

Die Entstehung der Tromben aus Luftwogen

Autor(en): **Hess, Clemens**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Mitteilungen der Thurgauischen Naturforschenden Gesellschaft**

Band (Jahr): **20 (1913)**

PDF erstellt am: **24.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-594000>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Die Entstehung der Tromben aus Luftwogen.

Von Clemens Heß.

1. Untersuchungsergebnisse von der Trombe bei Schönenbaumgarten.¹

Bis auf die neueste Zeit gehen alle Trombentheorien darauf aus, die Trombe als eine Wirbelerscheinung zu erklären und zwar als einen Wirbel mit vertikaler Achse und schraubenförmiger Luftbewegung. Schon vor mehr als 70 Jahren hat aber *Peltier*² in seiner Zusammenstellung beobachteter Tromben hervorgehoben, daß von 116 Tromben nur bei 29 eine kreiselnde Bewegung konstatiert und bei 22 keine innere Bewegung beobachtet worden sei; von diesen 22 seien 9 auf dem Meere und 13 auf dem Lande gesehen worden. Den 22 nicht kreiselnden Tromben hat man bis heute die ihnen ebensogut wie den andern gebührende Aufmerksamkeit versagt; sie wurden behandelt, als wären sie überhaupt nicht beobachtet worden oder als hätten sich die Gewährsmänner getäuscht. Ich glaube heute die Behauptung aufstellen zu dürfen, daß dieses Beiseitelassen nicht gerechtfertigt war, sondern daß die Tromben ohne kreiselnde Bewegung bei der Erklärung berücksichtigt werden müssen und daß sogar ein großer Teil der sogenannten Wirbeltromben eigentlich zu den „wirbellosen“ gezählt werden müssen. Vorerst soll nun die bei Schönenbaumgarten beobachtete Landhose³ als Trombe ohne Wirbelbewegung vorgestellt und sodann bewiesen werden,

¹ Bearbeitet in der Beilage zum Programm der thurgauischen Kantonschule für das Schuljahr 1912/13.

² *Gehlers* physik. Wörterbuch, Artikel „Wettersäulen.“

³ Eingehende Beschreibung a. a. O.

daß auch eine Erklärung möglich ist, ohne die Wirbelbewegung zu Hilfe zu ziehen.

Am 19. Juli 1912, zirka 8 $\frac{1}{4}$ Uhr p, wurde die unmittelbare Nachbarschaft von Schönenbaumgarten bei Altnau am südwestlichen Ufergebiet des Bodensees von einer Landhose mit allen charakteristischen Eigenschaften einer solchen heimgesucht. Sie setzte zirka 500 m westlich vom genannten Dorfe ein (siehe Fig. 1) und machte sich am Boden durch eine kugelförmige, grauschwarze Erscheinung bemerkbar, aus welcher ein säulenförmiger Wolkenschlauch herauswuchs und „pustend wie eine Lokomotive“ sich bis zu den Wolken verlängerte. Die Trombe zeichnete ihre Bahn, indem sie das Gras dem Boden eben strich, Baumkronen zerriß, Stämme schälte und ganze Bäume umlegte. Nach einem Marsche von zirka 200 m in westöstlicher Richtung überschritt sie ein bewaldetes Tobel, um dann in der bisherigen Bewegungsrichtung zu verschwinden. Ungefähr 430 m in der östlichen Verlängerung der ersten Zerstörungstrecke wurde ganz vereinzelt noch ein Bäumchen unmittelbar über dem Boden abgedrückt.

Jenseits des Tobels setzte die Erscheinung zirka 90 m rechts seitwärts wieder zerstörend ein und wieder in westöstlicher Richtung eine Reihe der schönsten Bäume dem Tode weihend; zwei solche wurden sogar aus dem Boden ausgehoben und fortgetragen. Am Ende dieser zweiten, zirka 230 m langen Zerstörungstrecke schien sich das Phänomen nochmals zu teilen. Geradeaus wurde in einiger Entfernung noch ein kleiner Baum gebodigt und weidendes Vieh in Angst und Schrecken versetzt; zirka 60 m rechts seitwärts dagegen begann die Verwüstung zum dritten Male, 2 schöne, große Bäume zu Boden legend und weiterhin noch das Kamin eines Wohnhauses teilweise demolierend.

Das 1 km lange Verwüstungsfeld wurde von der Trombe in zirka 2 Minuten überschritten. Es besteht aus drei getrennten, parallel verlaufenden Streifen, von denen jeder einen schmalen, scharf abgegrenzten Strich intensivster Zerstörung und einen zirka 3 mal breitem Rand unbedeutender Schädigungsspuren aufweist.

Prüfen wir nun die Situation der Zerstörungen auf das Windsystem einer Wirbeltrombe.

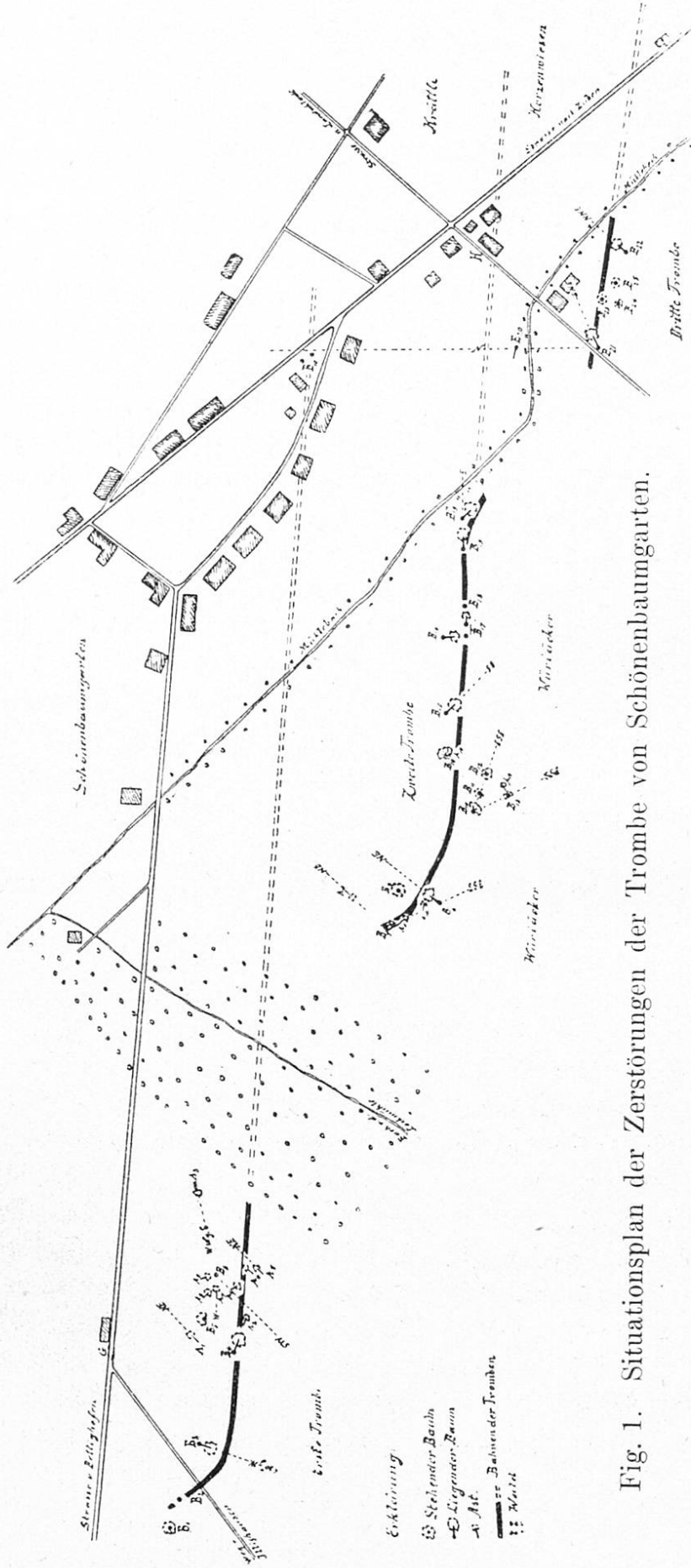


Fig. 1. Situationsplan der Zerstörungen der Trombe von Schönenbaumgarten.

Köppen hat für das in Wirbeltromben herrschende Windsystem ein Schema aufgestellt,¹ dem zunächst einige Aufmerksamkeit zuzuwenden ist.

Zur bequemern Ausdrucksweise zerlegen wir das Schema nach trigonometrischer Gepflogenheit in 4 Quadranten, indem wir die positive Achse mit der Fortpflanzungsrichtung der Trombe zusammenfallen und durch das Zentrum des Windsystems gehen lassen. Dann finden wir vorn auf der Achse selbst die Windrichtung senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung stehend; bei 45° ist sie parallel zur Fortpflanzungsrichtung, aber dem Fortschreiten selbst entgegengesetzt, und bei 90° steht die Druck- oder Windrichtung zur Achse senkrecht. Alle drei Geschwindigkeiten sind im Verhältnis zu den übrigen nur klein; sie werden von den diametralen um das Dreifache überboten. Im weitern sind, wenn wir die Fortpflanzungsrichtung auf E verlegen, die Windrichtungen bei 135° NNW, 180° W 30° g. N, 225° W, 270° WSW und endlich bei 315° S 35° g. W. Am größten ist die Geschwindigkeit bei W (Fortpflanzungs)-Richtung (bei 225°), wo sie dreimal so groß ist als bei 45° . Bei der Trombe von Schönenbaumgarten, für deren Schädigungen der Situationsplan (siehe Fig. 1) beigegeben ist, war schon der zweite Baum (B_2) in einer Weise malträtiert, die gar nicht zum Schema paßt und desgleichen auch die Bäume B_6 und B_7 . Die Aeste waren von oben nach unten abgerissen, wie wenn Männer sich daran gehängt und das Zerstörungswerk gewalttätig besorgt hätten. Mit den Aesten wurde auch die Rinde nach unten gerissen, so daß zwei der Bäume (B_6 und B_7) kahl, wie geschält dastanden. Die Ueberreste waren Strünke mit nadscharfen Splintern nach oben. Beim Baum B_6 ist noch auf die merkwürdige Situation aufmerksam zu machen, daß die Aeste um den Stamm herum liegen geblieben sind und zwar mit dem Blätterwerk gegen den Stamm gerichtet. Die Aeste mußten darnach zuerst heruntergerissen, das Blätterwerk vom Stamme weggeschleppt, dann umgedreht gegen den Stamm hingelegt worden sein. Diese Art der Verletzung ist mit der Wirbeltheorie unerklärlich; denn nach dieser können Aeste nie abwärts, sondern nur seitwärts und aufwärts beansprucht werden. Derartige Schädigungen sind ohne Zweifel an vielen

¹ Annalen der Hydrographie 1896, S. 551.

andern Orten auch schon beobachtet worden; doch findet sich nirgends eine Erklärung dafür. Ich bin im Falle eine solche geben zu können. Im weitern verweise ich auf die Bäume B₃, B₈ und B₁₆; sie liegen senkrecht zur Achse, zwei rechts und einer links. Diese Lage ist nach der Wirbeltheorie gar nicht zu erwarten gewesen; denn rechts der Bahn gibt es gar keine zu dieser senkrechte Windrichtungen, und links sind die Geschwindigkeiten dem Schema gemäß nicht so groß, daß die stärksten Bäume denselben zum Opfer fallen konnten.

Auch das Verhalten des Baumes B₉ paßt ganz und gar nicht zu dem Benehmen eines Trombenwirbels: Er blieb mit seiner Birnenlast unbehelligt, während seine Nachbarn B₇ und B₈, ersterer entkront und geschunden, letzterer gegen die Achse der Bahn gelegt worden ist. Auch die Situation bei den Bäumen B₁₀, B₁₁ und B₁₂ fügt sich nicht in das Windschema. Bei B₁₀ ist die Westhälfte der Krone entästet, B₁₁ und B₁₂ sind ganz unversehrt geblieben. Sie konnten aber nach der Wirbeltheorie nicht im Schatten von B₁₀ sein; denn dem Westdruck sind die starken Drücke aus SW und WSW vorangegangen.

Das Versagen der Wirbeltheorie und auch der übrigen Erklärungen bei der Prüfung auf ihre Stichhaltigkeit im Falle der Trombe von Schönenbaumgarten veranlaßte den Verfasser zum eingehenden Studium der atmosphärischen Verhältnisse am Tage des Ereignisses, das folgende Resultate zeitigte.¹

Am 19. Juli 1912, dem Tage des Ereignisses der Trombe von Schönenbaumgarten, lagerte über Zentraleuropa eine barometrische Depression mit dem Zentrum in Mitteldeutschland. Infolge dieser Luftdruckverteilung fiel ein kalter Luftstrom aus NW über den Jura und den Hegau ins schweizerische Mittelland und Bodenseegebiet. Die zum Strome querstehende Alpenkette bewirkte eine Stauung, die sich im Voralpengebiet und Mittelland als barometrischer Hochdruck geringen Grades bemerkbar machte. Im NE der Schweiz erlitt die Stauung eine Unterbrechung durch das Rheintal; deshalb entstand über dem Bodensee und seiner nächsten Umgebung ein Niederdruckstreifen mit geringer Druckdifferenz gegenüber dem relativen

¹ Ausführliche Darstellung siehe Beilage zum Programm der thurgauischen Kantonsschule für das Schuljahr 1912/13.

Hochdruck zu beiden Seiten. Ueber dem westlichen Teile des Bodensees und dem südwestlichen Ufergebiet hatte sich ein kleines barometrisches Minimum ausgebildet, dessen Zentrum gerade über dem Aktionsfeld der Trombe lag. Ueber dem Bodensee hatte sich nicht nur eine barische, sondern auch eine thermische Depression eingestellt; dem Schweizerufer entlang liefen die Isothermen 14° und $14,5^{\circ}$. Im Innern des Landes war die Temperatur um ein Geringes höher. In Betracht der Sommerszeit war die relative Feuchtigkeit der Luft groß; der Kondensationspunkt hatte nur eine relative Höhe von zirka 140 m. Nach der Höhe nahm die Temperatur so ab, daß die Luft nahezu im labilen Gleichgewichtszustand sich befand. Die untere Luftlage war ruhig oder nur leicht bewegt. Durch die Stauwirkung der Hochalpen erfuhr der NW-Strom eine Abbiegung parallel zur Alpenkette, so zwar, daß in Höhen von 1000—1500 m an aufwärts W- und WSW-Strömungen mit Geschwindigkeiten von 10—12 m/sec. dahineilten. Das barometrische Minimum über dem westlichen Bodensee und dem südwestlichen Ufergebiet ließ mich in der Höhe eine mächtige Luftwoge erkennen, die als das Resultat der starken Strömungen in der Höhe über der kalten Luftlage der Tiefe zu betrachten ist. Der Wellenberg hatte ungefähr die Richtung von S nach N und bewegte sich mit einer Geschwindigkeit von 8,3 m von W nach E. Um 8 Uhr abends hatte die Woge über der Gegend Dettighofen-Schönenbaumgarten unter dem Einfluß des an Stärke zugenommenen Windes besonders hohen Gang angenommen. Ungefähr um $8\frac{1}{4}$ Uhr erzeugte ein Windstoß besonderer Stärke einen strudelnden Wogenkopf, riß ihn mit sich fort und hob, entlastend und aspirierend, die unter der Abreißstelle liegenden Luftteilchen in die Höhe. Dadurch kam die nahezu im labilen Gleichgewicht liegende Luft zum Steigen; die freiwerdende Kondensationswärme trat in beschleunigende Aktion und erzeugte durch den ganzen Wogenbereich hinunter längs der Linie der vertikalen Geschwindigkeiten einen Vertikalstrom enger Begrenzung. Der hohe Wogengang an der Oberfläche hatte den Wellenbereich bis zum Boden vertieft; der entstandene Vertikalstrom beschleunigte die Horizontalgeschwindigkeit im Wellentale über dem Boden, und die in der untersten Wogenlage aufgespeicherte Energie kam zur Entfaltung.

Die Trombe von Schönenbaumgarten verdankte also ihre Entstehung nach meinem Dafürhalten einer Luftwoge mit notwendigen Nebenumständen. Die nachfolgenden Zeilen haben den Zweck, diese Wogentheorie der Tromben noch eingehender klarzulegen.

2. Die Vorgänge in einer Luftwoge.

Die Vorgänge in einer Luftwoge sind übereinstimmend mit denjenigen in einer Wasserwelle. Luft- und Wasserwellen sind, sehr tiefe Schichten vorausgesetzt, Kreiswellen, d. h. Wellen, deren Elemente Kreisbahnen beschreiben. Eine ganze Woge besteht aus unzähligen übereinanderliegenden Schichten, von denen jede eine Wellenfläche bildet. Für die oberste Wellenfläche sind die Schwingungskreise am größten; nach der Tiefe werden sie kleiner, bis die Radien 0, d. h. Luft und Wasser in Ruhe sind. Die Tiefe, bis zu welcher das Wasser bei der Wellenbewegung in Mitleidenschaft gezogen wird, beträgt nach den Versuchen der *Gebr. Weber* das 350 fache der Wellenhöhe; bei Luftwellen wird dieser Faktor kaum kleiner sein, d. h. Luftwellen, deren Oberfläche kilometerhoch liegen, können ihre Wirkungssphäre in bedeutende Tiefen, manchmal bis an die Erdoberfläche ausdehnen.

Eine Kreiswelle (siehe Fig. 2) besteht aus Berg und Tal; der Höhenunterschied der höchsten und tiefsten Stelle ist die Wellenhöhe; sie ist gleich dem Durchmesser des Schwingungskreises. Berg und Tal sind von ungleicher Breite; das Tal ist breiter als der Berg; der Unterschied ist gleich dem doppelten Durchmesser des Schwingungskreises.

Beim Fortschreiten einer Kreiswelle besitzen sämtliche Punkte der Wellenfläche immer die gleiche Geschwindigkeit, nämlich die Peripheriegeschwindigkeit der gleichförmigen Kreisbewegung, aus der die Kreiswelle zusammengesetzt ist; doch haben die Geschwindigkeiten an den verschiedenen Stellen gegenüber der Lage der Wellenfläche verschiedene Richtungen. Im ganzen Systeme der übereinanderliegenden Wellenflächen sind auf der Vorderseite des Wellenberges an der tiefsten Stelle des Wellentales die Geschwindigkeiten in allen Flächen horizontal gegen den nachfolgenden Berg gerichtet. Eine Viertelsschwingung näher am Kulminationspunkte der Welle

haben alle Bewegungsrichtungen eine vertikale Lage angenommen, so daß also im ganzen Wogebereich von oben bis unten (im vertikalen Durchschnitt) eine gerade Linie existiert, deren Punkte im gleichen Momente eine vertikal aufwärts gerichtete Bewegung besitzen.

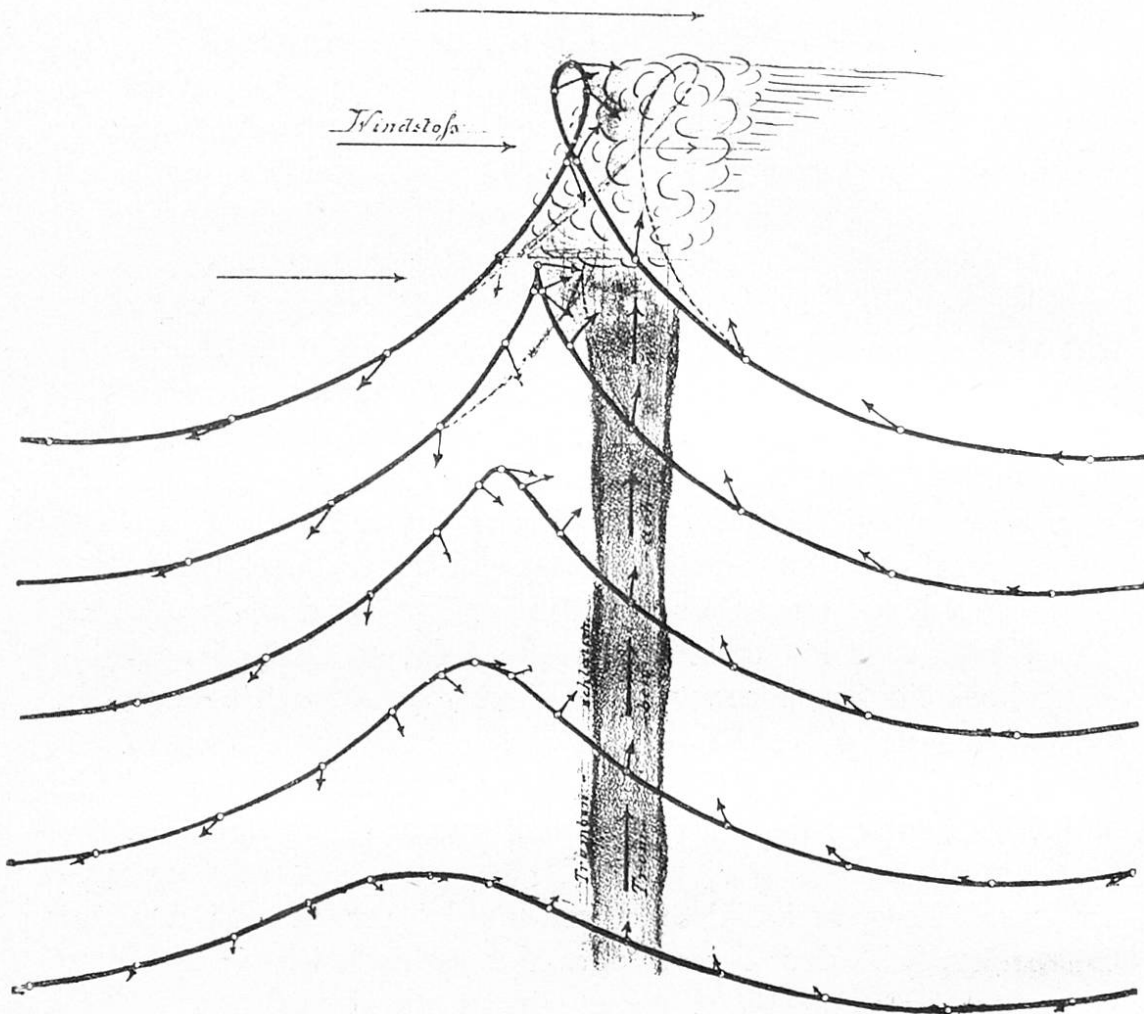


Fig. 2. Schema einer wogenden Luftschicht mit Sturmkräuse und Vertikalstrom. Die eingezeichneten Pfeile sind die momentanen Geschwindigkeiten der Luftteilchen an den betreffenden Stellen.

Vor und hinter dieser Vertikallinie sind die Geschwindigkeiten gegen die bezeichnete Linie hingeneigt und zwar mit einer um so größeren Vertikalkomponente, je näher die Punkte der Vertikallinie liegen. Die ganze Vorderseite der Welle wird durch die Vertikalkomponenten gehoben; es wird kinetische Energie in potenzielle umgewandelt. Die Umwandlung ist fertig, wenn ein Punkt auf die Höhe des Wellenkammes

gestiegen ist. Auf der Rückseite der Welle, also hinter dem Wellenberg sind die Geschwindigkeiten abwärts gerichtet; sie vollführen vom Kamm bis zur Sohle eine Drehung von 180° , um daselbst wieder die ursprüngliche Lage anzunehmen. Die ganze Rückseite ist also in Abwärtsbewegung; die potenzielle Energie wird wieder in kinetische umgewandelt.

Im zweiten und dritten Viertel der Schwingung besitzen alle Geschwindigkeiten eine horizontale, vorwärtsgerichtete Komponente, die im Kulminations- oder Scheitelpunkte des Wellenberges gleich der totalen Peripheriegeschwindigkeit ist. Alle diese Komponenten treiben den Wellenberg vorwärts und machen die Welle zur fortschreitenden. Ohne innere und äußere Reibung würden Bewegungsgröße und Energie der Woge unverändert bleiben; die stets vorhandene Reibung bringt jedoch eine sich selbst überlassene Woge zur Ruhe. Soll eine Woge unverändert weiterwandern, so muß der Energieverlust auf einer größern Strecke durch die Arbeit des Winddruckes auf dem gleichen Wege ersetzt werden. Ist die vom Winde geleistete Arbeit größer, als die von der Reibung aufgezehrte, so werden die Schwingungskreise der Wasser- oder Luftteilchen größer; das Wellental wird breiter und tiefer, der Berg schmaler, aber höher; der Kamm schärft sich zu; er wird zur Kante. Bei weiterer Zunahme der Schwingungskreise sollte sich nun eine Schleife ausbilden, die in der Natur tatsächlich nicht bestehen kann. Die Wasser- und Luftteilchen stoßen sich; es entstehen einerseits die weißen Kragen der Wasserwellen, die vom Sturm erfaßt und überworfen werden, und anderseits die Sturmkrausen und Wellenköpfe der Luftwogen, die vom Sturme mitgerissen, weitergetragen und mit der treibenden Luft gemischt werden. Wolkenballen mit ausgezogenen Wolkenhaaren sind beispielsweise in den Wolkenregionen die Zeugen hochgehender Luftwogen mit Sturmkrausen.

Bei einer Luftwoge können nun je nach der Stärke des treibenden Windes alle möglichen Formen der Wellenflächen vorkommen, glatte Oberflächen bei mäßigem Winde, scharfkantige bei Sturm und gekrauste bei Orkan. Aber auch bei einer einzigen Woge können von der Oberfläche aus in die Tiefe alle Formen vertreten sein (Fig. 2), zuoberst die Wellenfläche mit der Sturmkrause, in einiger Tiefe die Fläche mit

der scharfen Kante und darunter die strudellosen, glatten Flächen. Die ganze Partie der Woge über der scharfen Kante befindet sich jedoch in strudelnder Bewegung; sie kehrt nicht mehr zur Welle zurück, sondern wird vom Sturme fortgerissen. Dadurch wird die Woge oben gewissermaßen enthauptet; der Strudel wird vorübergerissen; es entsteht über der früher bezeichneten Vertikallinie mit den vertikalen Geschwindigkeiten eine Entlastung und Aspiration, welche durch die ganze Wogentiefe hindurch einen Vertikalstrom zu erzeugen bestrebt ist; die sonst kreisenden Luftteilchen verlassen die Kreisbahnen und ziehen, dem Vertikalzuge folgend, in die Höhe. Kommt der Vertikalstrom unter der saugenden Wirkung des oben dahinsausenden Sturmes und unter Mitwirkung besonderer Umstände zustande, so trägt die aufsteigende Luft die Energie der Welle fort. Ueber der Woge vollführt sich eine durchgreifende Mischung der untern und obern Luft; unter dem aufsteigenden Strome entsteht eine plötzliche Druckverminderung (Barometersturz), und hinter dem aufwärtsgerichteten Luftstrome wird das wogende Medium geglättet. Der Vertikalstrom bleibt nicht stehen, sondern schreitet mit der Geschwindigkeit der Luftwoge fort; der aufsteigende Strom verbraucht die in der wogenden Luft enthaltene Energie, bis überhaupt die ganze Woge aufgezehrt ist.

Eine glatte Luftwoge braucht jedoch nicht auf der ganzen Kammlänge von einem Sturme bearbeitet zu werden, der eine vertikal steigende Luftschicht erzeugt; sie kann auch von einem schmalen Luftstrome, einem Windstoße auf kurzer Strecke erfaßt und zum Strudeln gebracht werden; es bilden sich dann auch nur auf einer kurzen Strecke des Kammes Wellenschleifen, d. i. eine Sturmkrause oder ein Wellenkopf, wie das auch auf dem Wasser beobachtet werden kann. Der stürmische Luftstrom, der den Wellenkopf zerzaust und mitreißt, besitzt auch das Bestreben, unter der Abreißstelle durch Aspiration bei günstigen Begleitzuständen einen engbegrenzten Vertikalstrom zu erzeugen. Das Bestreben des aspirierenden Windstoßes ist aber nicht immer ausreichend, den bezeichneten Vertikalstrom in Gang zu setzen; es bedarf dazu häufig noch unterstützender Momente.

3. Den Vertikalstrom unterstützende Momente.

Die Entstehung des Vertikalstromes wird begünstigt durch den Feuchtigkeitsgehalt der Luft. Wird unter dem Einfluß der Aspiration feuchte Luft in die Höhe gesogen, so kühlt sich die Luft ab; sie nähert sich dem Sättigungszustand, erreicht diesen; der Wasserdampf wird kondensiert; die freiwerdende Kondensationswärme beschleunigt die aufsteigende Bewegung längs der Linie vertikaler Geschwindigkeiten und gibt Veranlassung zu immer tiefer greifender Störung der Kreisbewegung in der Wogenlage. Je größer der Wassergehalt der Luft ist, desto stärker tritt dieses Moment in Tätigkeit. Ist die Temperaturabnahme mit der Höhe derart, daß die Luft nahezu im labilen Gleichgewichtszustand ist, so genügt ein geringer Zug von oben, die Kondensationserscheinungen in Szene treten zu lassen und die Bewegungsvorgänge optisch zu verraten, die sich vorher in der Durchsichtigkeit der Luft verborgen hielten. Der Grad der Feuchtigkeit der Luft, die Temperaturabnahme mit der Höhe, die Stärke des Wogenganges und damit der Tiefenbereich der Woge bedingen die Raschheit und Tiefe im Eindringen des Vertikalstromes von der Oberfläche aus gegen den Boden. Je nach der Höhenlage der Wogenschicht treten dann die Phänomene auf, welche die Meteorologie als Trombe, Wetterssäule, Windhose, oder nach ihrem örtlichen Auftreten als Wasserhose, Landhose und Wolkenzapfen bezeichnet.

4. Die Entstehung der Trombe aus der Luftwoge.

Wir gehen von der Annahme aus, daß eine hochgehende Luftwoge die Wellenbewegung bis nahe an die Oberfläche der Erde oder auch ganz bis auf dieselbe ausgedehnt habe, dann ist die ganze Luftlage unter der wogenden Oberfläche, soweit die Bewegung reicht, der Träger einer großen Menge von Energie, die allerdings nach der Tiefe für jede Schicht bestimmter Mächtigkeit von oben nach unten abnimmt. Diese Energie ist dem über die Oberfläche dahinwehenden Winde abgenommen und aufgespeichert oder akkumuliert worden. Bei konstanten Windverhältnissen liegen in den verschiedenen Höhenschichten die gleichen Wellenphasen direkt untereinander,

so daß also in der ganzen Wogenlage von oben bis unten in allen Schichten die Wellenberge und ebenso die Wellentäler unter- oder übereinander liegen.¹ In allen Schichten sind in den Tälern der Wellenflächen die Bewegungen der Fortpflanzungsrichtung entgegengesetzt, auf den Kammhöhen mit der Fortpflanzungsrichtung übereinstimmend; vor dem Kamm auf halber Höhe sind sie vertikal aufwärts und auf gleicher Höhe hinter dem Kamm vertikal abwärts gerichtet.

Denken wir uns nun an der Oberfläche einen Windstoß, der einen Wellenkopf erzeugt und abreißt, so tritt, günstige Feuchtigkeits- und Temperaturverhältnisse vorausgesetzt, sofort oben auch der Vertikalstrom auf und pflanzt sich, weil unter der Abreißstelle durch die ganze Wogenschicht hinunter die Luftteilchen sowieso von der Wellenbewegung her in aufsteigender Bewegung sind, mit rapider Geschwindigkeit bis an die untere Grenze fort, und in wenigen Sekunden ist die Trombensäule fertig, anfänglich unsichtbar und erst dann sichtbar in die Erscheinung tretend, wenn Wasser oder Staub aufsteigend die Luft zu trüben beginnen.

Die Radien der Schwingungskreise sind an der Oberfläche der Woge am größten; deshalb wird auch an der Oberfläche ein größeres Gebiet dem Vertikalstrom einverleibt als in der Tiefe, wo die Schwingungskreise kleiner sind. In dieser Abnahme der Radien der Schwingungskreise ist die Verengung des Schlauches von oben bis unten begründet.

Der Windstoß an der Oberfläche erzeugt jedoch nicht nur den Vertikalstrom, sondern er vertieft auch den Wellenbereich und erhöht die Energie einer bestimmten Höhenlage. Es ist also die Energie des Windstoßes, welche unter Zuhilfenahme der Wellenbewegung in die Tiefe greift und dort mechanische Wirkungen zur Ausführung bringt. Dadurch, daß nur die vertikalen und nahezu vertikalen Geschwindigkeiten in den Vertikalstrom hineingezogen werden, wird dieser stets eng begrenzt sein. In seinem Bereich wird auch die Wellenbewegung in den verschiedenen Höhenlagen gestört sein, während sie zu beiden Seiten unverändert fortbestehen bleibt. Innerhalb der Trombensäule kommen die Energie der Wellenfläche und die Saugkraft des

¹ Durch Bewegung der untern Luftlage können Verschiebungen aus der Vertikallage vorkommen.

Vertikalstroms zur Geltung, während zu beiden Seiten nur die erstere in Aktion ist. Die Abnahme der Zerstörungsintensität ist daher auch nicht durchweg allmählich, sondern am Rande der Säule stufenartig und von da an auswärts allgemach, wie der Wogengang beim Wellenkopf. Bei der Trombe von Schönenbaumgarten war die Stufe eine sehr augenscheinliche. Der Streifen starker Schädigungen hatte eine Breite von 15—20 m. Er war mit entwurzelten, umgelegten, entkronten und geschundenen Bäumen bedeckt, während zu beiden Seiten auf eine Distanz von 60—65 m nur noch Astbeschädigungen vorkamen. Auch bei der Wassertrombe oder Wasserhose, welche am 19. Juni 1905 den Zugersee von Cham bis Trubikon überschritt,¹ ist der streichende Angriff der Luftwoge auf der Wasseroberfläche in Wellenstreifen, welche der Fortpflanzungsrichtung der Trombe parallel gelagert sind, selbst in der Photographie deutlich zu erkennen.

Das Windsystem, das sich am Fuß der Trombe entwickelt, ist in der Peripherie des Fußes radial; zu beiden Seiten sind die Windrichtungen zur Fortpflanzungsrichtung parallel.

5. Stehende Wellen in den Tromben als Ursache der großen Schädigungen.

Die Trombe bei Schönenbaumgarten weist in ihren Zerstörungstreifen Erscheinungen ganz merkwürdiger Art auf. Wie schon a. a. O. angegeben worden ist, sind die Aeste der Bäume B₆ und B₇ nicht seitwärts abgedrückt, was durch einen Horizontalwirbel geschehen wäre, auch nicht (durch den Zug eines aufwärtsgerichteten Vertikalstromes) aufwärts gerissen und fortgetragen worden, sondern sie sind buchstäblich von oben nach unten samt der Rinde des Baumes weggerissen worden. Die Zugkraft hat das Laubwerk abwärts gedrückt, am Boden radial auswärts gezogen, dann die Aeste umgekehrt und mit dem Laubwerk radial gegen den Stamm hingezogen. Diese letztbeschriebene Situation ist anderorts auch schon beobachtet worden; doch war in keiner der Beschreibungen eine Erklärung gegeben. Die Photographien

¹ Ausführliche Beschreibung in „Wasserhosen auf Schweizerseen“ von Prof. Dr. J. Früh. Jahresbericht der geogr.-ethnogr. Gesellschaft in Zürich 1906—1907.

der Zugertrombe¹ vom 19. Juni 1905 haben mir eine solche nahegelegt. Betrachtet man die Wasserhose der unten bezeichneten Figuren genauer, so sieht man, daß die Schläuche mit Wülsten besetzt sind, die in der einen Aufnahme (Weiß, 4^h 15^m p.) am obern, in der andern (Wölfling, 4^h 18^m p.) am untern Ende besonders gut sichtbar sind. Auch *Früh* hat auf diese Formen aufmerksam gemacht und darüber geschrieben: „Unsere Fig. 1, sowie eine Aufnahme durch Bahnhofvorstand M. in Zug, Wölflingsche Bilder Nr. 5—11, besonders 8—11 aus Entfernungen von 2—2¹/₂ km, zeigen ferner wellenförmige Ränder der Säule als Ausdruck wirbelnder Bewegungen, während Photogramme aus großen Distanzen nur glatte Randlinien abbilden ließen.“ Diese Formen sind nach meiner Auffassung der unzweifelhafte Beweis stehender Longitudinalwellen im Innern der Trombensäule. Wie die Luft in den Röhren der sog. „chemischen Harmonika“ oder in dem Kamin eines gut ziehenden Ofens oder in den langen Röhren unserer Tunnels² durch einen konstanten Zug in den Schwingungszustand stehender Wellen versetzt wird, so kommt auch der Vertikalstrom, verursacht durch den Zug des Windstoßes, an der Oberfläche in den bezeichneten Zustand. Es entstehen der Länge nach abwechselnd Verdichtungen und Verdünnungen, von denen sich erstere durch die Ausbauchungen, letztere durch Einschnürungen im Wolken-schlauch sichtbar machen. Auf den ganzen Wolken-schlauch der Zugertrombe scheinen mir 10 halbe, also 5 ganze Wellen verteilt zu sein, so daß sich, die Schlauchlänge zu 1200 m angenommen, eine Wellenlänge von 240 m ergibt. Dieser Wellenlänge entspricht eine Schwingungsdauer von zirka ²/₃ Sekunden. In ¹/₃ Sek. wechselten somit Verdichtung und Verdünnung ihren Platz, was wohl bei vielen Beobachtern den Eindruck hervorbrachte, der Schlauch habe die Form eines gewundenen Tauens, einer sich drehenden Schraube mit auf- oder abwärtsgehender Bewegung gehabt, je nachdem der Blick den Wechsel auf- oder abwärts verfolgte. Das untere Ende der Trombenröhre muß als offen betrachtet werden, weil daselbst die horizontal zuströmende Luft in dieselbe eintritt;

¹ *J. Früh*, Die Wasserhosen auf Schweizerseen, Fig. 1, 2 u. 3.

² Beim Gotthardtunnel habe ich die Knotenpunkte bei einer Durchfahrt selbst bestimmt; sie lagen 20 Sek. voneinander, was einer Wellenlänge von 480 m entsprach.

natürlich ist auch das obere Ende offen. An den offenen Enden einer Röhre mit stehenden Longitudinalwellen befinden sich Schwingungsmaxima, an denen die Luft mit größter Geschwindigkeit hin und her, bei der Trombensäule also auf und ab schwingt. Diese impulsiv arbeitenden Luftstöße gegen den untersten Knotenpunkt hin und vom untersten Knotenpunkt weg, oder unten zur Röhre heraus und wieder in die Röhre hinein, sind es gewesen, welche in Schönenbaumgarten die Aeste von den Bäumen heruntergerissen, weggeschleppt und mit dem Blätterwerk umgekehrt wieder gegen den Baum B₆ hingezogen haben. Einen schönen Beweis für die Richtigkeit meiner Auffassung liefern die beiden Photographien Fig. 1 und Fig. 2 der Zuger Wasserhose. In Fig. 1, welche 4^h 15^m aufgenommen worden ist, endigt die Säule unten in eine „Spitze“, in Fig. 2, 4^h 18^m aufgenommen, dagegen in eine keulenförmige Ausweitung; die Spitze entspricht der Verdünnung, die Keule der Verdichtung. Beide sind nur scheinbar zu unterst; das eigentliche untere Ende steckt auf dem Boden des korbformigen Fußes. Hiemit kommen wir auch zur Erklärung des eigentümlichen Fußes der Wasserhose. In Fig. 1 ist die Peripherie des korbformigen Fußes vom Wasser abgehoben, weil die aus der Säule zurückschlagende Luft im Wasser eine Vertiefung eingräbt und ringsherum einen Wellenberg aufbaut, so daß das ganze eine Wasserschale bildet, über deren Rand die ausströmende Luft Wasserstaub hinausjagt. Der gleiche Wasserstaub wird weiter oben von der Wellenbewegung erfaßt und wieder der Trombensäule zugetragen. Die in meiner Hand befindliche, vorzügliche Photographie läßt auch das Zufießen deutlich erkennen; es erreicht mit dem obern Rande die unterste Verdichtung. In Figur 2, wo die Luft in die Säule, gewissermaßen in das untere Ende der Keule hineinfährt, erscheint diese vom Wasser abgehoben; denn man sieht unter dem Fuße hindurch ans jenseitige Ufer zwischen Risch und der Kiemenecke.

Man dürfte sich vielleicht daran stoßen, daß man von einem Vertikalstrom spricht und von einem Rückschlag, der imstande sein soll, die Aeste eines Baumes herunterzureißen und zum Teil wieder zurückzuziehen. Es ist jedoch daran zu erinnern, daß auch die Flamme in der chemischen Harmonika

bis auf die Gasröhre zurückkehrt und bei einem gutziehenden Ofen die Flamme tatsächlich bei der schwingenden Bewegung der Luft pustend aus der Türöffnung bis 10 cm vor die Ofentüre zurückschlägt, ein Vorgang, den ich jetzt tagtäglich an unserm eigenen Ofen beobachten kann.

Dem impulsiven Ein- und Ausatmen der Trombe am untern Ende sind in Schönenbaumgarten nicht nur die abgerissenen Aeste zum Opfer gefallen, sondern auch die einwärts gelegten Bäume, und jetzt wird es auch verständlich, wie ein Baum, der mit seiner Krone gerade mitten in der Säule steckt, beim Einatmen der Trombe aus dem Boden gerissen und fortgetragen werden kann, wie B₁₇ und B₁₈ es erfahren mußten.

6. Trombenfronten.

Nach den zahlreichen Beschreibungen von Wasser- und Landhosen, welche *Gehler* in seinem phys. Wörterbuch gibt, und der schon zitierten Schrift von *J. Früh* „Wasserhosen auf Schweizerseen“, kommt es nicht selten vor, daß gleichzeitig zwei, drei und sogar mehrere Tromben zugleich auftreten und zwar immer nebeneinander, zum Teil vollständig, zum Teil nur als Wolkenzapfen. Einige Beispiele mögen die Behauptung beweisen.

*Thevenot*¹ sah 1664 bei der Insel Kesomo „zugleich mehrere Wasserhosen gleichzeitig und kurz nacheinander.“

*Golden*² berichtet von einer Wasserhose, die eine Vertiefung ins Wasser grub und ringsum eine kreisförmige Falte aufwarf. Derselbe Beobachter sah noch mehrere Wasserhosen, deren keine aber das Wasser erreichte.

Buchanan sah 1789 I. 8. eine Wasserhose, welche sich oben in 3 Zinken gabelte. Die drei Teile verliefen einzeln in die Wolke.

Brechey erzählt von einer Trombe, bei welcher aus der nämlichen Wolke drei Schläuche dicht nebeneinander herunterhingen. Sie waren ausnehmend lang und am untern Ende außerordentlich dünn, vereinigten sich einmal, trennten sich aber bald wieder.

¹ *Gehler*, S. 1681.

² Dasselbst S. 1674.

Lachmann berichtet, daß er am 26. VI. 1833 von Konstanz aus auf dem untern Bodensee zwei gleichzeitig bestehende Wasserhosen gesehen habe, eine dicke und eine dünne. Am 4. VII. 1872, 7—8^{1/2} h a. sollen auf dem obern Bodensee fünf vollständige Wasserhosen und zwei Wolkenrichter nebeneinander beobachtet worden sein, und am 16. IX. 1912 deren sogar 8—10 (Thurg. Zeitung Nr. 221).

Ein besonders interessantes Beispiel beschreibt *G. vom Rath* in Poggendorffs Annalen.¹ Wir meinen die Wettersäule von Königswinter, welche am 10. VI. 1858 den Rhein übersetzte und dabei vom Wasser aus so wunderliche Formen annahm, daß man sie am besten mit drei- und fünffingerigen Handschuhen vergleicht, deren Mittelfinger fast und zeitweise ganz bis zu den Wolken reichten. Es ist unmöglich, diesen Formen mit der Wirbeltheorie erklärend auf den Leib zu rücken, während meine Wogentheorie eine ungezwungene Erklärung zuläßt.

Eine hochgehende Luftwoge kann gleichzeitig an zwei, drei oder mehreren Stellen von Windstößen erfaßt werden. Was dann unter dem einen Windstoß geschieht, ereignet sich auch unter dem andern, nur vielleicht mit anderer Intensität. Die Stöße können weit voneinander entfernt erfolgen, aber auch ganz nahe. Die Disposition ist längs des ganzen Wogenkammes vorhanden; überall sind die vertikalen Geschwindigkeiten bereit, einem allfälligen vertikalen Zuge zu folgen, d. h. die Seele einer Trombe zu werden. Liegen die Windstöße unmittelbar nebeneinander, so zieht sich das Phänomen in die Breite, die Gestalt einer Hand bildend, in den Fingern bald sich vereinigend und dann wieder trennend.

Die Vereinigung der Trombe von Königswinter am Fuße, das Zusammenlaufen dreier Stränge in einem Schaft, wie die Zinken einer Gabel einerseits, und das nachherige Ausweiten, wie der Stamm eines Baumes beim Uebergang in den Wurzelstock andererseits, sind die unzweifelhaften Zeichen der stehenden Longitudinalwellen innerhalb der Säule.

Die Wogen, denen die fraglichen Tromben angehören, können kilometerlange Rücken haben, und auch Berg und Tal zusammengenommen können in der Ausdehnung mehrere Kilometer betragen. Deshalb stehen die einzelnen Individuen, wenn sie gruppenweise auftreten, in einer Reihe und schreiten

¹ Zeichnungen reprod. in *Reyrs* „Wirbelstürme etc.“, S. 31 u. 33.

frontal fort in der Richtung des treibenden Windes, wie der Wogenkamm selbst.

Ohne in dieser Arbeit näher darauf eintreten zu wollen, scheint mir hier der Uebergang zu den Böen nahe zu liegen. Eine Sturmkräuse über einer ganzen Woge wird Erscheinungen mit sich bringen, die von denjenigen einer fortschreitenden Böe nicht sehr verschieden sein können.

7. Hüpfende Tromben.

In seinem Lehrbuch der Meteorologie¹ schreibt *J. Hann*: „Der Wirbeltrichter, der vom Wolkenniveau herunterhängt, sich dabei oft schlangenartig krümmt und windet, zeigt sich in seinem Fortschreiten von den Verhältnissen an der Erdoberfläche häufig ganz unabhängig. Er verfolgt seinen geraden Weg, auch über Täler hinweg, indem er dabei, und das ist sehr bezeichnend, zuweilen einige Zeit den Boden gar nicht berührt, örtlich wieder zerstörend herabsaust, dann wieder sich von der Erde zurückzieht und so gleichsam hüpfende Bewegungen macht.“

Für die Tromben, welche ihre Entstehung Luftwogen und Windstößen mit den a. a. O. angegebenen, das Aufsteigen der Luft begünstigenden Umständen verdanken, also eigentlich keinen Wirbeltrichter besitzen, ist das oben gezeichnete Verhalten leicht erklärlich. In erster Linie wird die schwankende Intensität des Windstoßes ausschlaggebend sein. Einem Abnehmen der Windstärke entspricht eine Abnahme des Wellenbereiches nach der Tiefe, eine Verminderung der Saugkraft und, damit zusammenhängend, ein Zurückgehen des Wolkenschlauches. Auch der Trombenfuß an der Erdoberfläche wird verschwinden, wenn der Vertikalstrom (mangels an Saugkraft) nicht mehr hinunterreicht.

Die Feuchtigkeitsverhältnisse am Boden können soweit mitspielen, daß sie die Sichtbarkeit des Schlauches beeinträchtigen oder begünstigen.

Die Konfiguration des Bodens wird das Fortschreiten insoweit beeinflussen, als die dem Wellenberge auf der Vorderseite zuströmende Luft durch ansteigendes Terrain etwas gehemmt wird.

¹ S. 701, 3. Absatz.

8. Tromben mit Seitensprüngen.

Ein eigentümliches Verhalten mancher Tromben besteht darin, daß sie zeitweise verschwinden und dann wieder an anderer Stelle, aber mehr oder weniger seitlich verschoben, zu neuer Tätigkeit einsetzen. Zu dieser Kategorie gehört die von *Köppen* eingehend behandelte Trombe von Oldenburg (5. VII. 1890). Dr. *Wegener* vertritt in seiner Thermodynamik der Atmosphäre die unzutreffende Ansicht, daß sich diese Verschiebung einfach durch Verlängern und Verkürzen der horizontalen, vor der Gewitterfront liegenden und (nach seiner Theorie) seitlich herunterhängenden Walzenachse erklären lasse. *Köppen* stellt dagegen die Vermutung auf, daß es sich bei dieser Erscheinung tatsächlich um verschiedene Trombenindividuen handle, die keinen unmittelbaren Zusammenhang hätten. Die Vermutung *Köppens* deckt sich mit unsern Befunden bei der Trombe von Schönenbaumgarten insoweit, daß es verschiedene Individuen gewesen sind; doch liegt hier ein unmittelbarer Zusammenhang offenkundig am Tage. Nach der Wogentheorie ergeben sich die Seitensprünge der Trombe als die Folge der Verschiebung des Windstoßes an der Oberfläche der Luftwoge. Während der Windstoß seine Wirkung sistiert, schreitet die Luftwoge fort; deshalb erscheint der neue Angriffspunkt um die Strecke vorgeschoben, um welche in der Zwischenzeit der Wogenkamm fortgeschritten ist.

Frauenfeld, den 14. Februar 1913.