

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Wind- und Wasserhosen in Europa

Wegener, Alfred

Braunschweig, 1917

Fünfzehntes Kapitel. Ansichten über die Entstehung der Tromben

Fünfzehntes Kapitel.

Ansichten über die Entstehung der Tromben.

Nur die hauptsächlichsten Theorien sollen im folgenden kurz besprochen werden.

Am wenigsten brauchen wir uns bei der **vulkanischen Theorie** aufzuhalten, welche von Buffon und Lemery aufgestellt wurde. Sie glaubten in dem Wolkenschlauch eine vulkanische Rauchsäule zu sehen, und namentlich der Fuß der Wasserhosen besitzt ja, wenn man ihn aus gehöriger Entfernung betrachtet, in der That einige Ähnlichkeit mit einem tätigen unterseeischen Vulkan. Bei der Widerlegung dieser auf grober Unkenntnis beruhenden Ansicht machte man merkwürdigerweise von dem nächstliegenden Gegengrund, dem Fortschreiten der Tromben, gar nicht Gebrauch. Um auch einer Entstehung von oben herab Rechnung zu tragen, macht Buffon die Annahme, daß „durch Entzündung der in einer Wolke enthaltenen schwefligen Materie sich ein Luftstrom bildet, der senkrecht von der Wolke zum Meer herabsteigt“, wodurch dann „alle wässerigen Teile, die die Wolke enthält, dem Luftstrom folgen und eine Trombe bilden, welche vom Himmel auf das Meer herabfällt“. Noch 1744 vertritt Jallabert gelegentlich seiner Beschreibung einer Wasserhose die Annahme unterirdischer vulkanischer Wirbel, und sogar noch 1878 finden wir in den von Mansuy veröffentlichten Beobachtungen und Ansichten des Kapitäns Seaman die ganz ähnliche (durch ein Experiment erläuterte) Vorstellung, daß sich zunächst durch Einströmen des Wassers in unterirdische Hohlräume ein in der Achse leerlaufender Wasserstrudel bilde, durch dessen axialen Kanal die Dämpfe des Hohlraumes emporsteigen und als vulkanische Wolkensäule sichtbar werden.

Auch die **Platzregen-Theorie** von Eeles¹⁾ verdient kaum eine Erwähnung; die Trombe soll nur einen eng begrenzten, aber sehr heftigen Regenguß darstellen, und die trichterförmige Verjüngung nach unten eine Folge der gegenseitigen Anziehung der fallenden

¹⁾ Schreibweise nach Peltier; Muncke schreibt Eelers; Bonfont schreibt diese Theorie einem Professor Telles zu.

Tropfen sein. Das Bild, welches dieser Erklärung zugrunde liegt, ist wohl das der Fallstreifen, welche bisweilen von einem a-cu herabhängend eine trichterförmige Gestalt annehmen, weil ihr mittelster Teil naturgemäß am spätesten der Auflösung in der nicht gesättigten unteren Schicht verfällt. Ich habe selber in Grönland eine a-cu-Wolke gesehen, bei der ich im Zweifel war, ob die herabhängenden Zapfen Fallstreifen oder kondensierende Wirbel waren. Freilich muß man Muncke beipflichten, wenn er Eeles Unkenntnis der Tatsachen vorwirft.

Fast ebenso bizarr wie die bisherigen erscheint uns heute die **elektrische Theorie**. Aber schon die große Zahl ihrer Vertreter (Beccaria 1753 mit Versuchen, Brisson 1767, Cavallo mit Versuchen, Reimarus, Michaud, Horner, Young, Hare, Pohl, Peltier 1840 mit Versuchen, Becquerel, Martins u. a.) zwingt uns, etwas näher darauf einzugehen. Zunächst dachte man, daß die elektrisch geladene Gewitterwolke vom Erdboden angezogen würde und sich deshalb in Gestalt eines Trichters herabsenke, der den Ausgleich vermittele. Auf See, meinte man, höbe sich die angezogene Wasseroberfläche ihrerseits dem Wolkenschlauch entgegen, und man glaubte in den Beobachtungen Belege dafür zu finden, daß im Augenblick der Berührung ein Blitz in der Trombe sichtbar werde. Diesen Vorgang ahmte man im kleinen mit einem benetzten Konduktor nach, den man einer Wasseroberfläche näherte. Die emporgerissenen, oft zur Wolkenhöhe emporgehobenen Gegenstände verglich man mit den tanzenden Kügelchen zwischen zwei entgegengesetzt geladenen Platten. Die immerhin erhebliche Lebensdauer der Tromben zwang dann zur Annahme einer dauernden elektrischen Strömung; man stellte die Ansicht auf, es gebe zwei Arten des Elektrizitätsausgleiches beim Gewitter: die plötzliche des Blitzes und die kontinuierliche der Tromben. Die Rotation der Tromben sei eine Wirkung des Erdmagnetismus auf diesen vertikalen Strom. Ebenso bewirke der Erdmagnetismus, daß die Tromben von WSW nach ENE, d. h. senkrecht zum magnetischen Meridian, fortschreiten (was der Betreffende zufällig in einem Falle festgestellt hatte). Die angebliche Lichterscheinung des Staubfußes, die wir oben als wesentlich auf einer optischen Täuschung beruhend erkannt haben, wurde als elektrische Flamme ausgelegt, und spätere Autoren scheinen auch mit der Vorstellung geliebäugelt zu haben, durch den luftverdünnten Raum im Inneren

der Trombe könne ein mit Leuchterscheinung verbundener elektrischer Ausgleich ähnlich wie in Geißler-Röhren hindurchgehen. Weil Peltier nach dem Vorübergang einer Trombe tote Fische in einem Teich gefunden hatte (freilich der einzige derartige Fall!), schloß man, daß diese durch den elektrischen Strom getötet seien. Alles rätselhafte, insbesondere die gespällten Baumstämme, wurden auf Elektrizität zurückgeführt, welche hier durch starke Erhitzung des als Leiter benutzten Stammes das in ihm enthaltene Wasser zur Explosion gebracht haben sollte. Die verdorrten Blätter erklärte man für versengt durch die elektrische Flamme. Der „schweflige“ Geruch wurde mit dem des Blitzes und der Elektrifiziermaschine verglichen.

Die elektrische Theorie fand ihre Hauptvertreter in Frankreich, von wo auch die meisten jener Beschreibungen stammen, welche sich zugunsten dieser Theorie auslegen lassen. In Deutschland bevorzugte man die später zu besprechenden mechanischen und thermodynamischen Theorien, jedoch ohne die elektrische ganz zu verwerfen. In Amerika fand die letztere immerhin so viel Anhänger, daß Finley sich noch 1887 zu umständlichen Widerlegungen veranlaßt sah.

Zu den heute als unmöglich zu bezeichnenden Erklärungsversuchen¹⁾ ist auch die erst 1913 von Hess ausgearbeitete und in der Meteorologischen Zeitschrift zustimmend besprochene **Wogentheorie** zu zählen. Sich unvorsichtigerweise auf Peltier stützend, geht dieser Autor von der unrichtigen Annahme aus, es gebe Wolkenschläuche ohne Rotation, und deutet die Abbildungen vom Rath's (Fig. 2, S. 31) in der Weise, daß er mehrere wie die Finger einer Hand neben einander in einer Reihe stehender Wolkenschläuche annimmt. Zur Entstehung einer solchen Schlauchreihe nimmt er eine Luftwohle an einer darüber gelegenen Schichtgrenze an, deren Kamm an einzelnen Punkten brandet und nun in einer freilich schwer verständlichen Weise die unter diesen Stellen befindlichen Luftsäulen zum Aufsteigen veranlaßt. Auch auf diese Theorie kann nicht weiter eingegangen werden.

¹⁾ Wir haben nicht alle aufgezählt. Aber z. B. auf Kastner's Frage: „Ob wohl die Wettersäulen aus Feuerkugelstoff in Gasform bestehen?“ brauchen wir wohl nicht einzugehen.

Thermodynamische Theorie. Es bleiben noch zwei Theorien, die mechanische und die thermodynamische. Die letztere, die wir zunächst besprechen wollen, sieht in der Trombe einen aufstrudelnden Luftfaden, der die durch Sonnenstrahlung erhitzte bodennächste Luftschicht in größere Höhen hinauf befördert. Die Rotation wird dabei als Begleiterscheinung aufgefaßt, wobei an den trichterförmigen Wasserwirbel erinnert wird, der sich über der Ausflußöffnung am Boden eines Wassergefäßes bildet. Da diese Vorstellung anscheinend für die Kleintromben wesentlich zutrifft ¹⁾, und man diese nicht von den Großtromben trennte, war man imstande, manche Beweise aus den Beobachtungen zu beschaffen. Schon 1753 vertrat Franklin diese Ansicht, 1786 desgleichen Oliver. Ferner sind zu nennen Ogden, Defrance, Espy 1840, Reye 1872, Hildebrandsson 1876, Mohn, Hoffmeyer, Ferrel 1886, Sprung 1885, Bigelow 1907 u. a. Wie man sieht, hat gerade eine große Zahl der bedeutendsten Fachmeteorologen diese thermodynamische Theorie vertreten, ja man kann sagen, daß sie in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts, namentlich seit der geschickten Darstellung von Reye, durchaus die herrschende war. Wir wollen hier nur auf die Ausführungen von Ferrel und Sprung näher eingehen, welche dauernd wertvolles enthalten.

Beide Autoren nehmen an, daß die Luftteilchen unter Erhaltung ihres Rotationsmomentes sich der Achse nähern, daß also das Rotationssystem bestimmt ist durch die Gleichung:

$$v \cdot r = \text{konst.}$$

Wenn dann für den Abstand $r_0 = 1000$ m von der Trombenachse ein Zahlenwert für die hier herrschende Geschwindigkeit v_0 angenommen wird, läßt sich für gegebene Feuchtigkeitsverhältnisse aus dieser Gleichung die Breite der kondensierenden Säule, und zwar in allen Höhen, also die gesamte Form des Wolken-schlauches, berechnen. Vorausgesetzt wird dabei, daß die Wolkenbasis neben der Trombe einfach den Beginn der Kondensation beim Aufsteigen vom Erdboden darstellt. So ergeben sich die

¹ Mit dem bereits auf S. 7 gemachten Vorbehalt, daß für das Zustandekommen einer einheitlichen Rotation noch bestimmte Vorbedingungen, vermutlich eine bestimmte Windschichtung, gegeben sein müssen.

beiden Abbildungen Fig. 83 u. 84 für die dabei angegebenen Ausgangsbedingungen (v_0 Geschwindigkeit in 1000 m Achsenabstand, τ_0 Temperatur, τ Taupunkt der Luft außerhalb der Trombe am Erdboden). Zahlenmäßig ergibt sich der Radius der kondensierenden Säule in den beiden Beispielen zu 13 und 10 m, wozu die Geschwindigkeiten 100 und 156 m p. s. gehören. Diese Geschwindigkeiten müssen mindestens in den beiden Tromben vorkommen, damit auch am Boden Kondensation eintritt. Auf Ferrel's Ansicht, daß in der oberen Verlängerung der Trombe der Schauplatz der Hagelbildung zu suchen sei, brauchen wir nicht einzugehen, da ihre Unhaltbarkeit auf der Hand liegt.

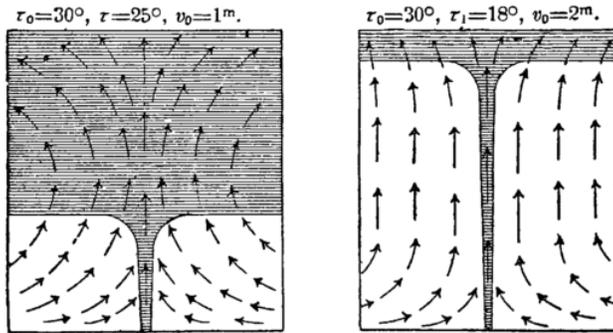


Fig. 83 u. 84. Theoretische Trombenformen für die oben angegebenen Ausgangswerte, nach Ferrel.

Übrigens haben sowohl Ferrel wie Sprung bereits gewisse Bedenken gegen diese Theorie gehabt, weil die für das Aufsteigen nötige Wärme im Widerspruch stehe mit der für die Kondensation nötigen Abkühlung. Sie kommen deshalb zu dem Schluß, daß die Wärme nur den ersten Anlaß für das Aufsteigen gebe, während das dauernde Aufströmen in der Trombe durch ihre Reibung am Boden erzeugt werde ¹⁾.

Dieser in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts gerade in den engeren Fachkreisen fast überall vertretenen thermodynamischen Trombentheorie steht ein namentlich von Faye erhobener Einwand entgegen, nämlich, daß der Trombenwirbel von oben

¹⁾ Sprung, Lehrbuch der Meteorologie, Hamburg 1885, S. 228.

herabwächst. Faye nahm aber fälschlich an, daß auch die Luft absteige, und setzte sich auf diese Weise mit den Beobachtungen in Widerspruch, weshalb er nur wenige Anhänger gewann. Da ein Teil seiner Vorstellungen aber unbestreitbar richtig war und im Widerspruch mit der thermodynamischen Theorie stand, finden wir eine Reihe von vermittelnden Erklärungsversuchen, die meist darauf hinauslaufen, daß es zwei Arten von Tromben, eine aufsteigende und eine absteigende, geben soll. Aus den Beobachtungen wurde angeführt, daß der Wasserstaubfuß der Wasserhosen mitunter auffällig verschieden entwickelt ist; auch das Vorhandensein oder Fehlen des Wasserturms gab Anlaß, einen solchen Unterschied zu konstruieren, und auch die direkten Wahrnehmungen über aufsteigende oder absteigende Bewegung in der Wolkensäule. Auch heute müssen wir ja zugeben, daß es cyclonisch und anticyklonisch rotierende Tromben gibt, und ebenso könnte man zwischen rechtsseitigen und linksseitigen Tromben unterscheiden. Allerdings haben wir bisher keinen Anhalt, zu glauben, daß auch ihr Bau verschieden sei.

Die thermodynamische Theorie nimmt an, daß das Aufstrudeln überhitzter Luftmassen eine notwendige und ausreichende Bedingung der Trombenbildung ist, d. h. daß ohne solches Aufstrudeln keine Trombe entstehen kann, und daß außer dem Aufstrudeln keine weiteren Ursachen zur Erklärung nötig sind. Beide Annahmen sind falsch. Wie Hirn und namentlich v. Hann in allen drei Auflagen seines großen Lehrbuches der Meteorologie betont hat, trifft das Aufstrudeln nur bei Kleintromben zu, während Wind- und Wasserhosen die durch Weiterwachsen herabkommenden Enden eines Wirbels sind, dessen Ursprung und Lage in höheren Schichten zu suchen ist. Aber auch die andere Annahme, daß ein solches Aufstrudeln eine hinreichende Erklärung der Wirbelbewegung abgebe, ist niemals bewiesen worden, ja offenbar unrichtig. Die Erfahrung lehrt das Gegenteil; der von der Zigarre aufsteigende Rauch, der Luftstrom über der Lampe, die vulkanischen Rauchsäulen, die Cumulus-Wolken — nichts von alledem rotiert um die vertikale Achse. Auch der bekannte Wirbeltrichter über der Ausflußöffnung eines Wassergefäßes bildet sich nicht, wenn das Wasser im Gefäß ganz in Ruhe war, und dem ausfließenden Strahl nicht durch seine Seitenwände eine Rotation mitgeteilt wird. Das Aufstrudeln ist also für Kleintromben an-

scheinend eine notwendige, doch nicht hinreichende Bedingung; für Wind- und Wasserhosen aber keins von beiden.

Mechanische Theorie. Die letzte Theorie, die wir besprechen müssen, und welche zugleich die heute wahrscheinlichste Erklärung der Tromben umfaßt, ist die mechanische, in welcher nicht wie bei der vorigen, die Wärmeverhältnisse als Ursache und die Rotation als Folge, sondern umgekehrt die Rotation, mechanisch oder hydrodynamisch entstanden, als Ursache der thermodynamischen Effekte betrachtet wird, die sich in der Kondensation der Wolkensäule äußern.

Diese Theorie ist zugleich die älteste, denn schon im Altertum wurden, namentlich von Lucretius ¹⁾, Ansichten geäußert, welche als die ersten Anfänge einer mechanischen Theorie gelten können. Die Stelle lautet in der Übersetzung ²⁾ folgendermaßen:

„Übrigens ist hiernach leicht einzusehen, auf welche Weise der »Prester« [feuriger Wirbelwind], wie die Griechen ihn nach seinem Aussehen nennen, sich von oben auf das Meer herabsenkt. Es kommt nämlich mitunter vor, daß gleichsam eine herabhängende Säule vom Himmel auf das Meer herabsteigt, um welche herum die Meeresfläche von brausenden Windstößen gepeitscht wird und heftig aufschäumt; werden Schiffe von diesem Aufruhr ergriffen, so werden sie übel zugerichtet und kommen in die größte Gefahr. Die Erscheinung tritt bisweilen ein, wenn ein heftiger Windstoß die Wolke, gegen die er prallt, nicht durchstoßen kann; er zieht sie dann allmählich herab, bis eine Säule vom Himmel zum Meere herabhängt; es ist als ob eine Masse durch die Faust und mit Hilfe des Armes von oben her in wirbelnde Bewegung gesetzt würde und sich auf dem Meere ausbreitete; sobald diese Säule zerstiebt, bricht von ihr ein gewaltiger Wind auf das Meer hervor und erregt die Oberfläche zu einem unglaublichen Schäumen; unter ständigem Kreisen senkt sich nämlich der Wirbel und zieht dabei, selbst unsichtbar, jene Wolkensäule mit sich hernieder. Sobald er diese schwere Wolkenmasse auf die Meeresfläche heruntergewirbelt hat, wirft er sich plötzlich selber mit seiner ganzen Wucht

¹⁾ Lucretius 6, 419—445. — Auch Plinius beschreibt im Kap. 49 und 50 des II. Buches die verschiedenen Lokaltürme, darunter die Trombe, desgl. Aristoteles im 1. Kap. des III. Buches seiner Meteorologie. Doch sind diese Beschreibungen weniger klar.

²⁾ Ich habe versucht, eine neue sinngemäße Übersetzung zu geben. An einzelnen Stellen ist jedoch die Auffassung unsicher. Die mir vorliegende deutsche Übersetzung von K. L. von Knebel (in Versen) steht an Klarheit hinter dem lateinischen Text zurück.

auf das Wasser, wühlt die ganze Meeresfläche unter ungeheurem Brausen auf und verwandelt sie in Gischt.

Es kommt auch vor, daß der Wirbelwind sich selber in Staubwolken hüllt, indem er aus der Luft die Staubeilchen zusammenrafft, und dann den von oben herabsteigenden Prester gleichsam nachahmt. Wo dieser sich auf das Land herabläßt und zerstiebt, entfesselt er einen maßlos heftigen Wirbelsturm. Da er aber überhaupt eine seltene Erscheinung darstellt, und auf dem Lande die Gebirge den Blick behindern, ist dieser Wirbelwind häufiger auf dem Meere zu beobachten, wo der Blick weiter reicht und der Himmel weniger abgedeckt ist¹."

Man beachte, daß hierin die Ähnlichkeit mit dem Feuerbrände, ferner das allmähliche Weiterwachsen von oben nach unten, der unsichtbare, die Wolkensäule umkreisende Wirbel, das explosionsartige Aufschäumen des Wassers, wenn die Wolkensäule es erreicht, ferner die Wesensgleichheit der Wind- und Wasserhosen, und das Vorwiegen der aufsteigenden Bewegung bei Windhosen

¹ „Quod superest, facile est ex his cognoscere rebus,
Ἡρησιθηρας Graii quos ab re nominatarunt,
In mare qua missi veniant ratione superne;
Nam fit ut interdum tanquam demissa columna
In mare de coelo descendat, quam freta circum
Fervescunt graviter spirantibus incita flabris;
Et quaecunque in eo tum sunt deprensa tumultu
Navigia, in summum veniunt vexata periculum:
Hoc fit, ubi interdum non quit vis incita venti
Rumpere, quam coepit, nubem; sed deprimit, ut sit
In mare de coelo tanquam demissa columna
Paulatim, quasi quid pugno brachiique superne
Conjectu tradatur et extendatur in undas:
Quam cum discidit, hinc prorumpitur in mare venti
Vis, et fervorem mirum concinnat in undis;
Versabundus enim turbo descendit, et illam
Deducit pariter lento cum corpore nubem:
Quam simulac gravidam detrusit ad aequora ponti
Ille in aquam subito totum se immittit, et omne
Excitat ingenti sonitu mare fervere cogens.
Fit quoque, ut involvat venti se nubibus ipse
Vortex, conradens ex aere semina nubes,
Et quasi demissum coelo pretera imitetur:
Hic ubi se in terras demisit dissolvitque,
Turbinis immanem vim provomit atque procellae;
Sed quia fit raro omnino, montesque necesse est
Officere in terris, apparet crebrius idem
Prospectu maris in magno coeloque patenti.“

in einer Weise geschildert wird, die bereits eine große Vertrautheit mit der Erscheinung verrät. Der unsichtbare Wirbel, der den Wolkenschlauch herabwirbelt, wird — wenn die Übersetzung des gerade hier nicht ganz klaren Textes richtig ist — mit dem Arm verglichen, der das Wasser in einem Gefäß umrührt. So primitiv dieser Vergleich ist, so zeigt er doch deutlich, daß der Vorgang als ein rein mechanischer oder hydrodynamischer aufgefaßt wurde.

Andoque hat im Jahre 1727 die Ansicht geäußert, der Trombenwirbel entstehe durch zwei entgegengesetzte Winde, die in mäßiger Entfernung von einander wehen und die zwischen ihnen ruhende Luft zur Wirbelbildung veranlassen. Andere nennen als Urheber dieser Meinung auch Stuart, der 1702 die Hohlrohrenform der Wolkensäule hervorhob, und in jüngster Zeit hat Defant (1913) wiederum diese Ansicht ausgesprochen. Wir haben bereits auf S. 155 ff. gezeigt, daß zwar einige Beobachtungen für diese Ansicht zu sprechen scheinen, daß aber die Mehrzahl nicht damit vereinbar ist. Wie dort ausführlich erörtert wurde, ist die herangezogene Bedingung — die zwei entgegengesetzten Winde — weder notwendig noch hinreichend, um die Tromben zu erklären; ersteres nicht, weil viele Tromben unter anderen Windverhältnissen beobachtet werden, und letzteres nicht, weil sich an einer gewöhnlichen Schichtgrenze, an der die Bedingung erfüllt ist, noch durchaus keine Trombe bildet. Es gehört vielmehr durchaus ein Cumulo-Nimbus dazu, um eine Wind- oder Wasserhose zu erzeugen.

Der hervorragendste unter den älteren Vertretern der mechanischen Theorie ist Oersted¹⁾, welcher für seine Zeit ungewöhnlich richtige Anschauungen hegte. Die Anhänger der elektrischen Theorie schlug er mit ihren eigenen Waffen: Menschen, die in die Trombe geraten, erhalten keinen elektrischen Schlag, und Schiffskompassse in der Nähe von Wasserhosen werden nicht abgelenkt. Von seinen eigenen Sätzen sei folgendes hervorgehoben: Stets gehört eine Wolke zu der Trombe. Die letztere ist oft bis auf ihr oberes und unteres Ende unsichtbar. Es gibt in ihr eine aufsteigende und gleichzeitig eine absteigende Bewegung, deren Abstand von

¹⁾ Schumachers Jahrb. f. 1838, S. 228 und Bibl. univers., Sept. 1839, Nr. 45, S. 145.

der Achse verschieden ist. Auch die durchsichtige Luft außerhalb der Wolkensäule nimmt an der Wirbelbewegung teil. Die Trombe erzeugt eine Vertiefung in der Wasseroberfläche. Froschregen und dergleichen stammen von Tromben. Weder unter der Erd- oder Wasseroberfläche noch auf ihr sind die Bedingungen für die Erzeugung der Trombe zur Stelle, und diese muß deshalb ihren Ursprung in den oberen Regionen haben. In der Achse des Wirbels entsteht durch Zentrifugalkraft ein luftverdünnter Raum, in welchen dicht über dem Boden die Luft stark einströmt. Freilich verfiel auch Oersted dem verbreiteten Irrtum, daß die Hageltürme eine Art Tromben ohne Fuß seien. Von besonderem Interesse ist, daß Oersted die Vorstellung der zwei entgegengesetzten Winde ausdrücklich ablehnt, weil nach den Beobachtungen die Tromben sich vorwiegend in ruhiger Luft bilden. Mit der Verlegung des Ursprungs in höhere Schichten läßt er die Frage nach der Entstehung selber offen.

Von neueren Autoren sucht Hirn den Ursprung der Tromben in höheren Schichten ohne nähere Angaben. v. Hann nimmt ihn — für die nordamerikanischen Tornados — „unter dem Cirrus-Niveau und oberhalb der Region der unteren mächtigen Haufenwolkenbildungen“ an. Die Ansicht, daß der Trombenwirbel in der Höhe umbiegt und horizontal weiterlaufend mit dem Böenwirbel identisch ist, ist von W. Krebs und von mir vertreten worden. Wie bereits im elften Kapitel ausgeführt wurde, läßt sich für viele Tromben in der Tat der Nachweis führen, daß der Wirbel in der untersten Wolkenetage geschlossen umbiegt und auf eine Strecke, die bisweilen das Zehnfache des vertikalen Stückes ausmacht, horizontal verläuft. Aber es wurde doch auch gezeigt, daß es fraglich ist, ob alle Tromben diesen Bau haben. Gewisse Anzeichen deuten darauf hin, daß sich der Wirbel an der Stelle, wo er umbiegt, oft in eine Anzahl von Teilwirbeln auflöst, welche parallel und horizontal neben einander herlaufen, so daß der einheitliche Wirbel nur in dem vertikalen Stück besteht. Jedenfalls läßt sich über die Beziehungen des horizontalen Teiles der Trombe zur Böe gegenwärtig noch um so weniger etwas aussagen, als über die Natur der Böe selber noch keineswegs die Akten geschlossen sind. Die von Wilhelm Schmidt ausgeführten Experimente haben ein ganz neues Licht auf diese letztere Erscheinung geworfen und es wahrscheinlich

gemacht, daß es verschiedene Arten von Böen gibt, deren Natur zunächst genauer erforscht werden muß, bevor das Verhältnis der Trombe zu ihnen ermittelt werden kann.

Die Beobachtungen scheinen anzudeuten, daß es nicht der fallende Niederschlag, sondern das Aufschießen des Cumulo-Nimbus ist, welches den Anlaß zur Trombenbildung gibt, und daß wahrscheinlich eine markante Windschichtung nötig ist, bei deren Durchbrechung von unten her der Wirbel entsteht. Für

diese Auffassung, die mir gegenwärtig die größte Wahrscheinlichkeit zu besitzen scheint, spricht namentlich ein bisher in diesem Zusammenhange unbeachtet gebliebener Versuch von Vettin¹⁾, welcher folgendermaßen beschrieben ist:

In einem länglichen Glaskasten (Fig. 85) wird eine Zirkulation der Luft dadurch herbeigeführt, daß ein größeres Stück Eis in das eine Ende desselben gelegt wird. Die Luft, deren Bewegung durch Tabakrauch sichtbar gemacht wird, zerfällt dann in zwei Schichten mit entgegengesetzter Bewegung. Erwärmt man nun den Gefäßboden am Punkte *c*, so daß

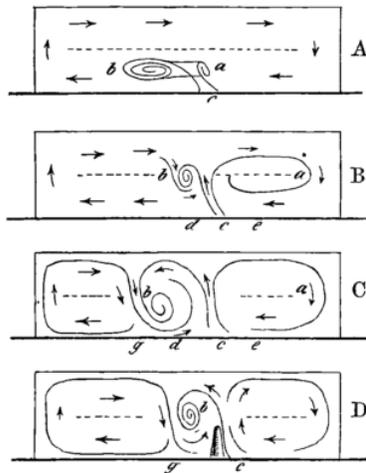


Fig. 85 A bis D. Versuch von Vettin: Wirbelbildung bei Durchbrechung einer Windgrenze.

sich die Luft hier in der bekannten Pilzform erhebt, so wird der entstehende Wirbelring, wie Fig. 85 A zeigt, auf der Leeseite, bei *b*, stark auseinandergesogen, also seine Rotation geschwächt, auf der Luvseite, bei *a*, dagegen verengt. Treibt man nun die Erwärmung so weit, daß die Schichtgrenze durchbrochen wird (Fig. 85 B), so wird der Wirbelring an der jetzigen Leeseite *a* wiederum auseinandergesogen und geht mehr und mehr in einen flächenhaften Gleitwirbel über. „Dagegen zieht sich der vorher erweiterte Rand (*b*) zusammen, indem

¹⁾ Vettin, Meteorologische Beobachtungen, Pogg. Ann. d. Phys. 102, 246, 1857.

die Bewegung seines oberen Theils der oberen Strömung entgegenläuft. Zugleich wird seine Rotation beschleunigt durch die bei *b* herabstürzende Luft. Es bilden sich an dieser Stelle Rollen oder Schläuche, welche sich um ihre horizontale Achse wälzen, und die, wenn die Erwärmung bei *c* nachläßt, mit dem absteigenden Luftstrom herabgerollt werden und endlich zerfallen.“ (Fig. 85 C). Die unterste Figur (D) zeigt ein neben der Erwärmungsstelle angebrachtes Stückchen Holz, durch welches die Ausbildung dieses Wirbels besonders begünstigt wird¹⁾.

¹⁾ Es ist möglich, daß sich noch andere Versuche vorfinden, welche zur Klärung der Frage beitragen können. Die Literatur darüber ist sehr zerstreut. Außer den schon früher angegebenen, unter denen diejenigen von Weyher die erste Stelle einnehmen, habe ich noch folgende Arbeiten gefunden:

Wilcke (Kongl. Vetenskaps Akad.s nya Handlingar 1780, 1782, 1785; Referat in Zeitschr. d. Österr. Ges. f. Met. **II**, 221, 1876) erzeugte einen Wirbel im Wasser, indem er an einer über dem Wasser rotierenden Scheibe einen exzentrischen Stift anbrachte, der in das Wasser hineinragte und dasselbe umrührte. Durch am Boden des Gefäßes abgelagerte geschlemmte Kreide wurde die aufsteigende Bewegung in dem so erzeugten Wirbel sichtbar. Durch Anbringung der Scheibe am Boden des Gefäßes und Bedecken des Wassers mit einer Schicht Wein oder Öl konnte umgekehrt ein absteigender Wirbel erhalten werden.

Graf Xavier de Maistre (Bibl. univ. de Genève **3**, 226) erzeugte einen Wirbel mittels eines Mühlenrädchens aus zwei Brettchen von 2 Zoll Höhe und 1,5 Zoll Breite. Als Flüssigkeit benutzte er zunächst Öl mit einer dünnen Wasserschicht am Boden, die dann als Säule aufstieg. Mit Wasser allein machte er die Bewegung sichtbar, indem er grob pulverisierten Kopal hineintat, oder auch kleine Stückchen Schellack. Brachte er die Mühle unten an, so erhielt er absteigende Bewegung; brachte er sie in der Mitte an, so konnte er durch Hineinwerfen von etwas zerstoßenem blauen Glas in das Wasser und durch eine obenauf schwimmende Ölschicht die aufsteigende Bewegung der unteren und die absteigende der oberen Hälfte gleichzeitig sichtbar machen (nach Muncke).

Andries (Zeitschr. d. Österr. Ges. f. Met. **17**, 307, 385 und **18**, 113, 156) erzeugte Wirbel, indem er mit freier Hand ein Brettchen von 2,5 cm Breite durch das Wasser führte; die Bewegung wurde durch Zigarrenasche sichtbar gemacht. — Ferner sind zu nennen:

G. A. Hirn, Étude sur une classe particulière de tourbillons. Paris 1878.

Dechevrens, Compt. rend. **105**, 1286, 1887.

Daß eine solche immerhin auffällige und nach unseren aerologischen Erfahrungen nicht sehr häufige Windschichtung für die Trombenbildung nötig wäre, würde nicht nur zu ihrer Seltenheit passen, sondern insbesondere auch zu der bei den amerikanischen Tornados beobachteten Wetterlage.

Allerdings muß wohl eine Bestätigung und ein weiterer Ausbau dieses Vettinschen Versuches abgewartet werden, ehe die Richtigkeit dieser Erklärung als erwiesen betrachtet werden darf.

— Zum Schluß sei noch auf die Verwandtschaft der atmosphärischen Tromben mit den Mahlströmen, den echten Großtromben der Hydrosphäre, hingewiesen. Es ist eine bedauerliche Tatsache, daß diese seit alters her bekannten Erscheinungen noch fast gar nicht wissenschaftlich erforscht sind. In den norwegischen und isländischen Segelanweisungen ist nicht viel mehr als ihr Ort angegeben, und selbst in dem so ausführlichen „Handbuch der Hydrographie“ von Krümmel sucht man vergeblich mehr als den Namen. Die benachbarte Bevölkerung ist aber, wie ich selbst feststellen konnte, ganz vertraut mit dem rhythmischen An- und Abswellen ihrer Rotationsgeschwindigkeit im Takt der Gezeiten; sie weiß genau, wann sie ungestraft mit Ruderbooten das im Wirbeltrichter sich sammelnde Treibholz abholen kann, und wann wiederum

Colladon (Compt. rend. **104**, 18. April und **105**, 17. Nov. 1887) ließ ein Schaufelrad in mittlerer Höhe im Wassergefäß rotieren und erhielt unter ihm eine aufsteigende, über ihm eine absteigende Bewegung. — Ferner:

Mascart, Journ. de Phys. **8**, 557, 1889.

W. H. Dines (Experiment illustrating the formation of the Tornado cloud, Quart. Journ. R. Met. Soc. **22**, 71, 1896) bringt eine neue, originelle Anordnung des Weyherschen Vorlesungsversuches der künstlichen, in Luft erzeugten Trombe: Statt ein Windrädchen an der Decke des Luftkastens zu benutzen, saugt er nur die Luft durch eine oben in der Mitte angebrachte Öffnung schnell ab; die an zwei offenen Vertikal-kanten des Kastens einströmende Luft wird durch die Form der Öffnungen (vgl. nebenstehenden Grundriß) zur Rotation gebracht, und der Luftwirbel wird, wie bei Weyher, durch den Dampf einer erhitzten Wasserschale sichtbar gemacht. Dines erhielt von dieser Erscheinung Photographien, welche die Röhrenform der Dampfsäule erkennen lassen.

Ferner sei auch verwiesen auf Auerbach in Winkelmanns Handb. d. Phys., 2. Aufl., **1** (2. Hälfte), 1047 ff.

selbst die modernen Küstendampfer, wenn sie hineingeraten, von dem Strudel willenlos im Kreise herumgeführt werden. Auch die Meteorologen müßten dafür dankbar sein, wenn die Erforschung dieser Erscheinungen endlich in Angriff genommen würde; denn wenn auch die Mahlströme durch ihre unveränderliche Lage verraten, daß das Bodenrelief bei ihrer Entstehung eine wesentliche, vielleicht die entscheidende Rolle spielt, so liegt doch auf der Hand, daß auch die Kenntnis der stets nur zufällig zu beobachtenden Wind- und Wasserhosen von einer solchen systematischen Untersuchung der Mahlströme mancherlei Anregung und Förderung zu erwarten hätte.
