

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 93/94 (1929)
Heft: 15

Artikel: Der Luftwiderstand bei sehr grossen Geschwindigkeiten
Autor: Ackeret, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-43431>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 12.02.2026

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

INHALT: Der Luftwiderstand bei sehr grossen Geschwindigkeiten. — Das Lichtspieltheater Kapitol in Bern (mit Tafeln 15 und 16). — Die neue Elbebrücke in Hamburg. — Tagungen der Deutschen Gesellschaft für Metallkunde und des englischen „Institute of Metals“ in Düsseldorf, 7. bis 11. September 1929. — Nekrolog: Walter Morf. — Mitteilungen: Eidgen. Techn. Hochschule. Zur Finanzierung von „Architektur-Werken. Basler Rheinhafen-Vorkehr. Ein psychotechnischer Einführungskurs. Von der Reklameschau Berlin 1929. — Wettbewerbe: Spital des Bezirkes Courteley in St. Imier. — Korrespondenz. — Schweiz. Verband für die Materialprüfungen der Technik. — Mitteilungen der Vereine: Zürcher Ingenieur- und Architekten-Verein. — Sitzungs- und Vortragskalender.

Band 94

Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich. Nachdruck von Text oder Abbildungen ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit genauer Quellenangabe gestattet.

Nr. 15

Der Luftwiderstand bei sehr grossen Geschwindigkeiten.¹⁾

Von Obering. J. ACKERET, Privatdozent an der E. T. H., Zürich.

Drei Gebiete der technischen Wissenschaft sind es, die ein besonderes Interesse an den Gesetzen des Luftwiderstandes, allgemeiner gesagt des Gaswiderstandes, bei sehr grossen Geschwindigkeiten haben. Erstens die *Ballistik*, im besondern die äussere Ballistik. Wenn man bedenkt, dass ein Maschinengewehr-Geschoss theoretisch im luftleeren Raum eine Schussweite von 80 km haben sollte bei 20 km Flughöhe und voller Durchschlagskraft am Ziel, dass es aber in Wirklichkeit nur rd. 4 km weit fliegt bei ständig sich vermindernder Geschwindigkeit, sieht man ein, dass die Luftwiderstandsgesetze das Alpha und Omega der Ballistik sind. Die Theorie freifliegender Körper im luftleeren Raum ist tatsächlich nicht einmal als Näherung zu gebrauchen.

Zweitens hat der *Dampfturbinenbau* vom Beginn seiner Entwicklung an Dampfgeschwindigkeiten von mehreren Hundert Metern pro Sekunde angewendet. Hier sind hauptsächlich die *Reibungs- und Ablösungsverluste* in den Leit- und Laufkanälen der Turbinen von Bedeutung, da sie den Wirkungsgrad, oder mit andern Worten den Kohlenverbrauch unmittelbar beeinflussen. Auch eine prozentuell bescheidene Verbesserung wirkt sich bei den heutigen Riesenmaschinen sofort in ansehnlichen Geldersparnissen aus.

Als letzte ist auch die *Flugtechnik* allmählich in das Gebiet der hohen Geschwindigkeiten eingedrungen. Zwar ist z. Z. die Fluggeschwindigkeit auch der allerschnellsten Flugzeuge nicht grösser als 150 m/sec = 540 km/h, aber die Spitzen der Luftschauben bewegen sich mit 200 bis 300 m/sec und mehr (1000 km/h). Da hat man bereits Erfahrungen gemacht, die den ballistischen sehr nahe verwandt sind. Ohne Zweifel werden die Fluggeschwindigkeiten in den nächsten Jahren noch weiter wachsen, auch wenn man nicht gleich die noch reichlich phantastischen Raketenflugzeuge in Betracht zieht.

Selbst scheinbar so entlegene Wissenschaften wie Astronomie oder Geophysik berühren ab und zu Fragen des Luftwiderstandes. Denken wir nur an die Meteore, die mit unerhörten Geschwindigkeiten bis 100 000 m/sec, also 360 000 km/h (= Entfernung Erde-Mond!) in die Atmosphäre eindringen und infolge des grossen Luftwiderstandes erglühen. Aus den beobachteten Verzögerungen kann man u. a. wichtige Schlüsse auf die Beschaffenheit der obersten Atmosphärenschichten ziehen.

Die uns hauptsächlich interessierende Frage lautet: Wie unterscheiden sich die Gesetze des Luftwiderstandes bei hohen Geschwindigkeiten von denen bei geringen? Welche neuen Erscheinungen sind zu erwarten? Die Theorie ist noch lange nicht so weit entwickelt, dass sie uns die Antwort klipp und klar geben könnte. Aber sie hilft uns doch die Frage zu präzisieren. Beispielsweise so:

Eine Kugel vom Durchmesser d werde mit der Geschwindigkeit v angeströmt. Auf Grund einfacher theoretischer Betrachtungen können wir das Widerstandsgesetz wie folgt schreiben:

$$W = c_w \frac{\varrho}{2} v^2 \frac{\pi}{4} d^2 \quad \varrho = \text{Luftdichte.}$$

Wäre der Koeffizient c_w konstant, so hätten wir es mit einem rein quadratischen Widerstandsgesetz zu tun, tatsächlich ist c_w variabel mit ϱ , v , d usw. und zwar in

¹⁾ Antrittsvorlesung, gehalten an der E. T. H. am 4. Mai 1929.

zunächst unbekannter Weise. Es ist aber erfreulich, dass man theoretisch etwas Ordnung schaffen kann, indem sich zeigen lässt, dass c_w nur eine Funktion zweier Zahlen sein kann:

Erstens der sog. *Reynolds'schen Zahl*:

$$R = \frac{vd\varrho}{\eta} \quad \eta = \text{Zähigkeit (Viskosität)}$$

Zweitens der *Mach'schen Zahl*¹⁾

$$M = \frac{v}{a} \quad a = \text{Schallgeschwindigkeit}$$

Die gleichzeitige Abhängigkeit von zwei Variablen kompliziert die Verhältnisse immer noch sehr. Aber glücklicherweise zeigt es sich, dass man oft in erster Annäherung die Einflüsse von M und R auf c_w als unabhängig voneinander betrachten kann.

In R steckt die Reibung η . Die Betrachtung dieser Abhängigkeit führt uns zu dem schwierigsten Kapitel der Aerodynamik, zur Turbulenztheorie. Es wäre ein hoffnungsloses Bemühen, auch nur andeutungsweise über diese Dinge in einer kurzen Stunde zu sprechen. Ich beschränke mich deshalb bewusst auf den hier wichtigsten Einfluss von M .

Die Schallgeschwindigkeit a hängt aufs engste zusammen mit der *Zusammendrückbarkeit* der Luft. In einem nicht zusammendrückbaren, inkompressiblen Körper breitet sich jeder kleine Stoß mit unendlicher Geschwindigkeit aus. Denken wir uns eine Stange aus solchem Material an einem Ende angestossen, so pflanzt sich die Bewegung ohne Zeitverlust bis ans fernste Ende fort, da kein Teil der Stange nachgibt. In einem kompressiblen Körper aber ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit von endlicher Grösse. M enthält also die Eigenschaft der Zusammendrückbarkeit. Damit verdichtet sich unser Problem zu der Frage: Welchen Einfluss hat die Zusammendrückbarkeit der Luft (gemessen durch die Zahl M) auf die Strömungserscheinungen?

In den folgenden Betrachtungen wollen wir nun an Hand einzelner typischer Beispiele von kleinen Geschwindigkeiten ausgehend zu immer grösseren schreiten.

In Abbildung 1 ist ein Flügelprofil dargestellt, wie es etwa in der Flugtechnik Verwendung findet. Die voll

ausgezogenen Kurven sollen die Stromlinien einer inkompressiblen Flüssigkeit sein, die gestrichelt gezeichneten aber zu einem wirklichen Gase gehören, dessen Geschwindigkeit v in einiger Entfernung vom Profil einen

Bruchteil (z. B. $1/2$) der Schallgeschwindigkeit a betrage. Da wo keinerlei Störung der Strömung durch das Profil vorhanden ist, also in grosser Entfernung, decken sich beide Liniensysteme; in der Nähe aber haben wir charakteristische Abweichungen, die qualitativ leicht überblickt werden können. Auf der Oberseite des Profils herrscht Unterdruck, d. h. tieferer Druck als in grosser Entfernung vom Flügel, auf der Unterseite Ueberdruck. Die in Wirklichkeit komprimierbare Luft gibt diesen Druckveränderungen nach, sie

¹⁾ In der Aerodynamik höherer Geschwindigkeiten tritt das Verhältnis v/a dauernd auf. Es empfiehlt sich deshalb, eine abkürzende Bezeichnung einzuführen. Da der bekannte Physiker Ernst Mach auf unserem Gebiete die grundlegende Bedeutung dieses Verhältnisses besonders klar erkannt und durch geniale experimentelle Methoden bestätigt hat, scheint es mir sehr berechtigt, v/a als *Mach'sche Zahl* zu bezeichnen.



Abb. 1. Strömung um einen Tragflügel bei inkompressibler und kompressibler Flüssigkeit.

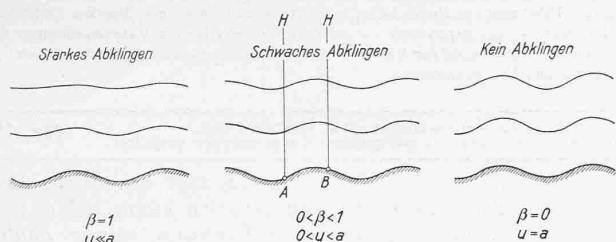


Abb. 2. Strömung über eine schwach gewellte Fläche bei verschiedenen Mach'schen Zahlen. (In den Abb. 2 bis 5 ist u gleichbedeutend mit v).

dehnt sich oben aus, während sie unten etwas komprimiert wird. Dadurch ergibt sich, wie ein Blick auf die Abbildung 1 lehrt, im ganzen eine stärkere Krümmung der Strombahnen in der Nähe des Profils. Wir könnten die selbe Krümmung auch bei inkompressiblem Medium erzielen durch Hereinbringen eines Profils mit stärkerer Wölbung. Man kann den Effekt der Kompressibilität in erster Näherung demnach so beschreiben: Der Flügel hat die Eigenschaften eines Profils mit grösserer Wölbung, er hat bei sonst gleichen Verhältnissen etwas grösseren Auftrieb bei allerdings auch vermehrter Gefahr, dass die Strömung sich von der Oberseite ablöst. Bei grossen Geschwindigkeiten ist also ein schwach gewölbter Flügel zu empfehlen. Es würde recht schwierig sein für einen so kompliziert geformten Körper wie ein Flügelprofil, den Einfluss der Kompressibilität rechnerisch genügend genau zu erfassen. Für einfachere Konturen ist es aber möglich, Näherungslösungen zu finden für Machsche Zahlen, die nicht in unmittelbarer Nähe von 1 liegen.

In Abbildung 2 ist das Ergebnis einer solchen Rechnung schematisch dargestellt.¹⁾ Es soll Luft ohne Reibung über eine schwach gewellte Fläche quer zu den Wellenströmen. Es entspricht durchaus dem natürlichen Empfinden, was die exakte Rechnung für kleine Machsche Zahlen liefert (Abb. 2 links; die Geschwindigkeit v ist hier mit u bezeichnet). Die unmittelbar über der Fläche strömende Luft folgt den Wellen exakt, die weiter entfernt strömende aber klingt in ihrer Wellung ab und ist in grösserem Abstand sozusagen ungestört. Bemerkenswert ist, dass dieses Abklingen mit grösser werdender Machscher Zahl geringer wird, und beim Erreichen der Schallgeschwindigkeit bis ins Unendliche kongruente Wellung der Stromlinien vorhanden ist. Die verstärkte Krümmung der Stromfäden, die wir in Abbildung 1 qualitativ errieten, zeigt sich hier wieder. Wenn bei Schallgeschwindigkeit ($M = 1$) das ganze Luftmeer über der Fläche mit überall gleicher Stärke auf und ab „geschüttelt“ wird, ergeben sich naturgemäß starke Gegenwirkungen auf die Fläche selbst. Die erste Näherung ergibt hier die Kraftwirkung unendlich gross, was gewiss nicht in Wirklichkeit in diesem Masse zutrifft. Eine Verstärkung aber ist tatsächlich vorhanden und dem Ballistiker wohlbekannt.

Abbildung 3 zeigt die auf das Quadrat der Geschwindigkeit bezogenen Luftwiderstände eines Spitzgeschosses nach den Messungen von C. Cranz, über der Machschen Zahl aufgetragen. Es zeigt sich ein sehr scharfer Anstieg in der Nähe von $M = 1$ und nachfolgend bei Ueberschallgeschwindigkeit ein Abfall.

Abbildung 4 stellt die theoretisch zu erwartende Kraftwirkung auf die gewellte Fläche der Abbildung 2 dar. Wenn man auch die beiden Fälle keineswegs ohne weiteres vergleichen darf, so scheint das an Resonanz erinnernde Maximum der Luftkräfte doch zu einem grossen Teil mit der Krümmungsverstärkung durch Kompressibilität der Luft zusammenzuhängen.

Aehnliche Beobachtungen hat man bei Luftschauben gemacht, deren Umfangsgeschwindigkeiten die Schall-

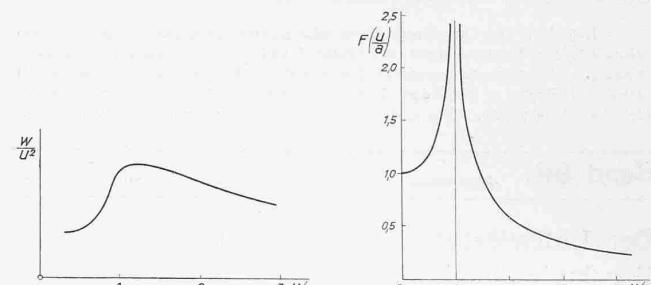


Abb. 3. Widerstandskoeffizient eines Spitzgeschosses bei verschiedenen M .

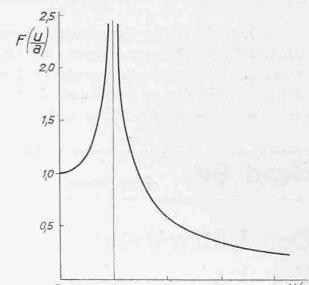


Abb. 4. Koeffizient der Kraftwirkung auf das gewellte Blech von Abb. 2.

geschwindigkeit oft schon erreichten. In Abb. 5 sind die auf das Quadrat der Umfangs-Geschwindigkeit bezogenen Drehmomente aufgetragen.¹⁾ Auch hier ist wieder deutlich der Anstieg bei wachsendem M zu erkennen. Der Propeller mit dickem Flügelschnitt (stärker gekrümmte Oberfläche) hat grösseren Kraftbedarf, das dünne Profil erweist sich auch hier als überlegen. Zahlreiche sehr interessante Untersuchungen, die in Deutschland und England durchgeführt wurden, lassen schliessen, dass die Strömungsablösung von der Profiloberseite gerade bei grossem M sehr leicht eintritt und nur durch möglichst geringe Profilkrümmung vermieden werden kann. Es liegt hier, wie nur kurz erwähnt sei, eine bemerkenswerte Analogie vor mit dem Verhalten der Schrauben schnellaufender Schiffe hinsichtlich der berüchtigten Kavitation, d. h. dem Kochen des Wassers durch tiefe Strömungsdrücke.

Sehr auffällig ist das Sirenengehäul, das in der Nähe der Schallgeschwindigkeit auftritt. Militärisch ist dieses Phänomen von grosser Wichtigkeit, da bekanntlich ein Flugzeug fast nur akustisch entdeckt werden kann.

Was geschieht nun eigentlich, wenn die Strömung Schallgeschwindigkeit erreicht? Darüber sind wir dank der wunderbaren Töplerschen Schlierenbilder ziemlich genau unterrichtet. Ich will die Methode hier nicht beschreiben, sondern nur erwähnen, dass sie auf optischem Wege Dichteunterschiede (Dichtegradienten) in strömenden Gasen durch Aufhellungen und Verdunkelungen des Bildfeldes anzeigt. Wenn beispielsweise auf kurzer Strecke bedeutende Dichte- (und Druck-)sprünge auftreten, zeigen sich diese durch helle oder dunkle Linien im Bilde.

In Abbildung 6 ist das Geschoss, mit dem die Kurve Abbildung 3 ermittelt wurde, im Flug nach Töpler photographiert worden. Die Geschwindigkeit ist ein wenig grösser als Schallgeschwindigkeit. Vor dem Geschoss bewegt sich eine Wellenfront mit gleicher Geschwindigkeit, ebenso ist hinter dem Geschoss eine Druckwelle sichtbar gemacht. Bei Unterschallgeschwindigkeit sind die Wellen nicht vorhanden. Steigt man die Geschwindigkeit, so laufen die Wellen in spitzen Kegeln vom Geschoss weg (Abb. 7). Der Drucksprung in der Welle kann als sog. *Geschossknall* sehr deutlich vernommen werden. Mit dem Mündungsknall des Gewehrs hat dieser Knall nichts zu tun; in der Tat kann man ohne Schwierigkeit auf dem Schiessplatz beide Knalle nacheinander hören. Hinter dem Geschoss sieht man besonders schön eine Wirbelallee, die von der Strömungsablösung am stumpfen Hinterende des Geschosses herrührt.

In Abbildung 8 ist angedeutet, wie die Wellenkegel entstehen. Man stelle sich vor, dass von jedem Punkt der

¹⁾ Für die Erlaubnis der Veröffentlichung dieser Abbildung und der Abbildungen 16 und 19 bin ich dem Kaiser-Wilhelm-Institut für Strömungsforschung Göttingen zu Dank verpflichtet.

¹⁾ Vergl. J. Ackeret „Ueber Luftkräfte bei sehr grossen Geschwindigkeiten“. Helv. phys. acta, 1928, S. 301.

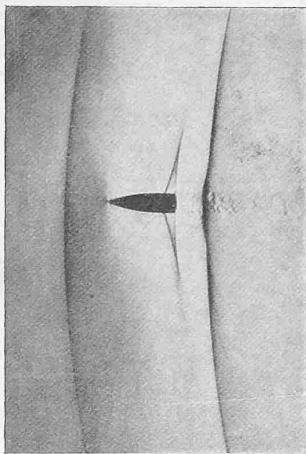
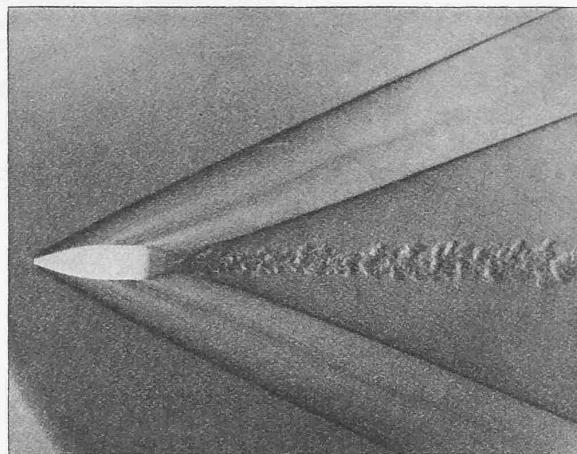
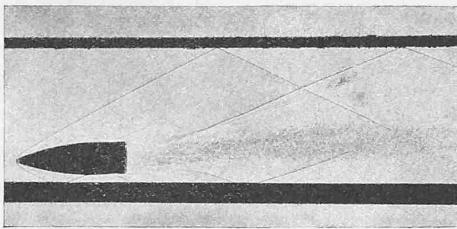
Abb. 6. Geschoss-Schlierenbild bei $M \sim 1$.Abb. 7. Schlierenbild bei $M > 1$.

Abb. 9. Reflexion der Geschosswellen an festen Platten.

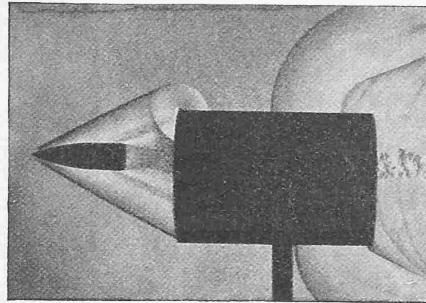


Abb. 10 (rechts). Beugung der Geschosswellen.

Flugbahn eine Störung in Kugelwellen mit Schallgeschwindigkeit a sich ausbreitet. Nach einiger Zeit sei das Geschoss in der ganz links gezeichneten Lage. Die früher entstandenen Kugelwellen sind inzwischen gewachsen, ihr Radius ist umso grösser, je älter sie sind. Es ist nicht schwer zu beweisen, dass sämtliche Kugeln einen einhüllenden Kegel, eben den Wellenkegel, haben, auf dem sich die Störungen der einzelnen Kugelwellen zu einem besonders starken Drucksprung summieren. Für den halben Öffnungswinkel α des Kegels gilt die berühmte Doppler-Machsche Beziehung:

$$\sin \alpha = \frac{a}{v} = \frac{I}{M}$$

Im unteren Teil der Abbildung 8 ist noch das Verhalten der Kugelwelle beim Auftreffen auf eine feste Wand dargestellt. Sie zeigt uns die aus der Optik geläufigen Gesetze der Reflexion und Beugung. Trifft die Welle auf eine feste Wand, so wird sie mit gleichem Winkel reflektiert. An Kanten wandern die Elementar-Kugelwellen nach allen Seiten und summieren sich als gebogene Welle. Die optische Analogie ist vollkommen, wenn die Intensität der Welle nicht zu stark ist; bei stärkern Drucksprüngen, wie sie bei Detonationen von Sprengstoff auftreten, hängt die Ausbreitungsgeschwindigkeit in komplizierter Weise noch von der Stärke des Sprunges ab.

Abbildung 9 zeigt die Reflexion der Wellen an Glassplatten sehr überzeugend, Abbildung 10 die Beugung um die Ränder eines zylindrischen Blechmantels, der in Axenrichtung durchschossen wurde. Der Mantel hält die im Zylinderinnern entstandenen Störungen zurück. An den Kanten sind die Beugungswellen vorhanden. Diese Bilder zeigen bei genauerem Studium noch eine Menge interessanter Tatsachen; wir verdanken sie dem deutschen Altmäister der Ballistik C. Cranz.

*

Wir haben uns bisher hauptsächlich mit Beispielen aus der Ballistik beschäftigt. So nützlich aber die ballistischen Erfahrungen auch sind, so umfassen sie doch nur ein sehr beschränktes Gebiet. Für den Ballistiker sind eben nur Rotationskörper ganz bestimmter Gattung von Be-

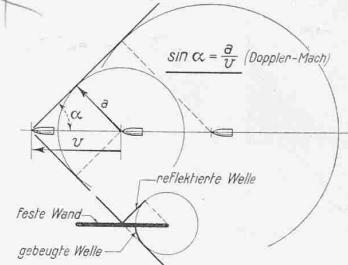


Abb. 8. Zur Erläuterung des Mach-Doppler'schen Wellenkegels.

deutung, deren strenge theoretische Behandlung vorläufig noch unmöglich ist. Die Wissenschaft kommt aber nur weiter, wenn es ihr gelingt, entweder die Theorie so weit auszubauen, dass sie diese Fälle umfasst, oder die Experimente soweit zu vereinfachen, dass sie eine Prüfung der bisherigen Rechnungsergebnisse gestatten.

Hier ist nun ganz allgemein zu sagen, dass das theoretisch noch am ehesten zu bezwingende Problem das der sogen. *ebenen Strömungen* ist, bei denen alle Stromlinien parallel zu einer festen Ebene verlaufen. Die angestromten Körper sind

nicht mehr Rotationskörper, sondern haben zylindrische Oberflächen mit Erzeugenden normal zu der erwähnten Ebene. Im folgenden werden wir nun einige ebene Strömungen besonders einfacher Art betrachten.

In Abb. 11 (rechte Hälfte) auf S. 182 handelt es sich um die folgende Aufgabe. Ein nach oben hin unendlich ausgedehnter Luftstrom kommt mit sehr grosser Geschwindigkeit (Uberschallgeschwindigkeit) von links an. Die führende Wand (schräffiert) soll nun vom Punkt A an über B nach C gekrümmmt sein. Durch die Querschnitts-Erweiterung ergibt sich eine Expansion, verbunden mit Richtungsablenkung und Geschwindigkeitsteigerung. Der Druck fällt von A bis C, anders wie bei $M < 1$, wo Druckanstieg, „Diffusorwirkung“ vorhanden ist. Die Lösung dieser Aufgabe durch L. Prandtl und Th. Meyer liegt schon 20 Jahre zurück, es ist aber in letzter Zeit gelungen, sie sehr einfach darzustellen.

Es zeigt sich nämlich, dass Ablenkung aus der ursprünglichen Richtung und Geschwindigkeit in einem einfachen Zusammenhang stehen. Die Geschwindigkeitsvektoren etwa in den Punkten A, B, C haben, von einem gemeinsamen Ursprung aus aufgetragen, ihre Endpunkte auf einer Zyklide (Abb. 11 links). Bringt man in A ein kleines Hindernis an, so geht von dort aus eine Machsche Welle in einer Richtung, die durch die Normale zur Zyklide in dem Punkt A (links) gegeben ist. Wenn wir jetzt noch die weitere Tatsache benutzen, dass längs jeder Störungslinie der selbe Geschwindigkeits- und Druckzustand herrscht wie am Ausgangspunkt der Welle, so kennen wir die Strömung vollständig, und die Aufgabe kann als gelöst betrachtet werden. Zu jedem Geschwindigkeitsbetrag gehört ein Druck, der der Kurve (Abb. 11 links oben) entnommen werden kann. Bemerkenswert ist das Auseinanderstreben der Machschen Wellen. — Krümmen wir die Ablenkfläche nach oben, so erhalten wir eine Kompressionsströmung (Abb. 12). Die Endpunkte der Vektoren im Geschwindigkeitsbild links liegen wieder auf der gleichen Zyklide. Hier ergibt sich nun eine Konvergenz der Störungswellen, die sich in einiger Entfernung sogar schneiden. Da auf jeder

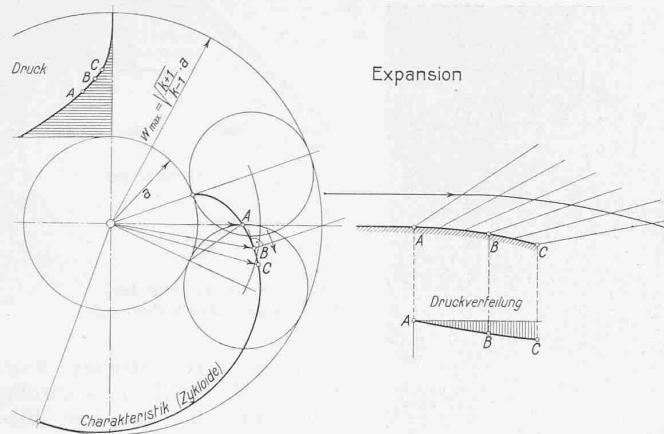


Abb. 11. Expansion bei Ueberschallgeschwindigkeit mit zugehörigem Geschwindigkeitsbilde.

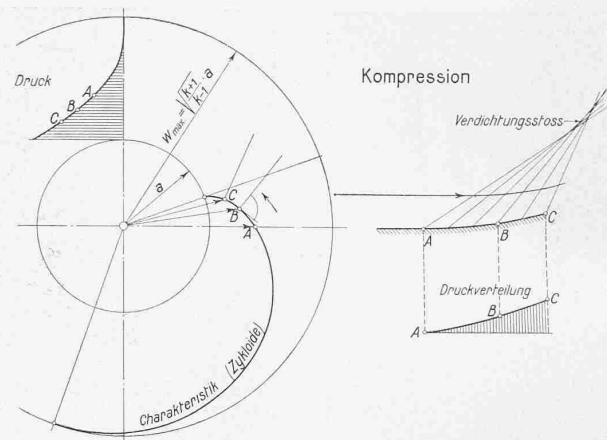


Abb. 12. Kompressionsströmung.

Welle ein bestimmter Druck herrscht (er kann aus der Druckverteilungskurve entnommen werden), haben wir den scheinbar widersinnigen Zustand, dass in dem Schnittpunkt zweier Wellen zwei verschiedene Drücke vorhanden sind. Tatsächlich bildet sich an einer solchen Konvergenzstelle Machscher Linien ein sprunghafter Druckanstieg aus, ein sog. stationärer Verdichtungsstoss, wie er von dem Mathematiker Riemann vorhergesagt und viele Jahre später von Professor Stodola in Zürich anlässlich seiner klassischen Druckmessungen an Lavaldüsen experimentell gefunden wurde. Es besteht heute eine ziemlich vollständige Theorie der Verdichtungstösse; sie versagt aber in charakteristischer Weise bei der Behandlung der „Feinstruktur“ der Drucksprünge. Die Stösse sind nämlich räumlich außerordentlich konzentriert, ihre Dicke ist mit molekularen Größen vergleichbar und an Stelle des kontinuierlichen Mediums der gewöhnlichen Aerodynamik müssen die einzelnen Moleküle treten. Hier herrscht noch eine Lücke, die wohl nicht leicht auszufüllen sein wird.

Abbildung 13 zeigt eine Schlierenaufnahme der Machschen Wellen bei der Kompressionsablenkung. Man sieht die Wellen konvergieren und zu einem Verdichtungsstoss zusammenlaufen. Die schwarzen Flecke sind Expansionsgebilde; die schräg von links oben und links unten zur Bildmitte laufenden Linien sind Störungen von der Ausflussdüse und haben nichts weiter zu bedeuten. Die Spitze des hier untersuchten Ablenkungskörpers ist schneidenförmig ausgeführt. Wird die Schneide mit grossem Schneidenwinkel ausgeführt, so rückt der Stoss immer näher an die Vorderkante. Abbildung 14 zeigt das sehr deutlich an einem Keil, indem ein sehr scharfer Stoss direkt an der Kante beginnt. Die weiter hinten liegenden Störungslinien laufen parallel, da ja weiter keine Ablenkung erfolgt, also im Geschwindigkeitsbild ein und der selbe Zykloidenpunkt zu dem ganzen Feld gehört.

In Abbildung 15 sind die Störungslinien aufgetragen, wie sie an einem Profildraht theoretisch zu erwarten sind. Vorne ist wie beim Keil (Abb. 14) ein starker Stoss, da der Kantenwinkel endlich ist, sodann folgt Expansion mit Divergenz der Störungslinien. Das zugehörige Schlierenbild (Abb. 16) beweist, dass die Theorie hier den Tatsachen gerecht wird und alle wesentlichen Züge erfasst hat.

Führt man den Körper mit runder Vorderkante aus, dann hebt sich der Verdichtungsstoss ab und steht in einem Abstand davor. Das Infanteriegeschoss alter Ausführung mit stumpfen Kopf zeigt das gleiche Verhalten (Abb. 17); Verdichtungstösse aber, die normal zur Geschwindigkeit stehen, geben besonders grosse Drucksprünge, und hierin liegt die Erklärung, warum die Einführung des Spitzgeschosses (Abb. 7) einen so grossen Fortschritt brachte. Der Stoss ist dort nicht mehr normal, sondern schief zur Flugrichtung und deshalb viel schwächer. Man sieht, dass die bedenkenlose Übertragung der Erfahrungen

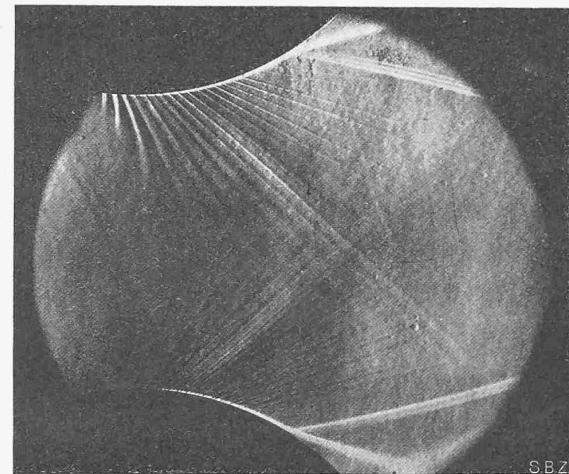


Abb. 19. Schlierenbild der Strömung durch eine stark erweiterte Düse.

bei Unterschallgeschwindigkeit (etwa an Luftschiffkörpern) auf Geschosse, die mit Ueberschallgeschwindigkeit fliegen, verfehlt ist. Viel mehr berechtigt ist die Analogie mit den Wellenvorgängen an Schiffen. Niemandem würde es einfallen, ein schnellfahrendes Schiff vorne stumpf zu machen; die Bugwelle würde sehr hoch werden und sehr viel Widerstand bieten. Schlank konische Enden könnten den Geschosswiderstand vermindern, weil die Wirbelbildung hinter dem Geschoss (Abb. 7) verkleinert wird, jedoch gewinnt man dadurch längst nicht so viel wie bei Unterschallgeschwindigkeit. Leider scheint die Stabilität solcher Geschosse und damit die Treffsicherheit geringer zu sein.

Bisher haben wir stets die Strömung um *einen* Körper untersucht. Es gibt aber Fälle, wo viele Körper gleichzeitig der gleichen Strömung ausgesetzt werden, z.B. die Schaufelreihen von Dampfturbinen. Denken wir einfachheitshalber z. B. an zwei Schaufeln. Bei Unterschallgeschwindigkeit ($M < 1$) ist die Sachlage so, dass die Schaufeln mit umso grösserer Berechtigung als voneinander unabhängig betrachtet werden können, je weiter sie voneinander entfernt sind. Man kann mit Erfolg die Schaufeln in „erster Näherung“ als Einzelschaufeln behandeln und die gegenseitige Beeinflussung als „schwache Störung“ einführen. Bei Ueberschallgeschwindigkeit ist dieses Verfahren meistens ganz unbrauchbar. Entweder beeinflussen sich die Schaufeln gar nicht, oder dann sehr stark. Anhand von Abbildung 18 sei dies etwas ausführlicher erläutert. Hier sind zwei schwach gewölbte Schaufeln mit ihren Machschen Linien dargestellt. Wir wissen schon, dass diese an festen Wänden reflektiert werden. Die Durchdringung der beiden Wellensysteme bietet ein ziemlich schwieriges mathematisches Problem, doch besteht heute bereits eine sehr elegante

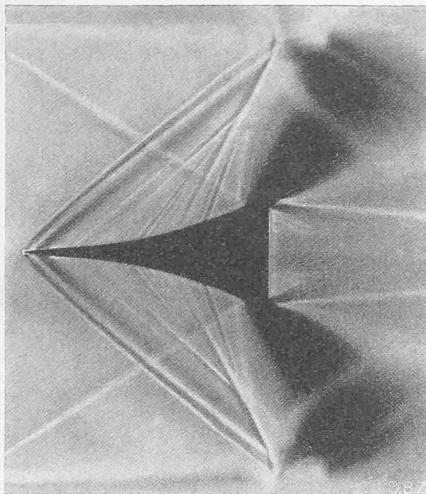


Abb. 13. Schlierenbild der Kompressionsströmung.

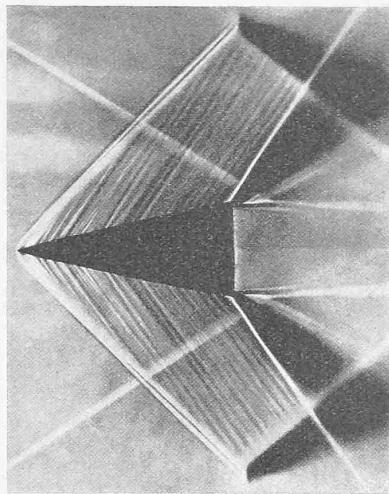


Abb. 14. Bild der Strömung gegen einen Keil.

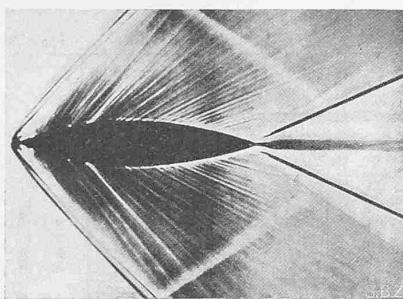


Abb. 16. Schlierenbild der Überschallströmung gegen einen Profildraht.

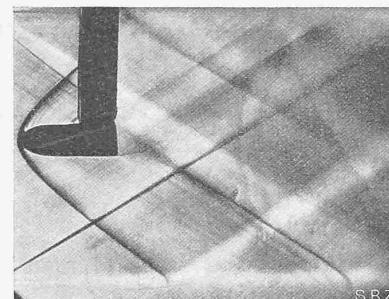


Abb. 17. Infanteriegeschoss alter Form im Luftstrom bei Überschallgeschwindigkeit.

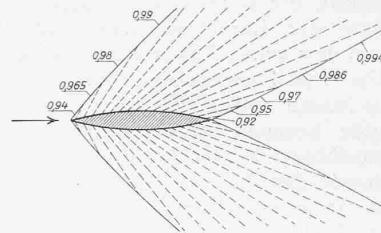


Abb. 15. Rechnerisch bestimmtes Wellenbild für einen Profildraht.

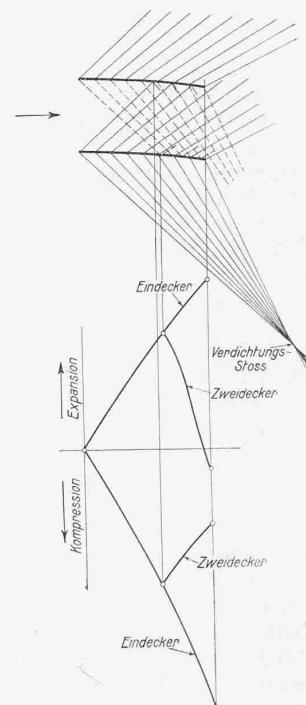


Abb. 18. Überschallströmung am Zweidecker.

graphische Methode¹⁾), die nichts anderes ist als eine Verallgemeinerung der Darstellung in den Abbildungen 11 und 12. Für unser Beispiel ergibt sich zufällig eine so geringe Störung in der Richtung der Machschen Linien, dass wir sie unbedenklich als Gerade durcheinanderziehen dürfen (im allgemein ist dies aber nicht zutreffend!). Eine genaue Betrachtung, die hier übergangen werden muss, liefert uns die Wanddrücke auf die untere und obere Fläche, damit dann auch die Schaufelkräfte. Ohne Rechnung kann man folgendes leicht aus der Figur entnehmen: Die Oberseite des Oberflügels und die Unterseite des Unterflügels haben genau die selbe Druckverteilung, wie wenn das „störende“ zweite Deck nicht da wäre. Die Unterseite des Oberflügels und die Oberseite des Unterflügels haben gleichfalls auf einer bestimmten Strecke genau die gleiche Verteilung. Aber von der Stelle an, wo die Störungslinien der Gegenfläche auftreffen, tritt eine radikale Änderung ein. Man sieht an den Druckkurven für den Zweidecker scharfe Knicke, die sehr wichtige Konsequenzen haben. Es ist aus der Aerodynamik wohlbekannt, dass scharfe Anstiege des Druckes in Strömungsrichtung zu Ablösungen führen, indem die an der Oberfläche infolge Reibungswirkungen langsam strömenden Teile nicht genügend Energie haben, um in das Gebiet hohen Druckes einzudringen. Auf der Oberseite des Unterflügels steigt der Druck so scharf an, dass Ablösung unvermeidlich ist. — Die in Abbildung 19 gezeigte Strömung verläuft zwar nicht so wie beim Zweidecker; die beiden Ablenkflächen haben entgegengesetzte Krümmung, doch sind einige der vorhin besprochenen Züge sehr deutlich sichtbar. Die beidseitigen Störungswellen durchdringen sich auch hier nahezu ohne Richtungsänderungen. Die Grenzschicht zeigt sich im Schlierenbild mit seltener Klarheit, schliesslich ist auch

die Ablösung der Grenzschicht zu erkennen, die durch einen Druckanstieg bewirkt wird, dessen Ursache hier allerdings eine etwas andere ist als im vorerwähnten Beispiel der Abb. 18.

So wären noch eine ganze Reihe teilweise sehr anziehender Erscheinungen zu erwähnen; die angeführten Beispiele mögen aber genügen, um zu zeigen, dass die relativ junge Wissenschaft der Gasdynamik, d. h. der Aerodynamik höherer Geschwindigkeiten, würdig ist, weiter ausgebaut zu werden. Ein besonderer Reiz liegt darin, dass sie einerseits tief in die mathematische Physik ein dringt, anderseits aber doch in engster Berührung mit vielen sehr verschiedenen Gebieten der praktischen Technik bleibt. Dadurch wird in glücklicher Weise vermieden, dass sie in eine trockene Integrationsaufgabe ausartet, ebenso aber auch in ein „Probieren“ ohne klares Ziel.

Das Lichtspieltheater Kapitol in Bern.

F. WIDMER und HANS WEISS, Architekten, Bern. (Mit Tafeln 15/16.)

Die geschichtlichen Ereignisse, die über die Liegenschaft Kramgasse 72-Metzgergasse 61 hinweggegangen sind, spiegelten sich wider in der komplizierten Einteilung des ehemaligen Gebäudes. Große Abbruch- und Wegräumungsarbeiten waren erforderlich, bestand doch ehemals die Liegenschaft aus fünf verschiedenen Gebäuden, deren Brandmauern, allerdings hinter einheitlicher Fassade, unvermutet die innere Einteilung durchkreuzten. Im Hinblick auf die Bauordnung der Stadt Bern, die einerseits guten Baudenkmalern aus alter Zeit grossen Schutz angedeihen lässt, und andererseits mit Rücksicht auf das einheitliche Stadtbild Gebäude mit ausgesprochen modernem Gepräge nur ungern zulässt, haben schliesslich wirtschaftliche Erwägungen dazu

¹⁾ L. Prandtl und A. Busemann: „Näherungsverfahren zur zeichnerischen Ermittlung von ebenen Strömungen mit Überschallgeschwindigkeit“. Stodola-Festschrift 1929, Seite 499. Orell Füssli-Verlag, Zürich.