme dieser Theorie kurz zu umreißen. Bild 1 veranschaulicht die Wirkungsweise einer Turbine. Das bei O eintretende Arbeitsmittel wird zunächst im stillstehenden Leitrad a unter Entspannung beschleunigt und derart abgelenkt, dass es am Austritt aus dem Schaufelkranz eine kreisende Bewegung mit grosser Geschwindigkeit ausführt und so in das Laufrad b übertritt. Dort wird dem Arbeitsmittel der Drall wieder entzogen, wodurch am Rade ein Drehmoment und damit schliesslich die Leistungsabgabe entsteht. Meist schaltet man mehrere solcher Elemente, genannt Stufen, hintereinander, um mit mechanisch beherrschbaren Umfangsgeschwindigkeiten auszukommen. Der Turboverdichter stellt prinzipiell die strömungstechnische Umkehrung der Turbine dar.

Wir wollen nun zunächst annehmen, die Abströmrichtungen, welche die Schaufeln dem Arbeitsmittel aufzwingen, seien für Leit- und Laufrad bekannt. Dann lässt sich ein erster Fragenkomplex folgendermassen andeuten. Bei völlig bekanntem Eintrittszustand (im Punkte O) mögen etwa die Drücke an den Stellen 1 und 2 vorgeschrieben werden und ebenso die Umfangsgeschwindigkeit des Laufrades und die durchzusetzende Menge. Gefragt wird nach den Strömungsgeschwindigkeiten, vor und nach jedem Schaufelkranz, nach der Arbeitsübertragung ans Laufrad und nach dem Zustand des Arbeitsmittels in den Punkten 1 und 2, insbesondere nach

seiner Dichte. Aus Strömungsgeschwindigkeiten und Dichte folgen sofort auch die Durchflussquerschnitte, womit die Dimensionierung der Maschine möglich ist.

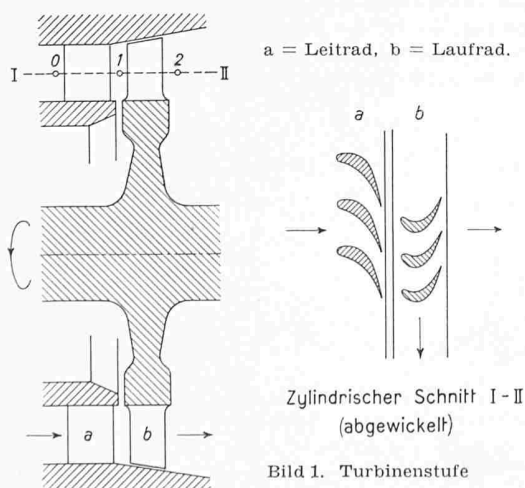
Die Lösung dieser Aufgabe setzt die Kenntnis der thermodynamischen Eigenschaften des Arbeitsmittels voraus. Liegen diese Unterlagen vor, so ist die Rechnung streng durchführbar, wenn die Reibung vernachlässigt wird, und das gilt auch noch für die reibungsbehaftete Strömung, sobald man für jeden Schaufelkranz weiss, wieviel Energie durch Reibung in Wärme rückverwandelt wird. An physikalischen Gesetzen gehen in diese Rechnung ein: Die Erhaltung der Masse, der Energiesatz oder I. Hauptsatz der Thermodynamik und auch der II. Hauptsatz, der ja implizite im Zustandsverhalten des Arbeitsmittels schon drinsteckt. Das grundlegende Bewegungsgesetz der Mechanik — Kraft = Masse \times Beschleunigung, — das ja für jedes Arbeitsmittelteilchen erfüllt sein muss, ist im reibungsfreien Falle durch den Energiesatz schon mit ausgesprochen. Auch im reibungsbehafteten Falle ist der Uebergang von der Energiegleichung zur Bewegungsgleichung herstellbar, sobald die Grösse der Reibungsverluste bekannt ist. So sagt die thermodynamische Theorie zugleich auch das dynamisch Grundlegende über die Bewegung des strömenden Mittels aus und gewinnt damit insbesondere auch jenen rein mechanisch gegebenen Zusammenhang, den schon Leonhard Euler ausgesprochen hat: die Eulersche Momentengleichung, aus der sich das Drehmoment und somit die Leistung berechnen lassen.

Alles dies ist eine auf klassischen Grundlagen beruhende, in sich geschlossene Theorie, die schon in der Frühepoche der Entwicklung der Dampfturbine ausgearbeitet wurde. Später folgten formale Ausgestaltungen, die besondere Zusammenhänge klar herausstellen oder der Lösung gewisser praktischer Aufgaben besonders angepasst sind, aber das gedanklich Grundlegende ist jedenfalls schon seit Jahrzehnten vorhanden. Damit verfügt man über die Mittel, eine Turbomaschine zu dimensionieren sowie ihre Leistung und ihren Wirkungsgrad voranzurechnen.

Allerdings müssen, wie erinnerlich, zwei Dinge bekannt sein. Man muss für jeden Schaufelkranz die Reibungsverluste kennen — worunter wir alle Nichtumkehrbarkeiten zusammenfassen wollen —, und man muss wissen, welcher Abströmwinkel die Schaufelreihe dem durchströmenden Medium aufzwingt. Bezüglich dieser Frage hat seit der Epoche, die wir durch den Namen Stodola kennzeichnen können, nicht etwa nur eine Erweiterung und Vervollständigung unserer Erkenntnisse stattgefunden, sondern eine Umgestaltung unserer Ansichten und Vorstellungen.

Nehmen wir die Frage des Abströmwinkels voraus. Hier hat sich die ältere Schule eigentlich nur mit einem Sonderfall genauer auseinandergesetzt. Tritt nämlich am Austritt aus dem Schaufelkranz Ueberschallgeschwindigkeit auf, so können sich zusätzliche Ablenkungseffekte einstellen. Diese hat man untersucht. Den normalen, weitaus häufigsten Fall, bei dem die Geschwindigkeit unter der Schallgeschwindigkeit liegt, hat man kaum genauer studiert. Das ist nicht verwunderlich, wenn man sich die älteren Schaufelformen vergegenwärtigt.

Bild 2a zeigt einen derartigen älteren Schaufelungstyp, der durch eine möglichst parallele Führung des Arbeitsmittels am Austritt gekennzeichnet ist, mit der man einen bestimmten Abströmwinkel zu erzwingen beabsichtigte. Neuere Schaufelformen, die man als günstiger erkannt hat, sind beispielsweise in den Bildern 2b und c dargestellt. Der parallelführende Teil fehlt, woraus aber das Problem der Vorausbestimmung des Abströmwinkels bei einer Schaufelreihe (genannt «Schaufelgitter») entsteht. Im Einzelfalle führt hier meist der Modellversuch am besten zum Ziel.



Systematische Einsicht gewährt hingegen nur die Theorie. Es besteht heute über dieses Sonderproblem eine umfangreiche Literatur; es ist rechnerisch lösbar, doch besteht die Hauptaufgabe heute darin, den Rechenaufwand auf ein angemessenes Mass herunterzubringen. In dieser Richtung sind neuerdings grosse Fortschritte erzielt worden.

Wir stossen hier auf einen wesentlichen Unterschied zwischen der älteren und der modernen Anschauungsweise. Man stellte sich früher das Strömungsmittel nicht in gleicher Weise wie wir Heutigen als ein Kontinuum vor. Wenn wir eine Theorie aufbauen, so gehen wir unvermeidlicherweise stets von vereinfachenden Vorstellungen aus. Die Natur ist ein derart verwickeltes Ineinandergreifen und Nebeneinanderhergehen verschiedenster Mechanismen und Einflüsse, dass wir nicht darum herumkommen, gewisse Aspekte als die für den Vorgang wesentlichen herauszugreifen und die anderen zurückzustellen. Welches diese massgebenden Aspekte sind, ist bis zu einem gewissen Grade unserer intuitiven Vorstellung überlassen. Einer der Aspekte im Verhalten eines Kontinuums ist der, dass eine Aenderung, die man an irgendeiner Stelle vornimmt, im allgemeinen in weitem Umkreis Aenderungen nach sich zieht. Diese Vorstellung ist — offenbar als nicht in erster Linie wesentlich — bei der älteren Betrachtungsweise nicht verarbeitet worden.

Betrachten wir etwa die Strömung von Dampf durch eine Schaufelreihe. Hier sah die ältere Theorie einzelne Dampfstrahlen, die aus Düsen austraten. Wir Heutigen sehen ein die Schaufeln rings umgebendes Medium, in dem ein gewisses Druckfeld und ein bestimmtes Geschwindigkeitsfeld herrscht. Diese Felder werden bestimmt durch die Gestalt des Schaufelgitters und sind so aufeinander abgestimmt, dass das dynamische Grundgesetz erfüllt ist. — Ausgehend von ihrer Strahlvorstellung hat z. B. die ältere Theorie angenommen, es müssten Stossverluste auftreten, wenn etwa ein solcher Strahl auf den Rücken der Schaufeln der nächsten Reihe auftreffe, vgl. Bild 3. Diesen Vorgang stellte man sich vor, als dem unelastischen Stoss der Mechanik verwandt. Heute wissen wir, dass hier von einem Stoss keine Rede sein kann. Wenn nachteilige Wirkungen eintreten, so deshalb, weil sich die Grenzschicht von den Wänden ablösen kann, was zu einer Arbeit aufzehrenden Wirbelbildung Anlass gibt. Man kann den so entstehenden Verlust Stossverlust nennen, verwendet dann aber eine Bezeichnung, die den wahren Sachverhalt nicht charakterisiert.

Diese Feldkonzeption hat uns übrigens auch veranlasst, einem Problem genauer nachzugehen, dem man früher nur wenig Beachtung schenkte. Betrachten wir z. B. die aus einem Leitrad, gemäss Bild 1, austretende Strömung, so geht aus den dynamischen Grundgleichungen hervor, dass nicht längs des ganzen Radius gleiche Bedingungen herrschen können. Optimale Auslegung erfordert insbesondere bei den Verdichtern die Kenntnis dieser Zusammenhänge. Zu ihrer Erfassung mussten mathematisch teilweise recht verwickelte Theorien geschaffen werden. Der Wasserturbinenbau hat solche Probleme übrigens schon lange vor dem thermischen Turbomaschinenbau studiert.

Mit der Frage der Reibungsverluste musste sich die Turbinentheorie von jeher befassen, da von ihnen der Wirkungsgrad abhängt. Der Weg, den man nach der älteren Auffassung einschlug, lässt sich folgendermassen skizzieren. Das von einem Anfangszustand p_0, T_0 auf den Druck p_1 entspannte Arbeitsmittel würde reibungsfrei eine gewisse Ge-

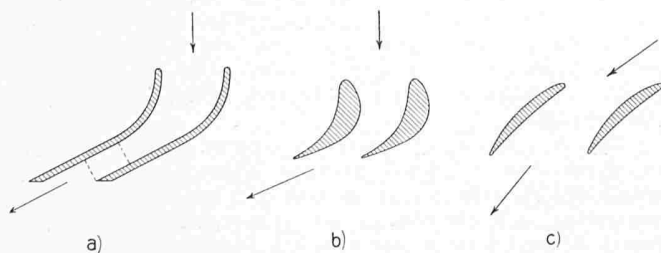
schwindigkeit c_1 annehmen, Bild 4. Infolge der Reibung wird die wirkliche Geschwindigkeit c_1 etwas tiefer liegen. Man setzt nun $c_1 = \varphi c_1'$, so dass alles darauf hinausläuft, den Koeffizienten φ in Funktion der massgebenden Einflussgrössen zu bestimmen. Zu diesem Zweck wurden Versuche durchgeführt. Hier begegnen wir aber wiederum grundlegenden Unterschieden gegenüber der modernen Auffassung.

Es fehlte bei diesen älteren Versuchen die Anwendung der Aehnlichkeitstheorie und der daraus folgenden Modellgesetze. Gemäss dem Grundgedanken der Aehnlichkeitstheorie werden die Konsequenzen gezogen werden aus der an sich selbstverständlichen Tatsache, dass die Phänomene in der Natur nicht von dem vom Menschen geschaffenen Masssystem abhängen. Für den Charakter eines Vorganges sind also Verhältniszahlen massgebend und nicht etwa Werte absoluter Längen und dgl. Ein Beispiel möge uns dies veranschaulichen:

Es ströme Luft von Umgebungstemperatur mit einer Geschwindigkeit von 500 m/s. Dies bedeutet: Ein Luftteilchen legt in der von uns beliebig geschaffenen Zeiteinheit 1 s einen Weg zurück, der das fünfhundertfache unserer ebenso beliebig festgesetzten Längeneinheit ist. An sich ist das eine physikalisch belanglose Aussage. Sagt man aber anstatt dessen: Die Geschwindigkeit der Luft ist das 1,5-fache der Schallgeschwindigkeit, so ist damit offensichtlich etwas physikalisch Bedeutungsvolles ausgesprochen. Denn die Schallgeschwindigkeit ist ja die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Störung im elastischen Kontinuum, und wenn sich nun dieses schneller bewegt als diese Ausbreitungsgeschwindigkeit, so muss das besondere physikalische Effekte zur Folge haben.

Die Charakterisierung eines Sachverhaltes durch dimensionslose Verhältniszahlen ist daher nicht nur zweckmässiger, sondern — im Gegensatz zu einem weit verbreiteten Vorurteil — auch anschaulicher. Solche dimensionslose Kennzahlen verwendet die moderne Turbomaschinenlehre in mannigfacher Weise bei der Berechnung auszuführender Maschinen. Insbesondere verwendet man sie allgemein zur Wiedergabe von Versuchsergebnissen, im Gegensatz zur älteren Schule, die ohne weiteres solche Werte wie etwa den oben genannten Koeffizienten φ in Funktion der Dampfgeschwindigkeit angab.

Aus der Aehnlichkeitstheorie folgen unmittelbar die Modellgesetze, die lehren, unter welchen Bedingungen durch Modellversuche gewonnene Ergebnisse auf die Ausführung übertragen werden können. Die Stodolasche Epoche kannte im Turbinenbau den Modellversuch in unserem modernen Sinne noch nicht. Sollte die Maschine Dampf verarbeiten, so experimentierte man mit Dampf und bildete die auszubauenden Elemente wie etwa Schaufelkanäle möglichst massgetreu der Ausführung nach. Korrekterweise hätte auch der Dampfzustand genau dem in der auszuführenden Maschine entsprechen müssen. Da aber die Spanne der praktisch in Frage kommenden Dampfzustände riesig gross ist und noch andere Parameter zu variieren waren, kam man nie dazu, so umfassende Versuche durchzuführen, wie man eigentlich für wünschbar hielt und blieb über gewisse Fragen im Unsicheren. Die Beachtung der Modellgesetze führt hier einen wesentlichen Schritt weiter. Sind die für den Vorgang massgebenden dimensionslosen Verhältniszahlen im Modellversuch gleich wie in der Ausführung, so ist der Mechanismus des Vorganges gleich, und die Versuchsergebnisse sind somit übertragbar. So wagen wir es z. B. zur Erforschung der Strömung in



a) ältere Schaufelung mit «Parallelführung» der Strömung
 b) moderne Turbinenschaufelform
 c) Schaufelung eines Axialverdichters

Bild 2. Typische Formen von Schaufelungen

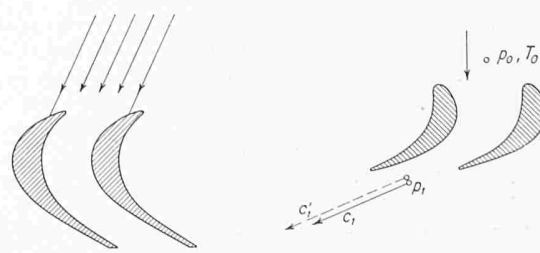


Bild 3. Zuströmung mit «Stoss» nach älterer Anschauung

Bild 4. Zur Berücksichtigung der Reibungsverluste

Dampf von 80 at und 500 ° C Versuche durchzuführen mit Luft von atomosphärischem Druck und Umgebungstemperatur. Wir erhalten zudem auf diese Weise nicht nur Unterlagen für einen bestimmten Fall, sondern sogleich für alle, die ihm physikalisch ähnlich, d. h. durch gleiche dimensionslose Verhältniszahlen gekennzeichnet sind.

Dies ist aber erst eine Seite der Erforschung der Reibungseffekte. Eine wesentliche Verfeinerung ist darin zu erkennen, dass wir uns nicht mehr einfach damit begnügen, Globaleffekte zu messen, wie sie etwa durch einen solchen Koeffizienten φ ausgedrückt werden. Mehr als früher untersuchen wir einzelne Verlustquellen gesondert und versuchen so auch den Mechanismus der Entstehung der Verluste besser verstehen zu lernen. Dabei ziehen wir insbesondere den Begriff der Grenzschicht heran, der in den älteren Theorien fehlte.

Die Strömungslehre weiss, dass ein längs irgendeiner Wandung strömendes Medium an dieser haftet. Die Strömungsgeschwindigkeit ist also an der Wand selbst Null und steigt innerhalb einer mehr oder weniger schmalen Zone auf den Wert an, der im Felde draussen an dieser Stelle herrscht, Bild 5. Diese Zone ist die Grenzschicht. Sie ist der Sitz der Reibungsverluste. Eigentliche grenzschichttheoretische Berechnungen sind in neuerer Zeit für Schaufelgitter durchgeführt worden. Den praktischen Turbomaschinenbau dürften diese Berechnungen noch kaum beeinflusst haben. Hingegen wird bei Messungen der Entwicklung der Grenzschichten oft nachgegangen und der moderne Turbomaschinenbau berücksichtigt die Grenzschichtvorstellung schon beim Entwurf der Schaufelformen, indem er z. B. scharfe Unstetigkeiten der Krümmung vermeidet.

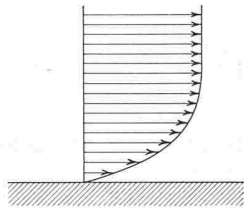


Bild 5. Geschwindigkeitsverlauf in der Grenzschicht

sehr vereinfachter Grundvorstellungen (eben nicht der konsequenten Feldvorstellung).

Erst durch die Entdeckung der Grenzschichttheorie durch Prandtl wurde es klar, worauf das Versagen der klassischen mathematischen Strömungslehre beruhte, und man erkannte sogleich auch, wo und mit welchen Zusatzbedingungen sie doch erfolgreich herangezogen werden kann. Diese moderne exaktere Strömungslehre entstand zunächst als flugtechnische Aerodynamik, denn die Entwicklung des Flugzeugbaues hatte eine verfeinerte Strömungsbetrachtung zur unabdingbaren Voraussetzung. Auch das Modellversuchswesen drängte sich dort geradezu auf. Hauptsächlich von dort her ist diese moderne Richtung auch in die Turbomaschinenlehre eingedrungen.

Diese letztgenannte Feststellung führt uns gerade zu einer gewissen Kritik an der modernen Turbomaschinenlehre. Jedes Fachgebiet — so auch die flugtechnische Aerodynamik — nimmt gewisse Begriffsbildungen vor, die im Hinblick auf die besonderen Probleme dieses Faches naheliegend sind. Die Uebertragung solcher Begriffe auf andere, verwandte Wissensgebiete kann sich als fruchtbar erweisen, ist aber nicht unter allen Umständen glücklich. Es kann vorkommen, dass dieses Vorgehen unzweckmässig wird, weil der entlehnte Begriff nicht auf einfache Zusammenhänge führt. Undurchsichtige Theorien sind die Folge, und bei solchen ist die Wahrscheinlichkeit eines Denkfehlers gross.

Dieser Gefahr ist die Turbomaschinenlehre nicht entgangen. So führt z. B. die flugtechnische Aerodynamik gewisse Koeffizienten ein, welche die Kräfte charakterisieren, die ein Tragflügel im Luftstrom erfährt (Auftriebs- und Widerstandskoeffizienten). Die selben Koeffizienten kann man auch in der Turbomaschinenlehre zur Charakterisierung der Schaufelkräfte einführen. Das erweist sich aber nur in besonderen Fällen als vorteilhaft (schwache Schaufelkrümmung, grosse Schaufelabstände). In der weitaus überwiegenden Mehrzahl der praktisch vorliegenden Probleme führt diese als Tragflügeltheorie bekannte Betrachtungsweise keineswegs zu besserer Einsicht in die Zusammenhänge. Meist ist es zweckmässiger, den Raum zwischen zwei Schaufeln als Kanal zu betrachten.

Wir dürfen nie vergessen, dass in der Ingenieurwissenschaft alles letzten Endes auf die Schaffung eines technischen Werkes gerichtet sein muss. Der Wert einer Theorie bemisst sich deshalb nach ihrem praktischen Nutzen, der ein indirekter sein kann, aber jedenfalls noch vorhanden sein sollte. Diese Unterwerfung unter das Gesetz der Nützlichkeit ist keine Degradierung der technischen Wissenschaft, denn sie ist bedingt durch den schöpferischen Gestaltungswillen, der das Primäre der Ingenieurarbeit ist. Jeder wissenschaftlich tätige Ingenieur kennt jenen «tragischen Konflikt der logischen Gewissenhaftigkeit mit dem Ziele der Ingenieurarbeit» — um die Worte Stodolas zu brauchen. Er hat sich immer wieder neu mit dieser Spannung auseinanderzusetzen, und zwar so, dass weder der schöpferische Gestaltungswille noch die Wissenschaftlichkeit verraten wird, denn erst beides zusammen führt zur Ingenieurkunst.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. W. Traupel, Rietholzstrasse 21, Zollikerberg.

Wenn wir das bisher Gesagte nochmals überblicken, so können wir die moderne Theorie gegenüber der älteren durch drei Stichworte ganz grob umreissen, nämlich:

- Feldvorstellung (das Strömungsfeld wird als Ganzes geschaut),
- Aehnlichkeitstheorie (mit dem durch sie möglich gemachten Modellversuchswesen),
- Grenzschichttheorie.

Vom Standpunkt der mathematischen Physik aus betrachtet wird man sich fragen, wieso die Ingenieure nicht sogleich von einer einwandfreien Feldvorstellung der Strömung ausgegangen sind, wo doch diese Betrachtungsweise der Wissenschaft schon seit etwa zwei Jahrhunderten bekannt ist. Hier müssen wir uns an folgendes erinnern. Die mathematische Strömungslehre wurde geschaffen von den grossen Mathematikern des 18. und 19. Jahrhunderts. Leider stand sie in ihren Schlussfolgerungen zum Teil in augenscheinlichem Widerspruch mit der Erfahrung. Die Ingenieure konnten sich folglich auf diese Theorien nicht verlassen und schufen eine ingenieurmässige Strömungslehre auf Grund

Bauen mit Stahlbetonfertigteilen

DK 624.012.4.002.62

Anlässlich der 51. Hauptversammlung des Deutschen Betonvereins am 6./7. Mai 1954 in Essen hielt Prof. E. Lewicki, T. H. Dresden, einen Vortrag über dieses aktuelle Thema. Er ist im «Beton- und Stahlbetonbau» 1954, Heft 9, zusammen mit zahlreichen eindrucksvollen Bildern veröffentlicht. Der Verfasser nennt als Hauptvorteile dieser Bauweise: Einsparung von Gerüst- und Schalungsholz, Einsparung an Arbeitskraft und Bauzeit und Verbesserung der Betongüte. Die wichtigsten Vorbedingungen für eine wirtschaftliche Anwendung sind: Typenbeschränkung, Konstruktionserfahrung besonders für die Wahl der statischen Systeme und für die konstruktive Formgebung der Einzelteile und ihrer Verbindungen, enge Zusammenarbeit zwischen Architekten und Ingenieuren von Anfang an, gute Herstellungswerkstätten mit geübten Arbeiterkolonnen, sorgfältige Montagevorbereitung und geeignete Hebezeuge für die Montage.

Nach diesen Einführungen werden einzelne Konstruktionsformen und Anwendungsbeispiele behandelt. Bei der Stossverbindung nach Hoffmann werden je zwei durchlochte Flachstahlstücke auf die Enden der Bewehrungsstähle aufgeschweisst. Zwischen die Flachstahlpaare wird ein ebenfalls durchlochtes Flachstahlstück als Lasche eingeschoben und schliesslich die Verbindung durch Doppelkeile hergestellt. Die einzelnen Stösse werden, unabhängig von der Montage, erst später verbügelt und einbetoniert. Eine grosse Schrägförderbrücke mit räumlichen Stützen aus tischartig aufeinandergestellten Fertigteilen und eine Sporthalle mit einer Kuppel von 40 m Spannweite aus 30 t schweren Schalenelementen sind näher beschrieben. Für den Grosswohnungsbau arbeitet die Deutsche Bauakademie zu Berlin an der Entwicklung von zwei verschiedenen Bauarten. Der Skelettbau kommt für vielgeschossige Häuser (6 bis 11 Stockwerke) in Frage; hier-