

# Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

# Wind- und Wasserhosen in Europa

Wegener, Alfred
Braunschweig, 1917

Zehntes Kapitel. Die Luftverdünnung im Innern der Trombe

urn:nbn:at:at-ubi:2-11208

Eine ganz entsprechende Rechnung ist weiter von Abbé Bourgeat bei der Trombe von St. Claude (A3) ausgeführt worden. Dort wurde ein Krahn von 25 000 kg Gewicht hochgehoben; da die Angriffsfläche (die obere Plattform) eine Größe von 5 m² hatte, kann der Winddruck, der zur Hebung nötig war, zu 500 kg/m² geschätzt werden, was nach Formel (2) die Geschwindigkeit v=83 mp.s. ergeben würde (Bourgeat kommt zu 95). Diese Rechnung ist zwar sehr anfechtbar wegen der komplizierten Form des Gegenstandes; wahrscheinlich ist die Angriffsfläche zu klein angesetzt, so daß eine zu hohe Geschwindigkeit berechnet ist. Dafür handelt es sich andererseits auch hier nur um die vertikale Komponente, so daß die Gesamtgeschwindigkeit vielleicht doch diesen Wert erreicht oder überschritten hat.

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

### Zehntes Kapitel.

## Die Luftverdünnung im Innern der Trombe.

Daß im Innern der Trombe infolge der Zentrifugalkraft eine starke Luftverdünnung herrschen müsse, ist bereits von den Autoren des 18. und 19. Jahrhunderts klar ausgesprochen worden. Indessen blieb dies im wesentlichen das Ergebnis theoretischer

in Betracht kommt. Als wahrscheinlichen Wert nimmt Mohorovičič 2000 kg pro Quadratmeter an, woraus er 103 m p. s. ableitet; hierbei setzt er voraus, daß diese Geschwindigkeit etwa 450 gegen den Horizont geneigt ist, woraus für horizontale und vertikale Komponente der gleiche Wert, nämlich 73 m p. s., folgt.

Erwägungen; höchstens hätte man die eigentümlichen, durch den schnellen Druckwechsel verursachten Sprengungserscheinungen, von denen noch die Rede sein wird, als Beleg anführen können, allein über die Entstehung dieser Wirkungen waren die Meinungen früher sehr geteilt, und selbst in den Kreisen, welche die elektrische Trombentheorie an sich ablehnten, neigte man dazu, zur Erklärung dieser Erscheinungen die Elektrizität zu Hilfe zu nehmen. Eine exakte Beziehung zur Beobachtung erhielt die Theorie der axialen Luftverdünnung erst nach Einführung und Verbreitung der Barographen. Naturgemäß ist das bisher auf diese Weise erhaltene Material an Registrierungen noch sehr gering; leider ist es auch nicht vollständig ausgenutzt, indem die genaue Lage des Barographen innerhalb der Trombenspur nicht immer ermittelt und angegeben ist.

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

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

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

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

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

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

Die Wasseroberfläche, welche auch hier als die Fläche des Druckes Null ein unmittelbares Bild von der Druckverteilung im Innern des Wirbels gibt, ist jetzt ein Rotations-Hyperboloid, es bildet sich also längs der Achse eine leere Röhre. Da die lineare Geschwindigkeit nach Gleichung (2) in der Achse unendlich wird, läßt sich für jeden endlichen Druck in der Umgebung des Wirbels angeben, in welcher Entfernung von der Achse der Druck Null erreicht wird, der Wirbel also leer läuft 1).

Diese beiden Wirbelarten mit ihrer Druckverteilung sind in Fig. 46 und 47 dargestellt.

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

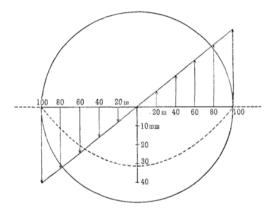


Fig. 46. Querschnitt eines Wirbels von dem Rotationsgesetz  $\frac{v}{r}$  = konst. Die gestrichelte Linie gibt die Druckerniedrigung längs eines Durchmessers, wenn die periphere Geschwindigkeit 80 m p. s. beträgt.

im vorangehenden genannten Idealformen entsprechen müssen, als im inneren Teile v mit wachsendem r zunimmt, während es im äußeren abnimmt. Auch in den angeführten Beispielen des rotierenden Wasserglases und des Ausflußtrichters ist dies der Fall; denn das erstere ist von mitrotierender Luft umgeben, deren

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>) Nach Muncke (a. a. O. S. 1686) kann man dieses Leerlaufen in folgender Weise besonders anschaulich machen: Man senke einen Trichter bis zum Rande ins Wasser und lasse ihn voll laufen. Versetzt man dann seinen Inhalt durch Umrühren in Rotation und hebt ihn etwas an, so bildet sich augenblicklich in dem unten heraustretenden Wirbel die axiale Leere.

Geschwindigkeit nach außen zu abnimmt, und der wasserleere Kanal im zweiten Falle ist mit Luft gefüllt, welche natürlich mitrotiert, und zwar in der Weise, daß die Geschwindigkeit von der Achse nach außen zu wächst. Es sind also auch in diesen Fällen immer zwei Teile des Wirbels, ein Kern und ein Mantel, vorhanden, nur daß in dem einen Falle der Kern, im anderen der Mantel aus Wasser besteht und dadurch sichtbar gemacht ist. Daß die Grenze zwischen Kern und Mantel, auch wenn beide aus gleichem

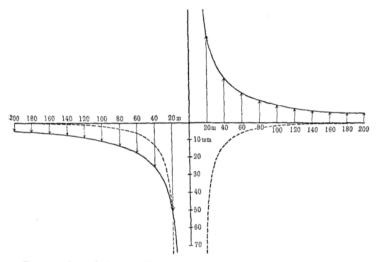


Fig. 47. Querschnitt eines Wirbels von dem Rotationsgesetz v.r = konst. Die gestrichelte Linie gibt die Druckerniedrigung an, wenn in 40 m Achsenabstand die Geschwindigkeit 50 m p. s. herrscht.

Material bestehen, dennoch meist ziemlich scharf ist, erscheint deshalb nicht unwahrscheinlich, weil die Bewegungsform des Kerns der "geradlinigen", diejenige des Mantels der "turbulenten" Bewegung ähnlich ist, zwischen denen es auch keine Übergänge gibt. Freilich kann der Mantel wohl zu einem Gleitwirbel zusammenschrumpfen, welcher dann, wie das Öl um eine rotierende Stahlachse, als Zylinderfläche den Kern umhüllt und den Übergang zur ruhenden Luft der Umgebung vermittelt. Man kann sich vorstellen, daß bei einer schnell aus der Wolkenhöhe herabwachsenden Trombe, oder bei einer solchen, die mit großer Geschwindigkeit durch die

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

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

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

wobei  $\lambda$  für den Kern den Wert — 1 hat. Für den Mantel dagegen muß  $\lambda$  einen anderen, jedenfalls positiven Wert haben, der bei "jugendlichen" Tromben nur wenig größer als + 1 ist, für "alternde" sich aber dem Wert  $+ \infty$  nähert.

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

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

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

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

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

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

Die Differentialgleichung der Druckverteilung ist sofort dadurch gegeben, daß das Druckgefälle in der Richtung auf die Achse, also  $\frac{d\,p}{d\,r}$ , der Zentrifugalkraft  $\frac{v^2}{r}$  das Gleichgewicht halten muß. Wir haben daher anzusetzen:

$$\frac{d p}{d r} = \frac{v^2}{r},$$

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

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

wo a = 0.0097 ist.

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

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

ergibt dies:

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

und

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

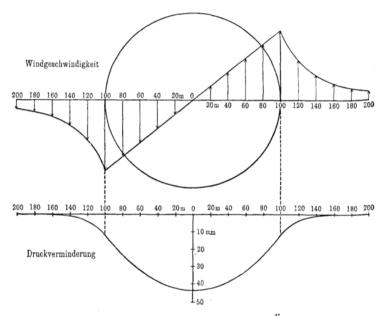


Fig. 48. Windgeschwindigkeit und Druckverminderung für  $\frac{v}{r}$  = konst. im inneren und  $v \cdot r^3$  = konst. im äußeren Teil der Trombe. Die maximale Geschwindigkeit ist in 100 m Achsenabstand und zu 80 m p. s. angenommen.

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

für junge Tromben 760 — 
$$\beta=\frac{|a|}{2}V^2$$
 , alte ,  $760-\beta=a\,V^2$ .

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

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

Theoretische Druckverminderung in Tromben.

Theoretis	che D	ruck	verm	inderi	ing i	n Tr	ombe	n.	
Maximale Geschwindig	gkeit .		m p. s	10	20	30	40	50	60
Druckverm. in { junalt	ngen Tr en	rombe	n mn	0,5 1,0	1,9 3,8	4,4 8,8	7,8 15,6	12,1 24,2	17,5 35,0
Maximale Geschwindig	gkeit .		m p. s	70	80	90	100	200	400
Druckverm. in { jur	igen Tr en	ombe	n mn	23,8 47,6	31,0 62,0	39,3 78,6			776
760 mm									7
600							/	<b>_</b>	
400 to a a a			~ /		<b>.</b>				_
07-20 - 000				June	Fromben				
150-1		]	1	<b>7</b>					
50 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 - 0 -	_	M	laxima	le Wind	geschw	indig!	keit		400
	100 шр. г.	,		o mina in	m1		T214	1	

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

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

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

196. Diese Pariser Trombe war blind, hinterließ aber doch einen Schadenstreifen von 150 bis 300 m in der Stadt. "Auf dem Turm St. Jacques ging der Wirbel um 2<sup>42</sup>p vorüber. Der Barograph, der 748 mm angab, fiel plötzlich auf 742 mm, um sofort wieder zu steigen (Fig. 50, links). Nur 160 m vom Turm St. Jacques, auf der äußeren Seite des Wirbels, notierte ein Barograph nur einen plötzlichen Fall von 2 mm." Im bureau central zeichnete der dortige Barograph die gewöhnliche Gewitternase auf. Der Druckdifferenz von 6 mm würde nach unserer Tabelle eine Geschwindigkeit von 25 bis 35 mp.s. ent-

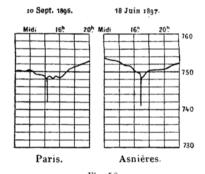


Fig. 50.
Barogramme, erhalten in den Spuren der
Tromben von Paris und Asnières.

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

201. Auch die Trombe von Asnières bei Paris, deren Windgeschwindigkeit gleichfalls schon oben erwähnt wurde, ist von besonderem Interesse: "Das Observatorium der Gemeinde von Paris besitzt in Asnières eine korrespon-

dierende Station ... Der Luftdruck, der in 32 m Höhe 750 mm betrug, fiel plötzlich auf 740,5 mm, um sogleich wieder zu steigen [Fig. 50, rechts]. Dieser Barometersturz im Moment der Passage des Zentrums genau  $4^{54}$ p erstreckte sich nicht weit, denn am rechten Ufer der Seine, in einer Distanz von etwa 600 m, senkrecht auf dem äußeren Rand des Scheitels [gemeint ist wohl: der Trombenspur] genommen, zeigte ein anderer Barograph keinen plötzlichen Sturz, er markierte bloß die gewöhnliche Störung beim Vorübergang von Gewitter." — Einem Luftdruckfall von 9,5 mm entspricht etwa eine maximale Windgeschwindigkeit von 35 bis 45 m p. s., was mit der Registrierung (> 30 m p. s.) gut vereinbar ist.

145. Bei der Trombe von Bukarest, die über den Südteil der Stadt fortzog, hier zahlreiche Bäume entwurzelte, Dächer abdeckte, Schornsteine umstürzte und Fensterscheiben eindrückte, wurde an dem im Norden der Stadt gelegenen Observatorium in einer nicht näher angegebenen Entfernung vom Zentrum der Bahn das nebenstehende

Barogramm erhalten; der Wind erreichte hier nur noch 15 m p. s. und ging von E nach NW um. Die Druckschwankungen betragen hier etwa 5 mm und lassen sich vielleicht als Kombination einer kräftigen Gewitternase mit einer Tromben-Druckschwankung von der Art der oben besprochenen deuten. Von einem Wolkenschlauch wird bei dieser Trombe nichts berichtet.

206. Die größte Druckabnahme, die überhaupt bisher beobachtet worden ist, wird von der Trombe Nr. 206 berichtet: "Die Trombe,

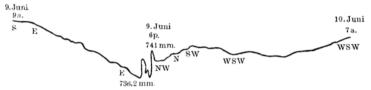


Fig. 51. Barogramm der Trombe von Bukarest.

welche 8—900 m im Durchmesser hatte, ging gerade mit ihrem Zentrum über unsere Schiffe hinweg, wobei die Registrierbarometer einen plötzlichen Fall von 35 mm anzeigten, dem ein ebenso rasches Steigen folgte." Aus dieser leider nirgends reproduzierten Registrierung würde eine maximale Windgeschwindigkeit von 60 bis 85 m p.s. folgen.

A 3. Bei dieser Trombe wird von einer plötzlichen Druckverminderung um mehrere Zentimeter berichtet. [Die Registrierung soll von Tardy im "Kosmos" veröffentlicht sein 1)].

<sup>1</sup>) Von ausländischen Beobachtungen seien noch die beiden nebenstehenden Registrierungen von Little Rock, Ark., vom 2. Oktober 1894,

und die vom 27. Mai 1896
von St. Louis, Mo., genannt.
In Little Rock ging die Zerstörungsspur mitten über die Station fort, in St. Louis aber war der Barograph angeblich mehr als 1 km von der Zentrallinie der Zerstörungen entfernt, wenngleich auch noch an seinem Orte orkanähnlicher Sturm auftrat. Ein Wolkentrichter war hier nicht vorhanden; dieser Tornado war ein Glied einer ganzen Gruppe,

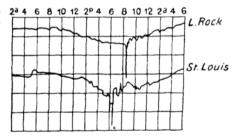


Fig. 52. Barogramme der Tornados von Little Rock und St. Louis. Skalenintervall 5 mm.

die sich im Verlauf von 6 Stunden auf einem Raume von 400 km Länge und 50 km Breite abspielte und zu einem großen Gewitter gehörte. Einige von ihnen, aber nicht der registrierte, zeigten den Wolkenschlauch. In

Diese Beobachtungen, die freilich noch sehr der Ergänzung durch neue bedürfen, scheinen doch so viel zu zeigen, daß Druckerniedrigungen von mehr als 20 mm nur in heftigen Tromben Hiermit stimmt jedenfalls unser früheres Resultat vorkommen. gut überein, daß bei blinden Tromben Windgeschwindigkeiten unter 50 m p. s., bei kräftigen solche zwischen 50 und 100 m p. s. vorkommen. Die von Finley mitgeteilten Schätzungen der Windgeschwindigkeiten für die nordamerikanischen Tornados sind erheblich höher 1). Er gibt nämlich an, daß diese Schätzungen zwischen 31 und 358 m p.s. liegen und als Mittel 175 m p.s. ergeben. Aber da die Grundlage dieser Schätzungen nicht mitgeteilt ist, kann wohl auch für die heftigeren Tornados noch immer nicht als erwiesen gelten, daß der Wert von 100 mp. s. jemals wesentlich überschritten worden sei. Es sei insbesondere daran erinnert, daß Werte von 350 mp. s. nach der obigen Tabelle bereits einer Druckerniedrigung um eine ganze Atmosphäre entsprechen würden, was nach den bisher erhaltenen Barogrammen offenbar nicht vorkommt.

Die starke, beim Vorübergang der Trombe plötzlich einsetzende Druckerniedrigung erzeugt bei Gegenständen, die Luft enthalten, explosionsartige Wirkungen. Für die amerikanischen Tornados hat Ferrel dies besonders klar hervorgehoben <sup>2</sup>). Nach ihm ist die Zerstörung der Gebäude weit mehr dieser Explosivkraft als dem Winddruck zuzuschreiben. Köppen hat hiergegen geltend gemacht, daß Häuser meist zu undicht seien, um den ruhigen Aus-

Little Rock ließ die Dunkelheit keine Beobachtung über den Wolkenschlauch zu. — In Ciel et Terre 7, 21, 1886/87 wird von der Trombe von Shanghai (21. Aug. 1885), deren 100 m breiter Fuß 450 m von dem betreffenden Schiff entfernt vorbeiging, berichtet, daß der Luftdruck an Bord des letzteren um 1,5 mm fiel. — Ferrel (Recent advances in Meteorology, Washington 1886, S. 303) sagt: "Der Luftdruck in einem Tornado ist nach den Beobachtungen nahezu 3 Zoll [75 mm] tiefer als der außen herrschende Druck"; die Beobachtungen, auf welche sich dies Urteil stützt, werden aber nicht genannt.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>) Finley, On the charakter of Six Hundred Tornados, Prof. Papers of the Signal Service, Nr. 7, Washington 1882.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>) Ferrel, Recent Advances in Meteorology, Washington 1886, S. 304. — Für die von Ferrel ohne genauere Angaben erwähnte Erscheinung, daß leere, verschlossene Flaschen durch den Tornado entkorkt werden, habe ich in den europäischen Trombenbeschreibungen kein einziges Beispiel gefunden.

gleich des Luftdruckes zu verhindern, und warnt vor übertriebenen Vorstellungen hinsichtlich dieser Explosivkraft<sup>1</sup>). In der Tat läßt sich aus unserer Fig. 48 (S. 194) ableiten, daß auch in der Zone stärksten Druckabfalles in der Trombe, wenn diese mit 10 mp.s. fortschreitet, für eine Druckerniedrigung um 25 mm immer noch 6 Sekunden erforderlich sind, und diese dürften in der Tat meist genügen, um der eingesperrten Luft Auswege zu gestatten.

Indessen ist zu beachten, daß die in Fig. 48 dargestellte Druckverteilung sich unmittelbar am Erdboden durch die Reibung leicht verändern kann. Denn die durch letztere erzeugte Turbulenz in dem Wirbel wird bestrebt sein, dessen Rotations- und Drucksystem nach der Richtung des in Fig. 47 (S. 189) dargestellten Schemas zu verändern. Damit ist die Möglichkeit gegeben, daß auf einem engeren Raume eine größere Druckerniedrigung erzeugt wird, und damit wieder wachsen die Chancen für Explosionswirkungen außerordentlich. Wir dürfen hiernach wohl annehmen, daß nicht selten solche Wirkungen auftreten, daß sie aber auf einen schmalen Streifen innerhalb der Trombenspur beschränkt sind. Hierdurch erklären sich die folgenden Beobachtungen.

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

Sehr gewöhnlich sind Beschreibungen wie die folgenden:

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

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

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

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>) Köppen, Die Windhose vom 5. Juli 1890 bei Oldenburg usw. Ann. d. Hydrogr. 1896, Heft 12.

- 129. Das Kirchendach von Nöttja wurde gelüftet, ohne sonst beschädigt zu werden, was deshalb Verwunderung erregte, weil keine Öffnung in der Kirche war, durch die der Wind hätte hineinblasen können. (Wortlaut S. 38.)
- 152. "In geschlossenen Räumlichkeiten eines Hauses am Markt wurden infolge des Luftdrucks einige Fenster zertrümmert."

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

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

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

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

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

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

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

31. "Schließlich riß dieser Wirbel an zwei Stellen die Steine auf, die das Pflaster einer Bastion des Forts Saint-Elme bildeten, und ließ zwei offene Stellen zurück, deren eine eine Quadrattoise betrug, während die andere 3 Toisen lang und 2 breit war. Die Steine aber hatten 8

bis 9 Zoll Dicke,  $1^1\!/_2$  Fuß im Quadrat und waren besonders gut cementiert, weil sie ein Kornmagazin bedeckten, das im Innern dieser Bastion lag."

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

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

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

Die starke Druckerniedrigung im Innern des Trombenwirbels ist auch die Hauptursache für die

Kondensation der Wolkensäule. Es wird allerdings später gezeigt werden, daß der kondensierende Zylindermantel der Trombe einer aufsteigenden Bewegung entspricht, und es ist klar, daß dieses Aufsteigen die Kondensation stark unterstützt. Dies ist ja auch der Grund, weshalb die Kondensation in der Höhe früher beginnt und später aufhört als unten. Allein bei den meisten Wasserhosen reicht doch der Wolkenschlauch bis zur Meeres-

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

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

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

wo H die Höhe ist, in welcher die Kondensation beginnt, t die Temperatur und  $\tau$  der Taupunkt der Luft vor dem Aufsteigen. Um diese Formel auf das horizontale Druckgefälle der Trombe anwenden zu können, ersetzen wir H durch  $11.9\,db$ , was für unsere Zwecke völlig ausreicht, und erhalten

$$db = 10.6 (t - \tau).$$

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

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

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

Diese Zahlen sind um so interessanter, als die relative Feuchtigkeit auf dem Meere außerordentlich gleichförmig, sowohl zeitlich wie räumlich, ist. v. Hann 1) sagt von ihr: "Sie ist über den Ozeanen vom Äquator bis gegen die Pole hin nahe dieselbe, und dürfte sich da bei  $80\,^{0}/_{0}$  halten; in den Passatgebieten kann sie auf  $75\,^{0}/_{0}$  (in einzelnen seltenen Fällen selbst auf  $50\,^{0}/_{0}$ )

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

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

### Elftes Kapitel.

#### 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. Wolkensäule außen noch von einem unsichtbaren Wirbel umgeben ist, wußte schon Lucretius 1). 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 Bau 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:

<sup>1)</sup> Vgl. das Zitat im letzten Kapitel.