

KAPITEL 9  
Dr. Alfred Wegener  
Wind- und Wasserhosen in Europa

### Die Rotation.

Im vorangegangenen ist überall vorausgesetzt, daß die Tromben Luftwirbel sind. Die Frage, ob dies stets der Fall ist, oder ob es auch Wolkenschläuche gibt, die nicht rotieren, darf indessen nicht übergangen werden, da sowohl in älterer Zeit als auch in der Gegenwart von einzelnen Forschern immer wieder die Existenz solcher nichtrotierenden Tromben verfochten wird. Und man kann in der Tat geltend machen, daß z. B. auch der aufsteigende Rauch einer Zigarre zunächst einen scharf begrenzten Schlot mit geradliniger Bewegung von etwa  $\frac{1}{2}$  m Länge bildet, dessen oberes Ende, ähnlich wie die Tromben, eine trompetenförmige Erweiterung zeigt, und zunächst in rhythmisch sich neubildende Wirbelringe und später in Turbulenz übergeht. Die Anhänger solcher und ähnlicher Vorstellungen führen hauptsächlich zwei Gründe aus den Beobachtungen an, zu denen wir Stellung nehmen müssen.

Das eine, z. B. von Pouillet und Hess angeführte Argument besteht in der Fallrichtung der Bäume. Man ging davon aus, daß die Rotation, wenn sie vorhanden war, sich auch in der Fallrichtung der Bäume mit Deutlichkeit zeigen müsse, und da diese im wesentlichen nur ein Zuströmen der Luft zur Trombenachse erkennen ließen, glaubte man die Rotationsfrage für diese Fälle verneinen zu müssen. Im vorigen Kapitel ist nun dargelegt worden, daß alle genauer untersuchten Trombenspuren das gleiche Bild bieten, nämlich in erster Linie nur ein Zuströmen zeigen. Insbesondere ist dies auch bei solchen Tromben der Fall, bei denen die Rotation der Wolkensäule direkt zu beobachten war. Der wahre Sachverhalt ist also der, daß es nicht zwei verschiedene Arten von Tromben, rotierende und nichtrotierende, gibt, sondern nur eine Art, welche zwar lebhaft rotiert, deren Rotationssystem aber so beschaffen ist, daß unmittelbar am Erdboden fast nur ein Einströmen stattfindet, die tangential Komponente hier also fast verschwindet. Daß die Rotationsbewegung mit der Höhe wächst, ist auch schon direkt beobachtet worden, z. B. bei Nr. 128, wo es heißt: „Die Drehung ging in einer Spirale, von unten nach oben und ein wenig nach innen.

Im Anfang war sie ziemlich langsam, aber je höher die Luft stieg, um so größer wurde ihre Geschwindigkeit.“ Im übrigen sei auf das Kapitel 12 über den Fuß der Trombe verwiesen (Bei der Trombe Nr. 238, welche Hess zu den genannten Zweifeln Anlaß gab, liegt um so weniger Grund zu solchen vor, als in einem der Augenzeugenberichte von einem „beständigen Umdrehen“ des Staubfußes die Rede ist. Auch bei Pouillet's Trombe wurde, wie schon auf S. 160 erwähnt, Wolkentrichter und Rotation direkt gesehen. Beide Autoren haben selber nur die Spuren nachträglich besucht.)

Auch das andere, namentlich von Peltier angeführte Argument hält der Kritik nicht Stand. Er beruft sich auf das Zeugnis von Beobachtern, welche angeben, eine Rotation nicht bemerkt zu haben. Solche Angaben finden sich in der Tat in einer Reihe von Fällen, die gleich besprochen werden sollen. Indessen ist Peltiers Behauptung, unter seinen 116 Tromben seien 22 ohne Rotation, auch dann noch stark übertrieben, wenn man sie dahin korrigiert, daß in 22 Fällen eine Rotation nicht bemerkt werden konnte. Wie schon früher gesagt wurde, sind Peltiers Angaben nur mit großer Vorsicht zu benutzen, und besonders ist solche hier am Platze, da durch den Nachweis nichtrotierender Tromben die mechanische Wirbeltheorie als unzulänglich gestempelt, und damit die von Peltier blind vertretene elektrische Theorie wesentlich gestützt werden konnte. Eine etwas kritische Betrachtung der Fälle, für welche Peltier die Rotation leugnet, führt denn auch zu dem Resultat, daß bei der Mehrzahl seitens des Beobachters gar keine Zweifel an der Rotation geäußert sind. Die Voreingenommenheit, mit der Peltier diese Beschreibungen ausgelegt hat, ist bei den sonstigen Verdiensten dieses bekannten Physikers so auffallend, daß wir auf einige Fälle eingehen müssen, um nicht selbst in den Verdacht eines ungerechten Urteils zu geraten.

Die Beschreibung der Trombe Nr. 11 überschreibt Peltier: sans giration. Das englische Original, das mir leider nicht zugänglich ist, übersetzt er folgendermaßen; „Au dessous, la mer etait tres-agitee, l'eau ecumait et s'elevait en jets d'eau, ou bien cette eau, en s'elevant, avait l'apparence d'une fumee qui monte dans une cheminee dans un temps calme ...“ Der letztere Ausdruck genügt Peltier offenbar, um auf Fehlen der Rotation zu schließen, obwohl es an einer anderen Stelle heißt:

„s'agitant avec fureur dans cet espace rond.“ Wenn es auch nachher von der vollständigen Wolkensäule heißt: „elle parut calme du commencement a la fin“, so ist doch in alledem nicht ausgesprochen, daß die Rotation fehlte, sondern nur, daß die Säule als Ganzes glatt war und ruhig stand. Daß der Beobachter gemeint habe, es sei keine Rotation vorhanden, ist mindestens zweifelhaft. Will man aber überhaupt zu einer Beurteilung des Falles kommen, so muß man offenbar auch berücksichtigen, ob der Beobachter in der Lage war, eine Rotation zu erkennen. Nun wird gesagt, daß die Trombe so dick wie ein Schiffsmast „in etwa 1 ½ Lieues“ (etwa 7 ½ km, wenn Peltiers Übersetzung richtig ist) erschien, und es wird hinzugefügt: „sie war also viel dicker“, woraus man schließen müßte, daß sie auch weiter entfernt war. Daß auf derartige Entfernungen die Rotation einer Wasserhose erkennbar ist, wird wohl niemand erwarten. — Auch die Trombe Nr. 84 überschreibt Peltier „pas de rotation“, obwohl in der Beschreibung weder von Rotation noch von ihrem Fehlen die Rede ist, — Auch Nr. 76 überschreibt er: „pas de mouvement giratoire“. In der Originalbeschreibung steht aber kein Wort davon, sondern nur, daß die „ziemlich“ nahe Trombe (woraus Peltier „sehr nahe“ macht) einen Fuß aus Wasserstaub oder Sand hatte, der die Form einer Garbe (gerbe) besaß. Dies genügt Peltier, er schließt einfach: „wenn der untere Conus . . . eine Rotation gehabt hätte, hätte der Autor sicher nicht das Wort Garbe angewendet“.

Bei Trombe Nr. 1 schreibt Peltier: „Die Wolken senkten sich bis auf 20 Faden zum Boden herab, mit dem sie durch einen Wirbel verbunden waren . . . Kleine, parasitische Wolken, die . . . mitunter mit großer Geschwindigkeit um sich selbst rotierten . . . Rasende Winde gingen von diesem Wirbel aus und wehten in alle Richtungen . . . Eine Mauer wurde umgeworfen, die eine Hälfte nach S, die andere nach N“ usw. Zu dieser, von ihm bereits umredigierten Beschreibung fügt Peltier die Bemerkung hinzu: „Die Bezeichnung Wirbel, die dem Meteor gegeben wird, bedeutet nicht eine Rotation der ganzen Säule. Denn die erzeugten Wirkungen und die Erzählung selbst zeigen zur Genüge, daß in diesem Transport der Gegenstände keine rotatorische Bewegung statthatte; das Wort ist lediglich ein Synonym von Sturm (tempete) und Aufruhr (tourmente).“

Unter den 255 Beobachtungen, die in diesem Buche beschrieben werden, finden sich aber doch sechs, bei denen wirklich von Augenzeugen berichtet wird, sie hätten eine Rotation nicht bemerken können, nämlich Nr. 39, 87, 200, 209, 214, 237. Will man aber hieraus den Schluß ziehen, daß die Rotation nicht nur nicht wahrgenommen werden konnte, sondern auch nicht existierte, so müßte erst wahrscheinlich gemacht werden, daß sie, wenn vorhanden, stets auch sichtbar wird. Da aber der Wolkenkörper der Trombe meist ein glattes Rotationsgebilde ist, dürfte es gerade in den Fällen, wo die Wirbelbewegung am ungestörtesten ist, sehr schwer sein, die Rotation zu erkennen, zumal der Laie meist viel zu kleine Umlaufzeiten erwartet. Für die Beurteilung der sechs Fälle kommt weiter die Entfernung des Beobachters von der Trombe in Betracht. Wenn z.B. bei Nr. 214 „eine Rotation der ganzen Masse um die Kegelachse nicht mit Sicherheit konstatiert werden konnte“, so verliert dies Zeugnis sehr an Bedeutung, wenn wir hören, daß diese Entfernung 11 km betrug. Bei Nr. 87 und 209 ist sie nicht genau mitgeteilt, war aber in beiden Fällen groß. Bei Nr. 237 betrug sie immer noch 2, bei Nr. 200 1,6 km. Wenn auch in letzterem Falle ein schwaches Fernrohr zur Beobachtung benutzt wurde, wird man doch nicht die Forderung stellen können, daß die Rotation auf solche Entfernungen erkennbar sei. Bei Nr. 237 scheinen mir sogar die Aufzeichnungen des Beobachters die Rotation zu beweisen; er sagt zwar zuerst ausdrücklich: „Es ließen sich absolut keine Merkmale intensiver Wirbelbewegungen konstatieren; weder die Wasserbewegung noch die am Fuße aufsteigenden Schwaden ließen eine Drehbewegung erkennen“, allein er fährt fort: „Ein mit ganz mäßiger Geschwindigkeit nach abwärts sinkender dunkler Fleck der Erscheinung bewegte sich

allerdings scheinbar in einer Schraubenlinie, doch war die Tangentialgeschwindigkeit so gering, daß auf Wirbelbewegung von irgend merkbarem Effekt nicht geschlossen werden konnte“. Die Beschreibung enthält aber keine Andeutung, daß der Verfasser sich über die zu erwartende Langsamkeit der Drehung im klaren wäre. Bei 75 mp. s. Rotationsgeschwindigkeit braucht ein Luftteilchen, das 50 m von der Wirbelachse entfernt ist, mehr als vier Sekunden zum Umlauf; aus der Ferne gesehen, erscheint eine solche Drehung aber sehr langsam.

Es bleibt noch Nr. 39; hier kann die Entfernung der Trombe nicht groß gewesen sein, da ihr oberster Teil anscheinend über den Beobachter fortzog. Die Beschreibung lautet: „Dieser Raum (von kochendem Wasser) war umgeben von einem Gürtel oder einer Atmosphäre von weißlichen, durchscheinenden Dämpfen, die der Form nach einem Ballon glichen, der sich nur soweit erhob, wie nötig war, um die kochende Luft einzuhüllen, und dabei einen Zustand der Ruhe ohne Rotation bewahrte, während das Ganze dem Wind gehorchend fortschritt". Es handelt sich also hier nicht um den Wolkenschlauch, sondern um den Fuß aus Wasserstaub; der Vergleich mit dem Ballon zeigt, daß derselbe hier die im zwölften Kapitel genauer zu beschreibende regelmäßige Form des Endwirbelringes hatte, dessen vollkommen glatte Mantelfläche dem Auge keinen Halt bieten dürfte, um die Bewegung eines Teilchens verfolgen zu können. Es liegt sehr nahe, anzunehmen, daß der Beobachter durch die Unveränderlichkeit der Form des Fußes zu dem irrigen Schluß verleitet wurde, daß die Luft darin in Ruhe sei.

Man wird zugeben müssen, daß die Annahme zweier verschiedener Arten von Tromben, von denen die eine rotiert und die andere nicht rotiert, an sich schon so unbefriedigend ist, daß man nicht ohne Not dazu greifen wird. Eine solche Notwendigkeit ist aber in den Beobachtungen keinesfalls zu finden. Darum stehe ich nicht an auszusprechen, daß auch die nichtrotierenden Tromben meines Erachtens in das Reich der Fabel gehören, ebenso wie einige andere teilweise schon besprochene Vorstellungen, deren Ursprung gleichfalls in kritikloser Verwendung des naturgemäß ungleichwertigen Beobachtungsmaterials zu suchen ist.

Gehen wir zu den positiven Beobachtungen, die Rotation betreffend, über, so ergibt sich als erste Frage: **Ist die Drehung cyclonisch oder anticyklonisch** ? Leider ist nur bei 25 Tromben der Drehungssinn direkt angegeben oder aus den sonstigen Angaben mit hinreichender Sicherheit zu entnehmen. Von ihnen zeigen 18 (72 Proz.) cyclonische und 7 (28 Proz.) anticyklonische Drehung (Für die nordamerikanischen Tornados findet Finley (Tornadoes, New York, 1887) 520 Fälle (95 Proz.) mit cyclonischer und 29 Fälle (5 Proz.) mit „wahrscheinlich anticyklonischer" Drehung.)

Cyclonische Drehung zeigen: 113—126 — 128 — 129 — 139  
— 144 — 177 — 178 — 180—181 — 185 — 196—207—208—218  
— 226—232 — 233.

Die Beweisführung für den Drehungssinn läßt zwar auch hier bisweilen zu wünschen übrig, allein es gibt doch für cyclonische Drehung so viele gut beglaubigte Fälle, daß ein besonderer Nachweis der Richtigkeit nicht nötig erscheint. Dagegen verdienen die sieben Fälle mit anticyklonischer Drehung nähere Beleuchtung, um sie gegen den Verdacht, daß es sich bei ihnen um Irrtümer handeln könne, und es Tromben mit anticyklonischer Drehung überhaupt nicht gebe, sicherzustellen.

Die Stichworte oder in Frage kommenden Sätze sind folgende:

163. (Auf dem Genfer See.) „Der Steuermann eines Dampfbootes sah das Wasser emporsteigen aus einem 2 bis 3 m breiten, rauchähnlichen Fuße. Die Säule zeigte eine drehende Bewegung in der Richtung des Uhrzeigers."

176. (Frankfurt.) „Rechts drehend".

182. (Bendeleben) . . . „in solcher Nähe, daß deutlich eine anfänglich drehende, mit der Uhr gehende Bewegung bemerkt wurde."

198. (Auf der Themse, nur Wasserkrone). "sich mit der Sonne um sich selbst drehend". Die kürzeste Entfernung des Beobachters von der Trombe betrug etwa 182 m (200 Yards).

205. (Bodensee.) „Man hatte eine etwa 15 m dicke Wasserhose vor sich, welche 5 bis 6 m hoch Staub aus dem See aufwirbelte und eine Drehung mit dem Uhrzeiger erkennen ließ."

219. (Stendsitz.) „Die Bewegung war eine rechtsherumgehende, vom Boden aufsteigende in der Trombe selbst."

241. (Achensee.) „Die Rotation des Wirbels war deutlich im Sinne des Uhrzeigers.“

Bei vier dieser Tromben, nämlich bei Nr. 176, 219, 198 u. 205 kennen wir die Zugrichtung; die ersten beiden zogen aus SW, die letzten beiden aus W. Da dies die häufigsten Zugrichtungen der Tromben überhaupt sind, besteht offenbar kein Grund, anzunehmen, daß anticyklonisch drehende Tromben etwa bestimmte Zugrichtungen bevorzugten.

Meines Erachtens lassen diese sieben Fälle, wenn auch der eine oder andere vielleicht unsicher erscheinen mag, keinen Zweifel daran zu, daß Tromben mit anticyklonischer Rotation in Europa vorkommen. Ebenso sicher scheint aber zu sein, daß der cyklonische Rotationssinn erheblich häufiger ist. Daß bei dieser Bevorzugung letzter Hand die Erdrotation im Spiele ist, dürfte sehr wahrscheinlich sein; der Beweis wird freilich erst durch entsprechende Untersuchungen von der Südhalbkugel und aus den Äquatorialgebieten erbracht werden können ( Drei Beobachtungen über den Rotationssinn von Tromben auf der südlichen Halbkugel, die mir zufällig in die Hände fielen, mögen hier angeführt werden; die beiden ersten geben süd-cyklonische Drehung (mit dem Uhrzeiger), die dritte süd-anticyklonische Drehung: Niejahr, Met. Zeitschr. 1886, S. 358, Trombe in 21° 25' Südbreite und 38° 40' w. L. („Mit dem Zeiger der Uhr".)

Balderstan, Quart. Journ. of the Roy. Met. Soc. Jan. 1888, S. 78: „The rotation of the whirl was to the right hand". Die Breite war nur 3° Süd.

Martyr, Quart. Journ. of the Roy. Met. Soc. July 1884, S. 205. Diese Trombe spielte sich in der Kapkolonie zwischen East-London und Port Elisabeth ab. („Ascending in Spiral curves revolving from right to left to the cloud".) W. M. Davis hat dem Gedanken dieser Abhängigkeit die folgende geistvolle Form gegeben: „Diese Wirbelbewegung hat sich erhalten durch Ringe, Planeten, die allgemeine Zirkulation, Cyklonen und Tornados; und so ist die Vererbung des ursprünglichen Zustandes, durch welche auch unsere Tornados ihre Wirbelbewegung erhalten haben" (Met. Zeitschr. 1891, S. 358.). Freilich kann diese Vorstellung, wie namentlich v. Hann betont hat, nicht für richtig gelten, wenn man sie so auslegt, als sei die Erdrotation eine notwendige Vorbedingung für die Entstehung der Tromben, ähnlich wie sie eine unerläßliche Bedingung für die Cyklonen zu sein scheint. Denn am Äquator, wo der Einfluß der Erdrotation verschwindet, sind Tromben sehr häufig. Allein dies schließt natürlich nicht aus, daß eine indirekte Abhängigkeit besteht, welche die größere Häufigkeit cyklonischen Drehungssinnes in unseren Breiten verursacht; es könnte beispielsweise sein, daß cyklonische Drehung bei einer Windschichtung entsteht, die einer Rechtsdrehung mit der Höhe entspricht, und diese Rechtsdrehung ist infolge der Erdrotation häufiger als Linksdrehung. Vermutlich werden sich auch diese Fragen von selbst lösen, sobald diejenige nach der Entstehung der Tromben überhaupt endgültig beantwortet sein wird.

**Windgeschwindigkeit in der Trombe.** Über die in den Tromben auftretenden Windgeschwindigkeiten besitzen wir nur wenige und meist recht unvollständige Beobachtungen exakter Art; die zahlreicheren Schätzungen der Geschwindigkeit entbehren aber in vielen Fällen so sehr einer begründeten Unterlage, daß bei ihrer Beurteilung größte Vorsicht am Platze ist.

Soweit ich sehen kann, lassen sich durch Geschwindigkeiten von etwa 50 bis 100 mp. s. alle beobachteten Wirkungen erklären, und da der Winddruck mit dem Quadrat der Geschwindigkeit wächst, jeder Zuwachs des Windes sich also um so mehr bemerkbar macht, je höher seine Geschwindigkeit bereits ist, so ist schon deshalb zu erwarten, daß es eine obere Grenze gibt, die selten und nur geringfügig überschritten wird, und diese Grenze dürfte viel tiefer liegen, als bei den zum Teil recht zügellosen Schätzungen angenommen wird. Ein Beweis dafür, daß jemals der Wert von 100 mp. s. wesentlich überschritten worden sei, ist jedenfalls bisher noch nicht erbracht.

Bei Nr. 233, einer blinden Trombe, wurde die Geschwindigkeit im Staubfuß zu nur 35 mp. s. geschätzt.

Nun dürften blinde Tromben im allgemeinen geringere Rotationsgeschwindigkeiten haben als kondensierende. In der Tat führen die meisten sonstigen Angaben auf größere Geschwindigkeiten. Bei Nr. 201 wurde eine Registrierung des Windes erhalten, da die Trombe gerade über ein Observatorium fortzog; „der Wind ging plötzlich von SSW nach WNW über E. Die Windgeschwindigkeit hielt sich [zuerst] fast konstant auf 7 bis 8mp.s., vor dem Vorübergang des Wirbels herrschte an der Erdoberfläche während 4 bis 5 Minuten eine fast absolute Windstille, hierauf trat ein plötzlicher Windstoß ein mit einem Maximum von 30 mp. s., d. i. der größte Wert, den der Apparat überhaupt registrieren konnte; in Wirklichkeit muß die Windstärke sehr beträchtlich größer gewesen sein . . .

Die [lokale] Dauer des Phänomens scheint 6 bis 8 Sekunden nicht überschritten zu haben" (vgl. auch das Barogramm im folgenden Kapitel). — Bei der Trombe von Chatenay (Nr. 102) wurden Windgeschwindigkeiten bis zu 45 m p. s. beobachtet. Bei Nr. 196 wurde die Geschwindigkeit aus der Umlaufzeit einzelner Wolkenteile bestimmt: „Indeß konnten einzelne [Wolken] während einer ganzen Umdrehung verfolgt werden . . . [Die Entfernung wurde nachträglich mit Hilfe der Zerstörungsspur bestimmt.]

Daraus folgt . . . eine Rotationsbewegung von 40 bis 50 m in der Sekunde bei einem Durchmesser des Wirbels von etwa 150 m... Dauer der Rotation 3 bis 4 Sekunden". Um diese Zahlenangaben zum Stimmen zu bringen, muß man annehmen, daß die Breite von 150 m nicht der Wolkensäule, sondern der Zerstörungsspur entspricht; da das beobachtete Wolkenstück sich vermutlich auf der Außenwand der kondensierenden Säule befand, so folgt für diese ein Durchmesser von 40 bis 60 m, also etwa ein Drittel der Spurbreite, was mit unseren späteren Zusammenstellungen gut stimmen würde.

Diese in den bisherigen Beispielen enthaltenen Werte:

Nr. 233	35	m p.s. (blinde Trombe)
„ 102	> 30	„
„ 201	45	„
„ 196	40 bis 50	„

sind indessen offenbar nicht ausreichend, um die großen Verheerungen zu erklären, welche die Tromben gewöhnlich anrichten. In der Tat legen auch die Beschreibungen selber die Annahme nahe, daß es sich in den genannten Fällen um ziemlich schwache Tromben handelte. Für die starken dürfte man etwa auf das Doppelte dieser Zahlen kommen. Damit stimmen auch die folgenden indirekten Bestimmungen überein.

Laienne hat eine Methode ausgearbeitet, um aus dem Umwerfen von Mauern auf den Winddruck und damit auf die Windgeschwindigkeit zu schließen. Da dies Umwerfen von Mauern relativ oft berichtet wird, andererseits aber ungefähr dem Maximum der Krafterleistung einer Trombe zu entsprechen scheint und dabei eine relativ zuverlässige mathematische Behandlung gestattet, sei die Methode hier kurz auseinandergesetzt (Laienne, Sur l'evaluation numerique de la force qui a produit certains effets de rupture a Chatenay. Compt, Rend. 9, 219—223, 1839). Natürlich eignen sich für die Berechnung nur freistehende Gartenmauern.

Aus dem Umwerfen einer Mauer von der Dicke  $d$  und der Höhe  $h$  berechnete Laienne den Winddruck pro Quadratmeter auf folgende Weise.

Zunächst ist ein Druck

$$p_1 = \alpha \cdot \frac{d^2}{h}$$

nötig, um eine schon von ihrer Unterlage gelöste Mauer zu kanten;  $\alpha$  ist dabei das Gewicht eines Kubikmeters Mauerwerk und wird von Laienne gleich 2400kg gesetzt.

Zweitens ist noch ein weiterer Druck

$$p_2 = \beta \cdot \frac{d^2}{3 h^2}$$

nötig, um den Zusammenhang des Mauerwerkes zu zerbrechen. Die Konstante  $\beta$  drückt dabei die Arbeit des Zuges aus, der nötig ist, um ein Prisma dieses Mauerwerkes von einem Quadratmeter Querschnitt zu zerbrechen, und wird von Laienne gleich 7500kg gesetzt, womit der Winddruck

$$p = p_1 + p_2 = \alpha \frac{d^2}{h} + \beta \frac{d^2}{3 h^2}$$

wird.



Wie man sieht, stimmen diese Berechnungen untereinander recht gut überein. Der „Tornado“ von Novska war wohl die heftigste in Betracht kommende europäische Trombe (vgl. z. B. die Spurbreite). Wenn wir für ihn nur etwa 100 mp.s. erhalten, so stimmt damit überein, daß in normalen Fällen, in denen die Tromben die üblichen zerstörenden Wirkungen äußern, etwa 70 bis 80m p.s. vorkommen, während schwächere, insbesondere blinde Tromben, nur etwa 30 bis 50 mp.s. aufweisen. Weitere Übereinstimmungen mit diesen Resultaten werden im nächsten Kapitel gefunden werden.

KAPITEL 10  
 Dr. Alfred Wegener  
 Wind- und Wasserhosen in Europa

**Die Luftverdünnung im Innern der Trombe.**

Daß im Innern der Trombe infolge der Zentrifugalkraft eine starke Luftverdünnung herrschen müsse, ist bereits von den Autoren des 18. und 19. Jahrhunderts klar ausgesprochen worden. Indessen blieb dies im wesentlichen das Ergebnis theoretischer Erwägungen; höchstens hätte man die eigentümlichen, durch den schnellen Druckwechsel verursachten Sprengungserscheinungen, von denen noch die Rede sein wird, als Beleg anführen können, allein über die Entstehung dieser Wirkungen waren die Meinungen früher sehr geteilt, und selbst in den Kreisen, welche die elektrische Trombentheorie an sich ablehnten, neigte man dazu, zur Erklärung dieser Erscheinungen die Elektrizität zu Hilfe zu nehmen. Eine exakte Beziehung zur Beobachtung erhielt die Theorie der axialen Luftverdünnung erst nach Einführung und Verbreitung der Barographen. Naturgemäß ist das bisher auf diese Weise erhaltene Material an Registrierungen noch sehr gering; leider ist es auch nicht vollständig ausgenutzt, indem die genaue Lage des Barographen innerhalb der Trombenspur nicht immer ermittelt und angegeben ist.

Zur besseren Beurteilung der Beobachtungen seien einige theoretische Betrachtungen vorausgeschickt, die indessen nicht den Anspruch erheben, eine abgeschlossene Theorie des Trombenwirbels darzustellen.

Die Bewegungsform eines natürlichen Wirbels kann sich mehr oder weniger an zwei Idealformen anschließen, welche experimentell durch ein rotierendes Glas Wasser und andererseits durch den Wirbeltrichter über der Öffnung am Boden eines Wassergefäßes veranschaulicht werden können. Im ersteren Falle rotiert der Inhalt des Wasserglases wie ein fester Körper, d. h. das Verhältnis von Geschwindigkeit zum Achsenabstand ist für alle Teile dasselbe:

$$\frac{v}{r} = \text{konst.} \dots \dots \dots (1)$$

Die Wasseroberfläche, welche die Druckfläche Null darstellt, nimmt dabei die Gestalt eines Rotations-Paraboloids an.

Im zweiten Falle ändern alle Teilchen fortwährend ihren Achsenabstand, wobei nach bekannten mechanischen Regeln ihr Rotationsmoment  $\omega r^2$  ( $\omega$  Winkelgeschwindigkeit,  $r$  Achsenabstand) unverändert bleibt, was wir auch, da

$$\omega = \frac{v}{r},$$

schreiben können:

$$v \cdot r = \text{konst.} \dots \dots \dots (2)$$

Die Wasseroberfläche, welche auch hier als die Fläche des Druckes Null ein unmittelbares Bild von der Druckverteilung im Innern des Wirbels gibt, ist jetzt ein Rotations-Hyperboloid, es bildet sich also längs der Achse eine leere Röhre. Da die lineare Geschwindigkeit nach Gleichung (2) in der Achse unendlich wird, läßt sich für jeden endlichen Druck in der Umgebung des Wirbels angeben, in welcher Entfernung von der Achse der Druck Null erreicht wird, der Wirbel also leer läuft (Nach Muncke (a. a. O. S. 1686) kann man dieses Leerlaufen in folgender Weise besonders anschaulich machen: Man senke einen Trichter bis zum Rande ins Wasser und lasse ihn voll laufen.

Versetzt man dann seinen Inhalt durch Umrühren in Rotation und hebt ihn etwas an, so bildet sich augenblicklich in dem unten heraustretenden Wirbel die axiale Leere. Diese beiden Wirbelarten mit ihrer Druckverteilung sind in Fig. 46 und 47 dargestellt.

Es ist nun leicht einzusehen, daß der natürliche Trombenwirbel aus zwei Teilen bestehen muß, die jedenfalls insofern den im vorangehenden genannten

Idealformen entsprechen müssen, als im inneren Teile  $v$  mit wachsendem  $r$  zunimmt, während es im äußeren abnimmt. Auch in den angeführten Beispielen des rotierenden Wasserglases und des Ausflußtrichters ist dies der Fall; denn das erstere ist von mitrotierender Luft umgeben, deren Geschwindigkeit nach außen zu abnimmt, und der wasserleere Kanal zweiten Falle ist mit Luft gefüllt, welche natürlich mitrotiert, und zwar in der Weise, daß die Geschwindigkeit von der Achse nach außen zu wächst. Es sind also auch in diesen Fällen immer zwei Teile des Wirbels, ein Kern und ein Mantel, vorhanden, nur daß in dem einen Falle der

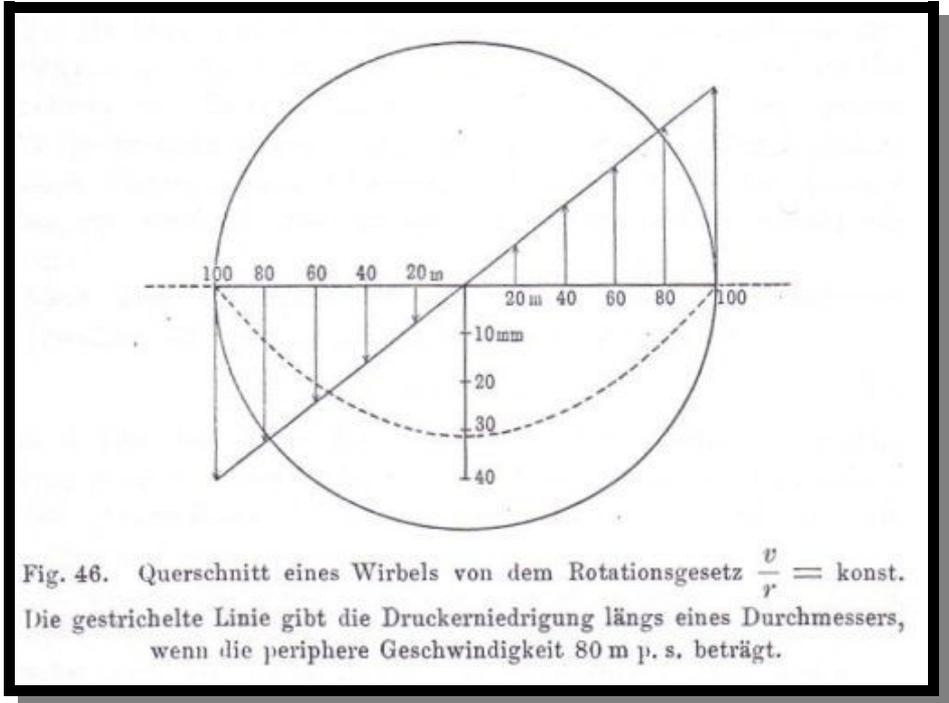


Fig. 46. Querschnitt eines Wirbels von dem Rotationsgesetz  $\frac{v}{r} = \text{konst.}$   
Die gestrichelte Linie gibt die Druckerniedrigung längs eines Durchmessers, wenn die periphere Geschwindigkeit 80 m p. s. beträgt.

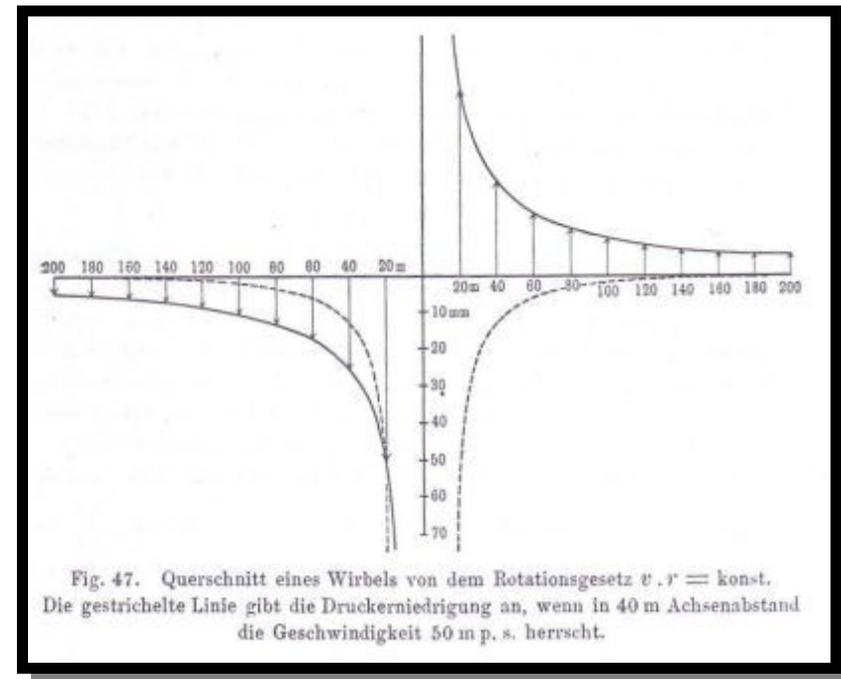


Fig. 47. Querschnitt eines Wirbels von dem Rotationsgesetz  $v \cdot r = \text{konst.}$   
Die gestrichelte Linie gibt die Druckerniedrigung an, wenn in 40 m Achsenabstand die Geschwindigkeit 50 m p. s. herrscht.

Kern, im anderen der Mantel aus Wasser besteht und dadurch sichtbar gemacht ist. Daß die Grenze zwischen Kern und Mantel, auch wenn beide aus gleichem Material bestehen, dennoch meist ziemlich scharf ist, erscheint deshalb nicht unwahrscheinlich, weil die Bewegungsform des Kerns der „geradlinigen“, diejenige des Mantels der „turbulenten“ Bewegung ähnlich ist, zwischen denen es auch keine Übergänge gibt. Freilich kann der Mantel wohl zu einem Gleitwirbel zusammenschrumpfen, welcher dann, wie das 01 um eine rotierende Stahlachse, als Zylinderfläche den Kern umhüllt und den Übergang zur ruhenden Luft der Umgebung vermittelt.

Man kann sich vorstellen, daß bei einer schnell aus der Wolkenhöhe herabwachsenden Trombe, oder bei einer solchen, die mit großer Geschwindigkeit durch die untere Luftschicht fortwandert, der Mantel nahezu auf einen solchen Gleitwirbel zusammengeschrumpft ist. Bleibt die Trombe aber, ohne ihren Ort in der unteren Luftschicht zu verändern, hinreichend lange in Rotation, so wird die Entfernung, bis zu welcher die umgebende Luft in Mitleidenschaft gezogen wird, immer größer werden, und der Abfall der Geschwindigkeit nach außen wird sich mehr und mehr dem in Fig. 47 dargestellten Schema nähern. Erreicht werden könnte dies Schema allerdings erst nach unendlich langer Zeit, weil darin der Einfluß der Trombe unendlich weit reicht.

Mit Hinblick auf diese Verhältnisse kann man vielleicht den Gleitwirbel als die Jugendform, das Schema der Fig. 47 als die Altersform des Trombenmantels bezeichnen; keine von beiden dürfte je erreicht werden, die wirklichen Formen liegen immer zwischen diesen beiden Extremen. Für den Kern der Trombe dürfen wir wohl das Schema der Fig. 46 als nahezu richtig annehmen.

Nach dem vorangehenden können wir das Rotationsgesetz der Tromben offenbar in die allgemeine Form kleiden:

$$V \cdot r^2 = \text{konst.} \dots \dots (3)$$

wobei r für den Kern den Wert — 1 hat. Für den Mantel dagegen muß r einen anderen, jedenfalls positiven Wert haben, der bei „jugendlichen“ Tromben nur wenig größer als + 1 ist, für „alternde“ sich aber dem Wert + ∞ nähert.

Daß die Geschwindigkeitsabnahme nach außen oft sehr rasch, also die Dicke des Mantels sehr klein ist, dafür sprechen mancherlei **Beobachtungen**, von denen einige hier angeführt werden sollen:

Bei Nr. 178 war 130 m links von der „Bahnmitte“ noch starker Wind, 300 m links von derselben „regte sich kein Lüftchen“. Bei Nr. 21 herrschte 240 m von der Säule Windstille. Bei Nr. 54 wurde am Wohnhaus kein Wind gespürt, während die Scheune daneben zusammenstürzte. Bei Nr. 196 registrierte der Turm St. Jacques, der jedenfalls in der Zerstörungsspur, vielleicht in ihrer Mitte lag, 6 mm Druckerniedrigung, während 160 m nach außen nur noch 2 mm registriert wurden. Bei der sehr schwachen Trombe Nr. 107, die nur 6 m Spurbreite hatte, bemerkte der Beobachter den Wind erst, als er sich ihm bis auf 5 m genähert hatte. Bei der zweiten der Tromben Nr. 231 heißt es: „Die Grenzen der Trombe waren außerordentlich scharf, wie die folgende Tatsache zeigt.

Ein Baum, der sich gerade am Rande der Trombe befand, war auf der der Trombe ausgesetzten Seite vollkommen entlaubt, während die entgegengesetzte Seite unversehrt blieb.“ Dies sind freilich extreme Fälle, denen andere gegenüberstehen, in welchen die Windabnahme nach außen eine langsamere war. Ein Extrem nach dieser Richtung stellt Nr. 177 dar, wo 2 km seitwärts der Zerstörungsspur noch so starker Wind herrschte, daß man glaubte, er würde die Bäume entwurzeln. Allerdings ist es wohl fraglich, ob es sich dabei nicht um die Gewitterböe handelte, die ja bisweilen neben der Trombe zur Ausbildung gelangt.

Nach dem vorangegangenen ist es nicht schwer, die **theoretische Druckverteilung** im Innern der Trombe zu berechnen, wenn man annimmt, daß ihr Geschwindigkeitssystem durch die Gleichung

$$v \cdot r^2 = \text{konst.} = c$$

dargestellt ist, und daß  $\lambda$  für den inneren Teil, d. h. für  $r = 0$  bis  $r = R$ , den konstanten, negativen Wert  $\lambda_i$ , im äußeren Teile dagegen, d. h. von  $r = R$  bis  $r = \infty$ , den konstanten positiven Wert  $\lambda_a$  hat.  $R$  ist dann der Radius der beide Teile trennenden Zylinderfläche, in welcher die Geschwindigkeit  $v$  den größten Wert erreicht, den wir mit  $V$  bezeichnen wollen.

Die Differentialgleichung der Druckverteilung ist sofort dadurch gegeben, daß das Druckgefälle in der Richtung auf die Achse, also  $\frac{dp}{dr}$ , der Zentrifugalkraft  $\frac{v^2}{r}$  das Gleichgewicht halten muß.

Wir haben daher anzusetzen:

$$\frac{dp}{dr} = \frac{v^2}{r},$$

oder wenn wir mit Hinblick auf die praktische Verwendung den Druck in Millimetern Quecksilber, den Achsenabstand in Metern und die Geschwindigkeit in m p. s. ausdrücken:

$$\frac{db}{dr} = a \frac{v^2}{r} \dots \dots \dots (4)$$

wo  $a = 0,0097$  ist.

Zusammen mit der obigen Gleichung der Geschwindigkeitsverteilung, die sich schreiben läßt:

$$v = \frac{c}{r^\lambda}$$

ergibt dies

$$\frac{db}{dr} = \frac{ac^2}{r^{2\lambda+1}}$$

und

$$\int db = ac^2 \int r^{-(2\lambda+1)} dr.$$

Solange  $\lambda$  als konstant betrachtet werden kann, d. h. innerhalb eines jeden der beiden Teile des Wirbels, läßt sich die Integration ohne weiteres ausführen, und wir erhalten:

$$b = -\frac{ac^2}{2\lambda} \cdot r^{-2\lambda} + \text{Konst.} \dots \dots \dots (5)$$

Die weitere Diskussion müssen wir getrennt für den inneren und äußeren Teil ausführen.

1. Innerer Teil der Trombe. Wenn wir in der letzten Gleichung  $r = 0$  setzen, so wird  $b$  gleich der Integrationskonstante, d. h. letztere ist gleich dem in der Trombenachse herrschenden Druck. Bezeichnen wir diesen mit  $\beta$ , so schreibt sich die Gleichung:

$$b - \beta = -\frac{a}{2\lambda_i} \cdot \frac{c^2}{r^{2\lambda_i}}.$$

Dies ist, wie die linke Seite besagt, der Drucküberschuß eines beliebigen Punktes gegen die Achse.

Wird  $\lambda_i = -1$  gesetzt, was dem rotierenden Glas Wasser entspricht, so ergibt sich die Gleichung einer Parabel (die gestrichelte Linie in Fig. 46).

Wir können noch die Konstante  $c$  eliminieren, die ja gleich  $v \cdot r^\lambda$  ist, und erhalten:

$$b - \beta = -\frac{a}{2\lambda_i} \cdot v^2.$$

Um die totale Druckverminderung im inneren Teil der Trombe zu erhalten, müssen wir diese Gleichung auf dessen Außenrand anwenden, wo  $r = R$ ,  $v = V$  und  $b = B$  ist:

$$B - \beta = -\frac{a}{2\lambda_i} \cdot V^2 \dots \dots \dots (6)$$

Es ist sehr bemerkenswert, daß diese totale Druckverminderung nur vom Rotationsgesetz ( $\lambda_i$ ) und der maximalen Geschwindigkeit ( $V$ ) abhängt. Sofern also ersteres als bekannt (nämlich gleich  $-1$ ) betrachtet werden darf, genügt es, die maximale Windgeschwindigkeit zu kennen, um die totale Druckverminderung

berechnen zu können, gleichgültig, welchen Durchmesser die Trombe hat.

2. Äußerer Teil der Trombe. Wenn wir in der allgemeinen Gleichung (5)  $r = \infty$  setzen, so wird  $b$  gleich der Integrationskonstante, d. h. letztere muß gleich dem Luftdruck außerhalb der Trombe sein. Wir setzen also jetzt die Integrationskonstante gleich 760 und schreiben  $\lambda_a$  statt  $\lambda$ :

$$760 - b = \frac{a}{2\lambda_a} \cdot \frac{c^2}{r^{2\lambda_a}}$$

Dies ist, wie die linke Seite besagt, die Druckverminderung in einem beliebigen Punkte des Mantels gegenüber der äußeren Luft.

Wird  $\lambda_a = +1$  gesetzt, was dem Trichter in ausfließendem Wasser und der Altersform der Trombe entspricht, so ergibt sich die Gleichung einer Hyperbel. (Die gestrichelte Linie in Fig. 47.)

Ersetzen wir wieder  $c$  durch  $v \cdot r^{\lambda}$ , so wird

$$760 - b = \frac{a}{2\lambda_a} \cdot v^2.$$

Die totale Druckerniedrigung im äußeren Trombenteil erhalten wir, wenn wir diese Gleichung auf den Innenrand desselben anwenden, wo  $r = R$ ,  $v = V$  und  $b = B$  ist:

$$760 - B = \frac{a}{2\lambda_a} \cdot V^2 \quad \dots \quad (7)$$

Auch hier ist die Unabhängigkeit von den Dimensionen der Trombe bemerkenswert.

3. Ganze Trombe. Die totale Druckerniedrigung der ganzen Trombe setzt sich aus derjenigen des Mantels und der des Kernes zusammen. Wir brauchen also nur die Gleichungen (6) und (7) zu addieren:

$$760 - \beta = \frac{aV^2}{2} \left( \frac{1}{\lambda_a} - \frac{1}{\lambda_i} \right) \dots \quad (8)$$

Um **Zahlenwerte** zu erhalten, die sich zum Vergleich mit den Beobachtungen eignen, ist zunächst in der umstehenden Fig. 48 ein Beispiel für die aus einer gegebenen Windverteilung folgende Druckverteilung dargestellt. Bei der Windverteilung, die im oberen Teile dargestellt ist, ist  $\lambda_i = -1$ ,  $\lambda_a = +3$  gesetzt. Ferner ist angenommen, daß die größte Geschwindigkeit  $V = 80$  m p. s. beträgt und in einem Abstände  $R = 100$  m von der Achse erreicht wird. Die untere Kurve gibt dann die zugehörige Druckverteilung.

Sehen wir von der Verteilung des Druckes ab, und beschränken wir uns auf die Betrachtung der totalen Druckverminderung, so können wir diese für jede beliebige Maximalgeschwindigkeit angeben, vorausgesetzt, daß das Rotationssystem  $\lambda_i$  und  $\lambda_a$  der Trombe bekannt ist. Daß  $\lambda_i = -1$  gesetzt werden kann, ist schon wiederholt gesagt worden;  $\lambda_a$  wird zwar in der Natur sehr

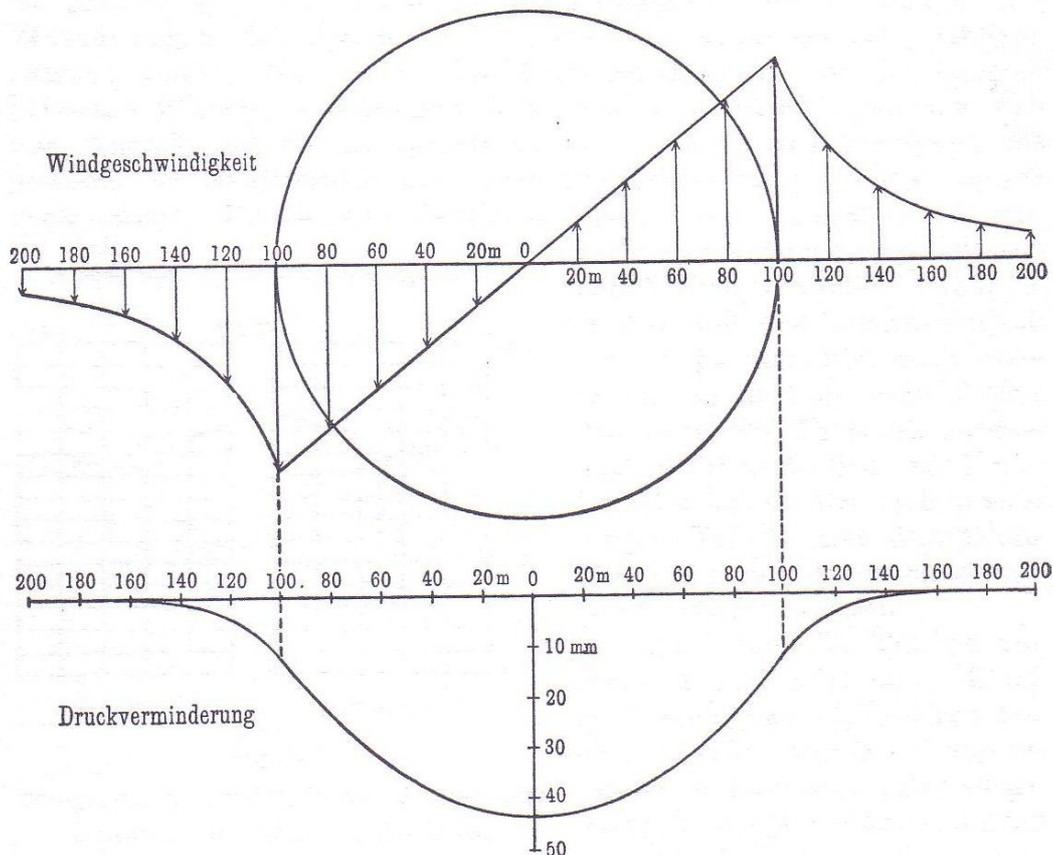


Fig. 48. Windgeschwindigkeit und Druckverminderung für  $\frac{v}{r} = \text{konst.}$  im inneren und  $v \cdot r^3 = \text{konst.}$  im äußeren Teil der Trombe. Die maximale Geschwindigkeit ist in 100 m Achsenabstand und zu 80 m p. s. angenommen.

veränderlich sein; führen wir die Rechnung aber sowohl für  $\lambda_a = +1$  (alte Tromben) als für  $\lambda_a = +\infty$  (junge Tromben) aus, so erhalten wir Grenzwerte, zwischen denen die natürlichen Werte liegen müssen. Die Gleichung (8) vereinfacht sich dann außerordentlich; es wird nämlich

$$\text{für junge Tromben } 760 - \beta = \frac{1}{2} V^2$$

$$\text{„ alte „ } 760 - \beta = a V^2.$$

Für die Altersform der Trombe ergibt sich also immer eine doppelt so große Druckerniedrigung wie für die Jugendform.

Da diese einfache Beziehung zwischen Druckerniedrigung und maximaler Geschwindigkeit sich vorzüglich zum Vergleich von Theorie und Beobachtung eignet, sei sie auch zahlenmäßig in Gestalt der folgenden Tabelle wiedergegeben:

Theoretische Druckverminderung in Tromben.						
Maximale Geschwindigkeit . . . m p. s.	10	20	30	40	50	60
Druckverm. in { jungen Tromben mm	0,5	1,9	4,4	7,8	12,1	17,5
{ alten       "       "	1,0	3,8	8,8	15,6	24,2	35,0
Maximale Geschwindigkeit . . . m p. s.	70	80	90	100	200	400
Druckverm. in { jungen Tromben mm	23,8	31,0	39,3	48,5	194	776
{ alten       "       "	47,6	62,0	78,6	97,0	388	—

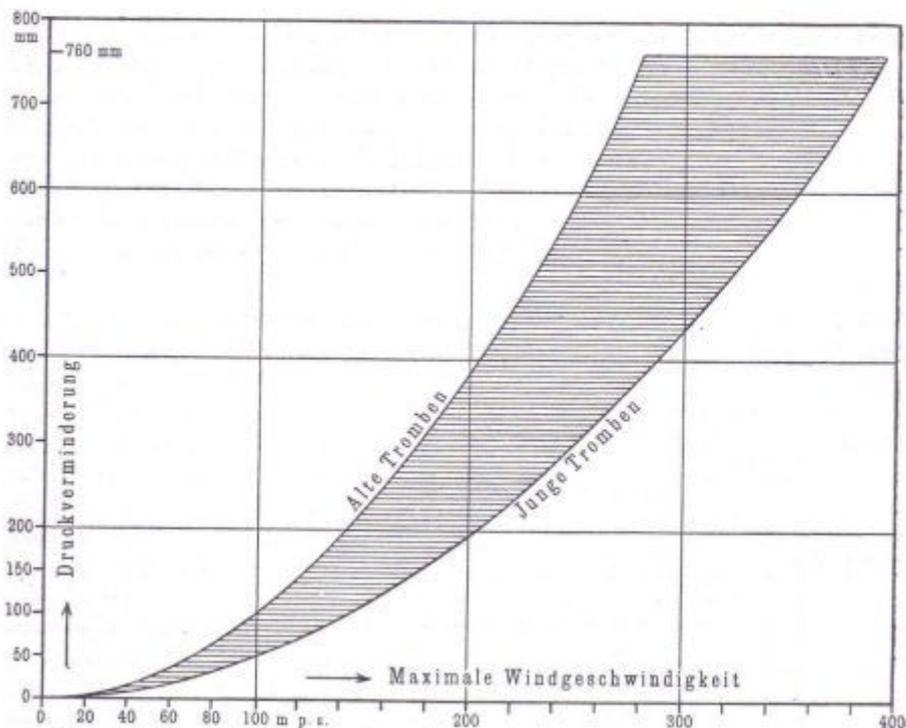


Fig. 49. Theoretische Druckverminderung in Tromben als Funktion der maximalen Rotationsgeschwindigkeit.

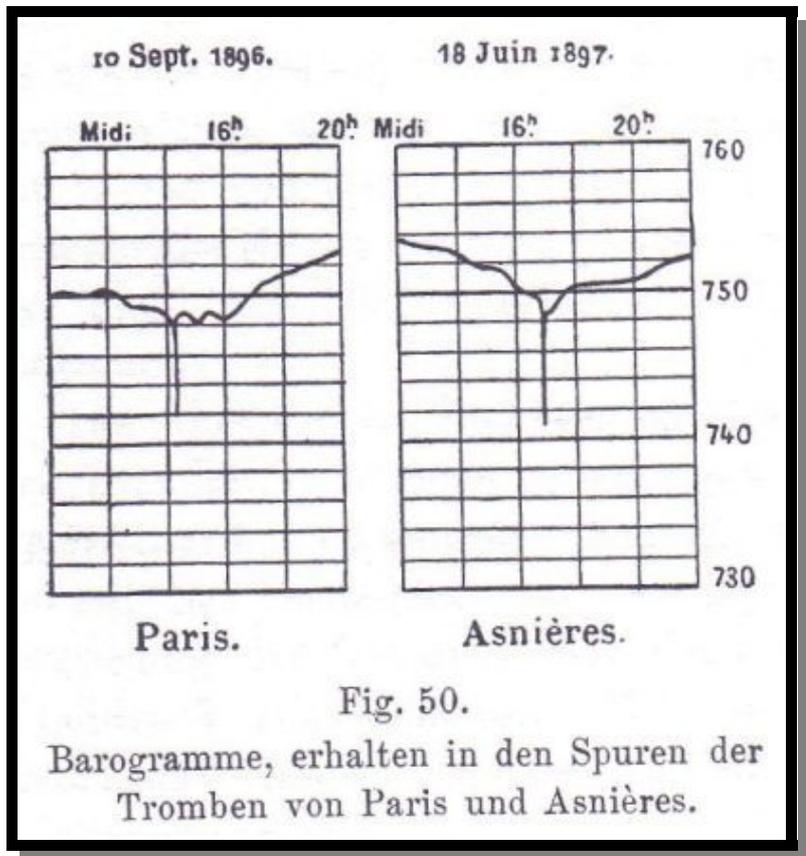
Noch bequemer für eine schnelle Orientierung ist die graphische Tabelle Fig. 49.

Im folgenden seien nun die Beobachtungen über Druckerniedrigung in den Tromben angeführt, welche nach dem Vorhergegangenen dazu verwertet werden können, die maximale Windgeschwindigkeit zu berechnen:

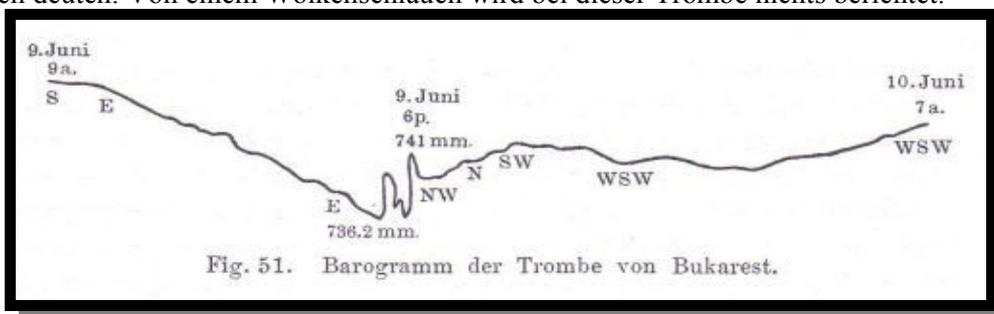
196. Diese Pariser Trombe war blind, hinterließ aber doch einen Schadenstreifen von 150 bis 300 m in der Stadt, „Auf dem Turm St. Jacques ging der Wirbel um 2<sup>42</sup>p vorüber. Der Barograph, der 748mm angab, fiel plötzlich auf 742 mm, um sofort wieder zu steigen (Fig. 50, links). Nur 160 m vom Turm St. Jacques, auf der äußeren Seite des Wirbels, notierte ein Barograph nur einen plötzlichen Fall von 2 mm.“ Im bureau central zeichnete der dortige Barograph die gewöhnliche Gewitternase auf.

Der Druckdifferenz von 6 mm würde nach unserer Tabelle eine Geschwindigkeit von 25 bis 35 m p. s. entsprechen; wenn aus den kreisenden Wolken, wie schon früher berichtet, auf eine Geschwindigkeit von 40 bis 50 m p. s. geschlossen wurde, so ist wohl anzunehmen, daß auch der Turm St. Jacques noch nicht in der Spur der Trombenachse lag, da hier nach unserer obigen Tabelle eine Druckdifferenz von 10 bis 20 mm hätte registriert werden müssen.

201. Auch die Trombe von Asnieres bei Paris, deren Windgeschwindigkeit gleichfalls schon oben erwähnt wurde, ist von besonderem Interesse: „Das Observatorium der Gemeinde von Paris besitzt in Asnieres eine korrespondierende Station . . . Der Luftdruck, der in 32 m Höhe 750 mm betrug, fiel plötzlich auf 740,5 mm, um sogleich wieder zu steigen [Fig. 50, rechts]. Dieser Barometersturz im Moment der Passage des Zentrums genau 4<sup>34</sup>p erstreckte sich nicht weit, denn am rechten Ufer der Seine, in einer Distanz von etwa 600 m, senkrecht auf dem äußeren Rand des Scheitels [gemeint ist wohl: der Trombenspur] genommen, zeigte ein anderer Barograph keinen plötzlichen Sturz, er markierte bloß die gewöhnliche Störung beim Vorübergang von Gewitter.“ — Einem Luftdruckfall von 9,5 mm entspricht etwa eine maximale Windgeschwindigkeit von 35 bis 45 m p.s., was mit der Registrierung (> 30 m p. s.) gut vereinbar ist.



145. Bei der Trombe von Bukarest, die über den Südteil der Stadt fortzog, hier zahlreiche Bäume entwurzelte, Dächer abdeckte, Schornsteine umstürzte und Fensterscheiben eindrückte, wurde an dem im Norden der Stadt gelegenen Observatorium in einer nicht näher angegebenen Entfernung vom Zentrum der Bahn das nebenstehende Barogramm erhalten; der Wind erreichte hier nur noch 15mp.s. und ging von E nach NW um. Die Druckschwankungen betragen hier etwa 5 mm und lassen sich vielleicht als Kombination einer kräftigen Gewitternase mit einer Tromben-Druckschwankung von der Art der oben besprochenen deuten. Von einem Wolkenschlauch wird bei dieser Trombe nichts berichtet.

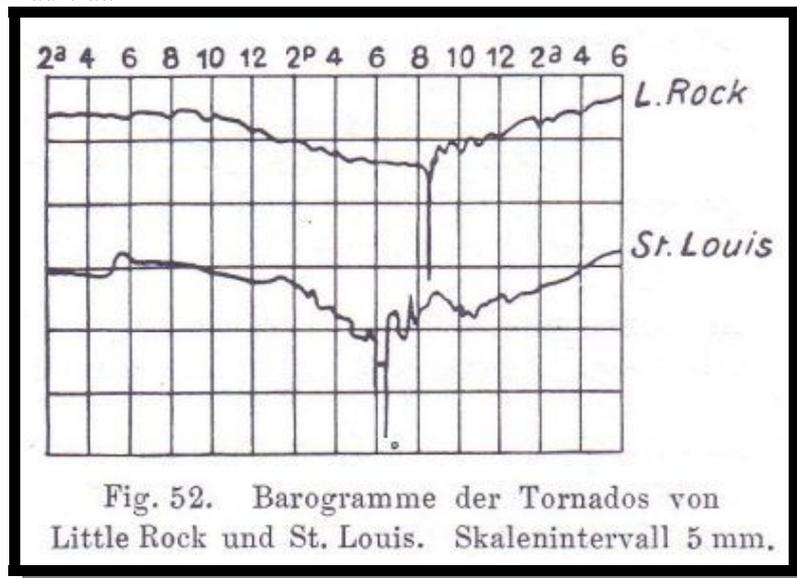


206. Die größte Druckabnahme, die überhaupt bisher beobachtet worden ist, wird von der Trombe Nr. 206 berichtet: „Die Trombe, welche 8—900 m im Durchmesser hatte, ging gerade mit ihrem Zentrum über unsere Schiffe hinweg, wobei die Registrierbarometer einen plötzlichen Fall von 35 mm anzeigten, dem ein ebenso rasches Steigen folgte.“

Aus dieser leider nirgends reproduzierten Registrierung würde eine maximale Windgeschwindigkeit von 60 bis 85 mp.s. folgen.

A 3. Bei dieser Trombe wird von einer plötzlichen Druckverminderung um mehrere Zentimeter berichtet. [Die Registrierung soll von Tardy im „Kosmos“ veröffentlicht sein<sup>1)</sup>].

<sup>1)</sup> Von ausländischen Beobachtungen seien noch die beiden nebenstehenden Registrierungen von Little Rock, Ark., vom 2. Oktober 1894, und die vom 27. Mai 1896 von St. Louis, Mo., genannt. In Little Rock ging die Zerstörungsspur mitten über die Station fort, in St. Louis aber war der Barograph angeblich mehr als 1 km von der Zentrallinie der Zerstörungen entfernt, wengleich auch noch an seinem Orte orkanähnlicher Sturm auftrat.



Ein Wolkenrichter war hier nicht vorhanden; dieser Tornado war ein Glied einer ganzen Gruppe, die sich im Verlauf von 6 Stunden auf einem Raume von 400 km Länge und 50km Breite abspielte und zu einem großen Gewitter gehörte. Einige von ihnen, aber nicht der registrierte, zeigten den Wolkenschlauch. In Little Rock ließ die Dunkelheit keine Beobachtung über den Wolkenschlauch zu. — In Ciel et Terre 7, 21, 1886/87 wird von der Trombe von Shanghai (21. Aug. 1885), deren 100 m breiter Fuß 450 in von dem betreffenden Schiff entfernt vorbeiging, berichtet, daß der Luftdruck an Bord des letzteren um 1,5 mm fiel. — Ferrel (Recent advances in Meteorology, Washington 1886, S. 303) sagt: „Der Luftdruck in einem Tornado ist nach den Beobachtungen nahezu 3 Zoll [75 mm] tiefer als der außen herrschende Druck“ ; die Beobachtungen, auf welche sich dies Urteil stützt, werden aber nicht genannt.

Diese Beobachtungen, die freilich noch sehr der Ergänzung durch neue bedürfen, scheinen doch so viel zu zeigen, daß Druckerniedrigungen von mehr als 20 mm nur in heftigen Tromben vorkommen. Hiermit stimmt jedenfalls unser früheres Resultat gut überein, daß bei blinden Tromben Windgeschwindigkeiten unter 50 m p. s., bei kräftigen solche zwischen 50 und 100 m p. s. vorkommen. Die von Finley mitgeteilten Schätzungen der Windgeschwindigkeiten für die nordamerikanischen Tornados sind erheblich höher (Finley, On the Charakter of Six Hundred Tornados, Prof. Papers of the Signal Service, Nr. 7, Washington 1882.) Er gibt nämlich an, daß diese Schätzungen zwischen 31 und 358 m p.s. liegen und als Mittel 175 m p.s. ergeben. Aber da die Grundlage dieser Schätzungen nicht mitgeteilt ist, kann wohl auch für die heftigeren Tornados noch immer nicht als erwiesen gelten, daß der Wert von 100 m p.s. jemals wesentlich überschritten worden sei. Es sei insbesondere daran erinnert, daß Werte von 350mp.s. nach der obigen Tabelle bereits einer Druckerniedrigung um eine ganze Atmosphäre entsprechen würden, was nach den bisher erhaltenen Barogrammen offenbar nicht vorkommt.

Die starke, beim Vorübergang der Trombe plötzlich einsetzende Druckerniedrigung erzeugt bei Gegenständen, die Luft enthalten, **explosionsartige Wirkungen**.

Für die amerikanischen Tornados hat Ferrel dies besonders klar hervorgehoben (Ferrel, Recent Advances in Meteorology, Washington 1886, S. 304. — Für die von Ferrel ohne genauere Angaben erwähnte Erscheinung, daß leere, verschlossene Flaschen durch den Tornado entkorkt werden, habe ich in den europäischen Trombenbeschreibungen kein einziges Beispiel gefunden.) Nach ihm ist die Zerstörung der Gebäude weit mehr dieser Explosivkraft als dem Winddruck zuzuschreiben. Köppen hat hiergegen geltend gemacht, daß Häuser meist zu undicht seien, um den ruhigen Ausgleich des Luftdruckes zu verhindern, und warnt vor übertriebenen Vorstellungen hinsichtlich dieser Explosionskraft (Köppen, Die Windhose vom 5. Juli 1890 bei Oldenburg usw. Ann. d. Hydrogr. 1896, Heft 12.)

In der Tat läßt sich aus unserer Fig. 48 ableiten, daß auch in der Zone stärksten Druckabfalles in der Trombe, wenn diese mit 10 mp.s. fortschreitet, für eine Druckerniedrigung um 25 mm immer noch 6 Sekunden erforderlich sind, und diese dürften in der Tat meist genügen, um der eingesperrten Luft Auswege zu gestatten.

Indessen ist zu beachten, daß die in Fig. 48 dargestellte Druckverteilung sich unmittelbar am Erdboden durch die Reibung leicht verändern kann. Denn die durch letztere erzeugte Turbulenz in dem Wirbel wird bestrebt sein, dessen Rotations- und Drucksystem nach der Richtung des in Fig. 47 dargestellten Schemas zu verändern. Damit ist die Möglichkeit gegeben, daß auf einem engeren Raume eine größere Druckerniedrigung erzeugt wird, und damit wieder wachsen die Chancen für Explosionswirkungen außerordentlich. Wir dürfen hiernach wohl annehmen, daß nicht selten solche Wirkungen auftreten, daß sie aber auf einen schmalen Streifen innerhalb der Trombenspur beschränkt sind. Hierdurch erklären sich die folgenden Beobachtungen.

A 10. Schon die alte Beschreibung der Windhose von Öls in Schlesien vom 1. September 1535 enthält einige solche charakteristische Beobachtungen. So wurde die Decke eines Zimmers gesprengt, offenbar eine Druckwirkung der Zimmerluft bei der plötzlichen äußeren Druckverminderung. Ferner wurde ein Kachelofen zertrümmert in einem Zimmer, dessen kleines Fenster herausgedrückt wurde. Hier wird man annehmen dürfen, daß die Sprengung erfolgte, als das Fenster im Bereich tiefen, der Schornstein im Bereich hohen Druckes war. Die wörtliche Wiedergabe dieser Stellen findet man im zweiten Kapitel.

Sehr gewöhnlich sind Beschreibungen wie die folgenden:

81. „Thore und Thüren, Laden und Fenster, so fest und vorsichtig sie auch durch starke eiserne Eiegel verschlossen sein mochten, wurden aufgesprengt und zerstört.“

Auch bei Nr. 82 sprangen die Schränke auf, bei Nr. 126 rissen die Tapeten von den Wänden, wohl infolge der Ausdehnung der in den Wänden enthaltenen Luft.

221. „Die Fenster und Türen geschlossener Lokale flogen nach auswärts, die ganzen Dächer [= diejenigen, welche ganz waren] wurden in toto in die Höhe gehoben, während die schadhafte keine schweren Beschädigungen erlitten haben.“

129. Das Kirchendach von Nöttja wurde gelüftet, ohne sonst beschädigt zu werden, was deshalb Verwunderung erregte, weil keine Öffnung in der Kirche war, durch die der Wind hätte hineinblasen können. (Wortlaut S. 38.)

152. „In geschlossenen Räumlichkeiten eines Hauses am Markt wurden infolge des Luftdrucks einige Fenster zertrümmert.“

185. „Beide wollten ins Zimmer, konnten aber mit vereinten Kräften drückend, nicht mehr die Thür aufmachen, obgleich man die Thür gegen das Innere des Zimmers öffnet. Sie hörten im selben Moment als wenn tausend Raketen auf einmal platzten, hörten aber nicht wie das ganze Dach über ihren Häupten wegflog. Sobald es zu dämmern anfieng [d. h. die durch die Trombe auf kurze Zeit verursachte Finsternis nachließ], öffneten sich plötzlich alle Thüren von selbst, und die Fenster flogen sammt den Fensterstöcken ins Zimmer hinein.“

Noch überzeugender ist das Sprengen der Fußböden, wovon in den folgenden Beobachtungen berichtet wird:

27. „Was wir nicht übergehen wollen, ist daß sie [die Trombe] in gewissen Häusern den aus Fliesen bestehenden Fußboden aufspringen ließ ebenso wie die Dielen ... In einem Speicher, wo Getreide in der Mitte lag, waren alle Dielenplatten, die nicht mit Getreide bedeckt waren, hochgehoben und durcheinandergebracht, während keine der mit Getreide bedeckten herausgerissen wurde.“

Ebenso bei Nr. 40: „Der Fußboden der Wohnräume wurde gefurcht (silonne) und aufgehoben; in einem anderen Zimmer fand diese Wirkung nur in der Mitte statt, und eine Menge Faience-Stücke, die rings herumstanden, blieben verschont.“

Dasselbe Aufplatzen des Fußbodens wird auch noch in den Beschreibungen Nr. 6, 82 und 24 berichtet, die hier nicht mitgeteilt werden können.

108. In einer Spinnerei, über welche die Trombe hinwegzog, blieben die drei untersten Stockwerke unversehrt, „der Fußboden des vierten wurde mit den Maschinen und Arbeitern gehoben, als ob er emporgezogen worden wäre; das ganze Dach wurde auf der einen Seite gleichsam durch dieselbe Kraft abgehoben, welche zuerst den Fußboden durchbrach und hob, um das Dach zu zerreißen“. — Eine andere, charakteristische Einzelheit bei dieser Trombe ist die folgende: „In der Fabrik des Herrn Mare zu Montville hingen ein Rock und ein Leibrock an einem Kleiderrechen vor einem Schornsteine, der durch eine Dachstube ging. Nach der Trombe fand man einen Schooß des einen und einen Theil des Schooßes des anderen Rockes in einer wagerechten Spalte eingeklemmt und gefangen, die an dem Schornstein entstanden war.“

Besonders deutlich ist aber die folgende Beobachtung, wo eine Erklärung durch Windstau offenbar ausgeschlossen ist:

31. „Schließlich riß dieser Wirbel an zwei Stellen die Steine auf, die das Pflaster einer Bastion des Forts Saint-Elme bildeten, und ließ zwei offene Stellen zurück, deren eine eine Quadrattoise betrug, während die andere 3 Toisen lang und 2 breit war. Die Steine aber hatten 8 bis 9 Zoll Dicke, 1 ½ Fuß im Quadrat und waren besonders gut cementiert, weil sie ein Kornmagazin bedeckten, das im Innern dieser Bastion lag.“

Schwieriger ist die Deutung in dem folgenden Falle, wo die Entstehung des Staubfußes beim Herabgreifen der Trombe mit folgenden Worten geschildert wird:

74. „Er erhob sich, indem er ein Geräusch machte wie eine großkalibrige Bombe, welche platzt, wobei er auf der Erde eine Aushöhlung in Form eines kreisrunden Bassins von 20—25 Fuß Umfang und von 3—4 Fuß Tiefe in der Mitte hinterließ.“ Die Losreiβung einer solchen Erdmasse kann wohl nicht durch den Wind erklärt werden, wohl aber durch die Saugwirkung des luftverdünnten Innern der Trombe; besonders wenn etwa unter einer dichteren (vielleicht feuchten) Oberfläche eine porösere (vielleicht trockene) Bodenschicht mit großem Luftgehalt gelegen hätte, könnte durch die Ausdehnung der in ihr enthaltenen Luft wohl eine solche Sprengwirkung entstehen.

Die angeführten Beobachtungen lassen sich meines Erachtens ohne die Annahme einer Explosivkraft nicht erklären, und die nach den Wirkungen zu schätzende Größe dieser Kraft stimmt durchaus mit den früher entwickelten Vorstellungen vom Bau des Trombenwirbels überein. Beachtenswert ist, daß nach den theoretischen Überlegungen die Spurbreite der Explosionswirkungen viel geringer sein muß als die Breite der zerstörenden Winde, wie sie im Walde durch die niedergelegten Bäume in Erscheinung tritt; da die Explosivwirkungen an die Wirbelachse gebunden sind, geht ferner aus den Erörterungen S. 169 hervor, daß sie nicht in der Mitte der Trombenspur auftreten, sondern — bei cyklonischem Rotationssinn — links davon. Die vorliegenden Beobachtungen widersprechen nicht der Annahme einer sehr geringen Breite der Explosionsspur, über ihre Lage geben sie aber keinen Anhalt.

Hierauf wäre bei künftigen Untersuchungen zu achten. Die starke Druckerniedrigung im Innern des Trombenwirbels ist auch die Hauptursache für die **Kondensation der Wolkensäule**. Es wird allerdings später gezeigt werden, daß der kondensierende Zylindermantel der Trombe einer aufsteigenden Bewegung entspricht, und es ist klar, daß dieses Aufsteigen die Kondensation stark unterstützt. Dies ist ja auch der Grund, weshalb die Kondensation in der Höhe früher beginnt und später aufhört als unten.

Allein bei den meisten Wasserhosen reicht doch der Wolkenschlauch bis zur Meeresfläche herab; daraus geht aber hervor, daß hier bereits die axiale Druckerniedrigung genügt, um die Luft zur Kondensation zu bringen, da sie im untersten Teil der Trombe horizontal aus der Umgebung einströmt. Nachdem in den genannten Fällen also die Luft noch vor dem Aufsteigen zur Kondensation gebracht wird, können wir, wenn Temperatur und Feuchtigkeit in der Umgebung bekannt sind, die Druckerniedrigung berechnen, welche mindestens in einer solchen bis zum Meere herab kondensierenden Trombe vorhanden sein muß.

Wir benutzen dazu am einfachsten die von Ferrel und Hennig zur Berechnung der Cumulus-Basis aufgestellte Näherungsformel

$$H = 122 (t - \tau),$$

wo  $H$  die Höhe ist, in welcher die Kondensation beginnt,  $t$  die Temperatur und  $\tau$  der Taupunkt der Luft vor dem Aufsteigen. Um diese Formel auf das horizontale Druckgefälle der Trombe anwenden zu können, ersetzen wir  $H$  durch  $11,9 db$ , was für unsere Zwecke völlig ausreicht, und erhalten

$$db = 10,6 (t - \tau).$$

Sind also Temperatur und Taupunkt (oder relative Feuchtigkeit) in der Umgebung der Wasserhose gegeben, so muß die letztere, um bis zum Meere herab zu kondensieren, mindestens die in der folgenden Tabelle angegebene Druckerniedrigung aufweisen:

Kleinste Druckerniedrigung für bis zum Meere herab kondensierende Wasserhosen für  $t = 20^\circ$ .

Relative Feuchtigkeit . . .	90	80	70	60	50 Proz.
Kleinste Druckerniedrigung . .	18	36	60	85	113 mm

Diese Zahlen sind um so interessanter, als die relative Feuchtigkeit auf dem Meere außerordentlich gleichförmig, sowohl zeitlich wie räumlich, ist. v. Hann <sup>1)</sup> sagt von ihr: „Sie ist über den Ozeanen vom Äquator bis gegen die Pole hin nahe dieselbe, und dürfte sich da bei 80 % halten; in den Passatgebieten kann sie auf 75 % (in einzelnen seltenen Fällen selbst auf 50 %)“

<sup>1)</sup> Lehrb. d. Meteorol., 3. Aufl., S. 234.

herabsinken.“ Man kommt also zu dem Schluß, daß die Wasserhosen, da sie in der Regel bis zum Meere herab kondensieren, mindestens eine Druckverminderung um 36 mm aufweisen müssen, ein Resultat, das mit den direkten Messungen durchaus übereinstimmt. Und damit wäre nach den früheren Ausführungen auch gesagt, daß solche Wasserhosen mindestens eine Windgeschwindigkeit von 70 m p. s. besitzen.