universität innsbruck
Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Universitäts- und Landesbibliothek Tirol

Wind- und Wasserhosen in Europa

Wegener, Alfred

Braunschweig, 1917

Neuntes Kapitel. Die Rotation

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

Neuntes Kapitel.

Die Rotation.

Im vorangegangenen ist überall vorausgesetzt, daß **die Tromben Luftwirbel** sind. Die Frage, ob dies stets der Fall ist, oder ob es auch Wolkenschläuche gibt, die nicht rotieren, darf indessen nicht übergangen werden, da sowohl in älterer Zeit als auch in der Gegenwart von einzelnen Forschern immer wieder die Existenz solcher nichtrotierenden Tromben verfochten wird. Und man kann in der Tat geltend machen, daß z. B. auch der aufsteigende Rauch einer Zigarre zunächst einen scharf begrenzten Schlot mit geradliniger Bewegung von etwa $^1/_2$ m Länge bildet, dessen oberes Ende, ähnlich wie die Tromben, eine trompetenförmige Erweiterung zeigt, und zunächst in rhythmisch sich neubildende Wirbelringe und später in Turbulenz übergeht. Die Anhänger solcher und ähnlicher Vorstellungen führen hauptsächlich zwei Gründe aus den Beobachtungen an, zu denen wir Stellung nehmen müssen.

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

langsam, aber je höher die Luft stieg, um so größer wurde ihre Geschwindigkeit.“ Im übrigen sei auf das Kapitel 12 über den Fuß der Trombe verwiesen [1]).

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

Die Beschreibung der Trombe Nr. 11 überschreibt Peltier: sans giration. Das englische Original, das mir leider nicht zugänglich ist, übersetzt er folgendermaßen: „Au dessous, la mer était très-agitée, l'eau écumait et s'élevait en jets d'eau, ou bien cette eau, en s'élevant, avait l'apparence d'une fumée qui monte dans une cheminée dans un temps calme ...“ Der letztere Ausdruck genügt Peltier offenbar, um auf Fehlen der Rotation zu schließen, obwohl es an einer anderen Stelle heißt: „s'agitant avec fureur dans cet espace rond.“ Wenn es auch nachher von der vollständigen Wolkensäule heißt: „elle parut calme du commencement à la fin“, so ist doch in alledem nicht ausgesprochen, daß die Rotation fehlte, sondern nur, daß die Säule als Ganzes glatt war

[1]) Bei der Trombe Nr. 238, welche Hess zu den genannten Zweifeln Anlaß gab, liegt um so weniger Grund zu solchen vor, als in einem der Augenzeugenberichte von einem „beständigen Umdrehen“ des Staubfußes die Rede ist. Auch bei Pouillets Trombe wurde, wie schon auf S. 160 erwähnt, Wolkentrichter und Rotation direkt gesehen. Beide Autoren haben selber nur die Spuren nachträglich besucht.

und ruhig stand. Daß der Beobachter gemeint habe, es sei keine Rotation vorhanden, ist mindestens zweifelhaft. Will man aber überhaupt zu einer Beurteilung des Falles kommen, so muß man offenbar auch berücksichtigen, ob der Beobachter in der Lage war, eine Rotation zu erkennen. Nun wird gesagt, daß die Trombe so dick wie ein Schiffsmast „in etwa $1^1/_2$ Lieues“ (etwa $7^1/_2$ km, wenn Peltiers Übersetzung richtig ist) erschien, und es wird hinzugefügt: „sie war also viel dicker“, woraus man schließen müßte, daß sie auch weiter entfernt war. Daß auf derartige Entfernungen die Rotation einer Wasserhose erkennbar ist, wird wohl niemand erwarten. — Auch die Trombe Nr. 84 überschreibt Peltier „pas de rotation“, obwohl in der Beschreibung weder von Rotation noch von ihrem Fehlen die Rede ist. — Auch Nr. 76 überschreibt er: „pas de mouvement giratoire“. In der Originalbeschreibung steht aber kein Wort davon, sondern nur, daß die „ziemlich“ nahe Trombe (woraus Peltier „sehr nahe“ macht) einen Fuß aus Wasserstaub oder Sand hatte, der die Form einer Garbe (gerbe) besaß. Dies genügt Peltier, er schließt einfach: „wenn der untere Conus ... eine Rotation gehabt hätte, hätte der Autor sicher nicht das Wort Garbe angewendet“.

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

Unter den 255 Beobachtungen, die in diesem Buche beschrieben werden, finden sich aber doch sechs, bei denen wirklich von Augenzeugen berichtet wird, sie hätten eine Rotation nicht bemerken können, nämlich Nr. 39, 87, 200, 209, 214, 237. Will man aber hieraus den Schluß ziehen, daß die Rotation nicht nur nicht wahrgenommen werden konnte, sondern auch nicht existierte, so müßte erst wahrscheinlich gemacht werden, daß sie, wenn vorhanden, stets auch sichtbar wird. Da aber der Wolkenkörper der Trombe meist ein glattes Rotationsgebilde ist, dürfte es gerade in den Fällen, wo die Wirbelbewegung am ungestörtesten ist, sehr schwer sein, die Rotation zu erkennen, zumal der Laie meist viel zu kleine Umlaufszeiten erwartet. Für die Beurteilung der sechs Fälle kommt

weiter die Entfernung des Beobachters von der Trombe in Betracht. Wenn z. B. bei Nr. 214 „eine Rotation der ganzen Masse um die Kegelachse nicht mit Sicherheit konstatiert werden konnte", so verliert dies Zeugnis sehr an Bedeutung, wenn wir hören, daß diese Entfernung 11 km betrug. Bei Nr. 87 und 209 ist sie nicht genau mitgeteilt, war aber in beiden Fällen groß. Bei Nr. 237 betrug sie immer noch 2, bei Nr. 200 1,6 km. Wenn auch in letzterem Falle ein schwaches Fernrohr zur Beobachtung benutzt wurde, wird man doch nicht die Forderung stellen können, daß die Rotation auf solche Entfernungen erkennbar sei. Bei Nr. 237 scheinen mir sogar die Aufzeichnungen des Beobachters die Rotation zu beweisen; er sagt zwar zuerst ausdrücklich: „Es ließen sich absolut keine Merkmale intensiver Wirbelbewegungen konstatieren; weder die Wasserbewegung noch die am Fuße aufsteigenden Schwaden ließen eine Drehbewegung erkennen", allein er fährt fort: „Ein mit ganz mäßiger Geschwindigkeit nach abwärts sinkender dunkler Fleck der Erscheinung bewegte sich allerdings scheinbar in einer Schraubenlinie, doch war die Tangentialgeschwindigkeit so gering, daß auf Wirbelbewegung von irgend merkbarem Effekt nicht geschlossen werden konnte". Die Beschreibung enthält aber keine Andeutung, daß der Verfasser sich über die zu erwartende Langsamkeit der Drehung im klaren wäre. Bei 75 m p. s. Rotationsgeschwindigkeit braucht ein Luftteilchen, das 50 m von der Wirbelachse entfernt ist, mehr als vier Sekunden zum Umlauf; aus der Ferne gesehen, erscheint eine solche Drehung aber sehr langsam.

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

Auge keinen Halt bieten dürfte, um die Bewegung eines Teilchens verfolgen zu können. Es liegt sehr nahe, anzunehmen, daß der Beobachter durch die Unveränderlichkeit der Form des Fußes zu dem irrigen Schluß verleitet wurde, daß die Luft darin in Ruhe sei.

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

Gehen wir zu den positiven Beobachtungen, die Rotation betreffend, über, so ergibt sich als erste Frage: **Ist die Drehung cyklonisch oder anticyklonisch?** Leider ist nur bei 25 Tromben der Drehungssinn direkt angegeben oder aus den sonstigen Angaben mit hinreichender Sicherheit zu entnehmen. Von ihnen zeigen 18 (72 Proz.) cyklonische und 7 (28 Proz.) anticyklonische Drehung [1]).

Cyklonische Drehung zeigen: 113 — 126 — 128 — 129 — 139 — 144 — 177 — 178 — 180 — 181 — 185 — 196 — 207 — 208 — 218 — 226 — 232 — 233. Die Beweisführung für den Drehungssinn läßt zwar auch hier bisweilen zu wünschen übrig, allein es gibt doch für cyklonische Drehung so viele gut beglaubigte Fälle, daß ein besonderer Nachweis der Richtigkeit nicht nötig erscheint. Dagegen verdienen die sieben Fälle mit anticyklonischer Drehung nähere Beleuchtung, um sie gegen den Verdacht, daß es sich bei ihnen um Irrtümer handeln könne, und es Tromben mit anticyklonischer Drehung überhaupt nicht gebe, sicherzustellen. Die Stichworte oder in Frage kommenden Sätze sind folgende:

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

176. (Frankfurt.) „Rechts drehend".

---

[1]) Für die nordamerikanischen Tornados findet Finley (Tornadoes, New York, 1887) 520 Fälle (95 Proz.) mit cyklonischer und 29 Fälle (5 Proz.) mit „wahrscheinlich anticyklonischer" Drehung.

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

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

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

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

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

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

Meines Erachtens lassen diese sieben Fälle, wenn auch der eine oder andere vielleicht unsicher erscheinen mag, keinen Zweifel daran zu, daß Tromben mit anticyklonischer Rotation in Europa vorkommen. Ebenso sicher scheint aber zu sein, daß der cyklonische Rotationssinn erheblich häufiger ist. Daß bei dieser Bevorzugung letzter Hand die Erdrotation im Spiele ist, dürfte sehr wahrscheinlich sein; der Beweis wird freilich erst durch entsprechende Untersuchungen von der Südhalbkugel und aus den Äquatorialgebieten erbracht werden können [1]). W. M. Davis hat dem Gedanken dieser Abhängigkeit die folgende geistvolle Form gegeben: „Diese Wirbelbewegung hat sich erhalten durch Ringe, Planeten,

---

[1]) Drei Beobachtungen über den Rotationssinn von Tromben auf der südlichen Halbkugel, die mir zufällig in die Hände fielen, mögen hier angeführt werden; die beiden ersten geben süd-cyklonische Drehung (mit dem Uhrzeiger), die dritte süd-anticyklonische Drehung:

Niejahr, Met. Zeitschr. 1886, S. 358, Trombe in 21° 25′ Südbreite und 38° 40′ w. L. („Mit dem Zeiger der Uhr".)

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

Martyr, Quart. Journ. of the Roy. Met. Soc. July 1884, S. 205. Diese Trombe spielte sich in der Kapkolonie zwischen East-London und Port Elisabeth ab. („Ascending in spiral curves revolving from right to left to the cloud".)

die allgemeine Zirkulation, Cyklonen und Tornados; und so ist es die Vererbung des ursprünglichen Zustandes, durch welche auch unsere Tornados ihre Wirbelbewegung erhalten haben“ [1]). Freilich kann diese Vorstellung, wie namentlich v. Hann betont hat, nicht für richtig gelten, wenn man sie so auslegt, als sei die Erdrotation eine notwendige Vorbedingung für die Entstehung der Tromben, ähnlich wie sie eine unerläßliche Bedingung für die Cyklonen zu sein scheint. Denn am Äquator, wo der Einfluß der Erdrotation verschwindet, sind Tromben sehr häufig. Allein dies schließt natürlich nicht aus, daß eine indirekte Abhängigkeit besteht, welche die größere Häufigkeit cyklonischen Drehungssinnes in unseren Breiten verursacht; es könnte beispielsweise sein, daß cyklonische Drehung bei einer Windschichtung entsteht, die einer Rechtsdrehung mit der Höhe entspricht, und diese Rechtsdrehung ist infolge der Erdrotation häufiger als Linksdrehung. Vermutlich werden sich auch diese Fragen von selbst lösen, sobald diejenige nach der Entstehung der Tromben überhaupt endgültig beantwortet sein wird.

Windgeschwindigkeit in der Trombe. Über die in den Tromben auftretenden Windgeschwindigkeiten besitzen wir nur wenige und meist recht unvollständige Beobachtungen exakter Art; die zahlreicheren Schätzungen der Geschwindigkeit entbehren aber in vielen Fällen so sehr einer begründeten Unterlage, daß bei ihrer Beurteilung größte Vorsicht am Platze ist. Soweit ich sehen kann, lassen sich durch Geschwindigkeiten von etwa 50 bis 100 m p. s. alle beobachteten Wirkungen erklären, und da der Winddruck mit dem Quadrat der Geschwindigkeit wächst, jeder Zuwachs des Windes sich also um so mehr bemerkbar macht, je höher seine Geschwindigkeit bereits ist, so ist schon deshalb zu erwarten, daß es eine obere Grenze gibt, die selten und nur geringfügig überschritten wird, und diese Grenze dürfte viel tiefer liegen, als bei den zum Teil recht zügellosen Schätzungen angenommen wird. Ein Beweis dafür, daß jemals der Wert von 100 m p. s. wesentlich überschritten worden sei, ist jedenfalls bisher noch nicht erbracht.

Bei Nr. 233, einer blinden Trombe, wurde die Geschwindigkeit im Staubfuß zu nur 35 m p. s. geschätzt. Nun dürften blinde

[1]) Met. Zeitschr. 1891, S. 358.

Tromben im allgemeinen geringere Rotationsgeschwindigkeiten haben als kondensierende. In der Tat führen die meisten sonstigen Angaben auf größere Geschwindigkeiten. Bei Nr. 201 wurde eine Registrierung des Windes erhalten, da die Trombe gerade über ein Observatorium fortzog; „der Wind ging plötzlich von SSW nach WNW über E. Die Windgeschwindigkeit hielt sich [zuerst] fast konstant auf 7 bis 8 m p. s., vor dem Vorübergang des Wirbels herrschte an der Erdoberfläche während 4 bis 5 Minuten eine fast absolute Windstille, hierauf trat ein plötzlicher Windstoß ein mit einem Maximum von 30 m p. s., d. i. der größte Wert, den der Apparat überhaupt registrieren konnte; in Wirklichkeit muß die Windstärke sehr beträchtlich größer gewesen sein . . . Die [lokale] Dauer des Phänomens scheint 6 bis 8 Sekunden nicht überschritten zu haben" (vgl. auch das Barogramm im folgenden Kapitel). — Bei der Trombe von Chatenay (Nr. 102) wurden Windgeschwindigkeiten bis zu 45 m p. s. beobachtet. Bei Nr. 196 wurde die Geschwindigkeit aus der Umlaufszeit einzelner Wolkenteile bestimmt: „Indeß konnten einzelne [Wolken] während einer ganzen Umdrehung verfolgt werden . . . [Die Entfernung wurde nachträglich mit Hilfe der Zerstörungsspur bestimmt.] Daraus folgt . . . eine Rotationsbewegung von 40 bis 50 m in der Sekunde bei einem Durchmesser des Wirbels von etwa 150 m . . . Dauer der Rotation 3 bis 4 Sekunden". Um diese Zahlenangaben zum Stimmen zu bringen, muß man annehmen, daß die Breite von 150 m nicht der Wolkensäule, sondern der Zerstörungsspur entspricht; da das beobachtete Wolkenstück sich vermutlich auf der Außenwand der kondensierenden Säule befand, so folgt für diese ein Durchmesser von 40 bis 60 m, also etwa ein Drittel der Spurbreite, was mit unseren späteren Zusammenstellungen gut stimmen würde.

Diese in den bisherigen Beispielen enthaltenen Werte:

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

sind indessen offenbar nicht ausreichend, um die großen Verheerungen zu erklären, welche die Tromben gewöhnlich anrichten. In der Tat legen auch die Beschreibungen selber die Annahme nahe, daß es sich in den genannten Fällen um ziemlich schwache

Tromben handelte. Für die starken dürfte man etwa auf das Doppelte dieser Zahlen kommen. Damit stimmen auch die folgenden indirekten Bestimmungen überein.

Lalanne hat eine Methode ausgearbeitet, um aus dem Umwerfen von Mauern auf den Winddruck und damit auf die Windgeschwindigkeit zu schließen. Da dies Umwerfen von Mauern relativ oft berichtet wird, andererseits aber ungefähr dem Maximum der Kraftleistung einer Trombe zu entsprechen scheint und dabei eine relativ zuverlässige mathematische Behandlung gestattet, sei die Methode hier kurz auseinandergesetzt [1]). Natürlich eignen sich für die Berechnung nur freistehende Gartenmauern.

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

Zunächst ist ein Druck

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

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

Zweitens ist noch ein weiterer Druck

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

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

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

wird.

Lalanne berechnet für die Trombe von Chatenay (102) aus $d = 1/2$ m, $h = 2$ m die Werte $p_1 = 300$ kg/m^2, $p_2 = 156{,}25$ kg/m^2, woraus der Winddruck $p = 456$ kg/m^2 folgt. Dieser wird mit Hilfe der Fresnelschen Formel in die Windgeschwindigkeit $v = 72{,}5$ mps. umgewandelt.

Da es sich nur um Überschlagsrechnungen handelt, lassen sich meines Erachtens ohne Nachteil noch Vereinfachungen bei der Rechnung einführen. Setzen wir nämlich β nicht gleich 75000, sondern gleich 72000 kg, so wird α gerade gleich $1/3\,\beta$, und die Formel für den Winddruck lautet

$$p = 2400\,(1 + h)\left(\frac{d}{h}\right)^2 \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (1)$$

[1]) Lalanne, Sur l'évaluation numérique de la force qui a produit certeins effets de rupture à Chatenay. Compt. Rend. **9**, 219—223, 1839.

Ferner können wir statt der umständlichen Fresnelschen Formel für die Umsetzung in Windgeschwindigkeit die empirische Formel

$$p = 0{,}08\, v^2$$

verwenden [1]) oder

$$v = 5\sqrt{\frac{p}{2}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (2)$$

Nach diesen gekürzten Formeln (1) und (2), die sich auch noch zusammenziehen lassen in

$$v = \frac{100\, d}{h}\sqrt{3\,(1+h)} \quad \cdots\cdots\cdots \quad (3)$$

würde sich für die Trombe von Chatenay ergeben

$$v = 75 \text{ m p. s.},$$

also praktisch dasselbe, was Lalanne erhielt.

Mohorovičič hat bei dem „Tornado" von Novska (Nr. 185) eine ähnliche Schätzung der Windgeschwindigkeit erhalten. Dort wurde ein 13140 kg schwerer Eisenbahnwagen, dessen Seitenfläche 32 m² betrug, vom Winde über einen Zaun fortgetragen. Bei dieser Fläche sind 410 kg/m² Winddruck von unten nötig, um den Wagen schwebend in der Luft zu halten. Nach unserer Formel (2) gäbe dies 72 m p. s.; nimmt man an, daß dies nur die vertikale Komponente des Windes war, der in Wirklichkeit unter 45° anstieg, so würde man als Gesamtgeschwindigkeit $v = 100$ m p. s. erhalten, d. h. fast genau den gleichen Wert, welchen Mohorovičič auf anderem Wege aus denselben Zahlen ableitete [2]).

---

[1]) Der Koeffizient dieser Formel ist von Lilienthal zu 0,125, von Langley zu 0,07 bis 0,09, von Eiffel zu 0,07 bis 0,08 empirisch ermittelt worden. Eiffels Messungen gelten für Geschwindigkeiten zwischen 20 und 40 m p. s. Vgl. O. Martienssen, Die Gesetze des Wasser- und Luftwiderstandes und ihre Anwendung in der Flugtechnik, Berlin 1913, S. 72 ff.

[2]) Mohorovičič selbst berechnet (nach unzulänglicher Formel?) nur 46 m p. s., hält dies aber für eine untere Grenze. Um andererseits eine obere Grenze zu erhalten, stellt er folgende Betrachtung an: „Hätte der Wind auf den Waggon nur einen Augenblick gewirkt [?], so hätte der Waggon eine Anfangsgeschwindigkeit von 20 m p. s. erhalten müssen, wozu ein Druck von 4100 kgr per m² Fläche nötig wäre. Die Windgeschwindigkeit, welche nötig ist, um einen solchen Druck zu verursachen, beträgt 158 m p. s." Auch wenn man von der anscheinend nicht richtigen Verwandlung von Druck in Geschwindkeit absieht, wird man dem Autor kaum in der Annahme folgen können, daß ein solches momentanes „Abschießen" des Wagens auch nur als Grenzwert

Eine ganz entsprechende Rechnung ist weiter von Abbé Bourgeat bei der Trombe von St. Claude (A 3) ausgeführt worden. Dort wurde ein Krahn von 25 000 kg Gewicht hochgehoben; da die Angriffsfläche (die obere Plattform) eine Größe von 5 m^2 hatte, kann der Winddruck, der zur Hebung nötig war, zu 500 kg/m^2 geschätzt werden, was nach Formel (2) die Geschwindigkeit $v = 83$ m p. 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 m p. s. erhalten, so stimmt damit überein, daß in normalen Fällen, in denen die Tromben die üblichen zerstörenden Wirkungen äußern, etwa 70 bis 80 m p. s. vorkommen, während schwächere, insbesondere blinde Tromben, nur etwa 30 bis 50 m p. 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 45^0 gegen den Horizont geneigt ist, woraus für horizontale und vertikale Komponente der gleiche Wert, nämlich 73 m p. s., folgt.