Das Prinzip von Bernoulli, seine Wirkungen und Anwendungen.

Von Dipl. Ing. Chem. P Medinger.

Wenn wir an einem unfreundlichen Winterabend gemütlich nach Feierstunde am Feuer sitzen, und unsern Gedanken freien Lauf lassend, alles um uns herum einige hundert Millionen mal vergrößert sähen, so würde sich unserm Auge ein merkwürdiges Bild entfalten. Billionen und Trillionen von Gasmolekeln von der Größe einer Erbse etwa sähen wir im wirren Taumel ständig durcheinander wirbeln, beständig einander streifend, sich gegenseitig anstoßend und von einander abprallend: der ewige Tanz der Moleküle!

Und wenn wir dann, nach dem Beispiel von Frisch bei seinen Bienenversuchen, uns einzelne der Moleküle einfangen und zu ihrer Kenntlichmachung mit Farbe betupfen würden, so würden wir nach ihrer Freilassung sehen, wie die einzelnen Moleküle ein buntes Gewirr von Zickzacklinien beschreiben, ganz ähnlich wie wir sie an Agglomeraten von Molekülen als Brown'sche Bewegung im Mikroskop zu sehen gewohnt sind. Wir würden weiter bemerken, daß unsere gefärbten Moleküle in unzähligen Umwegen und Zickzacklinien denn doch nach und nach den ganzen Raum des Zimmers durchwandern und an den Wänden und Gegenständen im Zimmer abprallen, die so einem beständigen Bombardement unterworfen sind. Die Summe dieser Stöße der Moleküle eines Gases gegen die Wände des das Gas einschließenden Gefäßes nennt man bekanntlich den Druck des Gases.

Wir würden weiter wahrnehmen, daß, so oft ein Molekül an den warmen Ofen anprallt, es mit bedeutend vergrößerter Geschwindigkeit wieder davon abprallt, und, beim nachfolgenden Anstoßen an andere Moleküle auch diesen größere Geschwindigkeit verleiht. Und wie dann so nach und nach alle Moleküle des Raumes ihre Geschwindigkeit vermehren, was man laienhaft so ausdrückt: die Temperatur der Zimmerluft steigt. Erwärmung ist eben Beschleunigung der Molekularbewegung. Mit steigender Temperatur wächst natürlich auch der Druck eines eingeschlossenen Gases, weil eben die auf die Gefäßwände wirkenden Molekülstöße heftiger und zahlreicher werden.

Dasselbe gilt, mutatis mutandis, auch für Flüßigkeiten und feste Körper, nur daß bei letzteren die Moleküle nicht wandern. Diese Art, die Eigenschaft der Gase an dem Verhalten der einzelnen Moleküle sich klar zu machen, ist auch sehr zweckdienlich,

wenn man die Bewegung der Gase oder Flüßigkeiten «en masse» studieren will.

Nehmen wir einmal an, durch ein Rohr ströme ein Gas oder eine Flüßigkeit mit gleich bleibender Geschwindigkeit, d. h. mit einem Durchfluß von gleichmäßig so und soviel Liter pro Sekunde. Dieses Rohr (Fig. 1) habe nun irgendwo eine Verengung. Es ist dann jedem ohne weiteres klar, daß in dieser Verengung A das Gas rascher strömen muß, als in den weiteren Teilen B und C. Denn es muß ja pro Sekunde durch B, C sowohl als auch durch A dieselben Menge Gas hindurch, sonst müßte ja Gas verloren gehen oder hinzukommen. Wenn wir nun wieder, wie vorhin, uns die Gasmoleküle auf Erbsengröße vergrößert denken, und ein gefärbtes Gasmolekül M auf seinem Wege von B nach A beobachten, so sehen wir, daß es in der Richtung von B nach A hin eine Beschleunigung erfährt. Diese Beschleunigung erfordert aber eine Energiezufuhr in der Richtung der Bewegung! Denn wenn z. B. jemand einen Schubkarren vor sich herschiebt, und er will, daß der Karren rascher vorwärts komme, so hilft kein guter Wille und kein Zureden, er muß eben fester drücken, d. h. dem Karren mehr Energie in der Fahrrichtung hin zuführen! Nun ist aber niemand da, der unserm Molekül Energie in der Fahrrichtung von B nach A zuführt. Es muß sie also wohl oder übel von sich selbst nehmen, indem es sein Umhervagabundieren nach allen Richtungen hin etwas einschränkt, und die so ersparte Energie zu seinem Mitvorwärtskommen nach A hin benutzt. Das heißt aber, die Zahl und Wucht der Molekülstöße gegen die Wandung des Rohres nehmen in A ab, oder in andern Worten, der Druck des Gases ist in A geringer als in B und C.

Wir können uns die Sache auch so zurechtlegen: Wenn das Molekül M von B bis A eine Beschleunigung erfährt, so muß in der Richtung B zu A eine stärkere Kraft darauf einwirken als in der Richtung A zu B. Das heißt, in A muß ein geringerer Druck herrschen als in B.

Das sind praktische Erklärungsversuche für ein Phenomen, das vor ca. 200 Jahren der schweizer Gelehrte Daniel Bernouilli aus meisterhaften mathematischen Erwägungen abgeleitet hatte, und das sich so ausdrücken läßt:

Wo immer in einem Gas- oder Flüssigkeitsstrom eine Geschwindigkeitszunahme stattfindet, nimmt der Druck ab.

Oder auch: Wenn in einem gleichmäßigen Gas- oder Flüssigkeitsstrom zwischen verschiedenen Punkten Geschwindigkeitsdifferenzen herrschen, so ist der Druck dort am geringsten, wo die Geschwindigkeit am größten ist.

Oder, wenn wir, nach dem Beispiel Bernoulli's, den Gasstrom in Stromlinien zerlegen, wie in Fig. 1 angedeutet:

Jede Verengung der Stromlinien bewirkt eine entsprechende Druckabnahme senkrecht zu den Stromlinien.

Oder schließlich: Der Druck eines ruhenden Gases (aerostatischer Druck), oder einer ruhenden Flüßigkeit (hydrostatischer Druck) ist größer als derjenige des bewegten Gases (aerodynamischer Druck) oder der bewegten Flüssigkeit (hydrodynamischer Druck).

Die Bernoulli'sche Formel läßt sich für unsern Hausgebrauch auf folgende einfachste Form vereinfachen:

$$p = p' - d/2. \ (v - v')$$

Darin sind p und v der Druck und die Geschwindigkeit an der Stelle der größeren Geschwindigkeit, p' und v' die entsprechenden Werte an der Stelle geringerer Geschwindigkeit, d die Dichte.

Dieses wichtige, von Bernoulli vor 200 Jahren errechnete und seither wenig beachtete Prinzip gibt uns die Erklärung für eine ganze Reihe von interessanten, weil paradoxal anmutenden Erscheinungen, die zum großen Teil, wie wir sehen werden, auch praktische Anwendung gefunden haben.

In einem vollständig geschlossenen Zimmer zeigt das Barometer den aerostatischen Druck der ruhenden Luft an. Wenn man aber Fenster und Tür öffnet, und dadurch ein starker Luftzug entsteht, so sinkt der Luftdruck im Zimmer und ein sehr empfindliches Barometer zeigt diese Druckabnahme an. Sie ist wegen der geringen Geschwindigkeit des Luftstromes natürlich sehr gering; es gelang mir aber, dieses Fallen des Barometers an einem sehr empfindlichen Höhenmesser regelmäßig festzustellen, sobald man diesen an die Lüftungsöffnung eines gut ziehenden Ventilationsschachtes heranbrachte. Nicht umsonst steht also «Sturm» am untersten Ende der Skala des Wetterbarometers.

Daß in unserer Rohrleitung, Fig 1, an der Stelle A wirklich ein Minderdruck herrscht, läßt sich leicht beweisen, indem man bei B und A je ein kleines Loch bohrt, und in die beiden Löcher ein U-förmig gebogenes Glasrohr genau einfügt, das zur Hälfte mit einer gefärbten Flüssigkeit gefüllt ist. (Fig. 2.) Sobald nun durch das Rohr B A ein Gasstrom fließt, steigt die gefärbte Flüssigkeit im Schenkel E, und zwar um so höher, je rascher das Gas durch B-A durchströmt. Unter dem Namen *Venturimeter* ist dieses Instrument seit langer Zeit vielfach verwendet worden zur Geschwindigkeitsmessung von Gasströmen. Man brachte bei E eine in Liter pro Sekunde geeichte Skala an und konnte so jeder Zeit die Geschwindigkeit des Gasstromes ablesen.

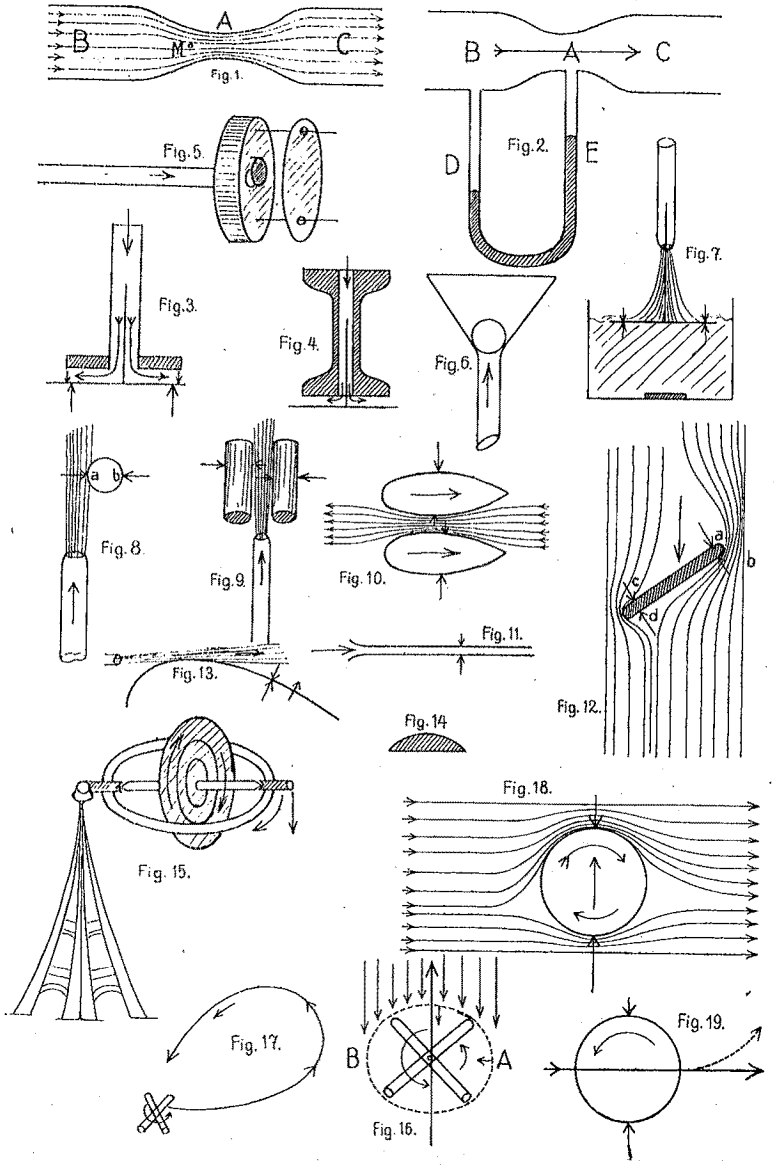
Da es vom dynamischen Standpunkte aus gleichgültig ist, ob das Gas durch das Rohr getrieben wird, oder ob sich das Rohr in der Richtung B-A rasch durch das Gas bewegt, dient diese Vorrichtung heute allgemein als Geschwindigkeitsmesser für Flugzeuge. Das Rohr B-A ist in geeigneter Anordnung parallel zur Flugrichtung angebracht, so daß die Luft je nach der Fluggeschwindigkeit mehr oder weniger rasch hindurchströmt, und an dem vor dem Führersitz angebrachten Manometerrohr D-E kann der Flieger die jeweilige Geschwindigkeit ablesen.

Wenn man mit Luft gesättigtes Wasser unter Druck durch ein Rohr fließen läßt, das an einer Stelle eine Verengung aufweist, so färbt sich unterhalb dieser Verengung der Wasserstrahl weißlich infolge von Bildung unzähliger Luftbläschen. Infolge der durch die Einengung bewirkten Druckabnahme entweicht hier die gelöste Luft zum größten Teil, daher die Bildung der Luftblasen unterhalb dieser Stelle. Diese Erscheinung kann man oft an Wasserleitungen beobachten, wenn zufällig das Wasser durch irgendwo angesaugte Luft gesättigt war. Der engere Querschnitt des Wasserhahnes bedeutet hier die Verengung des Rohres.

Als aerostatisches Paradoxon ist die unglaublich erscheinende Tatsache bekannt, daß unter gegebenen Umständen ein Blatt Papier, gegen dessen Fläche man bläst, dem Luftstrom entgegen sich bewegen soll. Und doch ist dies, nach dem Bernoulli'schen Prinzip, unter gewissen Bedingungen selbstverständlich. Man bedarf zu diesem Experiment eines Rohres, das an einem Ende eine flache runde Scheibe trägt. Man nimmt z. B. einen flachen breiten Pulverflaschenkork, bohrt ihn in der Mitte an und steckt in die Bohrung ein Glasrohr. (Fig. 3.) Nun legt man auf den Tisch eine Visitenkarte oder sonst ein Stück Papier, hält den flachen Kork einige Millimeter darüber und bläst durch das Rohr, so erhebt sich das Papier, fliegt gegen die Korkscheibe an und fällt nicht herunter, solange man bläst. Besser steckt man in das Papier eine Nadel, die, wie in Fig. 3 angedeutet, in das Rohr hinein ragt, und ein seitliches Abgleiten des Papieres verhindert. Man kann sich zu diesem Experiment auch einer einfachen Zwirnspule bedienen (Fig. 4). Die Erklärung ist einfach: der zwischen Platte und Karte mit großer Geschwindigkeit sich bewegende Gasstrom hat einen weit geringeren seitlichen Druck als der aerostatische Druck der Luft unter der Karte, und deshalb fliegt diese gegen die Platte an, und zwar um so stärker, je stärker man bläst.

Man kann die Wirkung noch bedeutend steigern, indem man die immerhin entgegengesetzt wirkende Stoßkraft des Luftstromes auf die Karte dadurch eliminiert, daß man mittelst eines Stiftes

vor die Mündung des Rohres ein rundes Metallplättchen anbringt, wie in Fig. 5 angedeutet. Die durch zwei durch den Korken gesteckte Nadeln geführte Karte wird bei dieser Vorrichtung schon aus Entfernungen bis zu 5 cm gegen die Platte heranfliegen.



Die einfachste Art, diesen Versuch anzustellen, rührt von Faraday her. Man schließe die Finger der offenen Hand fest aneinander, so wird doch noch von Gelenk zu Gelenk ein spaltenartiger Zwischenraum bleiben. Während man nun die Hand auf diese Weise horizontal hält, so daß die Fläche abwärts gekehrt ist, appliziere man die Lippen dem Intervall zwischen dem Zeige- und Mittelfinger nahe an ihren Wurzeln, und blase möglichst stark. Bringt man nun ein Papier von ca. 16 qcm von unten an die Öffnung, durch welche der Luftstrom hindurchgeht, so wird es weder durch diesen Luftstrom fortgeblasen, noch fällt es durch sein Gewicht herab, was aber sogleich geschieht, sobald man mit dem Blasen aufhört.

Auch mit einem Wasserstrahl gelingt dieses Experiment in folgender Weise: Auf den Boden eines Gefäßes legt man eine, in der Mitte mit einer langen Nadel versehene runde Scheibe aus Aluminiumblech, von ca. 15 cm Durchmesser. (Fig. 7.) Läßt man nun mittelst eines Gartenschlauches einen kräftigen Wasserstrahl senkrecht auf die Mitte der Scheibe aufließen (wobei die Nadel in die Schlauchöffnung hineinragt), so steigt das Blech mit dem Wasserspiegel im Gefäß, schwimmt also auf dem Wasser, um alsbald unter zu sinken, sobald der Wasserstrahl aufhört. Es scheint ganz, als ob die Scheibe vom Wasserstrahl angezogen würde.

Wer hat sich, wenn er in den Schießbuden auf der Schobermesse dem lustigen Spiel der am Wasserstrahl des Springbrunnens tänzelnden farbigen Kugeln zusah, Rechenschaft darüber zu geben versucht, warum die Kugeln förmlich an dem Wasserstrahl anzukleben scheinen? Diese Erscheinung, die übrigens am Luftstrahl eines kräftigen Gebläses ebenso schön sich zeigt, findet im Prinzip von Bernoulli ihre einfachste Erklärung. In Fig. 8 ist eine solche, durch einen Luftstrahl in der Schwebe gehaltene Kugel dargestellt. Im Punkte b wirkt auf die Kugel der gew. aerostatische Luftdruck, in a dagegen nur der geringere aerodynamische Druck der bewegten Luft- oder Wassermasse. Wegen des stärkeren Druckes in b wird die Kugel beständig an den Strahl herangedrückt und von der emporströmenden Luft unter Rotation in der Schwebe gehalten. Wird sie dann mal durch diese Druckdifferenz ganz in den Strahl hinein gedrückt, so wird sie von diesem in die Höhe geworfen.

Es ist selbstverständlich, daß sowohl in diesem wie auch in manchen andern der erwähnten Experimente auch noch andere Faktoren mitspielen, so u. a. hier auch die Oberflächenspannung.

Auf demselben Prinzip beruht der bekannte Versuch mit der Kugel im Trichter. In einen Trichter lege man eine leichte hohle Kugel (Fig. 6), verbinde das untere Ende des Trichterrohres mit

einem Gummischlauch und blase stark in diesen hinein. Die Kugel fliegt dann nicht fort, sondern hebt sich etwas und wird sofort heftig wieder gegen die Trichterspitze geschleudert. Dieses Spiel wiederholt sich beständig, sodaß ein Klappern entsteht, das um so lauter ist, je stärker man bläst. Man kann auch den Trichter während des Blasens umdrehen, ohne zu befürchten, daß die Kugel herunter fällt. Der Druck der zwischen Kugel und Trichterwandung durchstreifenden Luft ist geringer als derjenige des auf die Kugel wirkenden Luftdruckes, daher wird sie beständig dem Luftstrom entgegen gedrückt.

Hängt man an je einem Faden zwei leichte Kugeln nebeneinander auf, in einer Entfernung von einander, die geringer ist als ihr Durchmesser, und bläst mittelst eines Rohres zwischen ihnen hindurch, so sollte man annehmen, man blase die Kugeln auseinander. Gerade das Gegenteil tritt jedoch ein: die Kugeln fliegen auf einander zu und stoßen zusammen.

In einfacherer Weise läßt sich das Experiment vornehmen mittelst zwei leichten Zylindern, z. B. zwei zylinderische Flaschenkorken, oder zwei leeren Aspirintuben. Man legt sie wie in Fig. 9 angedeutet, an den Rand des Tisches und bläst durch ein Glas- oder Papierrohr zwischen ihnen hindurch: die Zylinder rollen zusammen, aufeinander zu.

Zwei in strömendem Wasser parallel zu einander liegende angekettete Boote stoßen infolge der Strömung unfehlbar rasch zusammen. Denn in dem engen Raum zwischen ihnen erfahren die Stromlinien des fließenden Wassers eine Verdichtung, was nach Bernoulli gleichbedeutend ist mit einer Druckabnahme zwischen den Booten. (Fig. 10.) Daß dies auch der Fall ist, wenn zwei Motorboote oder zwei Schiffe dicht nebeneinanderfahren, ist jedem Marineoffizier längst bekannt. Kriegsschiffe, Torpedoboote, Zerstörer dürfen daher bei taktischen Übungen nie enger an einander fahren, als ihre eigene Breite beträgt. Andernfalls bestände eine mit wachsender Fahrgeschwindigkeit steigende Tendenz des Zusammenstoßens. Durch entsprechende Steuerung weiß man zwar dieses Zusammenstoßen zu verhindern, aber die beständige Überwindung dieses Seitendruckes verbraucht unnützerweise Kraft, und dadurch wird die Fahrgeschwindigkeit herabgesetzt.

Auf sehr einfache Weise kann man denselben Effekt demonstrieren, indem man zwischen zwei eng gegeneinander gehaltenen Blättern Papier hindurch bläst. (Fig. 11.) Statt auseinander zu fliegen, wie man doch annehmen sollte, schlagen sie dann zusammen und wieder um so stärker, je stärker man bläst. Sobald die Blätter zusammenliegen, hört der Luftstrom zwischen ihnen auf, und damit auch der Bernoulli-Effekt, und die Blätter trennen sich wieder,

um sofort wieder zusammenzuschlagen. Es entsteht so ein mehr oder weniger starkes Flattern, das auch wohl mancher bereits feststellen konnte beim Versuch, zwei Zigarettenpapierblätter durch blasen von einander zu trennen. Manch primitives «Musik»-instrument unserer Jugendzeit beruht, zum Teil wenigstens, auf dieser Erscheinung, z. B. der «Wuppert», plattgedrücktes Ende des hohlen Löwenzahnstieles usw.

Eine merkwürdige Folge des Bernoulli-Prinzips wurde nach «Scientific American» kürzlich in Amerika festgestellt. Es handelte sich um die Warmluftheizung eines Hauses, das in einer kurzen, engen Straße lag. Durch einen auf diese Straße mündenden Kanal wird frische Luft angesaugt, die dann, durch den Heizapparat erwärmt, nach oben steigt, zu den zu heizenden Räumen. Als nun eines Tages, infolge plötzlich eintretender Kälte, die Heizung in Gang gesetzt werden sollte, versagte sie vollkommen, insofern als nach den zu heizenden Räumen keine warme Luft gelangte. Es herrschte ein starker Nord-Ost-Wind, der heftig durch die enge, nach Nordost gerichtete Straße strich. Als man dann die Eintrittsöffnung für die frische Luft an der Straße nachsah, merkte man, wie durch die Öffnung warme Luft auf die Straße herausströmte, und einige Sperlinge, die sich dort wohl die kalten Füße gewärmt hatten, flogen davon. Infolge der starken Luftströmung in der Straße, hatte dort nach Bernoulli der seitliche Druck wesentlich abgenommen, und der höhere aerostatische Druck oben in den Zimmern bewirkte, daß durch die Heizung die Luft aus den Zimmern angesaugt wurde. Sie wurde dann im Ofen erwärmt und diente zur Heizung der Landstraße. Man verlegte daraufhin die Eintrittsöffnung der Luft an die hintere Seite des Hauses und die erwähnte Erscheinung zeigte sich nie mehr.

Wenn man, wie in Fig. 13 angedeutet, ein Blatt Papier horizontal, so daß sich das Ende nach unten biegt, vor den Mund hält, und dann kräftig darüber hinweg bläst, so hebt sich das Blatt in die Höhe, weil der aerostatische Druck unter dem Blatt durch den schwächeren aerodynamischen Druck darüber nicht mehr kompensiert wird.

Die Kurve dieses Blattes ähnelt der Form der modernen Flugzeugflügel. In Wirklichkeit spielt in der Flugzeugtechnik die hebende Wirkung der so geformten Flügel eine bedeutende Rolle.

Ein jeder, der gelegentlich im Ruderboot gefahren ist, wird unzweifelhaft die Erfahrung gemacht haben, daß, wenn er beim Zurücklegen der Ruder diese nicht fest in der Hand hält, sie die ausgesprochene Tendenz zeigen, höchst unanständig platt mit der Breitseite auf das Wasser aufzufallen und so auch ins Wasser einzusinken, anstatt mit der scharfen Kante ins Wasser einzu-

dringen. Hingegen muß es dem denkenden Ruderer merkwürdig erscheinen, daß beim Anziehen der Ruder diese sich automatisch platt gegen die Strömung stellen. Es ist dieselbe Erscheinung, die sich zeigt, wenn man einen Karton oder eine Holzscheibe aus größerer Höhe herunter fallen läßt. Sie zeigt dann deutlich die Neigung sich platt zur Fallrichtung zu stellen und fällt in horizontaler Lage zu Boden.

In meiner, im Jahre 1918 in unserer Zeitschrift veröffentlichten Arbeit «Von Fliegerbomben und was drum und dran» schrieb ich über das Herunterfallen der Granatsplitter: «In Wirklichkeit waren fast alle größeren Splitter, die ich zu Gesicht bekam, mit der flachen Seite auf den Boden aufgeschlagen. (Beim Aufschlagen der Sprengstücke auf eine harte Unterlage, wie auf Pflaster, -- oder auch auf Gras -- kann man die Aufschlagstelle an den Splittern leicht feststellen).» ———

Die Ursache dieser Erscheinung war mir damals gar nicht klar, umsomehr gereicht es mir heute zur Genugtuung sie notiert zu haben! Der Forscher und Naturfreund soll eben stets alle gemachten Beobachtungen notieren, auch wenn sie ihm unwahrscheinlich oder paradox vorkommen. Ich habe damals eine Verlegenheitserklärung für meine Beobachtung gegeben: «Die Splitter werden bei der Explosion der Granate meist in stark rotierende Bewegung versetzt, dadurch bieten sie der Luft ihren größten Querschnitt dar und fallen dementsprechend langsamer.» —

Daß ich damals die Arbeiten von Bernoulli noch nicht kannte, gestehe ich gerne ein, sind sie doch in fast keinem auch der grösseren Handbücher der Physik auch nur erwähnt! Ja, in dem klassischen Handbuch der Physik von Müller-Pouillet, in 5 Lexikonbänden ist Bernoulli und seine Arbeit vollkommen ignoriert, und man gibt dort für manche auf seinem Prinzip beruhenden Erscheinungen entweder gar keine Erklärung, oder unwahrscheinliche Verlegenheitserklärungen. Sogar in der Flut von Veröffentlichungen der letzten Zeit über das Rotorboot, das, wie wir sehen werden, fast ausschließlich auf Bernoulli's Prinzip beruht, ist Bernoulli höchstens so nebensächlich erwähnt, meist aber totgeschwiegen.

Einem platten, durch die Luft fallenden Körper liegen die Luftströmungslinien symetrisch an, solange er in vertikaler Stellung fällt, und es treten keine seitlichen Kräfte auf. Das ändert sich aber, sobald unter dem Einfluß der Luftströmung oder des Windes der Körper seine vertikale Stellung verliert und sich schief zur Fallrichtung stellt.

Es treten dann, wie in Fig. 12 angedeutet, Verdichtungen der Stromlinien und damit Druckänderungen ein und zwar wird der

Druck in b und c geringer als in a und b. Dadurch wird die Scheibe nach und nach in eine horizontale Lage gedrückt, d. h. sie stellt sich senkrecht, platt zur Fallrichtung.

So hat man denn auch schon seit langer Zeit immer und immer wieder die Beobachtung gemacht, daß Meteoriten in horizontaler Lage, d. h. mit der Breitseite nach vorn gerichtet die Luft durchsausen. Man erkennt dies bei aufgefundenen Meteoriten leicht an der durch die Luftreibung geschmolzenen Frontfläche.

Schon Sir Hiram Maxim, der bekannte Erfinder des Machinengewehres, erwähnt in seinem Buche: «Künstlicher und natürlicher Flug» einen Propeller für Aeroplane, dessen Flügel flach in einer Ebene liegen und keine schraubenförmige Verstellung aufweisen. Sie haben den in Fig. 14 dargestellten Querschnitt. «Ganz gleich,» schreibt Maxim, «in welcher Richtung der Motor lief, der Propeller zog stets in derselben Richtung an, und zwar nach der konvexen Seite der Flügel hin, wo doch gerade das Gegenteil zu erwarten war.» — Also auch Maxim kannte die damals schon seit weit über 100 Jahren veröffentlichten Arbeiten Bernoulli's nicht, sonst hätte er die Sache als selbstverständlich erkannt. Denn an der konvexen Seite der Propellerflügel bildet sich eine starke Verdichtung der Strömungslinien aus, also ein starker Minderdruck gegenüber der flachen Seite.

Eine der interessantesten Sportübungen ist unstreitig das Bumerangwerfen. Zu den ersten Übungen aber ist unbedingt erforderlich, daß man «steht allein auf weiter Flur». Denn bei den verblüffenden und unglaublichen Flugbahnen die der Bumerang bei ungeübtem Werfen einschlägt, besteht die größte Gefahr für jeden Zuschauer, ganz gleich wohin er sich stellt, — nebenbei bemerkt, auch für jedes irgendwie in erreichbarer Nähe sich befindende Fenster u. s. w.

Es gibt Bumerange der verschiedensten Formen: die der Australneger haben L-Form, wobei die beiden Flügel etwas verdreht sind, dann gibt es solche in Dreieckform, in Kreuzform usw. Wesentlich ist immer der Querschnitt in D-Form (Fig. 14).

Wählen wir für unsere Ausführungen die in England und in Amerika als Spielzeug beliebte Kreuzform (Fig. 16). Wirft man diesen (nach entsprechender Übung) in horizontaler Lage und Richtung, so daß man im letzten Augenblick vor dem Loslassen dem in der Hand gehaltenen Schenkel einen kräftigen Zug nach rückwärts versetzt, dem Bumerang damit eine rasch rotierende Bewegung erteilt, so fliegt er anfangs in beinahe horizontaler Richtung, um sich dann unter allmählicher Umdrehung in die Luft zu erheben, und in elegantem Bogen zum Schützen zurück-

zukehren, der ihn dann mit der Hand wieder auffangen kann. (Fig. 17.)

Zur Erklärung des Bumerangfluges sind eine ganze Anzahl von Theorien aufgestellt worden, die aber recht wenig oder gar nicht befriedigen. Seine beste Erklärung findet er in dem Prinzip von Bernoulli, kombiniert mit der Theorie des Kreisels. Denn der rasch rotierende Bumerang stellt eine Art Kreisel dar und gehorcht dessen Gesetzen.

Wie wohl allgemein bekannt, sucht ein sich rasch drehender Kreisel die Richtung seiner Axe beizubehalten. Auf dieser Eigenschaft beruhen seine verschiedenartigen Anwendungen als Gyroskop, das zum Beispiel zum stabilisieren der Schiffe vorgeschlagen wurde. Einer meiner Freunde, ein gewandter Mechaniker, hatte sich ein solches Gyroskop in sein Motorrad eingebaut, und erregte gewaltiges Aufsehen, wenn das Rad auf freier Strasse anhielt und mit dem Fahrer, ohne umzufallen, ruhig stehen blieb, wie auch nach dem Absteigen des letzteren. Das schwere, in das Rad eingebaute Gyroskop verhinderte das Umfallen. Während der Fahrt allerdings mußte das Gyroskop ausgeschaltet werden, da es sich sonst in den Kurven dadurch ganz unangenehm bemerkbar macht, daß es sich der in den Kurven notwendigen schiefen Einstellung des Vehikels ganz energisch widersetzte!

Kehren wir nach dieser kurzen Abschweifung zu unserm Kreisel zurück: Wenn auf die Axe eines Kreisels eine Kraft in einer bestimmten Richtung beständig einwirkt, so weicht die Axe dieser Einwirkung aus einer Richtung, die senkrecht zu der wirkenden Kraft steht. So etwa, wie ein Junge, nach dem ein anderer mit einem Stein wirft, oder mit einem Stock stößt, in einer zur Wurf- oder Stoßrichtung senkrechten Richtung ausweicht.

Am besten läßt sich diese Eigenschaft veranschaulichen mit Hilfe eines der bunten Bleikreisel, die früher auf allen Jahrmärkten von Hausierern verkauft wurden, und die auf der Spitze eines dazu gelieferten bleiernen Eifelturms die merkwürdigsten Bewegungen ausführten. Ein solcher in Fig. 15 dargestellter Kreisel oder Gyroskop besteht aus einem Bleiring, der, einander gegenüber, zwei regulierbare Achsenträger eingeschraubt trägt. In diesen Achsenträgern liegt die Achse des eigentlichen Kreisels, der aus einer Platte mit dickem bleiernen Wulst am Rande besteht. Durch kräftiges Abziehen einer auf die stählerne Achse des Kreisels aufgewickelten Schnur wird letzterer in rasche Rotation versetzt. Legt man nun das kugelförmig ausgebildete aus dem hervorstehenden Ende des einen Achsenlagers in die entsprechende Höhlung in der Spitze des Eifelturms, so daß die Achse des Kreisels horizontal liegt, so fällt der Kreisel nicht herunter, sondern behält seine hori-

zontale Lage bei, so lange die rasche Rotation dauert. Auf das äußere Ende des Gyroskops wirkt beständig die Anziehungskraft der Erde und zieht den Kreisel nach unten. Dieser Einwirkung weicht der Kreisel in einer dazu senkrechten Richtung aus, und so dreht sich das Gyroskop langsam im Sinne ds Uhrzeigers um den Eifelturm herum.

Wirft man einen z. B. kreuzförmigen Bumerang so, daß er unter rascher Rotation in horizontaler Lage und Richtung fliegt, wobei die gewölbte Seite nach oben gerichtet ist, so geschieht folgendes: Unter dem Einfluß der sich über der Wölbung ausbildenden Verdichtung der Stromlinien wird, sobald die Vorwärtsbewegung etwas nachläßt, der Bumerang in die Höhe gehoben, da ja nach dem mehrfach Gesagten, der Druck über ihm schwächer ist als unter ihm. Die hebende Kraft ist dabei proportional der Geschwindigkeit der Luftströmung. Diese Geschwindigkeit ist aber nicht an allen Punkten des Bumerangs gleich groß, sondern rechts (Fig. 16) wo sich Rotation und Vorwärtsbewegung addieren, viel größer als links, wo sich diese beiden Größen subtrahieren. Es besteht also eine beständige Tendenz den Bumerang rechts zu heben, d. h. ihn von rechts nach links umzukippen. Der sich rasch drehende Bumerang ist aber ein Kreisel und weicht deshalb dieser Kraft aus in einer senkrecht dazu liegenden Richtung, d. h. er hebt sich am vorderen Ende und kippt langsam von vorn nach hinten um. (Am einfachsten läßt sich das so versinnbildlichen, daß man an ein vor sich aufgeschlagenes Buch denkt, das beim Umschlagen eines Blattes von rechts nach links sich am oberen Ende heben, resp. sich aufrichten würde.)

Je mehr nun die in der Wurfrichtung wirkende Kraft erlahmt, um so mehr wird die Flugrichtung des Bumerangs durch das Bernoulli'sche Prinzip, d. h. durch die jeweilige Lage der Wölbung bestimmt. Das heißt, da sich ja die Wölbung, wie oben beschrieben, immer mehr dem Schützen zukehrt, fliegt der Bumerang schließlich wieder auf diesen zu.

Bei dem australischen Bumerang kommt zu der Wirkung der gewölbten Fläche noch diejenige der schraubenförmigen Verstellung der beiden Flügel hinzu!

Wenn man einen freischwebenden Kreisel der sich im Sinne des Uhrzeigers dreht, anbläst, so weicht er nach links aus. Denn links findet nach Fig. 18 eine starke Verdichtung der Stromlinien statt, also eine Druckverminderung gegenüber rechts. Und wenn wir den Kreisel auf einem kleinen Boot befestigen, so haben wir das Rotorboot oder Flettnerboot. Dieses wird also vom Winde senkrecht zur Windrichtung getrieben.

Dieses, auf dem Prinzip von Bernoulli beruhende seitliche Ausweichen des in einem Luftstrom rotierenden Zylinders wurde 1852 zuerst von dem Physiker Gustav Magnus beschrieben und zu erklären versucht. Magnus beschäftigte sich viel mit ballistischen Fragen, speziell mit dem Studium der seitlichen Abweichungen der Geschosse. Damals verschoß man aus Handfeuerwaffen noch richtige «Kugeln», d. h. kugelförmige Bleigeschosse. Es wurden damals vielfach unerklärliche Abweichungen einzelner Kugeln festgestellt. Magnus fand schließlich, daß es sich in solchen Fällen durchwegs um Geschosse handelte, die seitlich in der Masse, infolge fehlerhaften Gusses, Luftblasen enthielten. Da bei diesen Geschossen dann der Schwerpunkt exzentrisch liegt, erfahren sie beim Schuß eine starke Drehung, und in dieser fand Magnus auf Grund seiner Kreiselversuche die Ursache ihrer Abweichungen. Auf der Seite wo die Drehungsrichtung der Kugel sich der Luftströmung addiert, findet eine starke Stromlinienverdichtung statt, entsteht also ein starker Minderdruck, wodurch nach Bernoulli die Kugel abgelenkt wird. Eine richtige Erklärung für die von ihm beobachtete Erscheinung konnte Magnus nicht geben. Diese wurde erst durch die neueren Arbeiten von Prandtl ermöglicht.

Die Stromlinien verdichten sich mit der Drehungsrichtung einmal, weil in dieser Richtung die Reibung bedeutend geringer ist. Wenn man einen Gegenstand über eine Fläche hinschiebt, so hat man einen bestimmten Reibungswiderstand zu überwinden. Wenn sich aber die Fläche, auf der der Gegenstand liegt, durch eine zweite Kraft gleichzeitig in derselben Richtung mitfortbewegt, so ist der Reibungswiderstand zur Fortschiebung des Gegenstandes natürlich bedeutend geringer und eventuell Null. So geht es auch mit der Reibung der Luft an der oberen Fläche unsers Zylinders in Fig. 18. Ferner bildet sich nach Prandtl an der Berührungsfläche von Luft und Zylinder eine «Grenzschicht», indem die Luft an der Zylinderoberfläche sozusagen festklebt und so von dem rotierenden Zylinder mitfortgerissen wird. Die treibende Kraft des Rotorbootes ist und bleibt ausschließlich der Bernoulli-Effekt, und es ist zum mindesten recht merkwürdig, daß bei dem gewaltigen Tamtam- und Reklamegeschrei um das Flettnerboot die schönen Arbeiten des Schweizers Bernoulli so gut wie totgeschwiegen wurden, und alles auf die Versuche des deutschen Physikers Magnus, für die dieser nicht einmal eine richtige Erklärung zu geben vermochte, zurückgeführt wurde. Das ging soweit, daß in der Zeitschrift «Schuß und Waffe» noch kürzlich ein bekannter Ballistiker, der dort die Arbeiten Magnus behandelte (H. Panther), die Abweichungen der Geschosse total verkehrt angibt, indem er meint, da wo eine Verdichtung der Stromlinien bestehe, müsse

natürlich ein größerer Druck herrschen. Der Mann scheint also auch von Bernoulli's Arbeiten noch keine Ahnung zu haben.

Ich komme noch einmal auf das vorhin erwähnte Ausweichen des Kreisels beim Anblasen zurück. Es muß zu diesem Versuch der Kreisel, wie schon erwähnt, zwischen zwei Spitzenlagern laufend, frei schwebend aufgehängt sein. Versucht man die Sache an einem auf dem Tisch laufenden gewöhnlichen Kreisel, so wird man, wenn sich der Kreisel z. B. im Sinne des Uhrzeigers dreht, keine Abweichung nach links beim Anblasen feststellen können, sondern eventuell das Gegenteil. Es kommt dann eben hier die beschriebene Reaktion des Kreisels gegenüber einer Kraft die die Lage seiner Achse zu verändern sucht, stärker zur Geltung als der Bernoulli-Effekt. Der auf den Kreisel geblasene Luftstrom wirkt am stärksten auf das obere Ende seiner Achse, da das untere Ende durch die Reibung am Tische sozusagen festgehalten ist. Der Luftstrom sucht also den Kreisel nach vorne umzublasen, dieser reagiert dagegen mit einer Ausweichung nach rechts.

Bei den Rotoren des Flettnerbootes, die nur ca. 100 Umdrehungen in der Minute machen, kommt eine Kreiselwirkung kaum in Frage; bei wesentlicher rascherer Drehung dagegen könnte sie sehr schädlich wirken.

Tennisspieler sind oft in der Lage zu beobachten wie «gewistete» Bälle mit starker Rotation recht merkwürdig gebogene Flugbahnen beschreiben. Es gibt ein Spielzeug mit dem man Kugeln «um die Ecke schießen» kann: ein in drei Viertel seiner Länge mit einer halbkreisförmigen Rille versehener Stab, der als Schleuder zum Werfen von leichten Kugeln dient. Die Fläche der Hohlrille, in die die Kugel am untern Ende gelegt wird, ist gerauht, die Oberfläche der Kugel ebenfalls, so daß beim Wegschleudern in horizontaler Richtung die Kugel in starke Rotation gerät und infolgedessen nach Fig. 19 eine horizontale Kurve beschreibt.

Da, wie wir gesehen haben, eine ganze Anzahl von merkwürdigen Erscheinungen sich durch die Formel Bernoulli's erklären lassen, ist man nach Prof. S. R. Williams wohl berechtigt von einem Prinzip von grundlegender Bedeutung zu sprechen.

Literatur: S. R. Williams: On the trail of the molecule, in Scientific american. — L. Prandtl: Flüssigkeitsbewegung und Gasbewegung im Handwörterbuch der Naturwissenschaften. — F. Berwerth: Meteoriten, ebendort. — Ackeret, Das Rotorschiff. — Muller-Pouillet, Handbuch der Physik, u. s. w.