

Tromben - Derzeitiger Stand der Kenntnisse

Von Albrecht Szillinsky

Institut für Meteorologie der Technischen Hochschule Darmstadt

Zusammenfassung: In einem Überblick werden die Ergebnisse der Trombenbeobachtung mit trombenähnlichen Wirbeln verglichen, die einmal aus verschiedenen Theorien erhalten und zum anderen im Labor simuliert worden sind. Dabei werden einige der Ursachen aufgezeigt, die für die Trombenentwicklung verantwortlich sind.

Abstract: The results of tornado observations are compared with tornado-like vortices which have been obtained from different theories and from simulations in laboratories. Some of the causes are pointed out which are responsible for tornado development.

1. Trombenbeobachtungen

Als Trombe — in der angelsächsischen Literatur Tornado genannt — wird eine stark um eine vertikale Achse rotierende Luftsäule bezeichnet, die mit großen Vertikalgeschwindigkeiten verbunden ist und deren Länge ein Vielfaches des Durchmessers beträgt. Tromben sind immer an Cumulonimben geknüpft, deren Zugrichtung den Weg dieser Wirbel bestimmt. Der untere Teil einer Trombe, der von der Wolkenbasis zur Erdoberfläche reicht, hat die Gestalt eines schlauch- oder trichterförmigen Rüssels, welcher meistens durch kondensierten Wasserdampf sichtbar wird. Dringt der Rüssel von der Wolkenbasis kommend in tiefere Schichten vor und erreicht schließlich den Erdboden, so werden infolge der hohen Rotationsgeschwindigkeit und infolge der starken horizontalen Druckunterschiede große Verwüstungen angerichtet, die wegen der geringen horizontalen Ausdehnung des Rüssels von wenigen 100 m auf einem schmalen Weg begrenzt bleiben, dem „Asgardsweg“.

Tromben kommen auf allen Kontinenten und Ozeanen vor (über Wasserflächen heißen sie Wasserhosen), am häufigsten jedoch in Australien und vor allem in den Vereinigten Staaten von Nordamerika mit einer Anzahl von im Mittel 140—150 pro Jahr. In anderen Erdteilen auftretende Tromben sind meistens weniger stark ausgeprägt und verursachen demzufolge geringere Schäden, wenn auch hier Ausnahmen vorkommen können, wie die Trombe von Pforzheim gezeigt hat (Nestle 1969).

Trotz des großen Interesses, das Tromben seit jeher gefunden haben, werden systematische Untersuchungen der Strömungsverteilung im sichtbaren Bereich derartiger Wirbel erst seit den letzten zwei Jahrzehnten gemacht. Bis dahin lagen Beschreibungen und Beobachtungen allgemeiner Art wie z. B. über die Zugrichtung, die Häufigkeit des Auftretens und die Zerstörungskraft von Tromben in großer Zahl vor, jedoch nur vage Vermutungen über ihren Aufbau und ihren Entstehungsmechanismus (Wegener 1917).

Wegen der hohen Windgeschwindigkeiten in Tromben, ihrer großen Zerstörungskraft, ihres plötzlichen Auftretens und ihrer schwierigen Ortung können direkte Messungen nicht vorgenommen werden. Eine indirekte Methode, Daten wenigstens vom sichtbaren Rüssel zu bekommen, hat Hoecker (1960, 1961) angewendet: Aus einer Vielzahl photographischer Aufnahmen und Filmmaterial des sog. „Dallas-Tornados“ vom 2. April 1957 konnte er Aufschlüsse über die Strömungsverhältnisse erhalten. Ihm war es gelungen, durch Ausmessen der Zugbahnen von größeren und kleineren Gegenständen, die der Sturm vom Erdboden in die Luft gewirbelt hatte, sowie von Wolkenfetzen die Geschwindigkeitskomponenten in diesem Tornado zu bestimmen. Unter der Annahme des Gleichgewichts zwischen Druckgradient- und Zentrifugalkraft wurde daraus gleichzeitig die Druckverteilung ermittelt. Bei dieser speziellen Trombe liegt die maximale Tangentialgeschwindigkeit bei 70 m sec^{-1} , der Druckfall auf der Achse am Erdboden beträgt 60 mb. Darüber hinaus kommt Hoecker zu dem Ergebnis, daß in Achsennähe in einer bestimmten Entfernung über dem Erdboden Abwinde vorherrschen, wohin-

gegen unterhalb dieser Höhe starke Aufwinde von etwa 70 m sec^{-1} anzutreffen sind. Ein Wirbel mit einer solchen Anordnung der Vertikalgeschwindigkeit wird als Zweizeller bezeichnet. Es ist bisher nicht geklärt, ob ein derartiges Strömungsbild für alle Tromben typisch ist, oder ob es lediglich zu einem starken Einströmen mit Ausströmen im Zentrum in größeren Höhen kommt (Einzeller). Abb. 1 verdeutlicht schematisch die Strömungsverhältnisse im Einzeller und im Zweizeller.

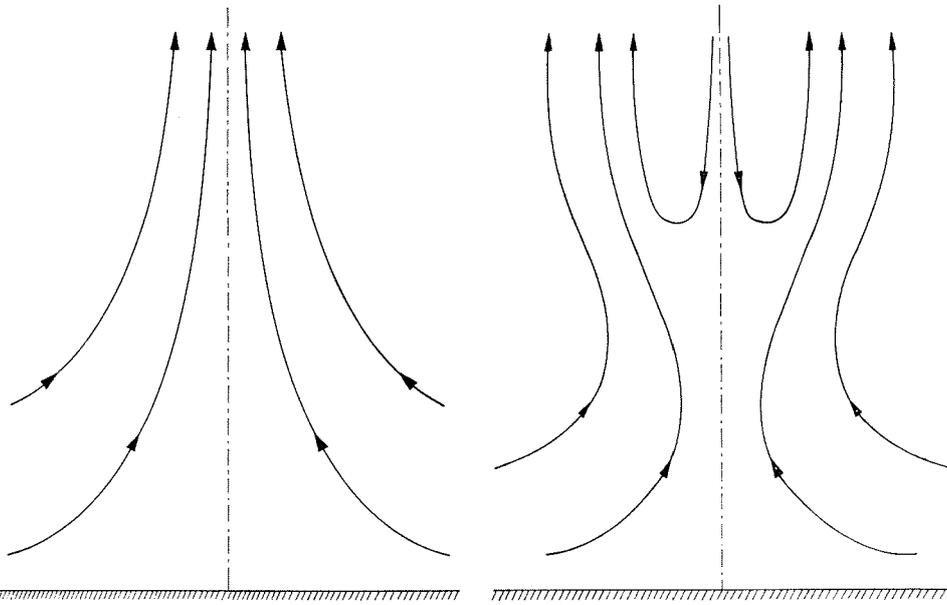


Abb. 1 Schematischer Strömungsverlauf in einer einzelligen (links) und in einer zweizelligen (rechts) Trombe

Fig. 1 Schematic streamline pattern within the one-cell (left) and the two-cell (right) tornado

Aus der Analyse von Hoecker und weiteren systematischen Untersuchungen anderer Autoren haben sich die folgenden typischen Merkmale der Dynamik einer Trombe ergeben:

1. Die Zirkulation der Tangentialbewegung (Produkt aus Tangentialgeschwindigkeit und Radius) einer Trombe wird nicht von der Corioliskraft aufrecht erhalten, sondern von der begleitenden, rotierenden Mutterwolke (Cumulonimbus). Die Rotationsrichtung der Trombe fällt mit der der Mutterwolke zusammen.
2. Ein Teil des konvektiven Auftriebs im Trombenkern stammt von warmer, feuchter Luft geringer Dichte nahe dem Erdboden oder der Wasseroberfläche her. Jedoch scheinen Auftriebskräfte auch im oberen Trombenteil wesentlich zu sein, wie Laborexperimente gezeigt haben; weiterhin wird Energiegewinn aus dem Kondensationsprozeß eine gewisse Rolle für die Aufrechterhaltung des Wirbelschlauches spielen.
3. Eine auf Spiralen nach innen zum Fuß des Wirbelkerns gerichtete Strömung warmer, feuchter Luft tritt innerhalb einer etwa 30 m dicken Bodengrenzschicht auf.

Auftrieb verbunden mit einer instabilen Schicht bestimmter Mächtigkeit und die Existenz starker Zirkulation werden als wesentliche Voraussetzungen für die Trombenentwicklung angenommen.

Einige typische mittlere Werte, die auf einer großen Anzahl von Beobachtungen beruhen, sind in Tab. 1 zusammengefaßt. Die tatsächlichen Werte können beträchtlich von den mittleren abweichen.

Tab. 1

Maximum der Rotationsgeschwindigkeit	133 m sec ⁻¹
Maximum der aufwärts gerichteten Vertikalgeschwindigkeit	44 m sec ⁻¹
Zuggeschwindigkeit des Rüssels	13 m sec ⁻¹
Druckerniedrigung im Rüssel	76 mb
Breite des Asgardsweges	180 m
Lebensdauer	20 min
Länge des sichtbaren Rüssels	900 m
Zirkulation	$3 \cdot 10^4$ m ² sec ⁻¹

2. Laborexperimente zur Erzeugung trombenähnlicher Wirbel

Um Einblick in die Trombendynamik zu erhalten, bietet sich die Möglichkeit an, durch geeignete Versuchsanordnungen trombenähnliche Wirbel im Labor zu erzeugen, wobei die folgenden vier Beobachtungsstatsachen erfüllt sein sollten:

1. Ein stationärer, den Erdboden berührender Wirbelschlauch.
2. Druckfall und im unteren Teil aufwärts gerichtete Strömung im Wirbelkern.
3. Eine Bodengrenzschicht, in der die Strömung in Spiralen zum Wirbelkern gerichtet ist.
4. Die Strömung im Wirbel sollte turbulent sein.

Zwei typische derartige Experimente werden anschließend beschrieben.

Turner und Lilly (1963) verwendeten bei ihren Versuchen einen rotierenden Zylinder von 15 cm Durchmesser und 46 cm Höhe, der mit kohlenstoffhaltigem Wasser gefüllt war. In diesen Zylinder wurden von oben Salzkerne von verschiedener Größe eingebracht, an denen sich Kohlenstoffgasblasen bildeten. Infolge des Archimedischen Auftriebes wird eine Vertikalbewegung und damit eine Zirkulation in der Vertikalebene, verbunden mit Druckfall im Zentrum, in Gang gesetzt. Das dabei erfolgende radiale Einströmen besonders am Boden konzentriert den bereits vorhandenen Drehimpuls, der von der Rotation des Zylinders herkommt, auf einen kleinen Bereich im Zentrum: Ein vertikalstehender Wirbelschlauch entsteht. Die Gestalt dieses Wirbels hängt hauptsächlich von der Menge des im Wasser gelösten Gases und der Größe der Kerne ab. Wenn kleine Kerne von oben eingestreut werden, so verhindert die dort sofort einsetzende Konvektion ein Herabfallen der Partikel bis in tiefere Schichten. Es bildet sich ein mit Gasblasen erfüllter Wirbel, der für kurze Zeit bis zum Boden vordringt. Schwerere, bis zum Boden fallende Kerne führen zu einem nahezu stationären im Zentrum des Zylinders gelegenen Wirbel, der bis zur Auflösung der Kerne bestehen bleibt.

Weitere Experimente, bei denen die durch Gasblasen simulierte „thermische Instabilität“ im Wirbel selbst keine Rolle spielte, wurden in einem mit Leitungswasser gefüllten Zylinder gemacht. Der Auftrieb wurde hierbei von aufsteigenden Luftblasen hervorgerufen, die aus einem Rohr strömten, welches zentral von oben ein kurzes Stück vom oberen Rand entfernt in das Wasser hineinragte. Bei geeigneter Stärke der Konvektionsquelle und der Rotationsgeschwindigkeit des Gefäßes bildete sich ein bis zum Boden reichender, nahezu stationärer Wirbel aus, der durch Farbe oder feinkörnigen Sand sichtbar

gemacht wurde. Aufwärtsbewegung ist im Zentrum des Wirbels anzutreffen, das von einem Gebiet mit absteigenden Bewegungen umgeben ist. Dabei scheinen die seitlichen Begrenzungen des Gefäßes kaum einen Einfluß auf die Strömung im Wirbelschlauch zu haben, da auch mit fortschreitender Zeit die Erscheinungen auf einen kleinen Bereich in Achsennähe konzentriert bleiben. Lediglich dieser Bereich wird allmählich gleichmäßig mit Farbe angefüllt, was anzeigt, daß die radiale und die vertikale Geschwindigkeitskomponente schnell mit radialer Entfernung von der Achse abfallen, und die Tangentialgeschwindigkeitsverteilung der eines starren Körpers entspricht.

Aus den Trajektorien kleiner Partikel konnte die Rotationsgeschwindigkeit des Wirbels nahe dem Zentrum ermittelt werden; sie betrug etwa das 10fache derjenigen des Zylinders.

Diese Experimente scheinen die Bedeutung eines thermisch instabilen Gebietes in größeren Höhen zu beweisen, was in Übereinstimmung mit in der Natur beobachteten Tromben ist. Die Existenz einer instabilen Schicht am Erdboden und Kondensationsvorgänge im Wirbel selbst können zur Aufrechterhaltung und zur Intensität des Wirbels beitragen, sind jedoch nicht Voraussetzung für seine Entstehung. Lediglich kleinere Wirbel bilden sich auf diese Weise.

Eine andere Versuchsanordnung zum Studium trombenähnlicher Wirbel im Labor ist von Ying und Chang (1970) verwendet worden. Sie benutzten einen aus Maschendraht bestehenden Zylinder von nahezu 2 m Durchmesser und 1,50 m Höhe, der mit einem rotierenden Tisch als unterer Begrenzung verbunden war. Als obere Berandung diente ein Deckel, in dem sich eine zentrale Öffnung von etwa 22 cm Durchmesser befand, durch die Luft mit Hilfe eines Ventilators nach oben abgesaugt werden konnte. Bei diesen Experimenten wird die erforderliche Zirkulation dadurch erzeugt, daß Luft radial nach innen durch die rotierende seitliche Zylinderbegrenzung strömt, wohingegen der notwendige Auftrieb von dem Ventilator hervorgerufen wird. Damit werden Zirkulation und Auftrieb unabhängig voneinander kontrolliert. Mit diesem Verfahren wird bei passender Wahl der Zylinderrotation und entsprechendem Auftrieb ein Wirbelschlauch erhalten, der den Tromben soweit ähnlich ist, daß kleine Modellhäuser und Autos bei Annäherung des Windes infolge des raschen Druckfalls und der hohen Strömungsgeschwindigkeit auseinanderfliegen bzw. hinweggeschleudert werden. Fehlt der Auftrieb, so rotiert die durch Rauch sichtbar gemachte Luftsäule wie ein starrer Körper.

Der wesentlich größere Versuchszylinder von Ying und Chang hat gegenüber demjenigen von Turner und Lilly benutzten den Vorteil der leichteren Erfassung von Meßdaten, vor allem in der Bodengrenzschicht. Durch Verwendung von Luft können gegenüber Wasser größere Reynoldszahlen erreicht werden, so daß hierbei die Möglichkeit gegeben ist, die Phänomene der Wirbelentstehung in turbulenter und nicht nur in laminarer Strömung zu beobachten.

Im Gegensatz zu Ying und Chang beschäftigen sich Turner und Lilly mehr mit der qualitativen Erfassung der Strömungsverhältnisse in Wirbelschläuchen außerhalb der Bodengrenzschicht.

Die sich aus Messungen ergebenden Radialgeschwindigkeiten innerhalb der Bodengrenzschicht zeigen den folgenden Verlauf (Abb. 2): In einer Schicht von etwa 9 cm Dicke wächst die nach innen gerichtete Radialgeschwindigkeit in einer Entfernung von 8 cm von der Achse vom Wert 0 am Boden bis zu einem Maximum von ungefähr 5 m sec^{-1} in der Höhe 0,6 cm, um bei 4 cm das Vorzeichen zu wechseln. Ein Maximum der nach außen gerichteten Radialgeschwindigkeit wird bei 6 cm erreicht, um schließlich auf den Wert 0 bei 9 cm abzufallen. Oberhalb dieser Höhe ist die Radialgeschwindigkeit nicht

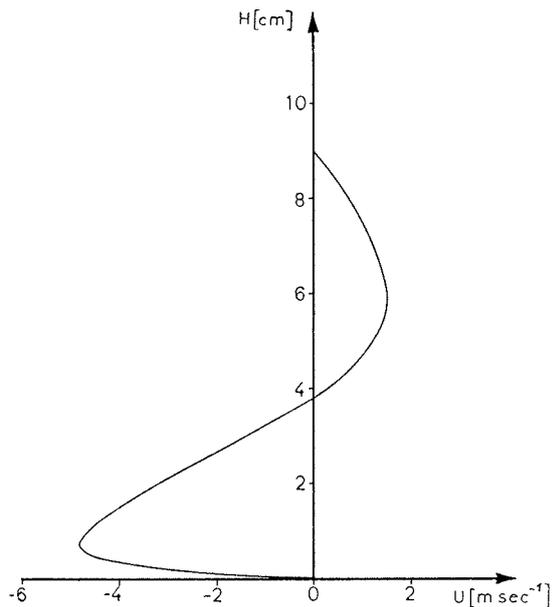


Abb. 2 Der Verlauf der Radialgeschwindigkeit 8 cm von der Rotationsachse entfernt nach Experimenten von Ying und Chang (1970)

Fig. 2 The radial velocity at a distance of 8 cm from the axis of rotation after experiments of Ying and Chang (1970)

mehr meßbar. Ein ähnlicher Kurvenverlauf jedoch mit geringerer Amplitude ergibt sich bei größerem Abstand von der Wirbelachse.

Die maximale Tangentialgeschwindigkeit steigt ebenfalls in einer Entfernung von 8 cm von der Achse vom Wert 0 am Boden bis zu einem fast konstanten Wert von etwa 8 m sec^{-1} in Höhen oberhalb 4 cm. Die Rotationsgeschwindigkeit des Zylinders betrug dabei 8 Umdrehungen pro Minute.

Ein Maximum der aufwärts gerichteten Vertikalgeschwindigkeit von ungefähr 8 m sec^{-1} tritt auf der Achse des Wirbelschlauches in einer Höhe von rund 20 cm auf.

Am Boden wird im Wirbelzentrum eine Druckerniedrigung von 13 mb gegenüber der Umgebung gemessen.

Auch in diesen Experimenten läßt sich ein Wirbelkern mit aufwärts gerichteter Strömung von einem Gebiet mit absteigender Bewegung unterscheiden.

3. Theorien zur Dynamik trombenähnlicher Wirbel

3.1. Trombenähnliche Wirbel in großer Höhe über dem Erdboden

Obwohl es verhältnismäßig einfach ist, trombenähnliche Wirbel im Labor zu erzeugen, ist die Theorie selbst zu diesen Phänomenen sehr schwierig. Die in der Atmosphäre vorkommenden Tromben sind wesentlich komplexerer Natur, so daß eine theoretische Erfassung der Strömungsverhältnisse in derartigen Wirbeln nur unter vereinfachenden Annahmen mit Hilfe eines Modells möglich ist. Gutman (1957) hat ein solches Modell unter Einbeziehung der Thermodynamik entworfen, das von Kuo (1966, 1967) weiter ausgebaut worden ist. Unter Zugrundelegung dieser Arbeiten hat Franz (1969) das im

folgenden kurz beschriebene wesentlich erweiterte Trombenmodell entwickelt. Die Voraussetzungen, die er treffen muß, um geschlossene analytische Lösungen angeben zu können, sind:

1. Stationarität.
2. Rotationssymmetrie um eine vertikale Wirbelachse.
3. Existenz eines breiten Maximums der Tangentialgeschwindigkeit in großer Entfernung über dem Erdboden.
4. Räumlich und zeitlich konstante turbulente Diffusionskoeffizienten für Wärme und Impuls.
5. Konstante Zirkulation der Tangentialbewegung für große Abstände von der Rotationsachse.

Voraussetzung 3 bedingt, daß die Lösungen nur für solche Höhen Gültigkeit haben, in denen die Bodenreibung von untergeordneter Bedeutung ist. Die so erhaltenen Ergebnisse stimmen in den charakteristischen Größen wie Extremwerte der Geschwindigkeit und des Druckabfalls mit denen der Hoeckerschen Analyse recht gut überein. Außerdem kann aus den Lösungen geschlossen werden, daß Tromben ein- oder zweizellig, niemals aber mit mehr als zwei Zellen auftreten können.

Es gibt eine Reihe weiterer Arbeiten zur Theorie trombenähnlicher Wirbel, deren Voraussetzungen jedoch weitaus einschränkender sind als die von Franz verwendeten. Ein Überblick hierzu wird von Morton (1966) gegeben, wo auch Abschätzungen der einzelnen in den Strömungsgleichungen auftretenden Terme gemacht werden.

3.2. Trombenähnliche Wirbel in der Bodengrenzschicht

Der Einfluß des Erdbodens auf die Strömungen in Wirbeln mit vertikaler Achse ist von mehreren Autoren studiert worden. Die hierbei gemachten Annahmen, die zur Lösung des hydrodynamischen Gleichungssystems getroffen werden müssen, sind aber entweder so einschränkend, daß sich die Ergebnisse nicht auf trombenähnliche Wirbel übertragen lassen, oder nicht ausreichend gerechtfertigt. Dagegen bietet sich die Möglichkeit an, mit einem numerischen Verfahren die vollständigen Gleichungen zu lösen. Zwei derartige Trombenmodelle werden im folgenden beschrieben.

In dem von Wippermann et al. (1969) verwendeten Modell wird ein Teil der Atmosphäre in einem zylindrischen Volumen mit einem Durchmesser von etwa 500 m und einer Höhe von ungefähr 250 m, welches dem Erdboden aufliegt, betrachtet. Auf dieses wirkt ein an der oberen Begrenzungsfläche vorgegebener, sich zeitlich intensivierender Wirbel ein. Die Tangentialgeschwindigkeitsverteilung dieses Wirbels entspricht einem Rankine-Wirbel ohne Diskontinuität. Außer Rotationssymmetrie wird vorausgesetzt, daß die Luft in dem Volumen homogen sei und sich anfänglich in Ruhe befinde. Es wird nun untersucht, welcher Strömungs- und Druckverlauf sich einstellt, wenn ein derartiger Wirbel — der rotierenden Mutterwolke vergleichbar — darunterliegenden Schichten aufgeprägt wird. Zu diesem Zweck werden die Strömungsgleichungen mit Hilfe eines numerischen Verfahrens so lange integriert, bis ein nahezu stationärer Zustand erreicht worden ist, nachdem die zeitliche Entwicklung des vorgegebenen Wirbels zum Stillstand gekommen ist.

Mit den Werten des vorgegebenen Wirbels stellte sich nach etwa 10.4 sec ein einzelliger trombenähnlicher Wirbel in der Bodengrenzschicht ein mit Einströmen durch die seitliche Volumenberandung und Ausströmen in Achsennähe durch die obere Begrenzung mit

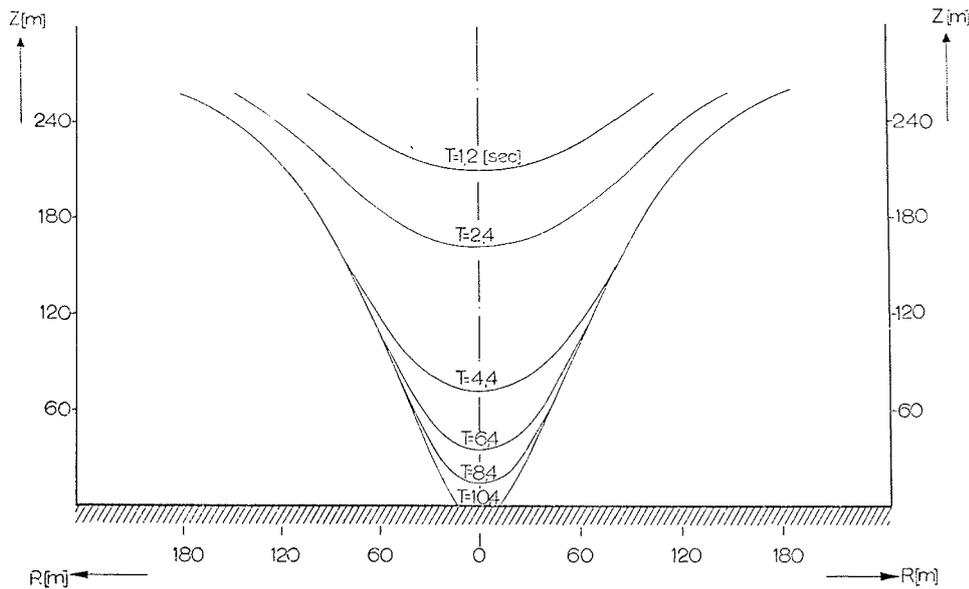


Abb. 3 Die Sichtbarkeitsgrenze des Trombenrüssels beim Einzeller zu verschiedenen Zeiten T [sec] nach Experimenten von Wippermann et al. (1969)

Fig. 3 The visible contour of the tornado funnel for the one-cell vortex at different times T [sec] after experiments of Wippermann et al. (1969)

einer Geschwindigkeit von ungefähr 100 m sec^{-1} . Absteigende Bewegung ist — wie in den Laborexperimenten — in größerer Entfernung von der Achse anzutreffen. Die Bodendruckerniedrigung in Achsennähe am Erdboden betrug dann etwa 34 mb , die Tangentialgeschwindigkeit in Erdbodennähe in einer Entfernung von 75 m von der Achse 40 m sec^{-1} .

Wird die obere Volumenberandung als Wolkenuntergrenze identifiziert, so läßt sich der Kondensationsdruck bestimmen und damit die Kontur des sichtbaren Rüssels in die Bodengrenzschicht hinein verfolgen. Abb. 3 zeigt in einem die Rotationsachse enthaltenen Vertikalschnitt diese Kontur zu verschiedenen Zeiten T , und man erkennt, wie ein trichterförmiger Rüssel von der Wolkenbasis kommend in die Bodengrenzschicht eindringt und den Erdboden nach einiger Zeit berührt.

Dieses Modell eines Einzellers ist von Szillinsky (1970) unter Zugrundelegung der Franzschen Ergebnisse auf den Zweizeller ausgedehnt worden. Hierbei haben geänderte Randbedingungen und die Verwendung von zeit- und raumabhängigen turbulenten Diffusionskoeffizienten zu unterschiedlichen Strömungsbildern geführt.

Ein anderes Modell zur Simulation trombenähnlicher Wirbel in der Bodengrenzschicht ist von Malbakhov und Gutman (1968) entwickelt worden. Sie untersuchten die Strömung in einem zylindrischen Volumen von $1,8 \text{ km}$ Durchmesser und 4 km Höhe, welches ebenfalls dem Erdboden auflag. Die unterste 1 km dicke Schicht ist thermisch instabil, die darüberliegende 3 km dicke Schicht dagegen stabil geschichtet. In der anfänglich in Ruhe befindlichen Luft wird Auftrieb dadurch erzeugt, daß ein gegenüber der Umgebung wärmerer Luftballen kleiner Abmessung, der an der Zylinderachse am Erdboden gelegen ist, aufsteigt. Unter der Voraussetzung von Rotationsymmetrie werden die thermo-hydrodynamischen Gleichungen gelöst, und es zeigt sich das typische

Bild eines sog. „thermals“ mit aufsteigender Bewegung in Achsennähe von maximal 45 m sec^{-1} in $1,7 \text{ km}$ Höhe zur Zeit $T = 36 \text{ min}$ und schwacher absteigender Strömung in der Umgebung. Die Höhe des Thermals beträgt 2 bis 3 mal die Höhe der instabilen Schicht. Zur Zeit $T = 36 \text{ min}$ wird dem zylindrischen Volumen an der seitlichen Begrenzung ($R = 900 \text{ m}$) plötzlich ein Tangentialimpuls von 15 m sec^{-1} aufgeprägt, welcher von der Höhe unabhängig ist. Hierbei entsteht mit fortschreitender Zeit ein trombenähnlicher Wirbel, bei dem maximale Werte der Strömungsgeschwindigkeit und des Druckabfalls nach etwa 56 min erreicht werden. Diese Werte betragen für die Tangentialgeschwindigkeit 75 m sec^{-1} am Erdboden in einer Entfernung von 45 m von der Rotationsachse und für die nach unten gerichtete Vertikalgeschwindigkeit 33 m sec^{-1} auf der Achse in 250 m Höhe; die Druckerniedrigung auf der Achse am Erdboden beträgt 110 mb .

Abb. 4 zeigt in einem die Rotationsachse enthaltenden Vertikalschnitt die Strömungsverteilung im Wirbel zur Zeit $T = 56 \text{ min}$; es handelt sich um einen Zweizeller mit absteigender Bewegung in Achsennähe bis nahe der unteren Berandung.

Die einzelnen Größen klingen mit zunehmender Zeit wieder ab, um nach etwa 70 min nur noch Bruchteile der maximalen Werte zu betragen. Die Lage des Staupunktes auf der Achse verschiebt sich in dieser Zeit weiter nach oben. Der Einfluß eines variablen turbulenten Diffusionskoeffizienten wird nicht untersucht.

Die mit den Modellen von Wippermann et al. und Szillinsky erhaltenen Ergebnisse stimmen lediglich größenordnungsmäßig in den Druck- und Geschwindigkeitswerten mit

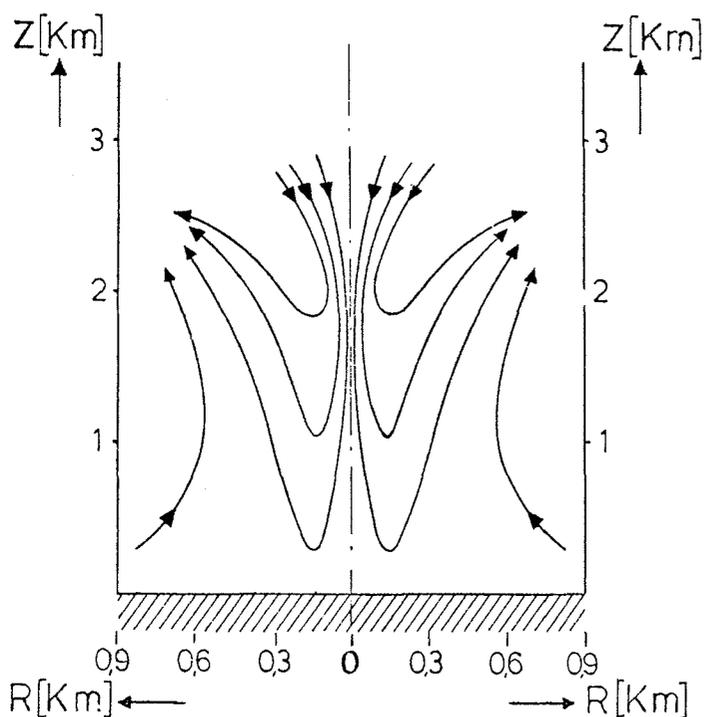


Abb. 4 Angenäherter Stromlinienverlauf in einem Zweizeller nach Experimenten von Malbakhov und Gutman (1968)
 Fig. 4 Approximated streamline pattern within a two-cell tornado after experiments of Malbakhov and Gutman (1968)

denen des Modells von Malbakhov und Gutman überein, da unterschiedliche Anfangs- und Randbedingungen und darüber hinaus verschiedene Rechenverfahren verwendet worden sind. Die untere Randbedingung im Modell von Malbakhov und Gutman z. B. scheint für Wasserhosen, dagegen diejenige im Modell von Wippermann et al. für Tromben über Land Gültigkeit zu besitzen. Eine langsamere zeitliche Entwicklung des vorgegebenen Wirbels beim Modell von Wippermann et al. hätte auch zu entsprechend längerer Zeit bis zur Einstellung eines stationären Zustandes im Volumen selbst geführt, ohne jedoch ein wesentlich anderes Strömungsbild zu ergeben und hätte außerdem längere Rechenzeit erfordert.

4. *Schlußbemerkungen*

Es ist gezeigt worden, auf welche verschiedene Arten trombenähnliche Wirbel im Labor und mit theoretischen Modellen erzeugt werden können. Voraussetzungen für die Entstehung derartiger Wirbel sind nach oben gerichtete Vertikalbewegung und Zirkulation der Tangentialbewegung. Die Vertikalbewegung wird entweder durch Absaugen von Masse oder durch Dichteunterschiede hervorgerufen, Zirkulation durch Rotation eines Zylinders oder Vorgabe einer Tangentialgeschwindigkeit entweder nur in einer bestimmten Höhe oder aber konstant über alle Höhen. Durch Dichteunterschiede bewirkter Auftrieb verbunden mit thermisch instabiler Schichtung und damit verknüpfte Vertikalbewegung scheint wesentlich für die Trombenentwicklung zu sein, wobei die Vertikalbewegung vom Boden her oder in der Höhe eingeleitet werden kann. Die Ursache für die Tangentialbewegung kann orographisch bedingt sein.

Erst die genaue Analyse weiterer sorgfältiger Beobachtungen der Strömung im sichtbaren Trombenrüssel, in der Bodenreibungsschicht und in der begleitenden Mutterwolke kann die Ursachen der Trombenentstehung erklären. Bisher sind für die Erklärung lediglich Ansätze vorhanden.

Literatur:

- Franz, H., 1969: Die Zellstruktur stationärer Konvektionswirbel, *Beitr. Physik der Atmosphäre* 42, 36—66.
- Gutman, L. N., 1957: Theoretical model of a waterspout, *Acad. of Sc. of USSR (Geophys. Ser.)* translated by A. K. Henn Pergamon Press Translation, New York 1, 87—103.
- Hoecker, Jr. W. H., 1960: Wind speed and air flow patterns in the Dallas-tornado of April 2, 1957, *Monthly Weath. Rev.* 88, 167—180.
- Hoecker, Jr. W. H., 1961: Three-dimensional pressure patterns of the Dallas-tornado and some resultant implications, *Monthly Weath. Rev.* 89, 533—542.
- Kuo, H. L., 1966: On the dynamics of convective atmospheric vortices, *J. Atmos. Sci.* 23, 25—42.
- Kuo, H. L., 1967: Note on the similarity solutions of the vortex equations in an unstably stratified atmosphere, *J. Atmos. Sci.* 24, 95—97.
- Malbakhov, V. M., Gutman, L. N., 1968: A non-stationary problem of a mesoscale atmospheric vortex with vertical axis, *Izv. Atmos. and Ocean. Phys.* 4, 333—340.
- Morton, B. R., 1966: Geophysical vortices, *Progress in Aeronautical Sciences*, Vol. 7, Pergamon Press London.
- Nestle, R., 1969: Der Tornado vom 10. 7. 1968 im Raum Pforzheim, *Meteor. Rundschau* 22, 1—3.
- Szillinsky, A., 1970: Numerische Experimente zur Simulation des Eindringens eines zweizelligen tornadoähnlichen Wirbels in die Bodengrenzschicht, *Beitr. Physik der Atmosphäre* 43, 47—73.
- Turner, J. S., Lilly, D. K., 1963: The carbonated-water tornado vortex, *J. Atmos. Sci.* 20, 468—471.
- Wegener, A., 1917: *Wind- und Wasserhosen in Europa*, Verlag Fr. Vieweg & Sohn, Braunschweig.
- Wippermann, F., Berkofsky, L., Szillinsky, A., 1969: Numerical experiments on the formation of a tornado funnel under an intensifying vortex, *Quart. J. Roy. Met. Soc.* 95, 689—702.
- Ying, S. J., Chang, C. C., 1970: Exploratory model study of tornado-like vortex dynamics, *J. Atmos. Sci.* 27, 1—14.