

KAPITEL 11
 Dr. Alfred Wegener
 Wind- und Wasserhosen in Europa

Der Bau des Trombenwirbels.

Nachdem schon im vorigen Kapitel gewisse Hauptzüge des Trombenbaues, insbesondere ihre Zweiteilung in Kern und Mantel und die Druckverteilung, besprochen worden sind, soll nunmehr versucht werden, ein vollständiges Bild dieses Baues zu gewinnen, und zwar auf Grund der Beobachtungen.

Die erste Beobachtungstatsache, auf die wir das Augenmerk richten müssen, ist die, daß der **Durchmesser der Wolkensäule** nur einen Bruchteil der Breite der Zerstörungsspur beträgt. Daß die Wolkensäule außen noch von einem unsichtbaren Wirbel umgeben ist, wußte schon Lucretius (Vgl. das Zitat im letzten Kapitel). Besonders betont hat es im Jahre 1838 Oersted, wobei er berichtete, daß Friedrich Rabe bei einer Windhose auf Laland Stroh, Blätter und andere leichte Gegenstände in Windungen außerhalb der Wettersäule aufsteigen sah. In der Tat zeigen auch alle Photographien von Wasserhosen, daß der Wolkenschlauch unten von einem breiten Fuß aus emporgerissenem Wasserstaub umgeben ist, und ein entsprechender, aus Staub und Trümmern bestehender Fuß bildet sich auch auf dem Lande. Die wechselnden Formen und den Baum dieses Fußes übergehen wir zunächst, um sie im nächsten Kapitel ausführlich zu besprechen. Die Breite dieses Fußes, nicht die der Wolkensäule, entspricht der Verwüstungsspur.

Für den Durchmesser der Säule an ihrem unteren Ende finden wir die folgenden Angaben:

Durchmesser der Wolkensäule

Nr.	Durchmesser m	Bemerkungen
51	96,5	Geschätzt.
218	20	"
91	17,5	15—20 m geschätzt.
72	15	Geschätzt.
205	15	"
95	10,5	9—12 m geschätzt.
43 a	10,8	Geschätzt.
200	9	Trigonometrisch gemessen.
74	7,5	Ellipse mit 9 und 6 m Durchmesser geschätzt, aus unmittelbarer Nähe.
53	7,5	Geschätzt.
61	7,5	Geschätzt. „In der Mitte“.
43 b	3,3	Geschätzt.
Mittel . .	18,3	

Während wir im achten Kapitel als mittlere Breite der Zerstörungsspur 192 m gefunden hatten, ergeben die vorstehenden Zahlen für den Durchmesser der Wolkensäule nur 18,3 m, also nur etwa ein Zehntel der ersteren. Freilich beruhen die Zahlen unserer Tabelle mit wenigen Ausnahmen auf Schätzungen, die meist aus größerer Entfernung ausgeführt sind; und diese Schätzungen fallen fast immer zu klein aus. Um nur ein Beispiel zu nennen, gibt Horner in seinen um die Mitte des 19. Jahrhunderts viel zitierten „Erfahrungstatsachen“ (die aber in Wirklichkeit den Erfahrungen so widersprechen, daß wir in diesem Buch keinen Gebrauch davon machen können) an, die Höhe der Tromben variere zwischen 10 und 500 m; selbst wenn man erstere Zahl als Höhe des Fußes oder Wasserturms auffaßt, so ist mit der zweiten doch sicherlich die Höhe der Wolkensäule bis zu ihrem Verschwinden im cu-ni gemeint. Es dürfte aber gewiß nur selten vorkommen, daß diese Basis schon in 500 m über dem Boden zu finden ist. Man könnte zahllose Beispiele für solche offenkundigen starken Unterschätzungen der Trombendimensionen anführen, während Überschätzungen selten oder nie vorkommen. Deshalb ist auch anzunehmen, daß der Mittelwert von 18,3 m für den Durchmesser der Wolkensäule erheblich zu klein ist. Wir können aber auf einem Umwege zu einem richtigen Resultat gelangen.

In einigen Fällen ist nämlich gleichzeitig der Durchmesser der Wolkensäule und der der Spur oder des Staubfußes geschätzt. Wenn dann auch beides unterschätzt wird, so wird doch das Verhältnis dieser beiden Angaben von dem Schätzungsfehler frei sein. Es sind die auf der nächsten Seite zusammengestellten Fälle.

Nach ihnen beträgt der Durchmesser der Wolkensäule im Durchschnitt nur 0,22 der Spurbreite; nehmen wir also für letztere den im achten Kapitel abgeleiteten Wert von 192 m an, so würde der Durchmesser der Wolkensäule etwa 40 m werden, wodurch die vorangehenden Ausführungen über die Unterschätzung der Trombendimensionen bestätigt werden. In unserer Tabelle schwankt das Verhältnis $\frac{a}{b}$ zwischen $\frac{1}{3}$ und $\frac{1}{10}$. Es ist in der Tat nicht anzunehmen, daß dies Verhältnis konstant ist, wie schon aus den Fällen hervorgeht, in denen die Wolkensäule immer breiter wird, schließlich in mittleren Höhen verschwindet und eine innere, dünnere Röhre erkennen läßt, welche dann wieder an Breite zunimmt, während die äußere sich ganz auflöst. (Dieser Vorgang wurde z.B. bei der von Bigelow beschriebenen Wasserhose von Cottage City (Nordamerika) beobachtet. Durch Ausmessung der Photographie (Fig. 53) konnte dort der Durchmesser der Wolkensäule zu 72 m, der der Wasserstaubwolke des Fußes zu 220 m (Verhältnis also 1:3) exakt gemessen werden. Die zur Ausmessung benutzte Aufnahme wurde kurz vor der Erweiterung erhalten, welche zur Auflösung der äußeren und Bildung der inneren Röhre führte. Die Höhe der Wolkensäule war 1100 m, die des Wasserstaubfußes 128 m. (Bigelow, Studies on the thermodynamics of the Atmosphere, Monthly Weather Review 1906, July, S. 37).

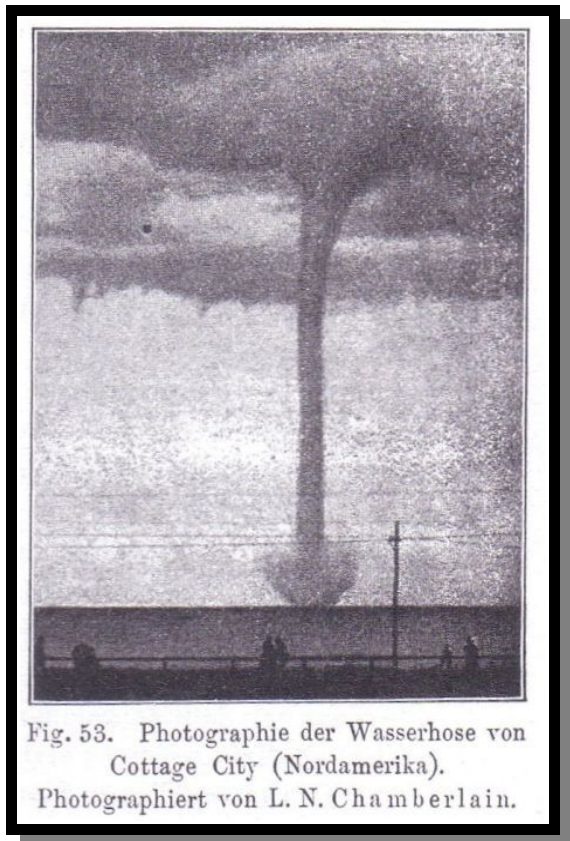


Fig. 53. Photographie der Wasserhose von Cottage City (Nordamerika).
Photographiert von L. N. Chamberlain.

Nr.	Durchmesser		$\frac{a}{b}$	Bemerkungen
	der Säule (a) m	des Fußes (b) m		
53	7,5	39	0,19	<i>a</i> und <i>b</i> einzeln geschätzt. $\frac{a}{b}$ direkt nach Photographie.
74	7,5	24	0,31	
91	15—20	75—120	0,18	
218	20	200	0,10	
218	—	—	0,20	
102	40—60	150	0,33	
	Mittel . .		0,22	

Eine zweite Erscheinung, welche Aufmerksamkeit verdient, ist die **Röhrengestalt** der kondensierenden Säule. Die Kondensation ist auf einen mehr oder minder breiten Röhrenmantel beschränkt, welcher einen nicht kondensierenden Kern birgt. Diese Erscheinung ist bereits sehr lange bekannt, vermutlich solange man genauere Beobachtungen besitzt. Sie wird z. B. bei den Wasserhosen vom 28. August 1701 auf dem Golfe du Lion (Nr. 11) von Alexander Stewart erwähnt: „Bei allen, besonders aber bei der großen Säule bemerkte man, daß sie gegen das Ende anfangen auszusehen wie ein hohler Kanal, bloß an den Rändern schwarz, in der Mitte aber weiß; und obgleich sie anfangs überall schwarz und undurchsichtig war, so konnte man doch sehr deutlich das Meerwasser in der Mitte dieses Kanals aufsteigen sehen.“ Je nach der Beleuchtung können die Ränder dieser Röhre heller oder dunkler aussehen als die Mitte, nämlich heller, wenn sie gegen dunklen, und dunkler, wenn sie gegen hellen Hintergrund gesehen werden. So heißt es z.B. bei Nr. 200: „Dort, wo sich der Schlauch auf hellem Hintergrund (gelbgrüner Abendhimmel mit fernen weißen Haufenwolken) abhob, ging eine helle Linie mitten durch das große Band, deren Breite den vierten Teil der Bandbreite betrug (Es sei dahingestellt, ob nicht durch den kondensationsfreien axialen Raum in der Trombe Licht von oben herabdringen und die Beleuchtungsverhältnisse verändern kann. Die auffällig häufigen Berichte von einer eigentümlichen Helligkeit in der Trombe legen diesen Gedanken nahe. Siehe hierüber auch zwölftes Kapitel.)“ Und bei der gleichfalls hohlen horizontalen Trombe Nr. 159, die sich umgekehrt gegen dunklen Wolkenhimmel abhob, heißt es entsprechend: „Die Längsachse zeigte sich stellenweise als dunkler Kern.“ Die Erscheinung wird insgesamt bei folgenden Beschreibungen erwähnt: Nr. 11—43—49 — 53 (vgl. Fig. 1, S. 18)— 58—118—120—131 —159—192—200 —218 (vgl. Fig. 12, S. 57) —236—237. Bei Nr. 192 handelt es sich um einen hohlen Wolkentrichter.

Bei Nr. 200 wurde die lichte Öffnung der Röhre zu 2 m gemessen, während der äußere Durchmesser 9m betrug; das Verhältnis der Durchmesser war also 0,22. Bei Nr. 218 war es $8 : 20 = 0,40$, und bei Nr. 237, hier allerdings im oberen Teil der Trombe, 0,67, während es unten kleiner wurde. Es ist natürlich nicht anzunehmen, daß die Wandstärke der kondensierenden Röhre immer die gleiche sei; bei blinden Tromben ist sie ja Null, während andererseits bei sehr zahlreichen Tromben, nämlich bei allen heftigeren, die Säule jedenfalls so stark kondensiert, daß der axiale Hohlraum, wenngleich er auch wohl in diesen Fällen vorhanden sein dürfte, doch von außen nicht mehr wahrgenommen werden kann.

So ist z. B. bei Nr. 55 die Rede von „Wolkensäulen“, die so dicht waren, daß man in der Entfernung nicht unterscheiden konnte, ob es Dampf oder Wasser sey“. Eine dieser Tromben kam dem Schiff so nahe, daß man letzteres mit Hilfe eines Ruderbootes fortbugsierte, um einen Zusammenstoß zu vermeiden.

Wenn also trotz einer sehr ins einzelne gehenden Beschreibung in diesem Falle nichts von dem Hohlraum erwähnt wird, so darf man annehmen, daß ein solcher nicht sichtbar war. Dem entspricht auch die schon weiter oben zitierte Erfahrung des Kapitäns Maxwell, daß die Wasserhosen, welche während ihrer vollen Tätigkeit undurchsichtig sind, vor ihrer Auflösung sich in ihrem unteren Teil in eine feine, durchscheinende Röhre verwandeln (vgl. die Fig. 24 auf S. 135). Daß die Röhrenform nur dann erkennbar ist, wenn die Wolkensäule durchscheinend ist, also nur schwache Kondensation herrscht, ist an sich einleuchtend und wird noch besonders bei Nr. 43 hervorgehoben, wo es heißt: „Die Materie, aus der die Trombe bestand, schien sich nicht von derjenigen der erzeugenden Wolke zu unterscheiden, ausgenommen, daß sie mehr durchscheinend war; so konnte man in den unteren Teilen die dahinterliegenden Gegenstände, d. h. das jenseitige Meer, hindurchsehen“, und später nochmals: „Die Materie der Trombe schien mir vollkommen ähnlich der der Wolke zu sein, und ihre Transparenz gestattete zu sehen, daß ihr Inneres vollständig leer war.“ Vgl. hierzu auch das Titelbild (Nr. 83).

Eine weitere, sehr wichtige Ergänzung unseres Bildes vom Bau der Trombe erhalten wir durch die Beobachtungen über **aufsteigende und absteigende Bewegung** in ihr. Den Sachverhalt hat Oersted bereits 1838 mit den kurzen Worten gekennzeichnet: „Man hat eine auf- und eine abwärts gehende Bewegung in der Wettersäule wahrgenommen, versteht sich die eine der Mittellinie näher als die andere.“ Wir wollen zunächst die Beobachtungen sprechen lassen.

Daß in den meisten Tromben eine starke aufsteigende Bewegung vorhanden ist, dafür gibt es so zahllose Belege, daß eine ausführliche Wiedergabe der betreffenden Beschreibungen einen zu großen Raum beanspruchen würde. Wir begnügen uns damit, festzustellen, daß in 21 Beschreibungen das Aufsteigen der Teilchen in der Wolkensäule selber gesehen wurde. Es sind dies die folgenden Nummern:

11 — 32 — 39 — 53 — 55 — 58 — 97 — 113—115 — 129 — 130 144—159 — 178—181—191—196—207—214—218—226.

Es ist aber von großem Interesse, den Wortlaut dieser Beschreibungen zu prüfen, da derselbe Anhaltspunkte darüber zu geben vermag, wo die Zylinderfläche stärksten Aufsteigens relativ zu der kondensierenden Röhre liegt. Bei Nr. 39, 129, 130, 144, 196, 207, 226 wird nur das Aufsteigen erwähnt, ohne daß die Beschreibung eine Andeutung darüber enthält, ob Verschiedenheiten in der Geschwindigkeit dieses Aufsteigens zu bemerken waren:

39. Bei dieser Trombe ließ Michaud sich durch 2 Zeugen folgende Erklärung bescheinigen: „Wir erklären, daß wir ganz deutlich und während des ganzen Vorüberganges der Trombe, ohne Furcht oder Verdacht einer optischen Illusion, ein dampfartiges Fluidum gesehen haben, welches in sehr schnellem Lauf mit stoßweisen aber niemals retrograden Bewegungen in die Wolke hinaufbefördert wurde; meist wogend, einige male spiralig.“

129. „Auf der ganzen Länge der Säule schienen ihre Bestandteile eine rotierende, aufwärts gehende Bewegung zu haben.“

144. Bei dieser Trombe wird in ähnlicher Weise von einer „spiralförmig aufsteigenden Bewegung“ in der Sturmsäule gesprochen.

196. Die Worte „Endlich schien die Rotationsbewegung begleitet zu sein von einer aufsteigenden Bewegung“ scheinen anzudeuten, daß das Aufsteigen im Vergleich zur Rotation nur schwach war. An einer anderen Stelle der Beschreibung wird die Neigung der Luftbahnen gegen den Horizont, wenngleich in etwas unklarer Weise, zu 12—15° angegeben. 207. Bei dieser Trombe „zeigte sich eine intensive aufwärtsgerichtete Schraubenbewegung.“

Die aufsteigende Geschwindigkeit ist also recht verschieden; aber in keiner von diesen Beschreibungen ist davon die Rede, daß die verschiedenen Teile der Wolkensäule verschieden große vertikale Geschwindigkeiten besäßen. Dies ist bei den folgenden der Fall, und zwar läßt sich die nächste Gruppe nur so deuten, daß die vertikal nach oben gerichtete Bewegungskomponente für den Innenrand des Wolkenmantels größer war als für den Außenrand, die Fläche größter Vertikalgeschwindigkeit also ungefähr mit dem Innenrande zusammenfiel.

11. „Indessen unterschied man sehr gut, daß das Seewasser die Bohre hinaufstieg wie der Rauch in einem Schornstein, mit großer Geschwindigkeit und beträchtlicher Bewegung.“ — Was der Beobachter hier für Seewasser hielt, können natürlich nur wirbelringartige Verdichtungen an der Innenfläche des Wolkenmantels sein.

58. Bei dieser Trombe wird dasselbe Bild gebraucht und noch deutlicher ausgeführt:

„... .. ziemlich ähnlich einem langen biegsamen Schlauch, in welchem ich die Dünste in Wellen aufsteigen sah, wie man den Rauch aufsteigen sehen würde in einem Ofenrohr, das aus isoliertem [?] Glas wäre; besonders bemerkenswert war, daß das Aufsteigen der Dünste viel bestimmter, viel lebhafter ganz im erdnächsten Teil war, und daß in diesem selben Teil die Bewegung äußerst sichtbar war; dies untere Ende mochte etwa 8—400 Fuß über der Erde sein. Die Dämpfe stiegen in dieser Trombe auf, ohne daß es mir auf irgend eine Weise möglich war zu sehen, woher sie kamen, indem ich unter der Trombe nichts aufsteigen sah.“ 113. Auch bei der Beschreibung dieser Wasserhose finden wir dasselbe Bild von dem durchsichtigen Schornstein wieder: „... .. in ihrer Bewegung gleichend einem riesigen durchscheinenden Schornstein, in welchem das Wasser rauchartig, wirbelnd seinen Weg gen Himmel nahm. Ich hatte Zeit, dies anzuschauen und war sehr betroffen über den wirbelnden Dampf, welcher in dieser glasartigen Bohre hinaufrollte.“

32. „Auf ihre Länge verteilt enthielt sie 5—6 Ausbuchtungen [wohl Verdickungen] und hatte auch durchscheinende Stellen, die das Aufsteigen des Wassers erkennen ließen.“

In allen vier Fällen ist offenbar anzunehmen, daß nur der Innenrand des Wolkenmantels mit seinen rollenartigen Verdichtungen eine starke Bewegung nach oben hatte, welche vom Beobachter unwillkürlich auf das in Wirklichkeit vollkommen klare Innere der Röhre übertragen wird. Der äußere Teil des Wolkenmantels dagegen, das „gläserne Rohr“, kann offenbar nicht die gleiche Bewegung nach oben gehabt haben, lag also bereits außerhalb der Zylinderfläche stärksten Aufsteigens.

Das Umgekehrte ist in den folgenden Beobachtungen der Fall:

214. „Für das unbewaffnete Auge verharrte dieser Wolkenkegel anscheinend in völliger Ruhe; ein Fernrohr mit 13-facher Vergrößerung ließ indessen, namentlich an namentlich an den Rändern, eine sehr starke, fast kochende Bewegung aufwärts flatternder Wolkenschleier erkennen.“ 191. (Fig. 54.) „Sofort veränderte dann die Wolke ihr Aussehen, indem sie sich, von der Spitze ausgehend, von unten nach oben hin schnell auflöste, wobei zur Seite des Schlauches und des Trichters schwarze Wölkchen in rollender Bewegung nach oben stiegen, einem schwarzen, aufwirbelnden Bauche sehr ähnlich.“

— Wenn auch der Beobachter bei der Beurteilung dieser Verhältnisse leicht optischen Täuschungen ausgesetzt ist, zumal es sich oft um

schwer auffaßbare Bewegungsvorgänge handelt, scheint mir aus den angeführten Beobachtungen doch soviel hervorzugehen, daß der sichtbare Wolkenmantel meist mit der Zone größter Vertikalgeschwindigkeit zusammenfällt: bisweilen kann letztere aber auch mit dem Innenrande des Mantels, und andererseits auch, wenngleich seltener, mit seinem Außenrande zusammenfallen.

Als Gegenstück sollen nun diejenigen Beobachtungen besprochen werden, in denen von einer absteigenden Bewegung in der Trombe berichtet wird:

237. Bei dieser Trombe wird nur eine langsam absteigende Bewegung erwähnt, ohne daß daneben noch eine aufsteigende Bewegung geherrscht hätte.

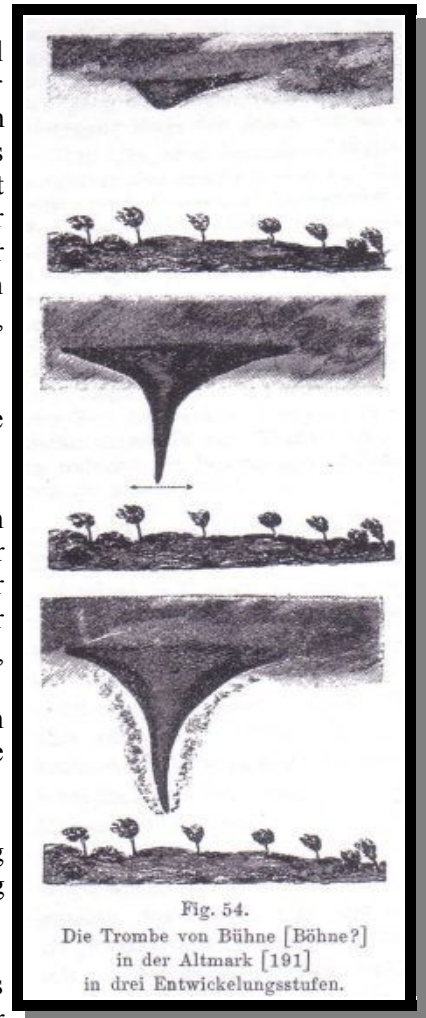
244. Das gleiche gut für die Wasserhose Nr. 244, welche über das Schiff des Beobachters fortging: „Er war ihr so nahe, daß er vollkommen erkennen konnte, wie das Wasser, aus welchem die Trombe bestand, herabstieg.“

224. Bei dieser Trombe hat der Beobachter in seiner Skizze (Fig. 74) Pfeile hineingesetzt, die absteigender Bewegung entsprechen; im Text wird diese Bewegung nicht erwähnt.

In den folgenden Fällen endlich wird auf- und absteigende Bewegung gleichzeitig neben einander beobachtet:

85. Hier heißt es von einem Arbeiter, der in den Fuß der Trombe hineingeriet: „Aber er behauptet, zwei Strömungen in demselben verspürt zu haben, wovon die eine schief nach oben gegangen sey, und Kornhalme mit Aehren und andere leichte Körper mitgenommen, die andere aber die entgegengesetzte Richtung gehabt habe.“

53. [Aus 100 Schritt Abstand.] „Es schien mir, daß die Tropfen, woraus der Cylinder bestand, nicht senkrecht herabfielen, sondern schraubengängig herabflossen und zum Theil in einer entgegengesetzten Richtung sich hinaufwandten“ (Fig.1). Nach Hinwegschreiten der Wasserhose über das Schiff heißt es weiter: „Es kam mir abermals so vor, als wenn das Wasser in dem Cylinder sich wie zwei Schrauben von einer Seite herab-, und von der anderen hinauf wand.“



55. „... kam es mir vor, als wenn bei jeder dieser Säulen das Wasser sich aus dem Meere in die Höhe erhöbe und zu den Wolken hinanstiege, und dagegen das Wasser der Wolken zum Meere herabströme. Wenigstens war eine außerordentlich schnelle Bewegung- von oben nach unten und von unten nach oben hinauf sehr bemerklich. Indessen schien doch auch zugleich das Wasser in concentrischen horizontalen Kreisen, die sich stets veränderten, zu laufen, welches ich sehr deutlich durch ein gutes Fernrohr, das ich zur Hand nahm, beobachten konnte.“

Die folgenden Beobachtungen sind unklarer; anscheinend ist es den Beobachtern bei ihnen nicht gelungen, diese Bewegungsverhältnisse aufzufassen. Gemeinsam ist ihnen, daß die aufwärts gerichtete Bewegung gegenüber der abwärts gerichteten stark in den Vordergrund tritt:

218. „Man konnte genau sehen, wie das Wasser hinaufschob; auf der hinteren Seite fielen vom oberen Teil der Säule ganze Fetzen herunter.“ Ein anderer Beobachter sagt, „*daß* — dem Auge ganz gut sichtbar — eine Dunstmasse *gegen* Süden an dem Biesenbaume hinauf und dann *gegen* Norden herunter flutete.“ Übrigens kann man die Verdichtungen, welche an der Außenseite der Säule nach oben wanderten, sehr gut auf den Photographien Fig. 11 und 12 erkennen.

181. „Deutlich und scharf war zu sehen, wie die Luft von unten nach oben in der Röhre strömte. .. Die aufsteigende Luft, einige Mal auch niederfliegende, ging außerordentlich schnell in Spiralforn von rechts nach links.“

159. Bei dieser horizontalen Trombe, bei welcher interessanterweise gleichfalls eine Bewegung der Wolkenteilchen in Richtung der Achse bemerkt wurde, und zwar vom spitzen zum breiten Ende

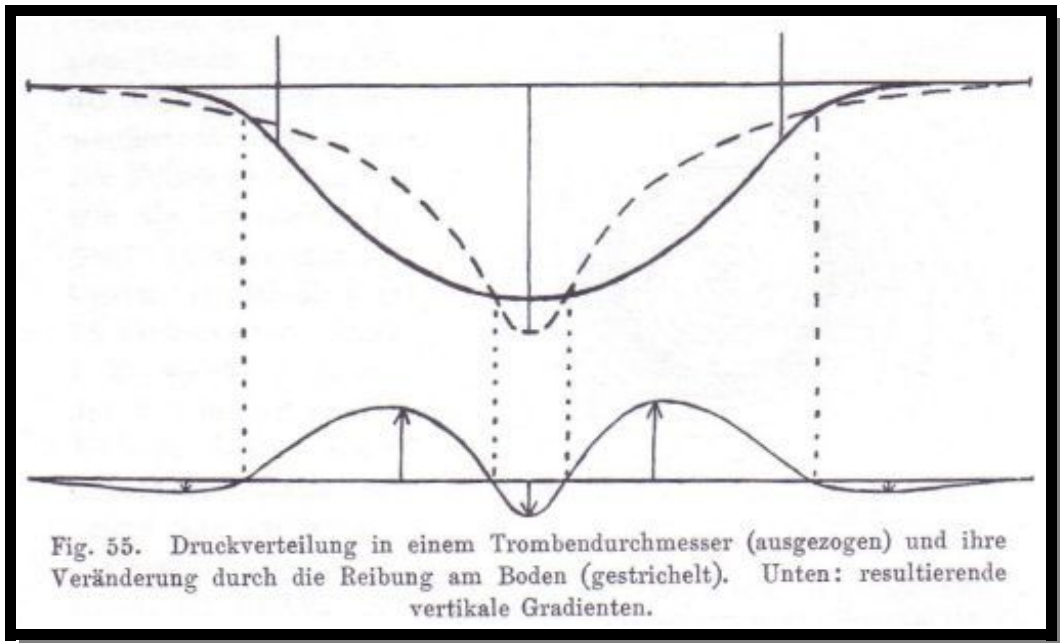
hin, kam es dem Beobachter zum Schluß vor, „als ob die in der Ferne herankommenden Dämpfe plötzlich in retrograde Bewegung kämen“. Da die Wirbelbewegung kaum ihren Sinn umgekehrt haben kann, ist es vielleicht die Bewegung längs der Achse, welche sich umkehrte.

178. In einer besonderen Weise wird bei der Windhose von Oldenburg über absteigende Bewegung berichtet. Während sonst die „kreisend aufsteigende Bewegung“ hervorgehoben, und erwähnt wird, daß am oberen Ende der Windhose die emporgerissenen Gegenstände „auf eine Weite von 200 m“ hinausgeschleudert wurden, heißt es in der Erläuterung zu der auf S. 50 (Fig. 7) bereits mitgeteilten Skizze: „Die Bewegung war außen eine korkzieherförmig absteigende; im Innern der Hose wurden die Wolken anscheinend wieder mit großer Geschwindigkeit nach oben gezogen.“ Nach meiner Auffassung dieser Figur, die noch weiter unten erläutert werden wird, stellt sie bereits einen äußeren Mantel dar, und die eigentliche Säule, die hier unsichtbar geworden ist, entspricht nur dem mittelsten Teil des Ganzen. Übrigens ist zu beachten, daß es sich hier um den dicht unterhalb der Wolkendecke liegenden Teil des Wirbels handelt, in welchem die Bewegungsverhältnisse nicht dieselben zu sein brauchen wie im unteren Teil.

Die Gesamtheit dieser Beobachtungen über auf- und absteigende Bewegung in der Trombe liefert also etwa folgendes Bild: Die aufsteigende Bewegung überwiegt bei weitem, anscheinend besonders auf dem Lande, weniger bei Wasserhosen. Die Geschwindigkeit des Aufstiegs scheint von unten nach oben abzunehmen; ihr Maximum erreicht sie in einem Abstände von der Wirbelachse, welcher der kondensierenden Röhrenwand entspricht, mitunter aber auch deren Innen- oder Außenrand. Die häufig gleichzeitig beobachtete absteigende Bewegung erreicht ihr Maximum wahrscheinlich in der Achse, wo eine solche schon wegen der Auflösung der Wolken jedenfalls vorhanden sein muß.

Andererseits aber scheint, wie die letztgenannte Beobachtung zeigt, auch der aufsteigende Mantel noch wieder von einem absteigenden umgeben zu sein, der bei stärkerer Ausbildung wohl eine ringwulstartige Senkung der Wolkenbasis zur Folge hat und damit zu der noch zu besprechenden Erscheinung der Doppelröhre hinüberleitet. Die Nr. 7 der in Fig. 62 (S. 221) abgebildeten Tornadowolken kann diesen Vorgang ebenfalls veranschaulichen.

Dies Ergebnis stimmt schlecht zu der Ansicht, daß der auf-, oder absteigenden Bewegung eine mehr als sekundäre Rolle in der Mechanik der Tromben zukommt. Es ergibt sich vielmehr eine ungezwungene **Erklärung** für sie aus dem Einfluß, welchen die Bodenreibung auf den Trombenwirbel ausübt. Dies läßt sich mit wenigen Worten an der Hand der Fig. 55 erläutern. Darin stellt die ausgezogene Linie die Druckverteilung im Trombenwirbel dar, wie sie auf S. 194 berechnet wurde, und wie sie in größerer Höhe über dem Boden, wo die Reibung an letzterem keine Rolle mehr spielt, auch nahezu erreicht sein dürfte. Im untersten Teil des Wirbels bewirkt nun die Reibung, daß die Luftbewegung einen mehr turbulenten Charakter annimmt; die Luftteilchen behalten hier nicht ihren Abstand von der Achse unverändert bei, und die Bewegungsform nähert sich deshalb dem auf S. 189 in Fig. 47 dargestellten Schema. Dadurch wird aber auch die Druckverteilung in diesem Teil der Trombe nach der gleichen Richtung hin verändert, so daß sich die ausgezogene Druckkurve in Fig. 55 in die gestrichelte Kurve verwandelt. Hieraus lassen sich aber folgende Schlüsse ziehen:



Im untersten Teil der Trombe muß ein eigentümliches System vertikaler Gradienten entstehen, welches in der unteren Hälfte der Figur dargestellt ist: in der Achse ein stark abwärts gerichteter Gradient, außen umgeben von einer Zone sehr starker aufwärts gerichteter Gradienten, die ihrerseits wieder umgeben ist von einer Zone schwacher nach unten gerichteter Gradienten. Hierdurch erklärt sich eine absteigende Luftbewegung in der Wirbelachse und eine mit der Reibung wachsende aufsteigende Bewegung in einem Zylindermantel, welche der kondensierenden Wand der Hohlrohre entspricht; außen ist diese Zone wieder von schwach absteigender Bewegung umgeben. Die aufsteigende Bewegung muß überwiegen, weil im ganzen die Reibung verzögernd wirkt und also die Druckverminderung schwächt, so daß die nach oben gerichteten Gradienten überwiegen. Da diese vertikalen Gradienten, und mit ihnen der Luft- und Energieaustausch in Richtung der Wirbelachse um so stärker werden, je größer die Reibung am Boden wird, so wird gerade bei großem Energieverbrauch am Boden die Herbeischaffung neuer Energiemengen aus den oberen Teilen der Trombe äußerst schnell von statten gehen; der Fuß der Trombe verfügt also sozusagen über die Energie der gesamten Trombe, auch wenn diese — wofür später Beispiele gegeben werden — eine Länge von 10 bis 20 km besitzt. Man kann den Fuß dieses Wirbels nicht bremsen, ohne ihn zugleich auf seiner ganzen Länge zu bremsen. Daher die scheinbar paradoxe Unerschöpflichkeit dieser Wirbelenergie, welche eine Stunde lang ohne Unterbrechung Bresche durch einen Wald schlagen kann, ohne Spuren des Nachlassens zu zeigen. An weiteren Einzelheiten zeigt unsere Figur noch, daß die Zylinderfläche des stärksten Aufstiegens einen viel kleineren Durchmesser hat als die Grenze zwischen „Kern“ und „Mantel“ der Trombe; die größte Rotationsgeschwindigkeit liegt also noch außerhalb der Wolkensäule. Auch bemerkt man, daß der Wirbel durch die Reibung am Boden verbreitert wird.

Stromlinien der Hohlröhre. Es ist am Platze, hier auf ein Ergebnis hinzuweisen, zu welchem Sandström bei der theoretischen Konstruktion der Stromlinien atmosphärischer Wirbel gelangte (J. W. Sandström, Über die Bewegung der Flüssigkeiten. Ann. d. Hydr. u. Marit. Met. 1909, S. 243 ff.). Danach lassen sich die Stromlinien als graphische Lösung einer Differentialgleichung darstellen, und zwar lautet diese, wenn als Form die arithmetische Spirale zugrunde gelegt wird:

$$\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg} \left(\sqrt{x^2 + y^2} + \operatorname{arctg} \frac{y}{x} - a \right).$$

Durch Variieren von a verändern sich nun die Stromlinien derart, daß sich vom Mittelpunkte eine kreisförmige "Trennungslinie" ausscheidet, welche bei weiterer Änderung von a sich konzentrisch erweitert. In diese Trennungslinie strömt die Luft von beiden Seiten unter gleichsinniger Drehung hinein.



In ihr selber muß die Luft also aufsteigen, in der Achse des Wirbels steigt sie ab. Die nebenstehende Fig. 56 zeigt diese Wirbelstromlinien.

Sandström selber wendete sie auf das „Auge“ der tropischen Cyklone an; sie gelten aber in genau gleicher Weise für die Tromben. Überhaupt verhalten sich die Tropencyklonen bezüglich des Bewegungssystems, wenigstens ihres inneren Teiles, ganz ähnlich wie die Tromben. In den Registrierungen der Cyklone von Manila vom 19. bis 20. Oktober 1882 z. B., welche v. Hann auf S. 608 der dritten Auflage seines Lehrbuches reproduziert, erkennt

man im Bereich des starken Barometerfalles ein Sinken der Temperatur um etwa 1° und Steigen der Feuchtigkeit um 10 Proz. Bei Annäherung an das Zentrum: bei Erreichung desselben wird ein plötzlicher Temperaturanstieg um 7° und ein Fall der

relativen Feuchtigkeit von 100 auf 43 Proz. beobachtet, während $\frac{1}{4}$ Stunde lang Windstille, nur unterbrochen von einzelnen Stößen, herrschte. Hier läßt sich also die mit der Druckverminderung verbundene Temperaturenniedrigung, die bei den Tromben zur Kondensation der Wolkensäule führt, direkt verfolgen, und das Absteigen der Luft in der Wirbelachse läßt sich hier mit Thermometer und Hygrometer beweisen. Bei den Tromben liegen begrifflicher Weise derartige Messungen bisher nicht vor.

Doch sei eine — leider gänzlich vereinzelt — Beobachtung erwähnt, die vielleicht hierher gehört: Bei der Windhose von Oldenburg (Nr. 178) berichtete der Schäferjunge, der in sie hineingeriet, es sei heiß darin gewesen. Da die Luft in 1500 m meist etwa 7° höhere potentielle Temperatur besitzt als die am Erdboden, so müßte eine Trombe, in deren Achse die Luft aus dieser Höhe herabsteigt, trotz des Druckdefizits noch etwa 5° Temperaturüberschuß im Innern aufweisen, was immerhin für das Gefühl schon merklich sein dürfte. Damit soll freilich nicht gesagt sein, daß einer so vereinzelt Beobachtung schon größere Bedeutung beizumessen sei. Allein man darf aus dem Gesagten wohl die Mahnung entnehmen, bei künftigen Trombenpassagen über meteorologische Stationen nicht nur den Barographen, sondern auch die übrigen registrierenden Instrumente zu beachten.

Doppelröhren. Eine weitere Erscheinung, welche den bisher geschilderten Bau des Trombenwirbels nicht selten modifiziert, ist die Ausbildung von Doppelröhren. Statt der einen Wolkenröhre erscheinen dann zwei konzentrische, von denen die äußere meist unvollständig ist und so die innere erkennen läßt. Auch hier seien zunächst die Beobachtungen angeführt:

205. Auch wenn die äußere Röhre als solche nicht ausgebildet ist, so läßt doch die Form der Wolkenbasis in der unmittelbaren Umgebung der Trombe oft bereits die Tendenz dazu erkennen, indem in einigem Abstände von ihr ein ringförmiger Wulst an der Unterseite der Wolke erkennbar ist. Sehr deutlich ist dies z. B. geschildert bei Nr. 205: „... fanden sich solche [Wolkenzapfen] an anderen Stellen, von Wolkenwülsten ringförmig umgeben, die deutlich die wirbelnde Bewegung um den Zapfen erkennen ließen, aber augenscheinlich von bedeutend größerem Durchmesser waren wie die Wasserhose.“ Auch in der Originalphotographie der Wasserhose vom Zugersee (Nr. 218) kann man diesen Ringwulst leidlich erkennen. Sein Durchmesser ist hier etwa drei- bis viermal so groß wie der Durchmesser der Trombe in der gleichen Höhe. Zwischen Wulst und Trombe befindet sich eine kuppelartige Wölbung. In der Reproduktion (Fig. 11, S. 56) sind diese Einzelheiten leider verloren gegangen.

210. Ganz ähnlich ist die Beschreibung bei Nr. 210: „Um den oberen breiteren Rand desselben [des Wolkentrichters] befand sich ein hellgrauer Kreis, der den Trichter umkreiste und auf- und abwogte.“

142. Wenn ferner die Wasserhose Nr. 142 aussah „wie der Stiel eines Regenschirmes im Verhältnis zum Schirm, wenn die Wolke den Schirm repräsentiert“, so würde dies Bild doch recht gesucht sein, wenn der Autor damit nur den geringen Durchmesser der Trombe bezeichnen und nicht zugleich die Wolkenkuppel mit der Wölbung des Regenschirmes vergleichen wollte.

115. Bei Nr. 115 hatte der Wolkenzapfen die Form eines schiefen umgekehrten Kegels, dessen Basis wie ein Nagelkopf geformt war“. Diese Bezeichnung ist zwar unklar, scheint sich aber doch auf die Kuppel und den umgebenden Ringwulst zu beziehen (Wegen der Objektivität der Photographie sei hier auch noch eine der von Bigelow veröffentlichten Aufnahmen der Wasserhose von

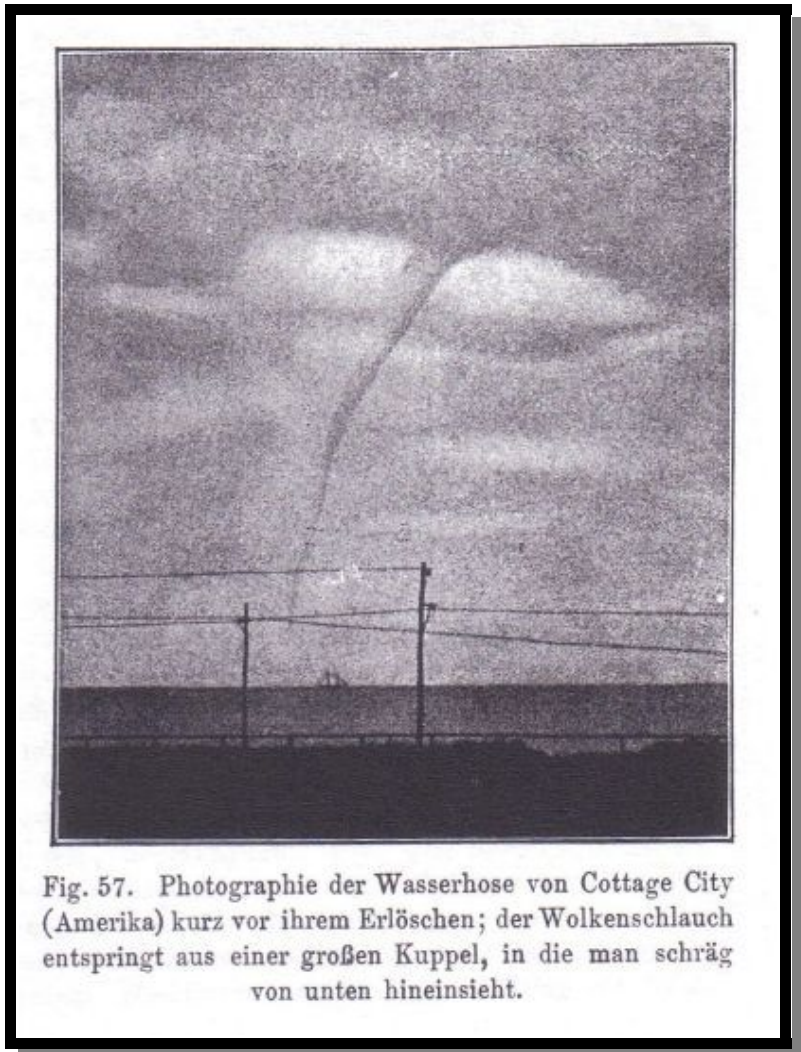


Fig. 57. Photographie der Wasserhose von Cottage City (Amerika) kurz vor ihrem Erlöschen; der Wolkenschlauch entspringt aus einer großen Kuppel, in die man schräg von unten hineinsieht.

Cottage City wiedergegeben (Fig. 57), welche dieselbe kurz vor ihrem Erlöschen zeigt, nachdem sie sich bereits vom Meere abgehoben hatte. Der weiße Fleck in der Wolkendecke an der Wurzel der Trombe ist offenbar die gegenüberliegende Innenwand der Kuppel, in deren Mitte der Zapfen in die Wolke eintritt.) Viel deutlicher wird die Doppelröhre aber in den folgenden Beispielen, in denen die äußere Röhre in ihrem oberen Teil vollkommen ausgebildet ist, so daß die sichtbare Trombe aus einem dickeren oberen Teil und einem dünneren unteren besteht, welche mehr oder weniger scharf gegeneinander abgegrenzt sind.

228. Bei der Trombe von Solingen wurden drei Skizzen erhalten (Fig. 58), deren linke die angegebene Form zeigt. Als Rotationskörper gedacht, stellt dieselbe offenbar zwei in einander steckende Kegel dar, von denen der äußere größere abgestumpft ist.



Fig. 58. Die Trombe von Solingen [228] in drei Erscheinungsformen.
Links Doppelröhre.

127. Ein ganz ähnliches Bild scheint die Trombe Nr. 127 geboten zu haben: „... erschien in beträchtlicher

Höhe über dem Horizonte ein ungeheurer Kegel, der rasch um seine Achse rotierte; die äußere Oberfläche des Kegels erschien grünlich, seine Basis grau. In Wahrheit waren es zwei Kegel, einer innerhalb des anderen. Die Basis des inneren senkte sich etwas tiefer als die des äußeren.“

48. Bei der Wasserhose von Nizza, Nr. 48, beschreibt Michaud mit Wort und Bild (Fig. 59) dieselbe Erscheinung: "Die merkwürdigsten Umstände bei diesen Wasserhosen waren: 1. Der außerordentlich große lation, und endlich sich unten öffnete, und nun sah der Arbeiter von dem erweiterten Ende desselben eine gerade Säule, welche er mit einem Wurfspieße verglich, zur Erde herabgehen, die auch als dichter Körper ziemlich weit aufwärts in der Wolke zu sehen war. ..."

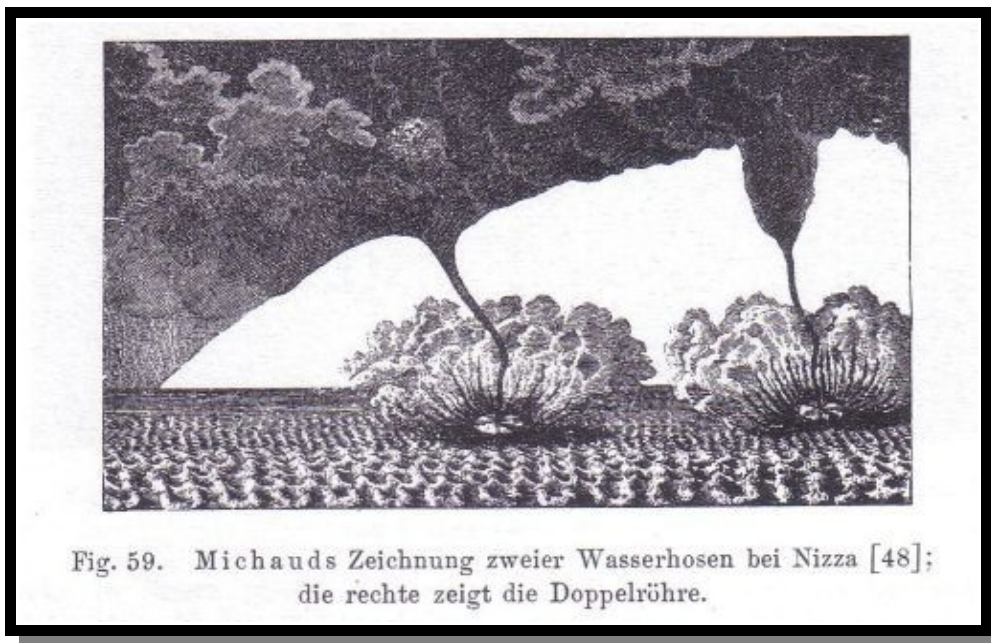


Fig. 59. Michauds Zeichnung zweier Wasserhosen bei Nizza [48];
die rechte zeigt die Doppelröhre.

55. Auch die folgende Beschreibung der Wasserhosen Nr. 55 dürfte hierher gehören; „Die Säulen waren alle sehr gleichförmig und in jeder Entfernung von der Oberfläche des Meeres gleich dick. .. Oben und unten allem, wo sich die Säulen in den Wolken und im Meere verloren, hatten sie eine weit beträchtlichere Peripherie, denn an diesen beiden Orten erblickte man unzählige Wirbel und Schneckengänge, die das hinauf- und herabrollende Wasser bildete, und die den Säulen das Aussehen gaben, als wären sie mit Kapitälen versehen.“

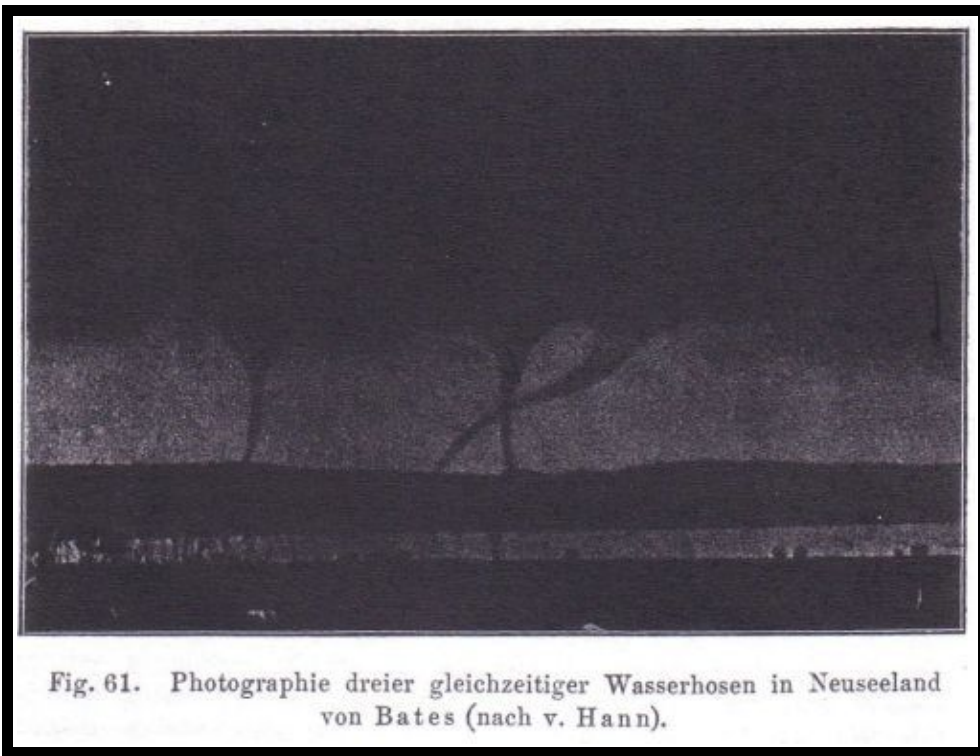
Da die kontinuierliche, trichterförmige Erweiterung, welche der Wolkenschlauch gewöhnlich in Höhe der Wolkenbasis erfährt, nicht zu der Vorstellung von Kapitälen passen würde, muß auch hier der charakteristische Absatz zwischen der äußeren und inneren Röhre vorhanden gewesen sein.

218. Es sei auch auf die Photographie der Wasserhose auf dem Zugersee (Fig. 11) hingewiesen. Denn wenn hier auch nicht eine so breite äußere Röhre vorhanden ist wie in den früheren Fällen, so erkennt man doch, daß der obere Teil der Trombe die Struktur eines umgekehrten Schachtelhalmes zeigt, indem in mehreren Höhen sprungweise Verbreiterungen einsetzen. Es ist nicht unwahrscheinlich, daß es sich hier um prinzipiell dieselbe Erscheinung handelt, wie bei den mehrfachen in einander steckenden Röhren.

118. Endlich ist noch die Wasserhose Nr. 118 zu nennen. Zwar enthält das Tagebuch-Manuskript von Natalie Köppen nichts, was auf Doppelröhren schließen ließe; indessen hat Professor Köppen, der gleichfalls Augenzeuge war, nachträglich (1915) den Bericht dahin ergänzt, daß auf ihn am meisten Eindruck das Abfallen der wolkigen Hülle und das Erscheinen des dünnen Schlauches ganz nach Art einer Photographie der Wasserhose von Cottage City gemacht habe. Letztere ist in Fig. 60 wiedergegeben.

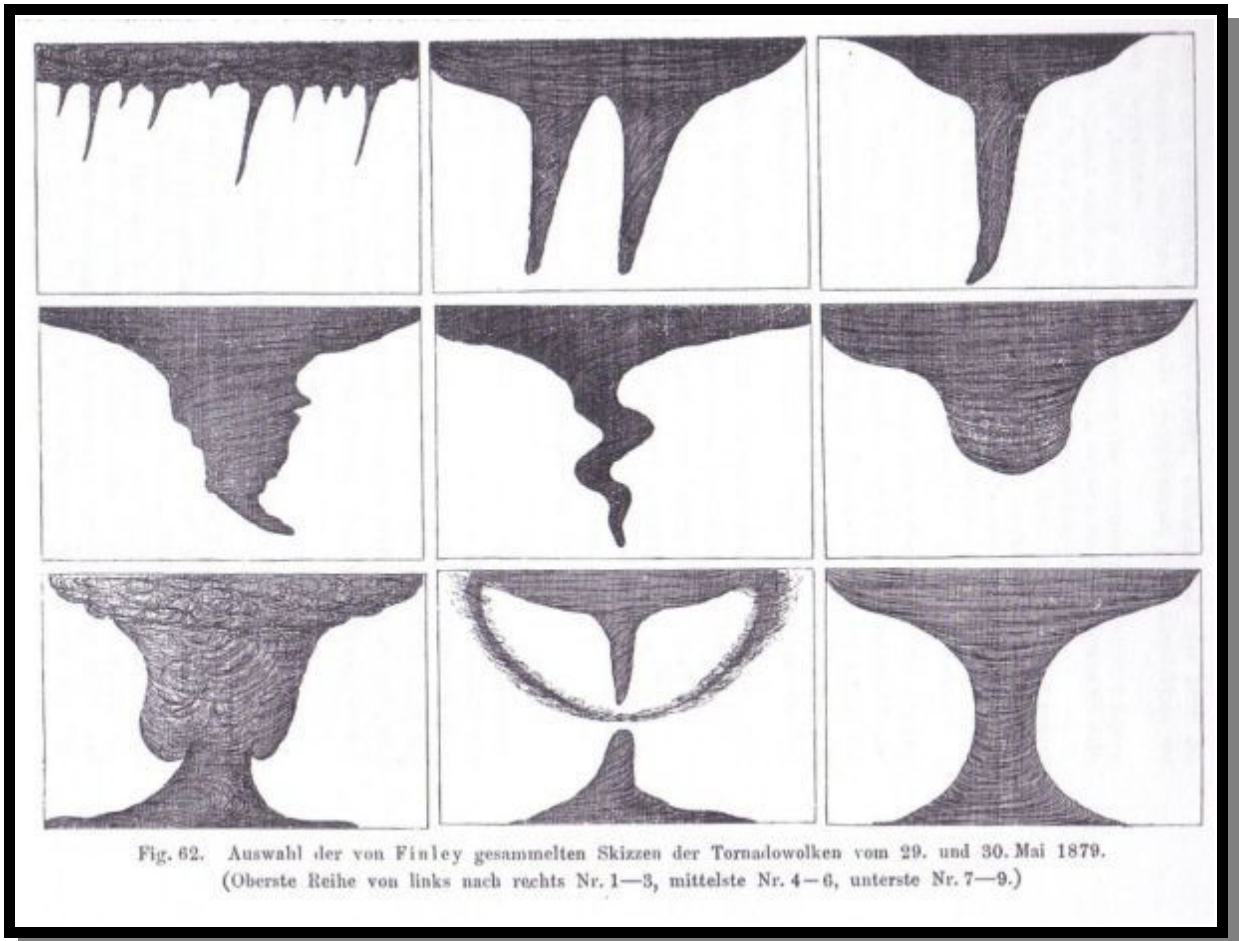


Besonders interessant ist es, daß bei dieser amerikanischen Wasserhose die Reihe von Photographien, welche Bigelow veröffentlicht hat, es gestattet, die Umbildung von der einfachen Röhre zur Doppelröhre zu



verfolgen: Die Röhre nimmt immer größeren Durchmesser an, bis sie zerzaust wird und in der Mitte aufbricht, wodurch eine zweite, zunächst sehr dünne zentrale Röhre sichtbar wird. Während dann die Reste der äußeren Röhre sich mehr und mehr auflösen, nimmt die innere wiederum an Durchmesser zu, bis sie, gänzlich frei, wieder die normale Dicke hat.

83. Unter den im Titelbild dieses Buches abgebildeten Wasserhosen befindet sich eine (vielleicht zwei), die bei auffälliger Breite durchscheinend sind und im Innern noch eine schmalere Wolkenröhre erkennen lassen (Diese noch fast gar nicht beachtete Eigentümlichkeit der Tromben, bisweilen Doppelröhren zu bilden, kommt auch in zahlreichen anderen außereuropäischen Beobachtungen zum Ausdruck. Wegen der Objektivität der Darstellung sei hier eine von Bat es in Neuseeland erhaltene Photographie dreier gleichzeitiger Wasserhosen wiedergegeben (Fig. 61; nach v. Hann, Lehrb. d. Met., 3. Aufl., S. 727), von denen namentlich die linke in ihrem oberen Teil eine Verbreiterung zeigt, die anscheinend nicht einer bloßen Trichterform, sondern wohl dem Übergang von der äußeren zur inneren Röhre entspricht. Ferner sei auf die in Fig. 62 wiedergegebene Auswahl von Tornadoskizzen von Finley hingewiesen, von denen Nr. 7 und 8 die Doppelröhre, Nr. 3 und 6 in ihrem obersten Teil immerhin einen Ansatz dazu zeigen. (Finley, Report of the Tornados of May 29 and 30, 1879, in Kansas, Nebraska, Missouri, and Jova, Professional Papers of the Signal Service Nr. 4, Washington 1881.)



39. Endlich sei noch eine vereinzelte Beobachtung besonderer Art erwähnt, welche vielleicht eine Beziehung zu den Doppelröhren hat. Es handelt sich um die nebenstehend abgebildete Erscheinung der Wasserhose Nr. 39. Zuerst zeigte sie die gewöhnliche Form ; als sie aber vor dem Hafen von Nizza anlangte, der am Ausgange eines Tales liegt, „wurde sie von einer sehr lebhaften, aus N kommenden Luftströmung getroffen (Fig. 63). Diese versuchte, den Körper der Trombe zu zerreißen, und es gelang ihr schließlich, sie am Punkt *a* [der Unterbrechungsstelle} anzuschneiden. Der untere Teil erschien darauf wie von großen Federbüschen begrenzt, die durch den Wind zurückgestoßen und sogar einige Male stark nach hinten umgekippt wurden und durch fortwährendes, aber vergebliches Aufschnellen unausgesetzt Anstrengungen machten, sich mit dem Stumpf wieder zu vereinigen; das sehr zugespitzte, um den Betrag der abgelösten Teile zusammengeschnitzte Ende des oberen Teiles hielt gleichwohl an dem unteren Teil fest und fuhr fort, Wasser zu pumpen, welches man wie vorher in die Wolken steigen sah, während der untere Teil der Trombe, der seine früheren Dimensionen behalten hatte, im Winde hin und her schwankte, sich verlängernd und verkürzend, aber ohne sich von der auf strömenden Stelle der Meeresoberfläche zu entfernen, die mit den Wolken von Ost nach West zog.

Als die Trombe vor dem Schlosse angekommen war, und sich wieder in Windschutz befand, vereinigte sich das abgerissene Ende wieder mit dem Stumpf, und bald nahm das Ganze wieder seine anfängliche Form an." Hier scheint es sich um eine Röhre zu handeln, die nur im oberen breiteren Teile doppelt war, wo aber die äußere Röhre für einige Zeit durch die Luftströmung zerstört wurde. Übrigens hat hier auch der Wolkenwulst, aus dem die Trombe herauskommt, große Ähnlichkeit mit der Doppelröhre.

Die Abbildung und Beschreibung der eigenartigen Unterbrechungsstelle erinnert stark an ein von Vettin experimentell erhaltenes Gebilde, welches in der Fig. 64 wiedergegeben ist (Vettin, Meteorologische Untersuchungen. Pogg. Ann. d. Phys. 102, 246.).

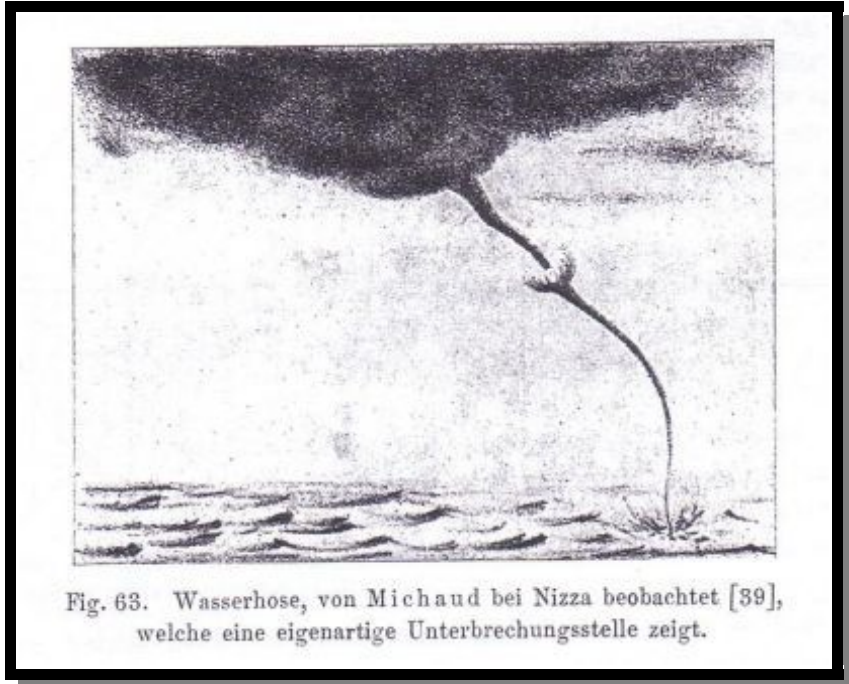


Fig. 63. Wasserhose, von Michaud bei Nizza beobachtet [39], welche eine eigenartige Unterbrechungsstelle zeigt.

Nach Vettins Beschreibung entsteht es dadurch, daß der im Innern des Wirbels absteigende Strom sich wie ein umgekehrter Pilz erweitert und einen Wirbelring bildet, der von dem Hauptwirbel mantelartig umhüllt wird. Ganz ähnliche Geschwülste des Wirbels konnte auch Weyher bei seinen Versuchen mit künstlichen Tromben willkürlich erzielen (Weyher, Sur les tourbillons etc. Paris, 2. Bd. 1889, 8.31.).

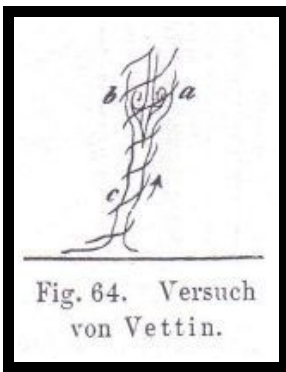


Fig. 64. Versuch von Vettin.

Schließlich sei noch kurz darauf hingewiesen, daß die Doppelröhrenstruktur bisweilen auch im Bau des Fußes, insbesondere des Wasserturmes, zum Ausdruck kommt; hier hat man sogar schon drei in einander geschachtelte Röhren beobachten können. Doch

sollen diese Beobachtungen erst im folgenden Kapitel besprochen werden.

Das Rotationssystem solcher Doppelröhren dürfte wohl in der Weise aufzufassen sein, daß sich im inneren Teil der Trombe, welcher mit überall gleicher Winkelgeschwindigkeit rotiert, nochmals ein Zylinder mit größerer Winkelgeschwindigkeit absondert. Diese Geschwindigkeitsverteilung und die daraus folgenden Druckverhältnisse sind in der nachstehenden Fig. 65 veranschaulicht; der äußere Teil der Trombe ist dabei fortgelassen, d. h. es ist angenommen, daß der gezeichnete Zylinder außen mit einem Gleitwirbel gegen die ruhende Luft endigt. Berücksichtigt man, auf welche Weise die einfache Wolkenröhre durch die Reibung

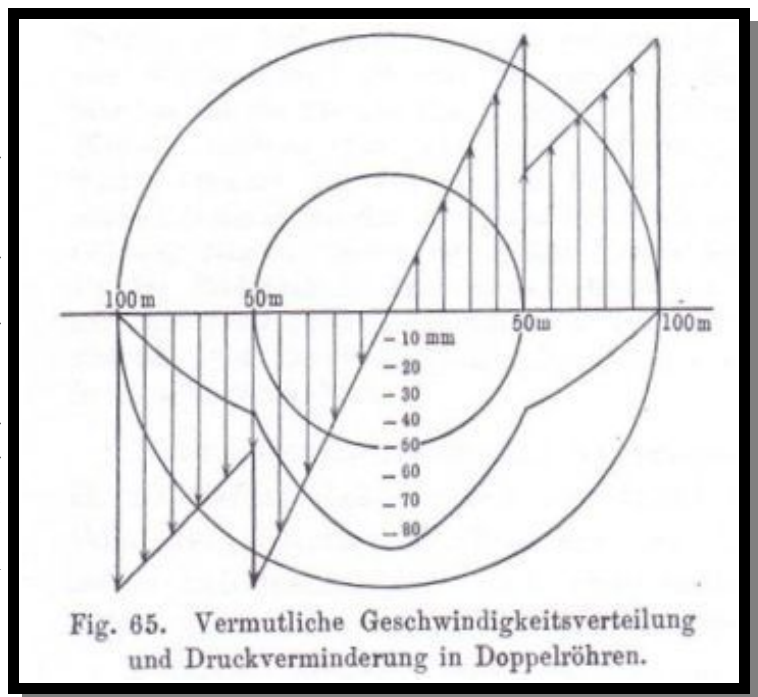


Fig. 65. Vermutliche Geschwindigkeitsverteilung und Druckverminderung in Doppelröhren.

Gelegenheit zur Ausbildung zweier konzentrischer Wolkenröhren geben muß (Coustes Annahme (Annuaire de la Soc. Met. de France 1875), daß die Tromben aus mehreren konzentrischen Röhren von entgegengesetzter Drehung bestehen, entbehrt wohl der Begründung. Vgl. Köppens Referat in Zeitschr. d. Österr. Ges. f. Met. 1883, S. 356, wo es heißt: „Die Grundlage für diese seltsame Annahme liegt darin, daß Hr. Couste bei den Tromben eine vollständige Analogie mit den Turbinen finden zu können glaubte.“)

Die Frage nach der Ursache eines solchen Rotationszuwachses in der Achse der Trombe ist damit allerdings noch nicht berührt. Es liegt aber recht nahe, anzunehmen, daß die Erscheinung mit einer Verstärkung des Wirbels zusammenhängt, welche in höheren Schichten erzeugt wird und sich zunächst längs der Achse nach unten fortpflanzt.

Damit würde auch insbesondere die Beobachtung Nr. 39 (vgl. oben S. 222) stimmen, wo die innere Röhre nur bis zur Mitte der Trombe herabreicht, die äußere aber bis zu dieser Höhe herab zerstört wird.

Wir wollen an dieser Stelle gleich eine Frage behandeln, welche von grundsätzlicher Bedeutung für die Erklärung der Tromben ist, nämlich **ob sich die Tromben noch weiter innerhalb der Wolke fortsetzen**, oder ob sie an der Wolkenbasis endigen.

Die meisten Autoren haben wohl letzteres angenommen oder berühren die Frage gar nicht. Auch mit Oersteds Worten: „Weder in der Erde, noch im Meere oder auch an der Oberfläche der Erde sind die Bedingungen enthalten, welche diese Wirbel hervorbringen können, und sie müssen daher in den oberen Regionen ihren Ursprung haben,“ brauchen nur die Schichten dicht unterhalb der Wolkenbasis gemeint zu sein. In neuerer Zeit hat namentlich Sandström die Ansicht vertreten, daß die Tromben nur aus dem sichtbaren vertikalen Stück bestehen; er hält sie für Randwirbel einer vordringenden Zunge kalter Luft. Von dieser Voraussetzung ausgehend, hat er interessante theoretische Vorstellungen über die Wirbellinien entwickelt, auf welche hier im Anschluß an einige allgemeine Betrachtungen kurz eingegangen werden soll (J. W. Sandström, Über die Wirbelbewegungen in der Atmosphäre. (Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik 7, Nr. 30, 1912.)

Eine "Wirbellinie" erhält man, wenn man von einem wirbelnden Teilchen in Richtung seiner Wirbelachse zum nächsten Teilchen weitergeht und so fort von Teilchen zu Teilchen. Über diese Wirbellinien gibt es eine Reihe theoretischer Sätze; da aber die Theorie für reibungslose Flüssigkeiten gilt, müssen wir bei Anwendungen auf die Natur zwischen kinematischen und dynamischen Sätzen unterscheiden, denn in reibenden Flüssigkeiten brauchen nur noch die ersteren zu gelten, während die letzteren auch nicht annähernd erfüllt zu sein brauchen. Zu den kinematischen Sätzen gehört der, daß die Wirbellinien nicht frei enden können. Dies ist eben eine geometrische Notwendigkeit von derselben Art wie die, daß eine Isobare nicht frei enden kann. Dagegen gehört zu den dynamischen, in der Natur meist nicht erfüllten Sätzen der, daß ein gegebenes Flüssigkeitsteilchen stets auf derselben Wirbellinie bleiben muß, auf der es sich einmal befindet. In reibenden Flüssigkeiten können sich also die Wirbellinien in bezug auf die Teilchen verlagern.

Sandström gibt die nebenstehende Darstellung der Wirbellinien einer Trombe, unter der Voraussetzung, daß dieselbe nicht oben umbiegt, sondern endet. Er berechnet ferner die Anzahl der „Einheitswirbel“ einer Trombe, die ein Maß für ihre Stärke gibt. Der Einheitswirbel wird dadurch definiert, daß er jeder geschlossenen Kurve, die ihn umschließt, die „Zirkulation“ $1 \text{ cm}^2/\text{sec}$ erteilt, und die „Zirkulation“ einer solchen Kurve ist das Integral der Tangentialkomponente der Geschwindigkeit längs derselben. Besteht nun die Trombe aus einem äußeren und einem inneren Teil, deren letzterer mit überall gleicher Winkelgeschwindigkeit rotiert, so läßt sich die Anzahl der Einheitswirbel in diesem berechnen. Ist z. B. sein Radius 25 m (also die Peripherie 157) und die periphere Geschwindigkeit 50 mp. s., so beträgt die Zirkulation dieser Peripherie $50 \times 157 = 7850 \text{ m}^2/\text{sec} = 78,5$ Millionen Einheitswirbel. Da nun die Wirbellinien in der Höhe umbiegen und im äußeren Teil der Trombe sämtlich wieder nach unten zurückkehren, so enthält dieser die gleiche Zahl von Einheitswirbeln, deren Drehungssinn aber entgegengesetzt ist, trotz des gleichsinnigen Kreisens der Luftmassen. Um den Drehungssinn der Einheitswirbel durch die Richtung der Wirbellinien bezeichnen zu können; setzt Sandström fest, daß in einer cyklonal rotierenden Trombe die Wirbellinien des inneren Teiles nach oben, die des äußeren nach unten gerichtet sind.

Aus dem weiteren Inhalt der Arbeit sei nur noch auf die Einführung der „Gleitwirbel“ hingewiesen. Jede mit Windsprung verbundene Schichtgrenze stellt einen solchen Gleitwirbel dar, dessen Wirbellinien alle parallel in der Grenzfläche angeordnet sind. Die Intensität eines Gleitwirbels ist die Anzahl der Einheitswirbel auf jedem Zentimeter senkrecht zu den Wirbellinien. Wenn der innere Teil der Trombe außen statt eines breiten Mantels nur mit einem Gleitwirbel umgeben ist, wie es dem Schema der Fig. 66 entspricht, so laufen alle Wirbellinien aus dem inneren Teil, nachdem sie in der Höhe umgebogen sind, in dieser einen Zylinderfläche zum Erdboden zurück. Die Verhältnisse sind dann die gleichen, wie bei einer im Lager laufenden Stahlachse; das 01 repräsentiert dabei den umgebenden Gleitwirbel. Je langsamer dagegen im Mantel die Geschwindigkeit nach außen abnimmt, desto mehr treten die rückkehrenden Wirbellinien auseinander. Für den Fall, daß das Geschwindigkeitsgesetz $v \cdot r = \text{konst.}$ erreicht ist, haben sie unendlich großen Abstand voneinander, oder mit anderen Worten, in diesem Falle kehren die Wirbellinien des inneren Teiles erst in unendlich großer Entfernung von der Trombe zur Erde zurück, die Umgebung der Trombe ist also ganz frei von Wirbellinien. Obwohl also auch in diesem Falle die Luft des Mantels um die Trombe kreist, bildet sie, theoretisch gesprochen, keinen Wirbel, sondern eine „wirbelfreie“ Strömung. Ein Teilchen, das zur Hälfte schwarz und zur anderen Hälfte weiß wäre, würde bei einem solchen Umlauf mit der schwarzen Seite immer nach derselben Himmelsrichtung zeigen. Wenn wir früher dies Bewegungssystem des Mantels als das Endergebnis einer unendlich langen Einwirkung der Trombe auf ihre Umgebung gekennzeichnet haben, so stimmt dies also damit überein, daß die Wirbellinien der Trombe erst in unendlicher Entfernung zurückkehren.

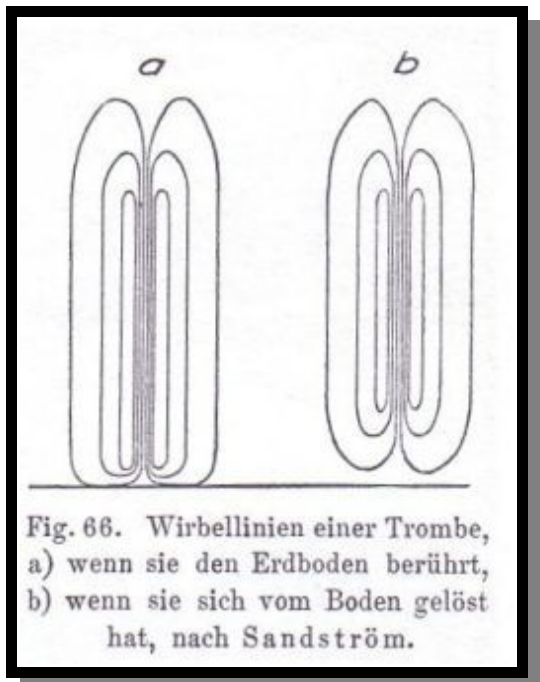


Fig. 66. Wirbellinien einer Trombe, a) wenn sie den Erdboden berührt, b) wenn sie sich vom Boden gelöst hat, nach Sandström.

Diese theoretischen Betrachtungen enthalten natürlich keinen Beweis dafür, daß wirklich der Trombenwirbel bereits in der Höhe der untersten Wolkenetage sein Ende erreicht, sondern lassen sich insbesondere auch ohne weiteres auf die später zu besprechenden Formen der horizontalen Tromben anwenden.

Indessen sprechen manche Beobachtungen in der Tat für die erstgenannte Auffassung. Insbesondere scheinen die trichterartigen und vielleicht noch mehr die trompetenartigen Formen anzudeuten, daß die starke Erweiterung des oberen Teiles bereits das Ende des Wirbels darstellt. Eins der zahlreichen Beispiele solcher sich nach oben stark erweiternden Tromben ist diejenige von Augsburg vom Jahre 1587 (A 9), welche nach einem von Hellmann neu herausgegebenen Einblattdruck in Fig. 67 reproduziert ist; sie dürfte zugleich die älteste deutsche Trombenabbildung darstellen.

Ebenso wäre auch die Trombe Nr. 243 von Bergzabern (Fig. 68) zu nennen, doch sind diese Fälle so zahlreich, daß eine vollständige Aufzählung unmöglich ist.

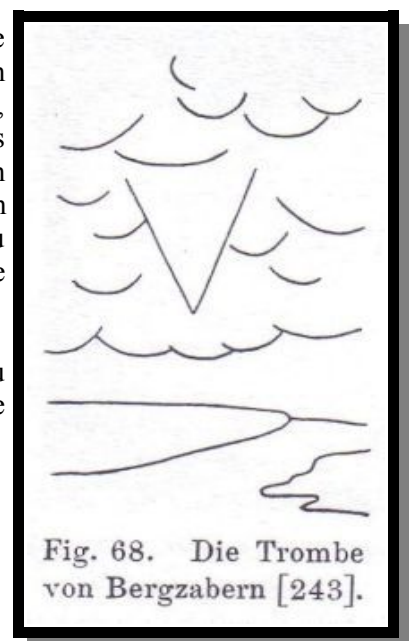


Fig. 68. Die Trombe von Bergzabern [243].

**Schröckliche neue Zeytung auß Augspurg, so man
an dem Himmel gesehen, vnd aygendtlich vernommen hat. Wie
solliches mit etlich Hundert Menschen, zu Probieren vnd beweysen ist.
2. Julio Anno 1587.**



Anno 1587, den 2. Julij, zwischen 12. vnd 1. Uhr, nach mittag, Hat sich jnn der Lufft ein grosses vngehewres Gewülckh zusammen gehauffet, gleichsam als ob ein schweres Wetter, mit Hagel, Donner, vnd Plitz anziehen vnd sich herfür thon wolte, Inn sollichem begibt sich augenscheinlich, das sieh gantz schewlich vnd schrecklich, gegen Mitternacht, ein gewlicher Wolckh, geformiert wie ein schwantz eines grossen Drachen, oder Lindwurms, (Wie er dann hie in diser Figur sichtbarlich abgemahlt, oder entworöen ist.) hat sehen lassen. Wellicher jetzt auff die Rechte, bald auff die Lincke seyten sich gekrümmet, vnd gewunden, Ja sich zu letzt, vnden herab verkleinert, gantz scharpff vnnd spitzig gemachet hat, Ist also nahend bey einer halben stund lang gestanden, vnd hernach allgemach verschwunden.

[Es folgt eine geistliche Ermahnung,]

zu Augspurg, bey Hanns Schulthes, dem Jüngern, Dockenmacher vor Barfüsser Thor.

Von früheren Autoren wurde diese Erweiterung des oberen Teiles meist aus der Zunahme der relativen Feuchtigkeit mit der Höhe bis zur Wolkenbasis erklärt. Daß aber diese Erklärung nicht ausreicht, geht schon aus denjenigen Fällen hervor, in denen die Verbreiterung fehlt, und die Trombe als eine in allen Höhen ganz oder doch fast gleich starke Säule erscheint. Berücksichtigen wir, daß im Innern der Trombe absteigende Bewegung herrscht, und die Kondensation der Röhre wesentlich, wenn auch nicht ausschließlich, durch die Fläche stärksten Aufsteigens bestimmt wird, so wird man mit größerem Recht die starke Verbreiterung im oberen Teil auf eine entsprechende Erweiterung dieser Fläche zurückführen. Diese Auffassung wird auch durch den Umstand gestützt, daß solche trichterartigen Formen bisweilen auch bei Kleintromben zu beobachten sind, die nur durch Staub sichtbar werden, so daß die relative Feuchtigkeit hier gar nicht in Frage kommt. Damit stimmt weiter überein, daß die horizontalen Tromben gleichfalls eine solche Verjüngung nach der einen Seite zeigen; auch hier kann die Trichterform nur durch das Rotationssystem der Trombe bedingt sein. Auch bei ihnen ist übrigens das spitze Ende dasjenige, welches sich verlängert, während die Wolkenteilchen sich umgekehrt vom spitzen zum dickeren Ende hin verschieben. Wenn aber aus den angeführten Gründen die trompetenartige Erweiterung des oberen Teiles in erster Linie nicht auf die Feuchtigkeitszunahme zurückzuführen ist, sondern eine wirkliche Erweiterung des Wirbels darstellt, so sprechen diese Fälle offenbar dafür, daß der Wirbel hier wirklich endigt, ebenso wie bei den Kleintromben, wo diese Erweiterung gleichfalls am oberen Ende auftritt.

Es gibt auch einige Beobachtungen, in denen sogar das Endigen des Wirbels an der Wolkenbasis direkt wahrgenommen zu sein scheint. So hatte z. B. die Trombe von Sarajewo (Nr. 130), wie Fig. 69 zeigt, an der Wolkenbasis eigentümliche wurzelartige Ansätze, welche anscheinend so zu deuten sind, daß erst an dieser Stelle die Vereinigung einer Reihe (wohl horizontal liegender)



Fig. 69. Die Trombe von Sarajewo [130] mit wurzelförmigen Ansätzen des Wolkentrichters.

Wirbelrollen zu einem einheitlichen Wirbel stattfindet, wobei wir an die früher besprochene Vereinigung von Zapfen erinnert werden. Es widerspricht nicht der Rotation der Trombe, daß solche Wurzelansätze stationär bleiben können (Wenn man z. B. in einer Kaffeetasse, deren Wandung etwas gewellt ist, durch Umrühren einen Wirbel erzeugt, so bildet sich auf der Flüssigkeitsoberfläche eine entsprechende Anzahl spiralförmig verlaufender Rinnen, welche vollkommen stationär bleiben, während die Flüssigkeit durch die zwischen ihnen liegenden Wülste hindurchströmt.)

Noch deutlicher ist das folgende, freilich ausländische Beispiel der von Buchanan am 8. Januar 1789 auf 3° 38' N. B. und 135° 26' östl. Länge beobachteten Wasserhose (Edinburgh philos. Journ. 5, S. 275, 1821; nach Gilberts Ann. d. Phys. 70, 104, 1822, und Peltier, a.a.O., S. 251.).



Fig. 70. Wasserhose, welche oben aus drei Wurzeln entspringt, beobachtet von Buchanan (nach Peltier). Links Regen.

Wie Fig. 70 zeigt, teilte sich hier der Wolkenschlauch in drei von einander getrennte Wurzeln. Die Wasserhose wurde aus einer Entfernung von 4 bis 6 engl. Meilen (6 ½ bis 9 ½ km) gesehen.

Diese letzteren Fälle scheinen also dafür zu sprechen, daß hier wenigstens der einheitliche Wirbel der Trombe in Höhe der Wolke aufhörte; aber es steht nichts im Wege, anzunehmen, daß die Teilwirbel, vielleicht in Form paralleler, neben einander liegender Rollen, umbiegen und horizontal um den Wolken türm des cu-ni herumlaufen.

Horizontale Tromben. Auf der anderen Seite verfügen wir aber über eine Anzahl von Beobachtungen, welche teils direkt beweisen, teils sehr wahrscheinlich machen, daß der Trombenwirbel geschlossen in der Höhe umbiegt und sich in der untersten Wolkenschicht als einheitlicher Wirbel meilenweit horizontal erstreckt. Daß die sichtbare Trombe überhaupt nur die passive Verlängerung eines uns durch die Wolken verborgenen Wirbels sei, hat v. Hann besonders deutlich ausgesprochen (v. Hann, Lehrbuch d. Meteor., 3. Aufl., Leipzig 1915, S. 730.): Die Tornados sind heftige Luftwirbel, die in der Wolkenregion entstehen, wahrscheinlich unter dem Cirrusniveau und oberhalb der Region der unteren mächtigen Haufenwolkenbildungen, und dann allmählich zur Erde herabsteigen". Freilich hält die durch diese Worte nahegelegte Vorstellung, daß der aktive Teil des Wirbels in der geraden Verlängerung der sichtbaren Trombe nach oben zu suchen sei, der Kritik wohl nicht stand.

Denn eine solche Fortsetzung ist auch in den Fällen nie gesehen worden, wo die Trombe von einer relativ flachen, vorgeschobenen Wolkenetage des cu-ni herabhing, über welche der Beobachter hinwegsehen konnte. Die Ansicht, daß der Wirbel innerhalb dieser Wolkenetage umbiegt und horizontal wird, ist unter anderen von mir im Jahre 1911 vertreten worden (Über den Ursprung der Tromben, Meteor. Zeitschr. 1911, S. 201. Die dort ausgesprochene Vermutung, daß die Trombe das Ende eines durch den fallenden Niederschlag erzeugten Luftwirbels (des Gewittersturms) sei — wofür W. Krebs, ebendort 1912, S. 41, die Priorität in Anspruch nimmt —, kann ich heute nicht mehr aufrecht erhalten.). Von großer Bedeutung für diese Auffassung ist der von Weyher und anderen erbrachte experimentelle Nachweis, daß derartige Wirbel freiwillig in Richtung ihrer Achse weiterwachsen (C. L. Weyher, Sur les tourbillons, trombes, tempetes et spheres tournantes. Etudes et Experiences. 2. Edition, Paris 1889. Weyher erzeugte die Trombe in einem gläsernen Luftkasten durch ein oben angebrachtes Windrädchen mit vertikaler Achse (Fig. 71). Der des Gefäßes wurde durch eine Schale mit Wasser gebildet, d unten durch eine Lampe erwärmt wurde. Durch den Dampf wurde dann eine röhrenförmige Trombe sichtbar, die vom Windrädchen bis zur Wasserschale hinabreichte. Weyher variierte den Versuch in mannigfaltiger Weise und machte dabei viele interessante Beobachtungen.). In einigen Fällen ist nun dieser horizontale Teil der Trombe, der sonst meist in der Wolke verborgen ist, direkt gesehen worden:

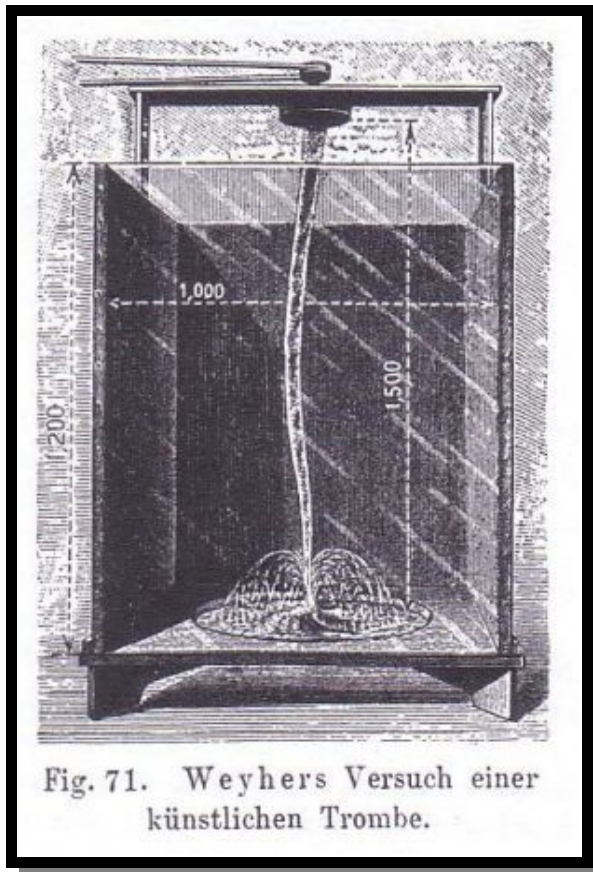


Fig. 71. Weyhers Versuch einer künstlichen Trombe.

159. Das beste Beispiel ist die Teplitzer Trombe Nr. 159, deren Beschreibung und Abbildung im zweiten Kapitel (S. 39—43) ausführlich wiedergegeben ist. Diese horizontale Trombe war anfangs kurz und dick, verlängert sich aber schnell in Richtung des spitzeren Endes, während sich die Wolkenteilchen in ihr in umgekehrter Richtung verschoben und gleichzeitig lebhaft um die Längsachse rotierten. Am dicken Ende traten sie wie Rauchwolken aus einem Schlot" in die umgebenden Wolken über. Die Länge dieses horizontalen Wirbels wurde zu $1\frac{1}{2}$ bis 2 Wegstunden (7 bis 10 km) geschätzt. Auf der einen Figur sieht man das spitze Ende dieses Wirbels in einem großen Bogen sich zur Erde herabsenken; andere Beobachter haben nur eine vertikale Trombe gesehen. Daß beide identisch sind, ist wohl kaum zu bezweifeln.

203. Ein zweites klares Beispiel einer horizontalen Trombe ist Nr. 203: „Die Gewitterwolken hatten sich auf etwa $\frac{1}{2}$ km Waldau genähert. . Da wurde ich von meinem Söhnchen, mit dem ich das herannahende Wetter betrachtete, auf eine scharfe Linie unter der Wolkenwand aufmerksam gemacht, die ganz plötzlich entstanden zu sein schien, da ich sie vorher nicht beobachtet hatte. Es war, wie sich bei näherer Betrachtung herausstellte, eine Windhose, die eine fast wagerechte Lage hatte und sich in einer Länge von mindestens 1 km (Man erinnere sich an die häufige Unterschätzung der Dimensionen.) ausdehnte. In N stark und trichterförmig, verlor sich das Ende wie eine lange gewundene Spindel (schlangenförmig) nach S. Der Durchmesser der Spindel schien nicht über $\frac{1}{2}$ m gewesen zu sein, aber die ganze Bildung war scharf abgegrenzt und drehte sich in furchtbar schnellem Wirbel um die Achse. Anfangs schien es, als wollte sich das Ende auf die Erde senken, doch hob es sich bald wieder, und nachdem eine vorliegende Wolkenwand erreicht war, löste sich die ganze Bildung auf (Eine ähnliche, nur weniger ausgeprägte Bildung sah ich im März 1916 in Mülhausen i. E. am vorderen Unterrand einer nicht regnenden Böenbank. Die Länge dieses nur wenige Minuten bestehenden dünnen Wirbels mochte etwa 4 km betragen. An dem Tage herrschte starke Winddrehung mit der Höhe.)

Unmittelbar darauf fielen beim Beobachter Hagelkörner von Taubenei bis Hühnereigröße. Der Wirbel lag hier also am Vorderrande des Hagelsturzes.

163. Mir scheint nach diesen Beispielen auch die folgende Beschreibung Nr. 163 (Genfersee), die an Klarheit zu wünschen übrig läßt, sich auf eine horizontale Trombe zu beziehen. Der Wortlaut bei Früh ist: „Bei bedecktem aber nicht gewitterhaftem Himmel und leichtem SW Wasserhose Cully-Rivaz während 8 Minuten auf eine Länge von 6100 m! ... Höhe 106 m + 20 m". Cully und Rivaz liegen am Nordufer des Sees, 4 1/2 km von einander entfernt, und ihre Verbindungslinie weist von WNW nach ESE. Es handelt sich also wohl um eine 6 km lange horizontale Trombe.

173. Ebenso scheint auch die Trombe Nr. 173 eine horizontale gewesen zu sein, wenn auch hier die Unklarheit des Ausdruckes besonders groß ist. Es heißt dort: . . . „bemerkte man . . . ein Auftauchen [sie!] der Wolken, hervorgerufen durch Luftströmungen aus verschiedenen Richtungen. Es bildete sich rasch eine sehr finstere Wolke, in der Mitte einen langen, schlangenartigen, weißen Nebelstreif in sich schließend. Dies geschah unter langsamem Fortschwimmen der Wolke von Osten nach Westen, wobei der erwähnte Streifen immer heftigere wellenförmige Bewegungen machte. Nach einigen Minuten näherte sich die Spitze des Schlauches der Erde und strich, ungeheure Staubwolken in sich aufziehend . . . darüber hin."

85. Leider noch unklarer ist die Beschreibung bei Nr. 95, bei welcher der Beobachter nach meiner Auffassung eine Trombe gesehen hat, deren Hauptteil horizontal an der Wolkenbasis lag, während das Ende als „Zapfen" herabhing, ohne mit dem am Erdboden fortschreitenden Staubfuß sichtbar verbunden zu sein (Die Beschreibung ist dem Brief eines gewissen Großmann entnommen, der aber die Trombe nicht selbst sah, sondern nur Erkundigungen über sie einzog, welche er dann wahrscheinlich unverstanden wiedergegeben hat.). Der Wortlaut ist folgender: „Das erste Meteor [der Zapfen] stand über diesem [Staubfuß] in der Höhe, und war inzwischen fast parallel mit dem unteren gegen Norden fortgerückt, hatte während ungefähr 18 Minuten eine große Masse graulich weißen und oft feurigen (Die schnellen Bewegungen verleiten oft zur Annahme von Flammen; vgl. zwölftes Kapitel.) Dampfes ausgeströmt, der hierauf die Gestalt einer Schlange von 140 Schritten (aus einer Entfernung von beiläufig einer halben Stunde gesehen) annahm (Man berücksichtige die übliche Unterschätzung!), deren Kopf nach Nordnordosten und deren Schweif (Der herabhängende spitze Zapfen.) nach Südsüdwesten gerichtet war. In Zeit von 8 —10 Minuten hatte sich der Schweif dieser Gestalt nach unten herum gewunden; und im Augenblick, als dieser den Kopf derselben berührte [perspektivisch?], war das ganze obere Schauspiel zu und mit diesem zugleich das untere [der Staubfuß], ohne daß weder aus der Höhe noch wie ein daneben gestandener Beobachter versichert, vorn letztern eine Explosion wahrgenommen wäre."

Zur weiteren Erläuterung des Zusammenhanges dieses horizontalen Teils der Tromben mit dem sogenannten Böenkragen, sei hier noch eine am Meteorologischen Observatorium in Potsdam erhaltene Aufnahme eines Wolkenwirbels wiedergegeben (Fig. 72), welcher anscheinend eine Mittelform zwischen dem gewöhnlichen Böenkragen und einer horizontalen Trombe darstellt; mit letzterer hat er die glatte Begrenzung gemein, welche auf eine gleichmäßige

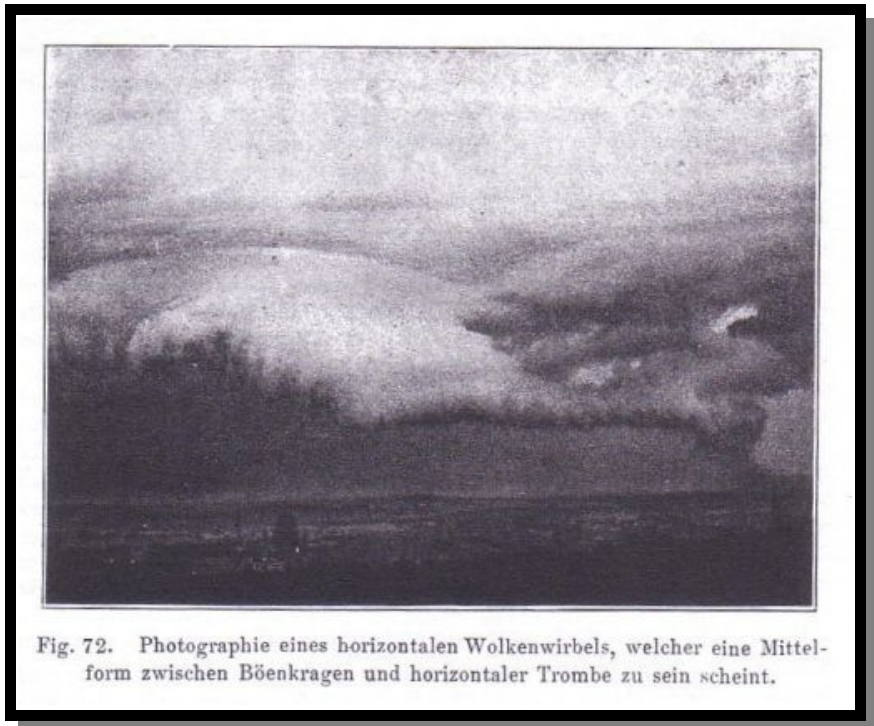


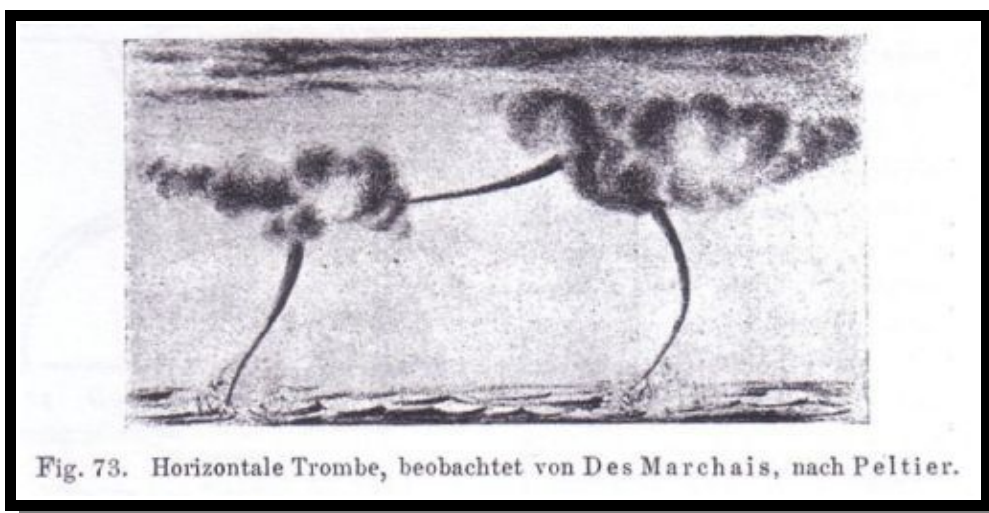
Fig. 72. Photographie eines horizontalen Wolkenwirbels, welcher eine Mittelform zwischen Böenkragen und horizontaler Trombe zu sein scheint.

Rotation hindeutet, und die Verjüngung nach der einen Seite. Der große Durchmesser dieses Wirbels, der zur Folge hat, daß nur seine obere Hälfte kondensiert, entspricht dagegen wieder dem Böenkragen. Bei der Seltenheit von Beobachtungen über horizontale Tromben seien hier noch zwei außereuropäische angeführt:

A. Tyerman's und Bennet's Bemerkungen auf einer . . . Reise um die Welt, zusammengestellt von Kästner. Kästners Archiv f. d. gesamte Naturlehre 25 (== Archiv f. Chemie u. Meteorologie 7) 1833, S. 1. Darin S. 72 Beschreibung einer seltsamen Wasserhose: Als Tyerman und Bennet am 16. April 1823 von der Insel Borabora zu der Insel Rajatea zurückkehrten, beobachteten sie zuerst eine gewöhnliche (vertikale) Wasserhose, die nach drei Minuten wieder verschwand. Bald darauf wurde unsere Aufmerksamkeit auf eine andere, viel seltenere Naturerscheinung hingelenkt. Eine leicht gekrümmte Wasserhose streckte sich nämlich wagrecht am Himmel aus, und verband zwei Wolken, während ein Wasserstrom von einer zu der andern mit Schnelligkeit sich ergoß, wie er sich sonst gewöhnlich senkrecht über das Meer auszuleeren pflegt. Die Wasserröhre war cylindrisch, halb durchsichtig und völlig ausgebildet, nur daß sie an ihren Enden mit dem schwarzen Gewölke zusammenfloß. Die Länge der Röhre mochte eine starke Viertelstunde Weges betragen, und hatte einen verhältnismäßig großen Durchmesser. Der obere Rand dieses mächtigen Wassertrichters schwebte gerade über uns, so daß wir ganz klar, mit großem Erstaunen den Wasserstrom in denselben beobachten konnten. Wäre er auf uns herabgesunken, so würde er unser kleines Schiff augenblicklich ersäuft haben. Es war keine Bewegung auf dem Wasserspiegel (Meeresspiegel), und nur aus der Entfernung von einer Stunde her wurde ein Donner gehört. Der ganze Prozeß geschah in der Luft, und dauerte etwa fünf Minuten lang."

B. Voyage du Chevalier Des Marchais, en Guinee et a Caienne, en 1725—1727, par le P. Labat, ed. 12°, 1730, t 1^{er}, p. 82. Nach Peltier, Meteorologie, Observations et recherches experimentales sur les causes qui concourent ä la formation des trombes, Paris 1840, S. 215 :

„Am 13. November 1724 [NB. Die ganze Reise ist aber datiert 1725—1727], eine Viertelstunde nach Mittag, kamen zwei Tromben von zu außergewöhnlicher Gestalt, als daß ich sie hier nicht beschreiben sollte. Die dickere und ansehnlichere [die rechte in Fig. 73], steckte mit ihrem Kopf in einer dicken, sehr schwarzen und hochreichenden Wolke und war gebogen; obgleich gar kein Wind war, ließ sie das Meer da, wo sie es berührte, auf mehr als Hundert Schritt im Umkreise aufwallen; eine andere Trombe, die von dem oberen Teil derselben Wolke ausging, verlor sich weiterhin in einer anderen Wolke, die etwas weniger dicht und schwarz als die erste, und viel niedriger war. Nachdem diese Erscheinung einige Minuten gedauert hatte, entsprang von dieser Wolke eine Trombe, die zu der mehr als 200 Toisen entfernten Meeresoberfläche herabstieg, die sie fast so wie die erste aufschäumen ließ. Nachdem diese beiden Tromben sich fast anderthalb Stunden in der Luft hin und her gewiegt hatten, beladen mit Wasser, zerplatzten sie endlich, und lieferten einen solchen Regen, daß alle Öffnungen des Schiffes nicht ausreichten, um ihn ablaufen zu lassen, und man ihn mit Eimern ausschöpfen mußte. Das Schiff war von diesen Tromben kaum eine halbe Meile entfernt.“)



Die angeführten Beobachtungen zeigen jedenfalls nicht nur, daß überhaupt Fälle vorkommen, in denen die vertikale Trombensäule in Höhe der Wolken umbiegt und horizontal wird, sondern diese Fälle müssen sogar recht häufig sein, weil, wie schon erwähnt, bei den meisten von ihnen der horizontale Teil innerhalb der Wolken liegen wird und also nicht zu sehen ist.

Wir können aber auch diese Fälle auf ihre Wahrscheinlichkeit prüfen, indem wir die **Neigung der Tromben** untersuchen. Schreibt doch Dampier: „Ihre Achse steht in der Regel schräg; ich habe niemals eine gesehen, die vollkommen vertikal stand“ (Peltier, a. a. O. S. 205.).

In 25 Fällen ist ausdrücklich gesagt oder durch bildliche Darstellung erwiesen, daß die Trombe schräg stand. In der Regel geben die Beobachter gleich die Erklärung dafür in den Windverhältnissen.

So heißt es bei Nr. 11: „Ich vergaß zu sagen, daß die schrägen Tromben dies im Sinne des Windes sind, d. h. da der Wind NE war, daß das obere Ende der Trombe nach SW wies, und zwar, während gleichzeitig andere Tromben genau vertikal standen. Ebenso verhält es sich mit der Krümmung: Die konvexe Seite folgt dem Wind, die konkave sieht ihm entgegen. Da also der Wind NE war, ist die konkave Seite nach NE, die konvexe nach SW gerichtet.“ Die Voraussetzung ist natürlich, daß der Wind mit der Höhe zunimmt, und zwar in den unteren Schichten schnell, in den höheren langsamer.

Besonders plausibel wird diese Deutung, wenn die Trombe sich zuerst annähernd vertikal bildet, durch Zurückbleiben des Fußes allmählich immer schräger wird und dann zerreißt. So heißt es z. B. bei Nr. 142: „Der Faden folgte, indem die Wolke weiter zog, auf dem Wasser nach, jedoch mit geringerer Geschwindigkeit, so daß er allmählich sich immer schräger zur Wasseroberfläche stellte. Schließlich zerriß er ungefähr in der Mitte.“

In ähnlicher Weise wird die Neigung der Trombe entweder schon vom Beobachter auf die Windverhältnisse zurückgeführt oder ist doch offenbar auf sie zurückzuführen bei: 11—58 (schließlich nur noch 20° von der Horizontalen entfernt!) —91—95—115 — 123—142—144 [schließlich „fast horizontal“! (Auch Nr. 183 war „sehr schräg“.)] —200.

Mitunter tritt dabei auch eine S-Form auf, bei der das Mittelstück horizontal ist. Fig. 74, welche die Trombe Nr. 224 darstellt, gibt ein Beispiel dafür, wobei durch die Perspektive eine Schlinge vorgetäuscht wird; eine ganz ähnliche Form ist auf dem Titelbild dieses Buches zu erkennen. . . . Vgl. dazu auch Nr. 5 der Figur 6 (S. 46) sowie die gebogene Trombe auf Figur 61. Die gleichzeitige Anwesenheit nicht gebogener Tromben legt indessen die Annahme nahe, daß es sich in diesen Fällen nicht um Windverwehung, sondern um die unterste Windung einer großen Schraubenform handelt, deren Entstehungsbedingungen noch unbekannt sind.



Diese Fälle von Windverwehung entsprechen der früher abgeleiteten Beziehung, daß die Geschwindigkeit der Tromben auch im Mittel geringer ist als die der Gewitter, und sind insofern nicht ohne Interesse; für die Frage der horizontalen Tromben kommen sie aber natürlich nicht in Betracht.

Indessen gibt es viele Fälle schräger Tromben, in denen die Erklärung durch die Windverhältnisse nicht auszureichen scheint, nämlich diejenigen, bei welchen erst im obersten Teile kurz vor dem Eintritt in die Wolke ein Umbiegen zur Horizontalen beginnt.

In den Beschreibungen selber ist dies allerdings nur selten erwähnt, wie bei Nr. 201, wo die Trombe „mit dem oberen Teil um etwa 65° nach vorne geneigt“ war. Um so häufiger ist dies aber auf den Abbildungen zu erkennen, und zwar zeigt sich überall, wo eine Kontrolle möglich ist, daß das Umbiegen nach der Seite des Cumulus-Turmes zu stattfindet. So nimmt auf der in Fig. 12 (S. 57) mitgeteilten Abbildung der Wasserhose vom Zugersee die Neigung nach oben bis auf etwa 45° zu, und zwar nach der angegebenen Seite; dasselbe ist auch auf der dritten, hier nicht wiedergegebenen Photographie derselben Wasserhose erkennbar; auch bei der ersten Photographie (Fig. 11, S. 56), bei der die Neigung der Säule freilich in allen Höhen fast die gleiche ist, hat sie diese Richtung.

Auch bei Nr. 51 ist eine Abbildung (Fig. 75) gegeben, bei der die Trombe mit ihrem untersten Teil fast vertikal steht, im obersten Teil aber eine Neigung von etwa 45° hat.

Bei Nr. 39 war die Trombe „von Süden nach Norden geneigt“, d. h. ihr Fuß befand sich südlich des oberen Teiles. Da sie sich nach Westen bewegte und sich auf der linken Seite des Regengusses befand, war also ihr oberer Teil auf diesen zu gerichtet.

Ähnlich scheinen die Verhältnisse bei Nr. 43 gewesen zu sein. Bei Nr. 178 wird ausdrücklich hervorgehoben, daß die Neigung nicht einem Nachschleppen entsprach; der Fuß zog hier links vom oberen Teil, wie auch daraus hervorzugehen scheint, daß ein 2 km weit mitgeführter Espenzweig 400 m rechts von der Spur herabfiel. Leider ist hier die Stellung relativ zum Gewitter unsicher.

Das Titelbild dieses Buches [Nr. 83] zeigt links im Vordergrund eine Wasserhose, deren Neigung mit der Höhe immer mehr zunimmt, bis sie an der Wolkenbasis fast horizontal geworden ist.

Auch bei Nr. 234 ist, wie Fig. 76 zeigt, die Neigung des herabhängenden Wolkenzipfels derart, daß man unmittelbar den Eindruck erhält, die Wirbelachse biege in der Wolke nach rechts um (Gleiches gilt für die in Fig. 57, S. 217 abgebildete Wasserhose von Cottage City. Auch in der anderen Abbildung derselben Wasserhose (Fig. 53, S. 205) sieht man das Umbiegen an der Wolkenbasis, wodurch der Wolkenschlauch erst dem Elefantenrüssel ähnlich wird, mit dem er so häufig in den Beschreibungen verglichen wird. Der in der Originalaufnahme erkennbare Regenguß, der in der Abbildung aus Platzmangel fortgelassen wurde, liegt rechts von der Trombe in einer scheinbaren Entfernung, die etwa das Anderthalbfache der Trombenlänge beträgt.)



Fig. 75. Wasserhose auf dem Genfer See [51].

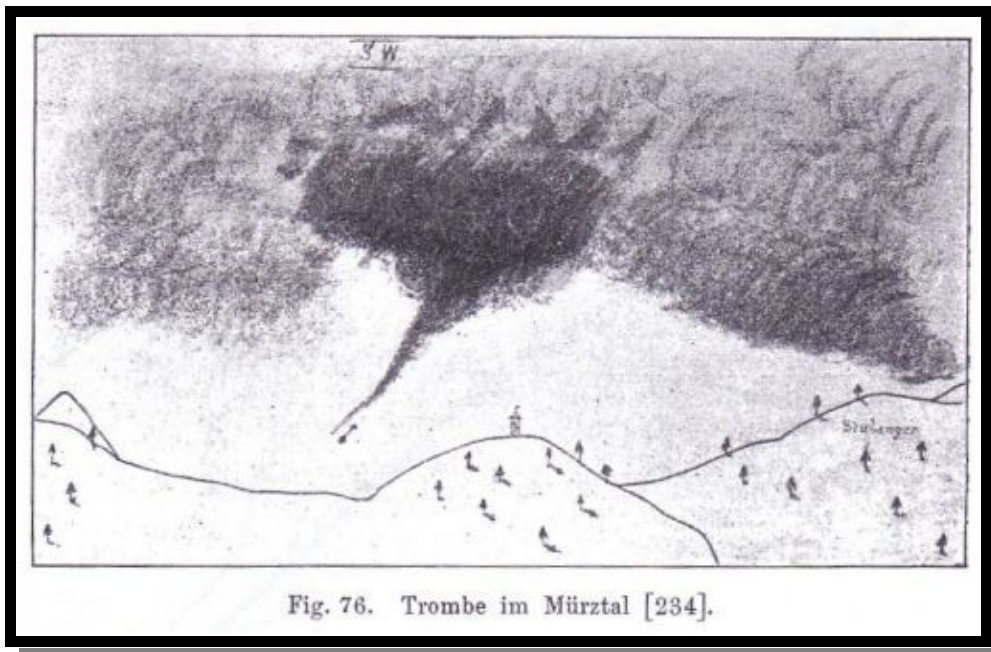


Fig. 76. Trombe im Mürztal [234].

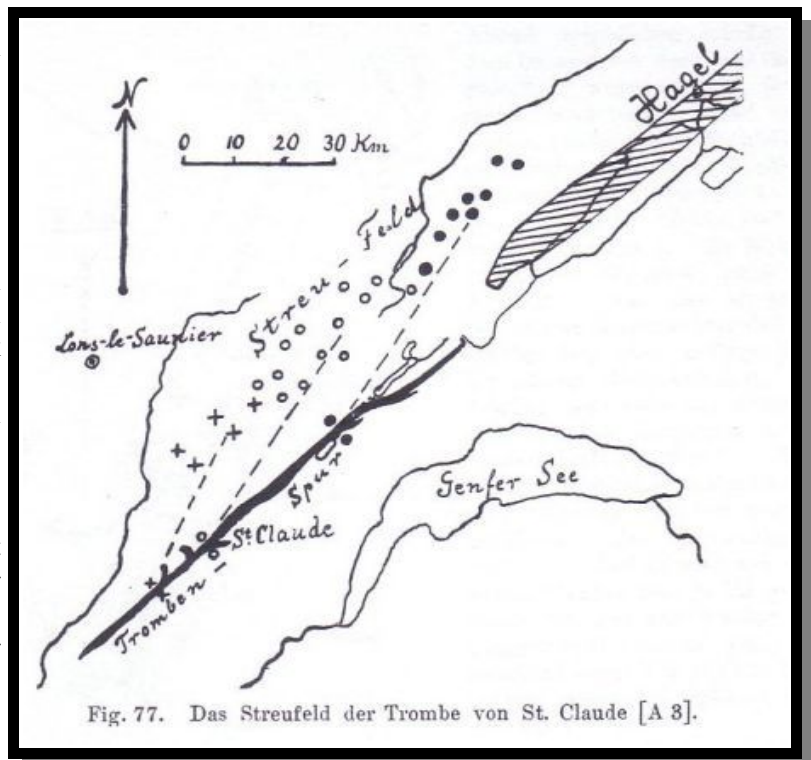
Die Wasserhose A 6 wird mit den Luftsaugern verglichen, die auf dem Schiff die Erneuerung der Luft in den Räumen bewirken; darin liegt wohl ausgesprochen, daß auch diese Trombe am oberen Ende nicht nur breiter wurde, sondern auch umbog, etwa nach Art der Fig. 53 (S. 205).

Eine andere Erscheinung, welche gleichfalls auf ein Umbiegen des Trombenwirbels zur Horizontalen hindeutet, welche aber auch schon an sich von größtem Interesse ist, bilden die **Streufelder der Windhosen**. Leider sind sich die Beobachter meist nicht klar darüber gewesen, daß eine genaue Untersuchung des Fallortes der emporgehobenen Gegenstände sowohl relativ zu ihrem Ursprungsort wie auch relativ zur Trombenbahn von größter Bedeutung für das Verständnis der Trombe ist.

Wir finden deshalb zwar häufig Angaben über die große Entfernung, bis zu welcher solche aufgenommenen Gegenstände transportiert wurden, aber nur selten ist auch die Richtung angegeben, und untersucht, wie weit seitlich der Trombenbahn die Fallorte liegen. Schon bei der Windhose von Öls vom Jahre 1535 (A 10) wird berichtet, daß Wolle 10 bis 12 km weit, Bücher etwa 8 km weit getragen wurden. Bei Nr. 80 wurden Wasserkannen, Stühle, Kleider, Betten und anderer Hausrat von Voigtsbach zwei Stunden (etwa 10 km) weit fortgeblasen und in einem Gebirgswald wiedergefunden. Bei Nr. 126 wurden Kleider, Wäsche und Bettdecken 15km, Stroh und Heu sogar doppelt so weit getragen, woraus hervorzugehen scheint, daß innerhalb des Streufeldes eine Ordnung der Gegenstände nach Gewicht und Größe eintritt, ähnlich wie bei den Meteoriten-Streufeldern (Vgl. Brezina, Die Meteoriten vor und nach ihrer Ankunft auf die Erde; Vorträge d. Ver. z. Verbreit. naturw. Kenntn. in Wien 33, Heft 15, Wien 1893.). Bei der Windhose Nr. 108 war offenbar ein sehr gut ausgebildetes Streufeld vorhanden; die von Monville entführten zahlreichen Gegenstände wurden 24 bis 38 km von Monville entfernt ausgestreut. „Der Chausseewärter von Magloire benachrichtigt mich soeben, daß noch viel größere und dickere Bretter in großer Menge zwischen Torcy und Saint-Nicolas (34km von Monville) zu finden sind; ebenso Blätter Papier, welche die Liste der Fabrikarbeiter zu sein scheinen; ein neues Taschentuch, gesponnene und nicht gesponnene Baumwolle, eine Fensterscheibe von 14 Zoll Seitenlänge, welche auf Getreide herabfiel und nur ein ganz kleines Stück an der einen Ecke verlor.“ Leider sind diese Angaben, wie gewöhnlich, mehr als Kuriosum betrachtet und nicht in die Karte eingetragen. Bei Nr. 178 wird ein Espenzweig 2 km weit mitgeführt und 400m rechts der Spur fallen gelassen, woraus man vielleicht schließen darf, daß die Trombe oben nach rechts umbog oder jedenfalls schräg stand.

Hierher gehört auch die merkwürdige Erscheinung des Fischregens. Schon 1817 hat Tilloch. (Philos. Magazine 50, S. 146.) gelegentlich einer Beschreibung der Windhose von Kentish-Town die Tromben allgemein als Ursache dieses Fischregens bezeichnet. Nach Peltier schreibt er: „Weiter verstreut sie [die Trombe im allgemeinen] auf ihrem Wege das, was sie anderwärts emporgehoben hat, und dieser Umstand führt die seltsamen Erscheinungen wie Fischregen, Froschregen usw. herbei.“ Auch Muncke hat dies nicht übergangen (a, a. O. S. 1674.): „Zugleich ist aber kaum zweifelhaft, daß manche von der See und großen Flüssen kommende oder über Flüsse und Teiche hinstreichende Tromben Fische, Frösche und sonstige Wassertiere aufheben, bis auf bedeutende Entfernungen fortführen und dann fallen lassen. Unter andern erzählt Wolke nach Aussage eines glaubhaften Augenzeugen, daß einst ein solches Meteor die Fische aus einem Weiher auf dem umgebenden Lande umherstreute.“ Wir können noch eine andere Beobachtung dafür anführen: bei der Trombe Nr. 99 heißt es nämlich: „In der letzten Gemeinde [Champagne-St. Hilaire] hat sie das ganze Wasser eines Tümpels emporgehoben und alle Fische, welche er enthielt: anderthalb Wegstunden [etwa 7 ½ km] von dort hat sie sie wieder fallen lassen zum großen Erstaunen der Personen, welche Zeugen dieses Fischregens waren.“

In einem einzigen Falle, nämlich bei der Trombe von St. Claude (A 3), ist das Streufeld in die Karte eingetragen, wofür wir den Bearbeitern Gauthier und namentlich Bourgeat zu besonderem Dank verpflichtet sind. Aus ihren Karten, für deren unveränderte Reproduktion hier nicht Platz ist, habe ich die Kartenskizze Fig. 77 zusammengestellt, welche die vollständige Spur der Trombe mit ihren kleinen Abzweigungen, ferner den Beginn der Hagelspur, welche erst da anfängt, wo die Trombenspur aufhört, und das Streufeld zeigt.



Die Kreuze stellen dabei Gegenstände dar, welche von St. Georges stammen, was auf der Trombenbahn durch zwei ebensolche Kreuze gekennzeichnet ist. Die kleinen leeren Kreise stammen dagegen aus St. Claude und die ausgefüllten aus Bois d'Amont. Das Streufeld beginnt erst etwa 6 bis 7 km links von der Trombenspur — in diesem Zwischenraum ist nirgends etwas herabgefallen —, und reicht bis etwa 25 km von der Spur. Die absoluten, von den Gegenständen zurückgelegten Entfernungen betragen aber erheblich mehr, nämlich meist über 50 km. Da die Zeitdifferenz zwischen dem Aufheben und Fallenlassen nicht bekannt ist, bleibt unbestimmt, ob diese Versetzung nach vorn durch das allgemeine Fortschreiten des Gewitters zu erklären ist oder durch eine entsprechende Schräglage des Trombenwirbels. Im ersteren Falle müßten die Gegenstände etwa $\frac{3}{4}$ Stunde für ihre Luftreise gebraucht haben.

In der Umgebung der Trombe herrschte kein nennenswerter Wind; wenn trotzdem die Gegenstände so weit von der Spur der Trombe fortgeblasen werden konnten, so zwingt dies offenbar zu der Annahme, daß der Trombenwirbel in der Höhe horizontal wurde; sein weitaus größter Teil, der etwa 20km lang gewesen sein muß, verlief offenbar ähnlich wie bei der Teplitzer Trombe horizontal.

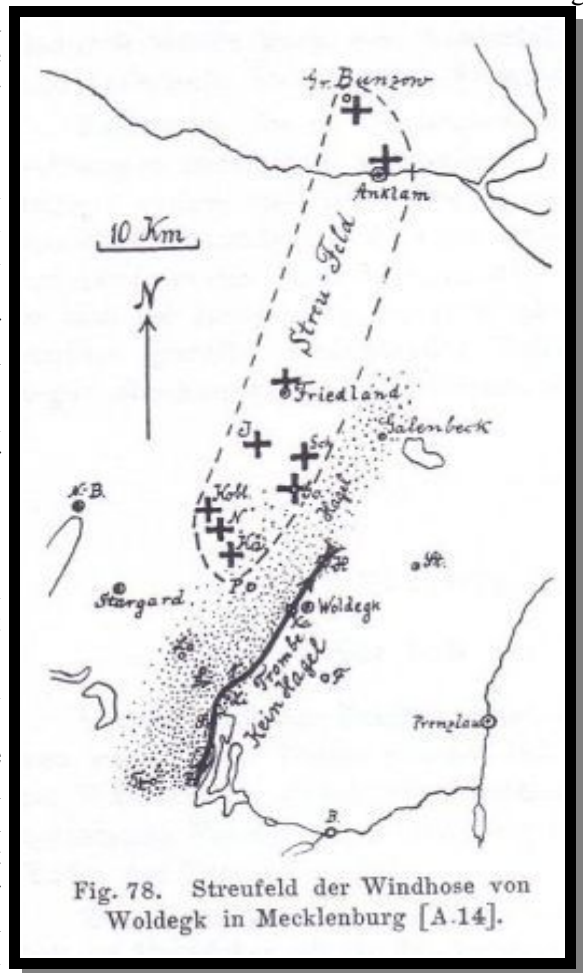
Besonders interessant ist auch der Vergleich mit der Hagelspur. Der vertikale Teil der Trombe befand sich rechts von dem aufstrebenden Cumulus-Turm, das Streufeld liegt links davon, also reichte der horizontale Teil der Trombe bis zur anderen Seite des Turmes herum, und die Gegenstände wurden von der einen Seite desselben auf die andere geschafft.

Wie schon im fünften Kapitel hervorgehoben wurde, ist auch das Aufhören der Trombenspur bei Beginn der Hagelspur von großem Interesse; denn es zeigt, daß die Trombe nicht etwa durch den fallenden Hagel erzeugt wurde — sie wurde im Gegenteil anscheinend durch ihn vernichtet —, sondern durch das starke Aufstreben der Luftmassen in dem Cumulus-Turm, der späterhin den Hagel lieferte. Starker Regen herrschte allerdings schon während der Lebensdauer der Trombe, links in 50 km Breite bis Lons-le-Saunier, rechts nur in einem 10 km breiten Streifen, an den sich weiter (am NW-Ufer des Genfer Sees) eine Zone mit heftigen Windstößen anschloß.

Ein zweites Beispiel, in welchem wir das Streufeld der Trombe jedenfalls aus den Angaben rekonstruieren können, wenn es auch vom Beobachter selbst nicht in die Karte eingetragen ist, bildet die Woldegker Windhose (A 14) vom 29. Juni 1764. Diese Rekonstruktion ist in der umstehenden Fig. 78 ausgeführt. Der zugehörige Text, der sich auf das Streufeld bezieht, lautet:

A 14. „Die von den Buchen und Eichen abgebrochenen Blätter und Zweige hat der Wirbelwind hoch in die Luft gehoben, und sehr weit umher, und ungemein entfernt von seinem Striche, zum Theil mit vieler daran sitzenden Mast, zerstreuet und fallen laßen. Zu Käwelich, Neetzke, Koblanck, Golen [Golm], Sehömbeck, Brome [?], Jahzke etc. und dergleichen, und manche von unglaublicher Größe, niedergefallen, und an einigen Orten, z. E. auf dem Neetzker Felde so häufig, daß nicht leicht ein Platz von vier Quadratruthen (einer mittelmäßigen Stube groß, wie man sich davon ausdrücket,) zu finden gewesen, wo nicht dergleichen gelegen. Einige dieser Zweige sind über eines Mannesarms dick, und zehn bis zwölf Fuß und darüber lang gewesen.

Zu Anklam hat der Küster von Lichtenberg, der eben da gewesen, an diesem Tage gegen Abend dergleichen häufig auf dem Damme vor der Stadt liegen gesehen, worüber sich jedermann verwundert, weil viele Meilen umher keine Eichbäume sich finden. Auch in Friedland sind dergleichen viele, doch nicht von sonderlicher Größe, auf den Straßen gelegen . . .



Zu Butzow [wohl Gr.-Bunzow] nahe bei Anklam . . . hat man als etwas besonderes angemerkt, daß die Zweige bey ganz stillem Wetter häufig niedergefallen, und folglich weit eher angekommen sein, als sich der Sturm in der niedern Luft geäußert." — Wohl auf eine westliche Paralleltrombe sind folgende Angaben zurückzuführen : „Im schwedischen Pommern sind dergleichen weit gegen Norden hin, ja bis gegen Stralsund, hin und wieder herumgestreuet worden" und: „Ja es sollen sogar bis auf die Insel Rügen einige hingeführet worden seyn.“ (Auch eine östliche Paralleltrombe scheint es gegeben zu haben, denn es heißt S. 17: „Wiewohl ein gewisser mecklenburgischer Cavallier versichern will, daß ihm eben dieser Wirbelwind um halb drey Uhr eine halbe Meile diesseits Stettin begegnet sey, und seinen Wagen beynahe umgeworfen habe.")

Das Streufeld liegt hier also um einen ganz ähnlichen Betrag (nämlich etwa gleich der mittleren Breite eines Hagelzuges) links der Trombenspur, und zwar ebenfalls erheblich in Richtung des Fortschreitens verschoben. Die Ähnlichkeit geht aber noch weiter, denn auch in diesem Falle wird die Zone zwischen der (verlängerten) Trombenspur und dem Streufeld durch den Hagelzug ausgefüllt. Zwar lassen die Feststellungen über die Ausdehnung des Hagelfalles zu wünschen übrig; aber aus den verschiedenen Stellen des Textes geht hervor, daß Hagel an folgenden Orten fiel: Triependorf [Tr., im Süden links des Anfanges der Trombenspur], Feldberg [F., am Anfang der Trombenspur], Schlicht [S.J., Lichtenberg [Li.], Neugarten [N.], Bredenfelde [Br.], Loitz [Lo.], dicht westlich von Kantzow [Ka], Helpte [HJ], Galenbeck. Daß die Trombenspur selber gerade mit dem rechten Eande der Hagelspur zusammenfiel und nur bei ihrer westlichen Ausbuchtung von jener überlagert wird, geht daraus hervor, daß in Schlicht und Helpte nur einzelne große Eisstücke fielen (v. Hann (Lehrb., S. 711) erwähnt diese Erscheinung, daß am Seitenrande des Hagelzuges mitunter nur einzelne, aber besonders große Stücke fallen, und fügt hinzu, bisher sei dies nur am rechten Rande beobachtet. Der oben geschilderte Fall steht hiermit in Übereinstimmung.), und daß noch in Feldberg starker Hagel beobachtet wurde, während auf dem nur wenig östlicher gelegenen Kanal zwischen dem Feldberger Haus-See und dem größeren, langgestreckten Lucin-See kein Hagel mehr fiel; ebenso wurde in Kantzow selber kein Hagel beobachtet, während dicht westlich davon die Erde vom Hagel weiß war. Der linke Rand des Hagelzuges läßt sich dagegen nicht scharf abgrenzen. Der einzige Unterschied gegen das vorige Beispiel besteht darin, daß hier die Spuren des Hagels und der Trombe bereits nebeneinander auftreten, während dort die Hagelspur erst beginnt, wo die Trombenspur aufhört. Die mecklenburgische Trombe war also offenbar gleichzeitig mit dem Hagelfall in Tätigkeit.

Beachtung verdient bei dieser Trombe auch noch die folgende seltsame Beobachtung: „Zu Galenbeck ist vor des dortigen Jägers Hause ein büchener Zweig mit Mast, eines guten Armes dick niedergefallen, der über und über mit Eise eines Fingers dick bezogen, und gleichsam candiret gewesen." Da dies die einzige Beobachtung überhaupt ist, nach der ein von der Trombe hochgenommener Gegenstand vereist herabfällt, muß die allgemeine Gültigkeit dieser Erscheinung dahingestellt bleiben, und der hieraus nahegelegte Schluß, daß der Trombenwirbel über die

Nullgrad-Isotherme emporreiche (die im Sommer wohl bei etwa 3000 m zu suchen ist), bedarf also vorläufig noch weiterer Bestätigung. Da Galenbeck mitten in der Hagelspur liegt, wäre es vielleicht denkbar, daß der Zweig bei etwa 2000 m Höhe aus dem hier horizontalen Trombenwirbel herausgeschleudert und von dem aufsteigenden Strom des Hagelturms noch erheblich weiter emporgeführt wurde; dadurch würde auch sein Niederfallen mitten in der Hagelspur und außerhalb des sonstigen Streufeldes erklärt.

Fassen wir die in den letzten Abschnitten angeführten Beobachtungen zusammen, so kommen wir zu dem Schluß, daß jedenfalls in vielen, vielleicht in den meisten Fällen der Trombenwirbel geschlossen umbiegt und in der untersten Wolkenetage horizontal um den Cumulus-Turm herumläuft; in manchen Fällen aber scheint er sich bei Erreichung dieser Wolkenschicht in eine Anzahl vermutlich parallel verlaufender Teilwirbel aufzulösen, vielleicht sogar überhaupt hier seine Grenze zu finden.

KAPITEL 12
Dr. Alfred Wegener
Wind- und Wasserhosen in Europa

Der Fuß der Trombe.

Um den Fuß der Trombe lagert meist ein kranzartiges Gebilde von wechselnder Form, welches bei Windhosen durch den Staub, bei Wasserhosen durch Wasserstaub sichtbar wird. Seine verschiedenen Formen sind lehrreich für die Mechanik des unteren Endes des Trombenwirbels.

Zunächst sei auf die mitunter buchstäblich täuschende **Ähnlichkeit des Staubfußes mit der Rauchsäule eines Feuerbrandes** hingewiesen, welche schon der alten griechischen Bezeichnung *Prester* (= feuriger Wirbelwind) zugrunde liegt und die Erklärung für zahlreiche angebliche Beobachtungen über Feuererscheinungen gibt. In der Tat gibt es fast keine Windhose, die nicht von einigen der Augenzeugen mit einem Brande verwechselt worden wäre. Zunächst einige Beispiele, in denen dies Bild nur als Vergleich gewählt wird:

115. "Anfangs hatte der Anblick eine gewisse Ähnlichkeit mit einem großen Brande, dessen Kohlenqualm von heftigem Winde bewegt wird."

178. „Der Fuß sah wie rotierende Ranchmassen aus."

208. Der Staubfuß war eine rauchähnliche Masse, die über den Berg rollte."

15. Die Trombe erschien als "eine Art von Rauch, der in verschiedene Kugeln geteilt war, deren jede von einer rotatorischen Bewegung bewegt wurde."

97. „Die Wolke glich einem dicken Rauch."

14. „Es war wie ein Wirbel aus Feuer, der über die Erde rollte, mit einem schrecklichen Geräusch. Es ging daraus eine Art gelbroter Rauch hervor, der in der Mitte am klarsten war [Hohlröhre!], und der immer heller wurde in dem Maße wie er emporstieg. Die Säule, die er bildete, konnte 1 1/2 Fuß Breite haben [wohl die übliche Unterschätzung], und stieg kochend mit einer unglaublichen Geschwindigkeit empor bis zu einer schwarzen Wolke, die darüber lag."

105. „Die Staubwolken, die daraus hervorgingen, glichen dem Rauch eines Brandes."

A13. „Gleich darauf sahen wir in der Richtung nach den südlichsten Häusern von Süsel zwei lange Schichtwolken von N nach S gegeneinander ziehen, sich verwickeln und einen bis auf die Erde reichenden Wirbel bilden, der wie eine dunkle Rauchwolke rasch durch Süsel zog."

Bei den folgenden Beispielen wurde der Irrtum tatsächlich begangen, aber als solcher von anderer Seite oder nachträglich erkannt:

177. Der Beobachter sah „eine Art Pfeiler, der wie Rauch aussah. Zuerst glaubte ich, die Färberei von Abro stände in Brand".

73. „Die Dichtigkeit des Schlauches war so groß, daß einige Personen ihn für eine Rauchsäule hielten."

194. „Die treibenden Massen von dunklen Wolken wurden von manchen als durch ein nahes Großfeuer verursacht aufgefaßt."

219. „Anfänglich beobachtete ich diese wie den Rauch eines entstehenden Waldfeuers, sich dann aber in einen senkrechten Trichter nach oben formend und weitergehend."

36. „... . lief sie bald quer durch ein Kornfeld von 300 bis 400 Ackern ; zehn Zeugen glaubten das Getreide brennend zu sehen, angesichts des dichten Rauches, der sich überall bei ihrem Durchgang von der Erde erhob. Welche Überraschung für die Zeugen, als sie das Kornfeld einige Augenblicke darauf durchschritten, hier keinerlei Schaden vorzufinden als daß das Getreide ein wenig zerzaust war, ohne geknickt oder niedergelegt zu sein!"

108. „Alle sagen übereinstimmend aus, daß die von der Trombe eingehüllten Spinnereien mit Flammen und Rauch bedeckt erschienen. Man eilte von allen Seiten mit Pumpen herbei, um den vermeintlichen Brand zu löschen."

A1. Während bis nach Mangschütz [das in der Trombenbahn lag] nur eine auf der Erde aufstehende, wirbelnde schwarze Wolkensäule beobachtet wurde, erschien es den Bewohnern der etwa 550 Ruthen [2 km] unterhalb liegenden Kolonie Neuwelt, als ob das Dorf Mangschütz in Flammen stände."

Bei der nun folgenden Gruppe von Beobachtungen ist die Täuschung vom Berichtersteller nicht mehr klar erkannt:

6. Die Trombe wird als „feuriger Rauch" geschildert.

180. Hier ist „nach den Angaben aus dem Fuß der Trombe in Dreux eine Art Flammen hervorgegangen."

24. „In diesem Augenblick sah man am Horizont eine Art großer Pyramide, bestehend aus Feuer und Rauch und verschiedene Farben zeigend."

79. Die Trombe war „ein schrecklicher Wirbel von schwarzem Rauch und Feuer."

92. „Eine Säule von Flammen . . . Die Flamme erlosch sogleich und verwandelte sich in einen Rauchwirbel, der die Atmosphäre verdunkelte."

45. Der „korbähnliche" Staubfuß „schleuderte Feuer in Gestalt von Spiralen aus, von denen die einen nach oben und die anderen nach unten gerichtet waren."

5. „Da bemerkte er eine Art großen Ofens [fournaise], von dem eine orangefarbene Feuerpyramide ausging . . . Die Flammen der Pyramide erschienen stark mit Rauch gemischt, waren aber doch sehr glänzend. Der Glanz der Säule [wohl aus Wolkenteilchen] war lebhafter als der der Pyramide" [aus Staub; beide waren von der Sonne beschienen und etwa 5 km entfernt].

20. „Henning und andere Personen sahen beim Rübenstechen dies Meteor wie eine große Lichterscheinung [eclair] oder eine Kugel von Feuer... Eins seiner Kinder, im Alter von sechs Jahren, rief: Der Hof Ferrybust steht in Flammen! Der Vater ging hinaus, um zu sehen, was das Kind sagte;' er sah kein Feuer mehr, aber einen schrecklichen Rauch, und er hörte ein Geräusch, als ob das Feuer eine Scheune verzehrte . . . Sie fürchteten, daß er mit seiner Familie und seinem ganzen Haus verbrannt wäre, da sie das Feuer auf diese Stelle zu wandern sahen und ein Geräusch hörten, als ob das Haus eingestürzt wäre." (Am Schlusse dieser Beschreibung hebt Peltier hervor, „daß die entfernteren Personen das Meteor ganz in Feuer sahen, während diejenigen Personen, die mitten darin waren, nichts davon bemerkten". Diese auch in den folgenden Beobachtungen wiederkehrende Eigentümlichkeit, durch die auch Peltier wohl hätte stutzig werden können, ist für den Irrtum, bezeichnend.)

85. „Andere [Weiber] liefen angstvoll davon und schrieten zu Hause: Die ganze Flur stehe in Brand!... . Seine [des Staubfußes] Gestalt war ziemlich kegelförmig, seine Farbe bald graulich weiß, gelblich, bald dunkelbraun und mehrmals feurig. Das erste Meteor der Zapfen; ... hatte während ungefähr 18 Minuten eine große Masse graulich weißen und oft feurigen Dampfes ausgeströmt."

Dem Verfasser Nöggerath, der diese Angaben gesammelt hat, scheinen bei dem Ausdruck „feurig“ gar keine Bedenken gekommen zu sein, obwohl ein Arbeiter in den Staubfuß hineingeriet, ohne etwas von Feuer zu merken; denn im Geleitwort hebt er ausdrücklich die „merkwürdige Eigentümlichkeit“ hervor, „die in gleicher Art wohl kaum irgend vorgekommen oder beobachtet seyn mag, nämlich, daß der sogenannte Rauch oder Dampf in der Trombe zum Theil leuchtend oder feurig erschien.“

106. „Solche, die weiter entfernt waren, behaupteten, nur eine Art dicken Rauch gesehen zu haben, der sie glauben machte, die Meierei stände in Flammen.“ Zwei Personen, die in der Trombe waren, sagten aus, sie hätten Feuer gesehen; die Aussagen der anderen gehen auseinander, „indessen es scheint, als ob die, welche Feuer gesehen zu haben versichern, in der Mehrzahl sind.“ Interessant ist auch, daß die Versicherungsgesellschaft „La France“ bei der Beschädigung eines Hauses gegen ihren Vorteil auf Blitzschaden erkannte.

105. „Einige Personen behaupten, Feuer oder einen Lichtschein an den beiden Enden [der Trombe] gesehen zu haben; aber man ist sich nicht einig über diesen Umstand, und man sollte auch meinen, daß es am hellen Tage schwierig sein müßte, diesen Lichtschein wahrzunehmen.“ Gerade der Wortlaut dieser letzteren Beobachtung legt eine schon früher geäußerte Vermutung nahe, nämlich, daß durch den Hohlraum der Trombe hindurch Licht von oben herabdringt, welches bei der durch die Gewitterwolke meist verursachten großen Dunkelheit wohl imstande sein könnte, dem Trombenkörper das Aussehen zu geben, als sei er selbstleuchtend.

Dies gilt z. B. auch für die Trombe Nr. 107, wo es heißt: „Eine Erscheinung von sehr blassem Feuer zeigte sich ohne irgend eine Detonation überall wo die Trombe über den Boden hinzog.“ Und ähnlich heißt es bei Nr. 108: „Alle Arbeiter, welche diese Katastrophe erlebten [nämlich den Einsturz der Fabrik], haben leuchtende Partien [des parties lumineuses] um sich herum gesehen.“ Ein solcher Lichteffekt ist aber gewiß das einzige, was wir als tatsächlich zugestehen können. Die Berichte von Flammen und Feuer dürften dagegen auf dem Mißverständnis beruhen, dessen Entstehen im vorangehenden darzulegen versucht wurde. Es gibt indessen, namentlich in der französischen Trombenliteratur, die von solchen Feuerberichten am meisten durchsetzt ist, noch viel krassere Fälle als die angeführten; wir wollen von diesen Beschreibungen, bei denen Voreingenommenheit und Kritiklosigkeit die Hauptrolle spielen, nur eine einzige herausgreifen, nämlich die Trombe von Chatenay, welche Peltier untersucht hat:

102. Das Laub verdorrte „wie die Blätter, die man starker elektrischer Strahlung ausgesetzt hat.“ Ein Schäfer, der in die Trombe geriet, merkte nichts von dem Feuer, welches ein entfernter Beobachter zu sehen meinte. Damit findet sich Peltier in folgender Weise ab: „Aber was er [der entferntere] sah, und was der Schäfer Olivier nicht gesehen hatte, der durch die Staubwolke geblendet war, in deren Mitte er sich befand, das war das untere Ende des Wolkentrichters, welches nach seiner Ausdrucksweise eine rote Feuerkalotte war, die anscheinend bis 8 m über dem Boden reichte.“ Diese Feuerkalotte läßt sich wohl als kugelförmigen Staubfuß auffassen. Schwieriger ist aber die Deutung bei folgenden Berichten: „Sie [Frau Bulot] sah auch Flammen auf die Bäume oder neben sie herabfallen. Frau Fernere und ihr Dienstmädchen sahen das feurige Ende des Trichters; sie verglichen die daraus hervorgehende Flamme mit einer Hufschmiede. . . . [Die Trombe senkt sich auf den See von Chatenay:] Zuerst gab es eine Entladung aus der Entfernung, welche eine große Flamme erzeugte, die von dem Trichter in den Weiher zu fallen schien. Diese feurige Kugel wurde gesehen von Frau Louvet und ihrer Tochter, welche sich in diesem Augenblick neben dem Weiher befanden.“ — Ein Kommentar ist wohl unnötig.

Die Formen des Staubfußes auf dem Lande sind die gleichen wie die des Wasserstaubfußes auf See und sollen deshalb gleich zusammen mit diesen besprochen werden. Sie lassen sich mehr oder weniger auf eine Grundform zurückführen, welche einen um den Fuß der Wolkensäule herumliegenden Wirbelring darstellt [vgl. Fig. 79 (Diesen Wirbelring hat auch Weyher bei seinen früher erwähnten Versuchen gefunden.

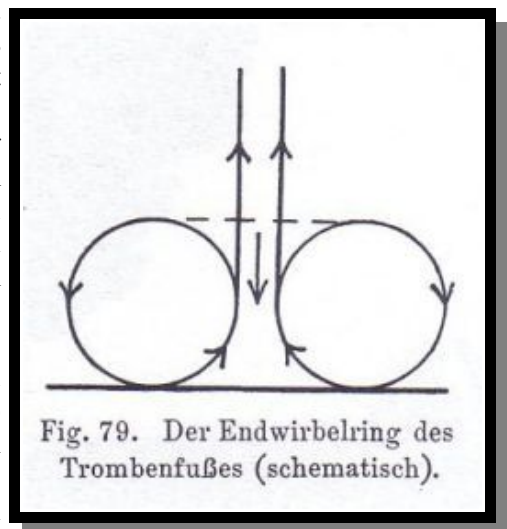
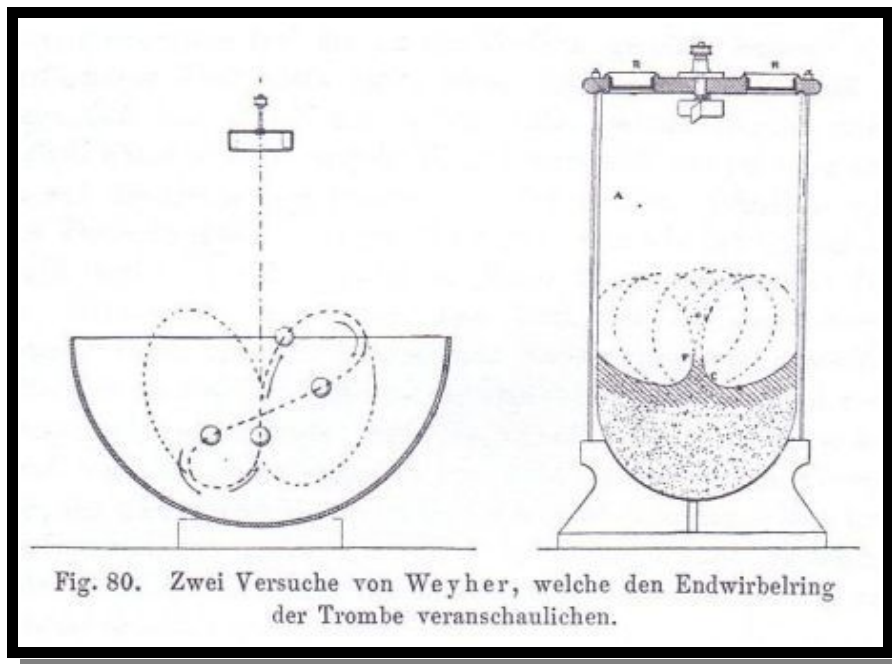


Fig. 79. Der Endwirbelring des Trombenfußes (schematisch).

Die Bewegung in ihm wird durch eine Versuchsanordnung sichtbar gemacht, welche Fig. 80 links zeigt. Durch das über der Schale befindliche Windrädchen wird eine vertikale Trombe erzeugt, und die Bewegung in dem großen Wirbelring, dessen Höhe sich durch Variieren der Geschwindigkeit verändern läßt, wird sichtbar durch kleine luftgefüllte Gummiballone von 4 bis 5 cm Durchmesser.



Die Eigentümlichkeit der Luftbahnen besteht darin, daß ihr unterer, nach innen gerichteter Teil nur wenig, ihr oberer, nach außen gerichteter erheblich mehr von der radialen Richtung abweicht; am Boden des Gefäßes ist also die Rotation um die vertikale Wirbelachse noch sehr gering, am Oberrand des Wirbelringes aber viel stärker. Der Wirbelring wirkt also wie eine Art Kugellager für die schnell rotierende, auf ihm stehende Trombe.

Die in derselben Figur rechts dargestellte Versuchsanordnung zeigt die Form des ganzen Endwirbels und kann als getreue Nachbildung des ballonförmigen Fußes der Tromben gelten. Der Boden des Gefäßes ist hier mit einer Mehlschicht bedeckt.)).

Diese Form war offenbar bei Nr. 45 vorhanden, wo der Staubfuß als „korbähnlich“ bezeichnet wird, und es weiter heißt: „sich um sich selbst drehend, schleuderte sie Feuer in Gestalt von Spiralen aus, von denen die einen nach oben und die anderen nach unten gerichtet waren.“ Ist dieser Wirbelring im Verhältnis zur Höhe etwas schmaler, so daß das ganze Gebilde mehr kugelförmig ist, so erweckt es bei vielen Beschauern den Eindruck eines dicht über dem Boden hintreibenden Ballons. So erschien bei Nr. 238 „vor dem Walde eine eigentümlich grauschwarze Erscheinung, in welcher man zuerst einen ganz nahe am Boden sich vorwärts bewegenden Ballon vermutete. Aber schon nach einigen Sekunden sah man, wie diese kugelförmige Erscheinung, die einen Durchmesser von etwa 5 m zu haben schien [wohl die übliche Unterschätzung], allmählich verjüngend sich säulenförmig nach oben verlängerte...

Unter beständigem Umdrehen bewegte sich die Naturerscheinung von NW nach SE, nach und nach zu einer Höhe von mindestens 30 m [wohl immer noch unterschätzt!] ansteigend.“ Dasselbe Bild vom Ballon wird beim Wasserstaubfuß der Wasserhose Nr. 39 gebraucht: „Dieser Raum [ein Kreis voll „kochenden“ Wassers] war umgeben von einem Gürtel oder einer Atmosphäre weißlicher, durchscheinender Dämpfe, welche der Figur nach einem Ballon ähnelte, der sich nur soweit erhob, wie nötig war, um die kochende Luft einzuhüllen, und dabei einen Zustand der Ruhe ohne Bewegung bewahrte [daß dies offenbar nur die stationäre Form bezeichnet, wurde schon auf S. 179 —180 gesagt], während das Ganze dem Winde folgend fortschritt“ (In Finleys Liste der Formbezeichnungen von Tornados (Tornadoes, New York 1887, S. 114) kommt 20 mal die Bezeichnung „Balloon“ vor. Vermutlich handelt es sich auch hier um den Ring- oder Kugelwirbel des Staubfußes.).

Dieselbe Erklärung muß wohl auch für den Fuß der einen unter Nr. 47 beschriebenen Wasserhose gelten, der durch die etwas stilisierte Zeichnung (Fig. 81) dargestellt wird. Dort erschien „ein runder Fleck auf der See, von 10 oder 12 Toisen im Durchmesser [wohl

wieder unterschätzt], wo das Wasser zwar noch nicht wirklich kochte, aber doch im Begriff zu seyn schien, aufzukochen. .. Denn rings herum, und zuweilen auch innerhalb jenes Kreises, zeigten sich acht Toisen hoch [s. o.] und höher Dünste in Nebelgestalt, denen (nur nach einem unvergleichlich größern Maßstabe) völlig ähnlich, die sich auf der Oberfläche des Wassers erheben, wenn es anfängt zu siedeln... Zu meiner großen Verwunderung erhielten sich stets dabei die rings umher befindlichen Dünste gleich aufgespannten Segeln, ungeachtet der außerordentlichen Gewalt des Windstoßes, der sie dem Ufer zutrieb."



Fig. 81. Kugelförmiger Wasserstaubfuß einer blinden Wasserhose bei Nizza [47] nach Michaud.

Wenn der Staubfuß bei Nr. 14 geschildert wird „wie ein Wirbel aus Feuer, der über die Erde rollte“, so scheint in letzterem Wort gleichfalls eine Andeutung der Kugelform zu liegen. Auch bei Nr. 208 "rollte eine rauchähnliche Masse über den Berg". Vielleicht gehört auch die unklare Beschreibung Nr. 15 hierher: „... sah ich von Weitem her auf mich zukommen eine Art von Rauch, der in verschiedene Kugeln geteilt war, deren jede von einer rotatorischen Bewegung bewegt wurde." Bei Nr. 116 scheint die äußere Begrenzung des Wirbelringes nicht mehr so glatt gewesen zu sein; hier erzeugte der herabsteigende Wolkenschlauch „ein ungeheures Gebüsch [buisson], das sich etwa 15 bis 20 m über dem Meeresspiegel erhob" [wohl stark unterschätzt]. Bei Nr. 237 bestand der Wasserstaubfuß nur aus „mächtigen Schwaden, welche neben der Säule auf etwa $\frac{1}{6}$ der gesamten Länge in die Höhe stiegen und sich dann verloren".

Ganz gewaltige Dimensionen scheint dieser Wirbelring bei der zweiten unter Nr. 47 beschriebenen Wasserhose gehabt zu haben; nach der hier nicht wiedergegebenen Zeichnung muß die Wasserstaubwolke fast bis an die Wolken gereicht haben. „Ihr kreisförmiger Fuß allein hatte einen solchen Umfang, daß ein Kriegsschiff von 100 Kanonen mit allen seinen Segeln darein gänzlich hätte können eingehüllt und versteckt werden (Das wäre nicht viel; man muß aber die übliche Unterschätzung; berücksichtigen. Die Beobachtung fand aus 2 bis 3 franz. Meilen statt.), woraus man auf die Größe der Dunst- und Nebelwolken schließen mag, deren Theile in ihrem richtigen Verhältnisse in der Zeichnung dargestellt sind." Die Bewegung in dieser Wasserstaubwolke fand „vom Mittelpunkt aus nach dem Umkreise in parabolischen Strömen" statt. Bei der Wasserhose Nr. 48, die von demselben Beobachter an gleicher Stelle beobachtet wurde, war der Kranz von Wasserstaub viel niedriger (vgl. Fig. 59 auf S. 218): „Ebenso auffallend war das Unvermögen in den Füßen dieser beiden Wasserhosen, ihr sie umgebendes Wassergefieder aufzurichten. Man sieht es ihnen an, daß es mit Gewalt niedergehalten und verhindert wurde, so senkrecht in die Höhe zu steigen, wie dies bei den vorher beschriebenen geschah."

Die Angaben über die Dimensionen beruhen offenbar so gut wie alle auf Unterschätzung; die Höhe variiert nach der Schätzung zwischen 5 und 30 m; einmal ist angegeben: $\frac{1}{6}$ der Wolkenhöhe. Nehmen wir letztere zu 1200 m an, so ergibt sich 200 m Höhe für den Staubkranz. Selbst bei nur 600 m Wolkenhöhe müßte letzterer noch 100 m hoch gewesen sein. Das Verhältnis von Höhe zur Breite des Staubkranzes, welches natürlich dem Schätzungsfehler weniger stark unterworfen ist, gibt bei Nr. 81 (80 bzw. 300 Fuß geschätzt) 3,8; bei Nr. 205 (5 bis 6 bzw. 15m geschätzt) 2,1. Nehmen wir hiernach an, die Höhe betrage in Wirklichkeit $\frac{1}{3}$ der Spurbreite der Trombe und setzen letztere gleich 200 m, so folgt für die Höhe des Staubkranzes etwa 70 m (Bei der Ausmessung der Wasserhose von Cottage City fand Bigelow als Höhe des Staubkranzes 128 m, bei 220 m Breite. (Verhältnis 1,7.) Die Höhe betrug hier $\frac{1}{8}$ der Wolkenhöhe (1097 m).) Die ungewöhnlich starken Fehlschätzungen dürften daher rühren, daß der Wasserstaub zu wenig dicht ist, um aus der Nähe ein Urteil über seine Grenzen zu gestatten.

In vielen Fällen gelangt nur der innere Teil des Wirbelringes, der meist dichter ist, zur Beobachtung. Dann werden garben- oder buketartige Formen beschrieben, und je nachdem der obere oder untere Teil eines solchen Gebildes besser entwickelt ist, wird daraus ein aufrechter oder ein umgekehrter Trichter. Diese letztere Form bildet zusammen mit dem aufrechten Wolkentrichter die auf Fig. 6, Nr. 7 (S. 46), Fig. 29 (S. 147), Fig. 58 rechts (S. 218) und Fig. 62, Nr. 9 (S. 221) abgebildete Sanduhr. Es ist natürlich zweifelhaft, ob man in diesem Falle noch berechtigt ist, von einem Wirbelring zu sprechen; seine Achse müßte hier mitten zwischen Wolke und Erde liegen. Aber es gibt jedenfalls einen kontinuierlichen Übergang von dem einen zum anderen Extrem.

Bei Nr. 76 glich der Fuß einer Garbe. Bei Nr. 131 war er „ein bouquetartiger dampfender Strudel, ähnlich wie ein Segnersches Wasserrad“, bei Nr. 218 ein „Wirbel von auseinander geschleudertem Wasser ähnlich einem Spray zum Besprengen des Rasens in Gartenanlagen“.

Die aufrechte Trichterform wird in folgenden Fällen beschrieben:

174. „Das untere Stück einer solchen Säule [Wasserhose] bildete ein Kegel, der mit der Spitze nach unten in rotierender Bewegung wie ein Kreisel auf der Oberfläche der See hinzugleiten schien.“ Der Wortlaut schließt hier den naheliegenden Verdacht aus, daß der Wolkentrichter gemeint sei.

241. „Das Wasser spritzte nach allen Seiten auseinander, während im Innern des haushohen Wirbels, der die deutliche Form eines Trichters annahm, das Wasser immer höher stieg.“ Auch hier ist jedes Mißverständnis ausgeschlossen. Auch die folgende Beobachtung ist wohl so zu verstehen:

186. Die Erscheinung, vermutlich nur der Wasserstaubfuß, „zog bei Windstille langsam von der Nehrung herauf und blieb über der Mitte des Haffes vollständig stille stehen.

Nur im Innern zeigte die etwa 20 m hohe trichterförmige Wasserhose eine gewaltige Bewegung, es ging ein feiner Sprühregen von ihr aus, der, von den Sonnenstrahlen beschienen, in Myriaden blitzender Fünkchen herniederfiel“.

95. „Die Staubwolke, welche wirbelnd über die Erde fortzog, war ganz grau von Farbe und undurchsichtig. . Sie hatte die scheinbare Form eines Trichters, dessen Spitze, nach unten gekehrt, einen Durchmesser von 30 — 40 Fuß hatte, dessen oberer Durchmesser aber drei bis vier Mal so groß war. Die Höhe hatte bald alle nahe gelegene Häuser weit überstiegen.“ Hier ist allerdings eine Verwechslung mit dem Wolkentrichter denkbar.

Auch bei Nr. 170 wurde eine 20 bis 25 Fuß hohe „trichterartige Wassersäule“ auf der Oder beobachtet.

Während diese Beobachtungen eines aufrechten Trichters selten sind, ist die Form des umgekehrten Trichters oder des aufrechten Kegels für den Fuß der Trombe sehr häufig. Man findet diese Form auf den Bildern Fig. 6 (S. 46), Fig. 25 (S. 137), Fig. 27 (S. 145), Fig. 29 (S. 147), Fig. 58 (S. 218) und Fig. 62 (S. 221). Ausdrücklich hervorgehoben wird sie z. B. bei den Beschreibungen Nr. 5, 105, 142, 178, 210 und vielen anderen. Ein Eingehen auf diese Form, welche wenigstens bei Landtromben wohl die gewöhnlichste sein dürfte, erübrigt sich (Finley (Tornadoes, New York 1887, S. 114) gibt eine Tabelle der verschiedenen Formbezeichnungen, die in den Tornadobeschreibungen auftreten. Mehr als einmal vorkommende Formen sind: „Funnel“ 981 mal, „Inverted cone“ 24mal, „Balloon“ 20mal, „Whirlwind“ 14mal, „Hour-glass“ 1mal, „Cone“ 10mal, „Waterspout“ 6mal, „Inverted funnel“ 5 mal, „Basket“ 4mal, „Serpent“ 4mal, „Cylindrical“ 3mal, „Elephant's trunk“ 2 mal.).

Außer diesem Staubkranz, welcher den Fuß der Trombe umlagert, treten bei Wasserhosen auch noch sehr interessante und charakteristische **Deformationen der Wasseroberfläche** unter der Trombe auf. Die Art dieser Deformation scheint zu wechseln, jedenfalls geben die Beobachtungen kein eindeutiges Bild davon; bald wird von einer Vertiefung des Wasserspiegels, bald von einer Erhöhung gesprochen, und mitunter scheinen beide gleichzeitig vorhanden zu sein, nämlich eine zentrale Vertiefung, die von einer Aufwölbung umgeben wird, wobei wahrscheinlich letztere bald als geschlossener Ring, bald nur in Sichelform ausgebildet ist. Außerdem wird aber das Wasser in der Zylinderfläche stärksten Aufsteigens in hüpfenden, spitzen Wellen emporgerissen, welche eine zackige Krone bilden können; es kann aber auch weiter mitgerissen werden und einen hohlen Wasserturm bilden, ja in Form von Gischt bis zu den Wolken emporgetragen werden. Wir wollen diese Erscheinungen der Reihe nach in den Beschreibungen verfolgen.

Eine schalenförmige Vertiefung der Wasseroberfläche, die unter dem inneren Teil der Trombe liegt und außen von der Zone mit Spitzwellen umgeben ist, wurde in folgenden Fällen beobachtet:

53. „Der Fuß der Säule schien auf einer großen kugelförmig hohlen Schale zu ruhen und mit ihr fortzugleiten. Des Schiffes Höhe, von der ich herabsah, erleichterte es mir, dieses zu bemerken. Um den Rand der Schale kochte die See mit Heftigkeit empor.“ Da die Wasserhose gleich darauf über das Schiff selber fortging, muß die Beobachtung als zuverlässig gelten.

218. Die Form des Fußes glich nach einem Beobachter „einem hübschen Becken mit unebenem Rande, ähnlich wie eine große weiße Muschel“.

51. „Der See darunter schien ausgehöhlt; wiewohl das eine Täuschung seyn konnte“ [Entfernung 5 ½ km].

32. „Sie hatte im Fluß eine Vertiefung ausgehöhlt.“

43. „Da nun diese Lamelle [die Spitzwellen an der Peripherie] an mehreren Stellen zerrissen war, ließ sie sehr deutlich eine Vertiefung in ihrem Inneren erkennen, die aber nicht in der Mitte lag, und die mehr als 2 Fuß tief in das Meer eindrang ...“ [Bei der zweiten und dritten Trombe, die noch näher waren:] „Man hörte aufs Deutlichste das Geräusch der Luft, welche, vom oberen Teil der Trombe senkrecht herabfallend, mit Gewalt auf das Meer schlug, es zwang sieh auszuhöhlen, und um die Höhlung herum einen schäumenden Vorhang von mehreren Fuß Höhe emporhob; und die Oberfläche der Höhlung kochte und schäumte und wurde in einer kreisenden Bewegung herumgeführt.“

81. „Es war ein prachtvoller Anblick: die ungeheure Kraft des wirbelnden Windes durchbohrte etwa 24 Fuß tief das Wasser, so daß man vom Lande aus sogar den Boden in der Mitte des Stromes unterscheiden konnte, während daneben die Wellen sich 40 bis 50 Fuß hoch über den Spiegel erhoben.“ Die Behauptung, daß man vom Lande aus in dieser doch nur schmalen Vertiefung, die noch hinter einer 40 bis 50 Fuß hohen Erhebung lag, den Boden erkennen konnte, erscheint wenig wahrscheinlich, selbst wenn die hohen Rheinufer berücksichtigt werden. Wegen des Hin- und Herpendelns des Stromstriches ist das Flußbett oft gerade in der Mitte sehr flach. Vermutlich wurde der Grund an einer solchen Stelle bloßgelegt, und der Berichterstatter hat nachträglich dafür die maximale Tiefe des Rheins gesetzt.

128. Ein Beobachter gibt an, die Trombe hätte das Wasser des Sees so aufgesogen, daß er noch ziemlich weit drinnen den Grund hätte sehen können.

42. „... und erzeugte zuletzt eine Vertiefung im Wasser, daß man fast bis auf den Grund des Flusses sehen konnte.“

Es ist unmöglich, diese Beobachtungen als Täuschungen zu deuten. Die Vertiefung unter dem mittelsten Teil der Trombe existiert also. Übrigens ist sie leicht zu erklären; freilich nicht durch den Druck des in der Achse senkrecht herabfallenden Windes. Dieser wird ja höchst wahrscheinlich erst durch die an der Wasseroberfläche herrschende Luftverdünnung erzeugt und unterhalten; dann können wir ihn aber nicht umgekehrt als Ursache eines ebendort herrschenden Überdruckes, der das Wasser niederdrückt, verantwortlich machen. Dies ist aber auch gar nicht nötig; die Wasserfläche kann trotz des Unterdruckes vertieft werden, wenn das Wasser durch die Trombe mit in Rotation versetzt wird. Und hierfür spricht sehr entschieden die Beobachtung Nr. 43, wo ausdrücklich die kreisende Bewegung des Wassers erwähnt wird. Auch die Bemerkung, daß die tiefste Stelle nicht in der Mitte lag, bestätigt diese Vorstellung. Denn der einmal erzeugte Wasserwirbel besitzt eine gewisse Selbständigkeit und bleibt hinter der fortschreitenden Bewegung der Trombe naturgemäß etwas zurück. Da die Übertragung der Wirbelbewegung auf das Wasser immer einige Zeit erfordert, muß hiernach erwartet werden, daß bei den schneller fortschreitenden Tromben diese Vertiefung der Wasserfläche geringer ist und gleichzeitig zurückbleibt; dann muß aber die Luftverdünnung um so mehr, zur Geltung kommen, welche eine Aufwölbung des Wassers verursacht. Als statische Erscheinung muß diese Wirkung nämlich momentan eintreten, also auch bei schnellen Tromben unvermindert in Erscheinung treten. Ein Beispiel hierfür ist die auf S. 137 in Fig. 25 wiedergegebene Abbildung einer amerikanischen Wasserhose, welche diese Aufwölbung sehr deutlich zeigt. Aber auch unter den europäischen Beschreibungen finden sich Beispiele:

115. „Die schöne Erscheinung glich einer sich drehenden Krone, deren weiße Schaumstrahlen 20 bis 30 Fuß aufschossen. Die innere Kreisfläche [Durchmesser etwa 50 Schritt geschätzt] zeigte sich dabei zu einem Schilde aufgewölbt (was deutlich von der Mehlemer Au, aus halbstündiger Entfernung zu erkennen war) und mit Schaum bedeckt. Man hätte wännen können, es habe sich im Rheine eine flache Insel erhoben, um welche im Kreise das Wasser aufspritze.“

A 14. [Gleichzeitig Vertiefung und Erhebung] „... [Die Fischer wurden gewahr,] daß in dem See und dessen Wasser, nicht weit vom Ufer, eine merkliche Vertiefung . . . wohl über Mann tief entstanden (es habe geschienen, so drücken sie sich hievon aus, als ob die Hälfte des Wassers aus dem See hinweggenommen wäre); daß zugleich das Wasser aus dem See bey zwanzig bis dreyßig Schritte weit schnell über das hier seichtere Ufer ausgetreten, die Kähne mit sich fortgerissen, und solche, nebst einigen Fischen, bey seinem baldigen Zurückflusse auf dem trockenen Lande liegen lassen (Ja ein Paar Kähne wären von den aufschwellenden Wellen über den drey Fuß hohen Bohlenoder Schlietenzaun geworfen worden, der sich zwischen dem See und den Fischerhäusern befindet).“ Das Ansteigen des Wassers am Ufer, welches dann von einem Fallen abgelöst wird, ist auch von dem Pastor beobachtet worden, dessen Kahn sich wohl etwa in der Peripherie der Trombe befand, als er das Ufer erreichte: „Das Wasser war hoch am Ufer, und mein Knecht mußte den Kahn halten, daß er nicht wegtriebe ... [der Knecht schöpft das Wasser aus] ... zu unserer Verwunderung aber war das Wasser verlaufen, und der ledige Kahn lag nunmehr auf trockenem Lande“. (Anmerkung Genzmers: „Man verstehe recht: mit dem einen Ende, so daß das andere noch im Wasser war.“)

Man wird hiernach zugeben müssen, daß die Wassererhebung jedenfalls zweifellos vorhanden ist, aber ihr Verhältnis zu der zentralen Vertiefung noch nicht vollkommen klargelegt ist. Zu erwarten wäre, daß bei stillstehenden Tromben sich die Erhebung ringförmig um die zentrale Vertiefung herumzieht, während sie bei fortschreitenden auf der Rückseite durch die jetzt zurückbleibende Vertiefung teilweise aufgehoben wird und sich daher hauptsächlich an der Vorderseite geltend macht. Es ist übrigens theoretisch einleuchtend, daß die Aufwölbung nicht so große Beträge erreichen kann wie die Vertiefung. Denn wenn die Druckerniedrigung in der Trombe z. B. 50 mm beträgt, so wird der Wasserspiegel statisch nur um $\frac{1}{2}$ m gehoben, eine Größe, die zu den angeführten Beispielen gut zu passen scheint.

Dagegen scheint die zentrale Vertiefung in dieser uhrglasförmigen schwachen Erhebung, wenn man den Beobachtungen trauen darf, oft erstaunlich tief hinabzugreifen.

Die Vertiefung ist umgeben von einer Zone tanzender Spitzwellen.

Ist diese Zone sehr breit, so zeigt sich aus der Entfernung nur ein runder Fleck mit starker Schaumbildung. Mehrmals, z. B. bei Nr. 39 und 198, wird das Bild eines versenkten Kessels mit kochendem Wasser gebraucht. Die Erscheinung kann sich aber mehr nach der Peripherie des inneren Kreises zu konzentrieren. Z. B. heißt es bei Nr. 53:

53. „Um den Band der Schale kochte die See mit Heftigkeit empor. Eine Menge kleiner und größerer Wassermassen b b (Fig. 1, S. 18) tanzte um sie herum. Sie erhoben sich zugespitzt zu einer Höhe von 12 bis 16 Fuß, und sanken, während andere wieder stiegen, herunter . . . [Nach Hinweggehen der Wasserhose über das Schiff] Es kam mir so vor, als wenn unser Schiff den Tanz der Spitzsäulen unterbrochen und den Umfang ihres Springplatzes verringert hatte. Sie erhoben sich nicht gleich wieder zu der Höhe, die ich in gleicher Weise bei ihrem Anzuge wahrnahm.“

Die Erklärung dieser Spitzsäulen, die in ihrer Form von gewöhnlichen Wellen so stark abweichen, ist wohl teilweise durch Kreuzung der verschiedenen gerichteten Wellensysteme möglich. Aber die auf diese Weise erzeugten Wellenspitzen werden durch lokale Druckunterschiede höher gesogen und von der aufsteigenden Komponente der Luftbewegung erfaßt und mitgerissen. Gerade die letztere dürfte die Hauptursache der auffälligen Form sein, weil sie eben nur auf die Erhöhungen wirkt.

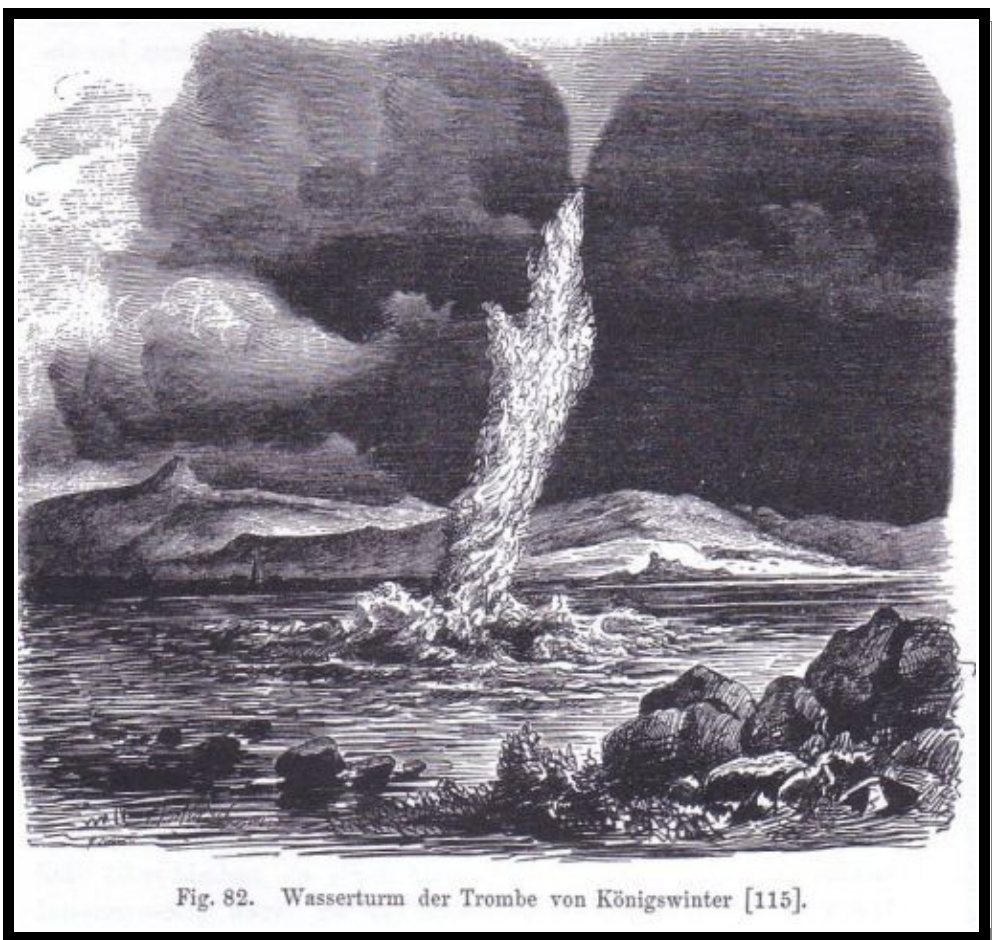
Wenn sich die aufsteigende Bewegung und damit die Spitzwellen noch mehr auf eine bestimmte Zylinderfläche konzentrieren, so entsteht die Wasserkrone, wie sie besonders in der Beschreibung Nr. 115 vorkommt:

115. „Da erhob sich das Wasser, indem auf der Peripherie eines Kreises, dessen Durchmesser 50 Schritte betragen mochte, Käbme und Strahlen von Wasser und Schaum emporsprangen. Die schöne Erscheinung glich einer sich drehenden Krone, deren weiÙe Schaumstrahlen 20 bis 30 Fuß aufschossen . . . Anfangs sah man das gegenüberliegende Rheinufer durch die Wasserkrone, was später nicht mehr möglich war . . . Dem linken Ufer nahe war die Krone schon in eine 40 bis 50 Fuß hohe Wassersäule verwandelt.“

43. Ganz ähnlich ist die schon mehrfach zitierte Beschreibung Nr. 43. Dort war es „eine Wasserlamelle, welche sich einige Fuß hoch über den Wasserspiegel erhob“, so daß man die Vertiefung im Inneren erkennen konnte.

Die weitere Entwicklung der Wasserkrone, wie sie bereits in dem vorstehenden Beispiel Nr. 115 geschildert ist, führt zur Entstehung eines hohlen Wasserturms.

115. In derselben Beschreibung wird dieser Turm noch eingehender beim zweiten Übergang der Trombe über den Rhein geschildert: "Mit einem Male erhob sich aus dem wogenden Schaume eine Masse von Wasser und Wasserdunst fast senkrecht, ein wenig nach rechts geneigt. Sehr interessant ist, daß auch der Wasserturm aus mehreren konzentrischen Röhren bestand, die dadurch sichtbar wurden, daß die inneren höher emporragten: „Sie theilte sich alsbald in drei Strahlen, welche mit einander parallel und einander nahe aufwärts streckten [strebten?] ... Die beiden seitlichen Strahlen schienen sich nun in je zwei zu zertheilen, so daß nun fünf erblickt wurden. Der mittelste stieg immer höher, der sich herabsenkenden Wolken spitze zu. Beide vereinigten sich .. Einige Minuten lang hatte die Wassersäule die auffallendste Ähnlichkeit mit einem gothischen Thurme.“ Die zugehörigen Figuren der Originalabhandlung in Pogg. Ann. sind bereits auf S. 31 mitgeteilt worden. Fig. 82 zeigt eine andere Abbildung des Wasserturms angeblich derselben Trombe, welche sich in Müller-Pouillet's Lehrbuch der Experimentalphysik findet. Ihre Herkunft habe ich nicht ermitteln können (Noch eine dritte Abbildung dieser Trombe, welche in der Ausführung etwa in der Mitte zwischen den beiden anderen steht, findet sich in Müllers Lehrb. d. Kosmischen Physik, o. Aufl., herausgegeben von Peters, Braunschweig 1894, S. 715.).



73. Bei dieser Trombe „trieb der Wirbelwind den Schaum des Wassers bis zu den Spitzen der höchsten Masten empor“.

2. Die Erscheinung kommt auch schon in Scheuchzers Trombenbeschreibung vor: „... hat eine Windsbraut nächst bey Meilen das Wasser also in die Höhe getrieben, daß es einem ziemlich hohen Thurn gleich gesehen“.

177. Bei dieser Trombe war es ein „Pfeiler aus Wasser“.

207. „... erhob die Wolke das Wasser in einer Säule höher als die Bäume“.

10. Bei dieser Trombe heißt es: „Bis einige Yards [= einige Meter] über der Meeresoberfläche erhob sich das Wasser wie eine Säule oder ein Pfeiler, und dann zerstäubte es und löste sich in Wolken auf.“

218. „Zuerst auf dunklem See ein lichter [Schaum-]Kreis und darüber Wolke mit trichterförmiger Spitze. Plötzlich steigt aus dem Kreis ein Stalagmit empor ...“

123. „Ein unten spitzer, oben breiter Wolkensack sank pfeilschnell herunter, dem dann ebenso schnell vom Seespiegel aus ein Wasserkegel entgegen schoß, und so stand plötzlich auf weiß aufschäumender Basis eine tanzende Wassersäule da, welche Wolke und See vollständig mit einander verband.“ Hier ist also der Wasserturm, wohl nach oben allmählich aus immer lufthaltigerem Gischt und schließlich wolkenähnlichen Tröpfchen bestehend, bis zur Wolke hinauf verlängert, wie es ja auch bei Nr. 115 in einer bestimmten Entwicklungsphase der Fall war.

216. Auch bei dieser Beobachtung heißt es: „Blitzschnell zog sich dieser Rüssel in ein rauchgefärbtes, peitschendes, schnurähnliches Band aus, um sich mit jenem weißen Fleck zu vereinigen. Dann stieg das Seewasser mit einem Schläge wie ein Hydrant von unglaublichem Drucke in die Höhe, scheinbar im Vergleich zu den Bergen 1 Kilometer hoch.“

Es entspricht durchaus den früher erläuterten Vorstellungen von dem um den Trombenfuß herumliegenden Ringwirbel, wenn dieser Wasserturm bisweilen am oberen Ende sich trichterförmig erweitert und das Wasser dort in einem Sprühregen nach außen schleudert. Diese Beobachtungen sind bereits oben besprochen worden, so daß ein Hinweis darauf genügt. Es sind hauptsächlich die Nummern 170, 174, 186.

Aus dem Angeführten geht hervor, daß die Höhe des Wasserturms sehr variieren kann. An dem einen Ende dieser Formenfolge steht die Wasserkrone, am anderen die bis zur Wolke reichende Säule, die unten vielleicht noch aus einer zusammenhängenden Wasserlamelle oder wenigstens grobem Gischt, oben aber aus feinstem Wasserstaub besteht. Die Zahlen seien noch einmal zusammengestellt:

	Nr.	Höhe
Krone	43	Etwa 1 m (einige Fuß)
	10	Einige Meter
	170	6—7½ m
	115	6—9 m
Turm	115	12—15 m
	207	Höher als die Bäume
	30	20 m
	186	20 m
	92	21—24 m
	73	Bis zu den höchsten Mastspitzen (etwa 30 m)
Säule	98	33 m
	115	Bis zur Wolke
	216	Bis zur Wolke
	123	Bis zur Wolke

Auch bei diesen Zahlen darf man wohl Unterschätzungen annehmen, so daß die Lücke zwischen 33m und der doch mindestens 500 — 1000 m betragenden Wolkenhöhe nicht reell zu sein braucht.

Zur Erklärung des Wasserturms kann die statische Wirkung der Druckverminderung in den Tromben kaum einen Beitrag liefern. Denn einmal müßten dann die Erhebungen stets unterhalb 10 m bleiben, da schon hierzu eine völlige Leere im Trombeninneren nötig wäre. Es war schon oben hervorgehoben, daß auf diese Weise nur eine schildförmige Erhebung um etwa $\frac{1}{2}$ m unter der Trombe entsteht. Vor allem wäre aber hierdurch auch die Form des Turmes auf keine Weise zu erklären. Daß der Turm hohl ist und sogar eine Vertiefung der Wasseroberfläche enthält, ist aus Analogie zur Wasserkrone zu schließen. Die richtige Erklärung ist offenbar die, daß die dünne Wasserlamelle, welche die Wandung des Turmes darstellt, durch Reibung an der mit großer Schnelligkeit aufstrebenden Luft schwebend gehalten wird.

Die Entstehung des Turmes ist also an die Ausbildung einer Zylinderfläche schnellsten Aufsteigern gebunden. Daher kann der unterste Teil des Turmes fortgenommen werden, ohne daß letzterer zusammenfällt:

115. „Darauf verengte sich die Wassersäule an ihrem Fuße, wo sie auf der wirbelnden und kochenden Wasserstaubmasse ruhte (Fig. 2, Nr. 5, S. 31). An der Stelle, wo diese Zusammenziehung stattfand, befindet sich im Rhein eine Untiefe, welche zur Zeit des Ereignisses nur 1 bis 2 Fuß Wasser besaß. Es war also nicht Wasser genug im Strome, um die Wassersäule zu unterhalten.“

Der Wasserturm enthält also viel weniger Wasser, als seiner Größe entspricht, weil er hohl ist. Immerhin sind es beträchtliche Massen, und wenn eine solche Wasserhose auf das Land übertritt, wo durch die Reibung die Bewegungsverhältnisse in ihrem unteren Teile plötzlich geändert werden, und das Wasser infolgedessen herabfällt, so gibt letzteres dem Beobachter meist Anlaß zu einer besonderen Erwähnung (Natürlich haben Beobachtungen dieser Art gelegentlich auch das Mißverständnis verursacht, als bestehe eine Wasserhose stets und wesentlich aus einem herabstürzenden Wasserschwall, während doch z. B. Nr. 53 beim Fortgang über das Schiff nur einige große Tropfen gab, die offenbar von den Spitzwellen stammten.)

115. So wird bei Nr. 115 berichtet, daß die Trombe, am rechten Rheinufer angelangt, „das Wasser 8 bis 10 Fuß hoch auf das Ufer“ warf.

15. Bei dieser Trombe heißt es, „daß bald darauf, als der Wirbel sich auf den See geworfen hatte, er eine große Menge Wasser emporhob . . . Ohne jeden Zweifel stammte das Wasser, mit dem das Dorf überschwemmt wurde, aus dem See“ ...

172. Die Trombe zog über ein „Wasserloch“ fort: „Das Wasser wurde aufgehoben und auf die 60 Klafter weit entfernte Dampfmühle geworfen; die Leute drinnen meinten, es sei ein Wolkenbruch.“

52. Die Wasserhose traf das Schiff, welches dabei einen starken Stoß erhielt. „Auch wurde durch die Gewalt der Wasserhose die Thür der Kajüte eingeschlagen, worauf ein großer Schwall von Wasser eindrang.“

73. Die Wasserhose füllte auf ähnliche Weise einige Leichterschiffe mit Wasser.

117. Bei dieser nächtlichen, von W. v. Siemens beobachteten Wasserhose, die das Schiff überschritt, „ergossen sich über das Schiff gewaltige Fluthen, die von allen Seiten heranzustürmen schienen, mit einer Kraft, der ich nur durch krampfhaftes Festhalten an dem eisernen Geländer des oberen Decks widerstehen konnte ... Ob man sich über oder unter Wasser befand, war kaum zu unterscheiden.

Es schien Schaum zu sein, den man mühsam athmete . . . Auch die in der Kajüte gebliebenen . . . waren zu Tode erschreckt durch das prasselnde Geräusch der auf das Deck niederfallenden Wassermassen.“

Da die Wassermassen dann herabstürzen müssen, wenn eine plötzliche Änderung des Bewegungszustandes der Trombe eintritt, so ist klar, daß die früher (vgl. S. 141) als „Platzen“ bezeichnete Erscheinung hierzu stets Anlaß geben wird.

Nur kurz sei schließlich erwähnt, daß der Wasserturm offenbar auch diejenige Erscheinung darstellt, durch welche die Trombe imstande ist, flache Gewässer gänzlich leer zu pumpen und den oben besprochenen Fischregen herbeizuführen.