

Die Bedeutung von Johannes P. Letzmans „Richtlinien zur Erforschung von Tromben, Tornados, Wasserhosen und Kleintromben“ für die heutige Tornadoforschung

N. DOTZEK *, Karlsruhe, G. BERZ, E. RAUCH, München und
R. E. PETERSON, Lubbock, U.S.A.

Zusammenfassung. Die vor wenigen Jahren wiederentdeckten Richtlinien Johannes Letzmans zur Trombenbeobachtung, -erfassung und -klimatologie von 1937, ihrer Zeit um mehrere Jahrzehnte voraus, werden im Kontext der heutigen Tornadoforschung bewertet. Der Richtlinienkatalog bietet die Möglichkeit, zusammen mit modernen Maßen der Tornadointensität und der hier vorgeschlagenen Aufbereitung der Daten eine für mitteleuropäische Länder gültige Gesamtstatistik der Tornadoereignisse zu schaffen, die eine aus volkswirtschaftlicher Sicht wertvolle Regionalisierung des Tornadorisikos ermöglicht.

The relevance of Johannes P. Letzmann’s “Guidelines for Research on Tornadoes, Waterspouts and Dust Devils” for contemporary tornado research

Summary. Johannes Letzmann’s recently rediscovered guidelines for observation and climatological recording of tornadoes written in German in 1937 are evaluated within the context of contemporary tornado research. The results indicate that combined with today’s tornado intensity scales and an interchangeable data record format it is possible to obtain a full statistical overview of tornado risk for Central Europe. This also allows for a regionalization of the tornado risk in these countries and would be most desirable from an economical standpoint.

1 Einleitung

Durch zwei Veröffentlichungen (PETERSON, 1992a,b) und eine Festschrift anlässlich seines 110. Geburtstages (TOOMING und EELSALU, 1995) wurden die Leistungen des im deutschsprachigen Raum so gut wie vergessenen Meteorologen Prof. Johannes Peter Letzmann (1885–1971) gewürdigt. Aus der großen Zahl seiner Publikationen über die Physik und Klimatologie

*Jetzt: DLR–Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, D–82234 Weßling.

der Tornados sind besonders zwei hervorzuheben, die einen Richtlinienkatalog zur Erforschung und Erfassung von Tornadoereignissen vorstellen: zum einen die Arbeit LETZMANN (1937), die Gegenstand dieses Artikels ist, zum anderen LETZMANN (1944), welche eine Überarbeitung der ersten Fassung darstellt. Aufgrund der Ereignisse des zweiten Weltkriegs gerieten diese Richtlinien jedoch schnell in Vergessenheit. Hier wird untersucht, inwieweit Letzmans Anweisungen heute noch von Nutzen sind.

Das Ziel der Arbeit ist es, mit Hilfe von Letzmans Richtlinienkatalog und neueren Kriterien Tornados einzuordnen, nach Stärke und Auswirkungen meteorologisch zu erfassen und den verursachten Schaden anhand relevanter Größen zu klassifizieren. Diese Erfassung sollte knapp und einfach gehalten sein, um eine internationale Standardisierung nicht zu erschweren.

Der Artikel gliedert sich in folgende Abschnitte: nach der Definition der relevanten Begriffe im Abschnitt 2 folgt eine knappe Darstellung von Letzmans Lebensweg im Abschnitt 3. Dann werden im Abschnitt 4 die drei Wege zur Einordnung von Tornadoereignissen näher beschrieben: in 4.1 wird auf die Analyse der Waldschäden nach Letzmann eingegangen, in 4.2 werden verschiedene meteorologisch motivierte Maße der Intensität und Ausprägung eines Tornados eingeführt, und in 4.3 wird schließlich eine allgemein verwendbare Datenstruktur zur Archivierung und Aufbereitung vorgeschlagen, der „Tornadoschlüssel“. Darin kann auch der ökonomische Schaden, den ein Tornado verursacht, mit wenigen prägnanten Kennzahlen berücksichtigt und quantifiziert werden. Im Abschnitt 5 wird die vorgestellte Klassifikation auf ihre Allgemeinheit sowie Austausch- und Erweiterbarkeit hin untersucht und bewertet. Abschnitt 6 faßt die wesentlichen Punkte dieser Arbeit zusammen.

2 Terminologie

Gemäß der von Alfred WEGENER (1917) gegebenen Definition bezeichnet man jeden von einer Gewitterwolke erzeugten, eng begrenzten und mehrheitlich vertikal verlaufenden starken Luftwirbel als Großtrombe oder Tornado, sobald dieser den Erdboden erreicht. Es ist dabei unerheblich, ob der Wirbel vom Boden aus zur Wolke emporwächst oder umgekehrt. Besteht (noch) keine Verbindung zwischen Erdboden und Wirbel, bezeichnet man diesen nur als Wolkentrichter oder Wolkenschlauch, denn wie bei einem voll ausgebildeten Tornado wird auch der Wolkentrichter meist durch Wasserdampfkondensation in seinem Innern als Wolkenfortsatz er-

kennbar¹. Weil ein zum Boden reichender Wirbel nicht immer durch Wassertröpfchen oder vom Boden aufgewirbelte Partikeln in voller Länge kenntlich ist, kann die Unterscheidung zwischen Wolkentrichter und Tornado mitunter erschwert sein. Dennoch ist das entscheidende Kriterium der kontinuierliche Verlauf des Wirbels von der Wolke bis zum Boden. Die Begriffe Großtrombe und Tornado sind im Sinne dieser Definition Synonyme.

Eine Unterteilung der Tornados ergibt sich, je nachdem ob der erzeugende Gewittersturm eine Superzelle ist oder nicht (KLEMP, 1987; HOUBE, 1993). Superzellentornados erreichen die höchsten Intensitäten und Lebensdauern aller Großtromben. Nicht-Superzellentornados entstehen dagegen bevorzugt an Böenfronten oder anderen kräftigen Konvergenzlinien über Land oder sommerlich warmen Wasserflächen, wenn Grenzschichtluft mit hoher Vorticity beim Heranziehen eines Gewitters in dessen Aufwindbereich gerät und damit einen Wirbel hervorruft, der von unten in die Wolke hineinwächst (SIMPSON et al., 1986; WAKIMOTO und WILSON, 1989).

Unter dem Begriff Kleintromben werden alle Wirbel mit Bodenkontakt bezeichnet, die nicht mit einer Gewitterwolke in direkter Wechselwirkung stehen. Dazu werden die durch bodennahe Konvergenz und lokal kräftige Trockenkonvektion erzeugten Staub- und Wasserteufel gezählt, sowie rein dynamisch an lokalen Windscherungen gebildete Wirbel. Bei großer vertikaler Mächtigkeit der konvektiven atmosphärischen Grenzschicht können Kleintromben zwar bis in mehrere 100 m Höhe vordringen, ihre Intensität und Lebensdauer sind aber meist nur gering, weil keine Verbindung zur hochreichenden und langanhaltenden Feuchtkonvektion eines Gewittersturms besteht. Aufgrund ihrer geringeren Intensität findet im Innern dieser senkrechten Wirbel keine Kondensation von Tröpfchen statt.

Die im Deutschen gebräuchlichen Oberbegriffe „Windhose“, „Trombe“ und „Wirbelsturm“ lassen sich dagegen nicht eindeutig zur Klassifikation von Tornados verwenden. Besonders der Begriff Wirbelsturm ist viel zu allgemeiner Natur, denn er bezeichnet auch die Zyklonen mittlerer und tropischer Breiten.

3 Abriß der Biographie Letzmans

Die folgenden Ausführungen stützen sich weitgehend auf die zu Beginn der Einleitung genannten Quellen PETERSON (1992a,b), sowie TAMUL (1995) und PETERSON (1995).

¹Traditionell wird dieses Phänomen als Blindtrombe bezeichnet, aber dieser Begriff wird hier nicht favorisiert.

Am 19. Juli 1885 in Wenden geboren, studierte Johannes Peter Letzmann von 1906 bis 1913 an der Universität im estnischen Dorpat (Tartu bzw. Jurjew) zunächst ein Jahr Philosophie und Sprachen, bevor er sich 1907 dem Studium der Physik zuwandte. Dabei war der russische Meteorologe B. Sresnewskij sein Mentor. Den entscheidenden Anstoß für die umfangreichen Studien zur Physik der Tornados, d. h. der Großtromben, erhielt der schon früh von Wetterphänomenen faszinierte Letzmann im Jahr 1918. In dieser Zeit hielt sich Alfred Lothar Wegener in Dorpat auf, wo er Letzmans Interesse an Tornados weckte und förderte. WEGENER (1917) hatte selbst kurz zuvor eine umfangreiche Monographie über „Wind- und Wasserhosen in Europa“ veröffentlicht, die weit über frühere Arbeiten (z. B. MARTINS, 1850; REYE, 1872) hinausführte. In den folgenden 20 Jahren bis zum 2. Weltkrieg arbeitete Letzmann als Privatdozent für Geophysik an der Universität Dorpat. Motiviert von Wegeners Tornadoforschung publizierte Letzmann dort eine große Zahl von Artikeln² über Entstehung und Aufbau der Großtromben. Nach seiner Promotion im Jahr 1924 folgten in den Jahren 1928 und 1933 längere Forschungsaufenthalte bei Alfred, bzw. Kurt Wegener an der Universität Graz. In diese Zeit fällt darüberhinaus Letzmans Beschreibung der baltischen Tornadoallee, in der sich Tornadoereignisse häufen.

Über 15 Jahre hinweg war er Mitherausgeber von Gerlands Beiträgen zur Geophysik und von 1935 bis 1938 Mitglied des Komitees für Wirbelforschung der Internationalen Meteorologischen Organisation (IMO), der Vorläuferin der WMO. Diesem Ausschuß gehörte auch Harald Koschmieder an, der ebenfalls in der Tornadoforschung aktiv war (KOSCHMIEDER, 1940). Auf Veranlassung der Klimatologischen Kommission der IMO erarbeitete J. P. LETZMANN (1937) unter Koschmieders Mitwirkung den Richtlinienkatalog zur Trombenforschung (PETERSON, 1992a), der Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist. Eine geringfügig überarbeitete Fassung dieser Richtlinien (LETZMANN, 1944) geriet aber aufgrund der politischen Verhältnisse vor und während des 2. Weltkrieges ebenso schnell in Vergessenheit wie die ursprüngliche Version von 1937³. Dieser Katalog zur Trombenforschung war jedoch seiner Zeit um Jahrzehnte voraus und stellte eine umfangreiche und auf modernen Analysemethoden basierende, objektive Anleitung zur meteorologischen und statistischen Analyse von Tornadoereignissen dar.

Der Ausbruch des Krieges hatte allerdings nicht nur Auswirkungen auf die Verbreitung von Letzmans Publikationen; er selbst wurde von der veränderten politischen Lage stark betroffen:

²Siehe z. B. die zahlreichen Referenzen in PETERSON (1992b) oder PETERSON (1995).

³Vgl. dazu die Reaktion des U.S.–Landwirtschaftsministeriums auf die Übermittlung des Letzmann'schen Richtlinienkatalogs (PETERSON, 1992a).

als Deutschstämmiger mußte er Estland im Oktober 1939 verlassen. Nach kurzem Aufenthalt an der Universität von Posen erhielt er im August 1940 eine Dozentur an der Forschungsstelle für atmosphärische Wirbel der Universität Graz. Dort konnte er bis nach Kriegsende seine Forschungen prinzipiell weiterführen. Im November 1947 wurden die Forschungsmittel jedoch gestrichen und seine berufliche Situation zunehmend schwieriger. Er blieb aber bis 1962 in Österreich und übersiedelte dann in den Altenstift Baltenheim auf Langeoog, wo er am 21. Mai 1971 starb. Seine letzten Mitwirkungen an Veröffentlichungen datieren aus den fünfziger und frühen sechziger Jahren. Zu diesem Zeitpunkt war sein umfangreiches Werk bereits weitgehend in Vergessenheit geraten, auch die umfassende Monographie von SCHNEIDER–CARIUS (1955) erwähnt ihn nicht. Es ist der Verdienst der Carl Schirren Gesellschaft in Lüneburg, die Letzmanns Nachlaß verwaltet (darunter auch mehrere unvollendete Manuskripte), das Andenken an diesen Pionier der Tornadoforschung aufrechtzuerhalten.

4 Tornadoklassifikation

4.1 Letzmanns Richtlinien

Die Richtlinien (vgl. Anhang A und PETERSON (1992a, S. 600-611)) bedürfen auch nach den vergangenen Jahrzehnten kaum einer Ergänzung oder Korrektur. Letzmann nahm in seiner Aufstellung vieles vorweg, was sich erst später in der Forschung etablieren sollte. Hier sind vor allem die ausführlichen Anweisungen zur Durchführung von Flügen zur Vermessung und fotografischen Dokumentation der Schadensspur⁴ zu nennen. Diese ausgezeichnete Methode der nachträglichen Analyse eines Tornadoereignisses wird in den U.S.A. seit den siebziger Jahren systematisch eingesetzt (FUJITA, 1981). Im deutschsprachigen Raum ist sie bislang noch die Ausnahme (KÜHNEL, 1994).

Die genauen Vorschriften für den Beobachter am Boden, die selbst quantitative Angaben erlauben, sind gleichfalls von großem Nutzen. Es erfolgt eine systematische, abschnittweise Behandlung der äußeren Erscheinung der trombenerzeugenden Gewitterwolke, des Wolkenrichters und dessen Fußes, sowohl bei Betrachtung aus größerer Ferne als auch aus der Nähe. Dabei nimmt die Diskussion des Wolkenrichters naturgemäß den breitesten Raum ein. Für das Abschätzen der Größenverhältnisse werden praktische Faustregeln angegeben, und die Bedeutung

⁴Damals noch romantisierend als „Åsgardsweg“ bezeichnet, mit Bezug auf die Verwüstungen, die die nordischen Gottheiten der Åsen bei ihrem Zug über das Land der Legende nach hinterlassen.

von Fotos und Skizzen wird hervorgehoben.

Ähnlich wichtig wie das Tornadounwetter selbst ist die Beachtung der allgemeinen Witterung in der räumlichen und zeitlichen Umgebung des Sturms. Hierzu werden die markantesten Punkte aufgeführt und diskutiert. Eine Besprechung der Wasserhosen und Kleintromben (z. B. Staubteufel) beendet die Beschreibung der Phänomene. Der Abschnitt über die nachträgliche systematische und wissenschaftlich fundierte Untersuchung des Sturms, sowie deren Aufbereitung und Veröffentlichung rundet das Gesamtbild der Richtlinien ab.

Der im Anhang A vorgestellte wörtliche Textauszug aus den Richtlinien, das dortige Kapitel C. III., verdeutlicht die bis ins Detail gehende Anleitung für die Analyse des Waldbruches nach einem Tornado. Diese Akribie ist jedoch berechtigt, weil die Unterscheidung der Waldschäden einer Großtrombe von denen einer Fall- oder Linienböe (*downburst*, FUJITA, 1981), die unter den gleichen Wetterbedingungen auftreten kann, ansonsten unmöglich würde und eine falsche Einordnung der Waldschäden bedingen könnte.

Abgesehen von modernen Methoden der Radarmeteorologie, die 1937 noch nicht zur Verfügung standen, verwendet Letzmann für seinen Richtlinienkatalog sämtliche Hilfsmittel, die zur Auswertung eines Tornadoereignisses auch nach heutiger Sicht sinnvoll und aussagekräftig sind.

4.2 Intensitätsskalen

Die moderne Klassifizierung der Tornadointensität erfolgt meist anhand der TORRO-⁵ (T-) bzw. Fujita- (F)–Skalen (MEADEN, 1976; FUJITA, 1981, vgl. Anhang B), die analog zur Beaufort'schen Windstärkenskala aufgebaut sind. Dabei wird der Wertebereich der Beaufort'schen B–Skala, die nur bis zu normaler Sturmstärke reicht, in größeren Abstufungen wesentlich nach oben hin erweitert. Eine andere Unterteilung nach KELLY et al. (1978) ordnet einem Tornado lediglich die Grade „schwach“, „stark“ und „verheerend“ zu und ist demnach nur zu einer Grobeinordnung geeignet. Tornados mit den Graden stark oder verheerend werden darüberhinaus als „signifikant“ eingestuft (vgl. Tab. 1).

Aufgrund der Eigenschaften der T- bzw. F–Skala ist es möglich, auch ohne direkte *in situ*–Messung der Windgeschwindigkeit, nachträglich anhand der Auswirkungen des Windes auf Bewuchs oder Bebauung eine Einteilung der Tornadointensität vorzunehmen. Mit Hilfe von Erfahrungswerten z. B. für Windbruch- oder Gebäudeschäden können dann typische Geschwindig-

⁵TORNado and storm Research Organisation; <http://www.torro.org.uk/>

keitsintervalle für die einzelnen Intensitätsskalen angegeben werden. Der T-Skala, die doppelt so fein abgestuft ist wie die F-Skala, sollte dabei der Vorzug gegeben werden, da aufgrund der hohen Siedlungs- und Bewaldungsdichte in Mitteleuropa in den meisten Fällen eine detaillierte Analyse und Einordnung der Windschäden vorgenommen werden kann als z. B. im mittleren Westen der Vereinigten Staaten.

Zur Umrechnung zwischen T- bzw. F-Skala und B-Skala dienen in guter Näherung die Beziehungen

$$\begin{aligned} B &= 2(T + 4) = 4(F + 2) \\ T &= 2F \quad = B/2 - 4 \\ F &= T/2 \quad = B/4 - 2 \quad . \end{aligned}$$

Sie verdeutlichen die Verwandtschaft der drei Skalen. Dem schwächsten Tornado, T0, entspricht demnach Windstärke 8, einem T11 entspräche die hypothetische Windstärke 30.

Eine Übersicht der typischen Windgeschwindigkeitsintervalle für v in m s^{-1} bei den T- und F-Skalen gibt Tab. 1. Diese folgen aus den Gleichungen (FUJITA, 1981)

$$\begin{aligned} v_B &= 0.84 B^{3/2} \\ v_T &= 2.36 (T + 4)^{3/2} \\ v_F &= 6.30 (F + 2)^{3/2} \quad . \end{aligned}$$

Wie Tab. 1 zeigt, werden in dieser Arbeit die beiden nicht exakt deckungsgleichen Skalen T und F erstmals in einer einheitlichen Form zusammengeführt. Dabei wird erkennbar, daß alle zwei T-Stufen, also mit jeder F-Stufe die Geschwindigkeitsdifferenz Δv zwischen zwei benachbarten Graden der T-Skala um 1 m s^{-1} zunimmt. Die Geschwindigkeit v bezeichnet hier die zu der an einem Punkt beobachteten Windwirkung gehörende mittlere Windgeschwindigkeit relativ zum Erdboden, bei einem Tornado also die lokale Summe aus Verlagerungs- und Umlaufgeschwindigkeit des Wirbels. Allerdings sind diese Geschwindigkeitsangaben als ungefähre Richtwerte aufzufassen.

Welche Windschäden z. B. an Gebäuden entstehen, hängt nicht nur von der Windstärke, sondern in hohem Maße auch von der Festigkeit der betroffenen Bausubstanz ab. Dieser Problematik bei der Tornadoklassifikation ist man sich in den U.S.A. zwar zunehmend bewußt, aber der von FUJITA (1992) unterbreitete Vorschlag einer Modifikation der F-Skala, so daß die Klassifizierung der Intensität nur noch eine Funktion der Windgeschwindigkeit darstellt, hat sich bislang noch nicht durchgesetzt.

Dem Problem kann aus versicherungs- und volkswirtschaftlicher Sicht durch die Einführung des mittleren Schadensatzes \bar{S} begegnet werden. Er bezeichnet das Verhältnis von Schaden zu Neuwert in Prozent:

$$\bar{S} = 100 \frac{\text{Schaden in EUR}}{\text{Neuwert in EUR}} .$$

Hierbei ist die Qualität der typischen Bausubstanz innerhalb der untersuchten Region in Rechnung zu stellen, so daß sich zwischen den U.S.A. und Mitteleuropa bei identischer Windgeschwindigkeit unterschiedliche Werte des mittleren Schadensatzes ergeben.

Zusätzlich werden bei Gebäuden die Schadensätze \bar{S}_{Leicht} für Leicht- und \bar{S}_{Massiv} für Massivbauweise unterschieden, wobei unter „Leichtbauweise“ Lagerhallen, landwirtschaftliche Gebäude (z. B. Scheunen) und temporäre Bauten verstanden werden. Unter „Massivbauweise“ sind dauerhafte Ziegel-, Stein- und Stahlkonstruktionen, Massivholzbauten mit Winddesign sowie eine dauerhafte Dachbauweise (Ziegel-, Flach-, Schindeldach) zusammengefaßt. Die Werte für \bar{S} sind in Tab. 1 und Anhang B dargestellt. Die stärkste absolute Zunahme des Schadensatzes findet man zwischen den Intensitäten T6–T7 (Leichtbau) bzw. T7–T8 (Massivbau).

4.3 Tornadoschlüssel

Die mittlere oder maximale Tornadointensität allein ist nicht ausreichend, ein solches Sturmergebnis zu klassifizieren. Simultan zur Entwicklung der F–Skala wurde daher von FUJITA und PEARSON (1973) eine ebenfalls sechsstufige Skala als Ergänzung geschaffen, die zusätzlich zum Wert der F–Skala sowohl die Länge als auch die Breite der Schadenspur mit je einer von Pearson vorgeschlagenen Klasse P quantifiziert. Daher ist für diese Einstufung der Name FPP–Skala gebräuchlich. Ein ähnlicher Weg wurde später von FUCHS (1981) beschritten. Allerdings erscheint es für klimatologische Auswertungen sinnvoller, Länge und Breite der Tornadoschneise nicht in Klassen einzuteilen, sondern die tatsächliche Breite in Metern und die Länge in Kilometern direkt anzugeben. Zusätzlich sind Angaben zum Zeitpunkt des Beginns, zur Dauer und zur Zugrichtung wichtige meteorologische Informationen über einen Tornado. Sie lassen sich in einer Gruppe zusammenfassen und in einer dem international gebräuchlichen Wetterschlüssel ähnelnden Struktur darstellen, so daß dafür der Begriff „Tornadoschlüssel“ vorgeschlagen wird.

Analog dazu können auch die Sach- und Flurschäden, Geländere relief und Landnutzung des Tornadogebiets sowie die Art der Quellen, die das Auftreten des Tornados belegen, in weiteren Untergruppen des Tornadoschlüssels aufgenommen werden.

Ein erstes Beispiel dieser Erfassungsmethode ist hier für den von HANNESEN et al. (1998) analysierten Tornado von Oberkirch–Nußbach aufgeführt:

9 Sep 1995 | Nußbach; 48°31'37" N, 8°05'27" E | T_S | ...
... | 2/1, 1, 50, 12:55, 2, W–E | FH, R | ...
... | \bar{S}_{Leicht} , \bar{S}_{Massiv} , Sach-, Flurschaden | ELNTW .

Dabei bezeichnen die Spalten 1 und 2 Datum und Ort(e), Spalte 3 die Tornadoart (hier: *super-cell tornado*). Spalte 4 gibt T/F–Skala, Länge der Spur in km, Breite in m, Zeit des Beginns, Dauer in min und Zugrichtung an. Spalte 5 bezeichnet Terrain und Bewuchs/Bebauung (hier: *flat*, *hilly*; *rural*), während Spalte 6 die beobachteten mittleren Schadensätze sowie Sach- und Flurschäden in EUR und Spalte 7 die Quellen nennt (hier: *eye-witnesses*, *literature*, *newspaper*, *television*, *weather service*). Die Kürzel wurden der internationalen Austauschbarkeit wegen passend zu englischsprachigen Begriffen gewählt.

Mit Hilfe der Gruppen dieses Tornadoschlüssels werden die wichtigsten Daten zu einem Tornadoereignis sehr stark komprimiert, aber dennoch übersichtlich zusammengefaßt und können somit auch als Format für Tornadomeldungen bei einer zentralen Sammelstelle dienen.

5 Diskussion

Nach der von DOTZEK et al. (1999) vorgelegten Analyse von ca. 410 Großtromben muß in Deutschland pro Jahr mit 2 bis 5 Tornadoereignissen gerechnet werden. Die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Tornados beträgt hier ca. $0.1 \text{ a}^{-1} 10^{-4} \text{ km}^{-2}$. Wegen dieser etwa um einen Faktor 20 kleineren Tornadowiederkehrdichte als im Haupt–Tornadogürtel der U.S.A. werden direkte Tornadobeobachtungen im deutschsprachigen Raum aber auch weiterhin die Ausnahme bleiben. Welche Art der nachträglichen Analyse solcher Ereignisse bietet sich im Zusammenhang mit den behandelten Verfahren an?

Neben den hier genannten Analyse- und Erfassungsmethoden steht heute im deutschsprachigen Raum eine nahezu flächendeckendes Netz von Doppler Radargeräten zur Verfügung. Wie von HANNESEN et al. (1998) demonstriert wurde, können auch routinemäßig erfaßte Radardaten nachträglich gewinnbringend für eine Analyse von Tornadofällen herangezogen werden. Im Zusammenspiel mit den schon vorgestellten Methoden ist so die Möglichkeit gegeben, im nachhinein eine Auswertung der Ereignisse auf verschiedenen Ebenen (Forstbehörden, Wetterdienst, Forschungszentren etc.) durchzuführen.

Es ist deshalb sinnvoll, mit den genannten Fernerkundungsmethoden und der *in situ*-Schadenanalyse nach den Letzmann'schen Richtlinien die Analyse von Tornados voranzutreiben, denn die Erstellung einer Tornadoklimatologie, die Letzmann zum Ende der Richtlinien einfordert, steht für den deutschsprachigen Raum bis heute aus: nach der schon von WEGENER (1917) begonnenen Kartierung der in Europa bekanntgewordenen Tornados und der zugehörigen statistischen Analyse beschränkten sich andere Autoren aus Deutschland und der Schweiz (FRÜH, 1907; PIAGET, 1976; FUCHS, 1981; FUCHS und BOCK, 1989; DOTZEK et al., 1998) auf das Führen von Teilstatistiken.

Sinnvoll erscheint das Anlegen einer Teilstatistik jedoch nur für Gebiete, in denen Tornados gehäuft oder unter stets sehr ähnlichen Wettersituationen auftreten. Ein Beispiel dafür ist die Oberrheinregion mit den angrenzenden Mittelgebirgen bis zum Schweizer Jura. Die Klimatologie der Großtromben ist in diesem Gebiet an tornadogefährdeten Tagen so ähnlich, daß sich eine die Ländergrenzen überspannende Kooperation mit Stellen in der Schweiz und in Frankreich anbietet (DESSENS und SNOW, 1993; HANNESEN et al., 1998).

Bundesweit wurden in den letzten Jahrzehnten sicher nicht alle Ereignisse erfaßt. Besonders in den ostdeutschen Bundesländern existieren größere Datenlücken. Die Zusammenführung der von einzelnen Personen und Stellen gesammelten Daten kann jedoch schnell ein klareres Bild der räumlichen Verteilung von Tornados in Deutschland liefern und andere bevorzugte Regionen aufzeigen, für die sich eine detailliertere Regionalklimatologie analog derer zum Oberrheingraben anbietet. Auf diese Weise wäre es denkbar, die seit Wegener bestehende Lücke in den Daten zu schließen und auch für die Zukunft eine kontinuierliche Erfassung zu ermöglichen. Die vorgestellte Methode des Tornadoschlüssels kann wegen ihrer Kürze und Allgemeinheit dabei wertvoll sein.

Vorbilder für solche Länderklimatologien in Europa existieren bereits. Neben der übergreifenden Arbeit von GOLIGER und MILFORD (1997) sind in den letzten Jahren Klimatologien für folgende Länder erarbeitet worden: England (MEADEN, 1976, 1985), Frankreich (DESSENS und SNOW, 1989, 1993), Italien (PALMIERI und PULCINI, 1979), Estland (TOOMING et al., 1997) und Österreich (PÜHRINGER, 1973). Sie haben das Verständnis der Entstehungs- und Entwicklungsprozesse der Großtromben in diesen Staaten wesentlich vertieft. Einen aktuellen Schritt in diese Richtung für den deutschsprachigen Raum unternimmt die Forschungsgruppe TorDACH nach dem Vorbild der britischen Organisation TORRO.

Trotz dieser Aktivitäten fehlt nach wie vor die Zusammenführung und kritische Auswertung

der einzelnen Tornadoereignisse durch eine zentrale Stelle, die auch zukünftige Fälle berücksichtigt und analysiert. So wie bei Erhebungen für andere Unwettertypen erst die langjährige und kontinuierliche Registrierung zu einer gesicherten Kenntnis der räumlichen und zeitlichen Verteilung der Ereignisse geführt hat, ist auch bei den Tornados eine langfristige Nutzung aller Datenquellen unerlässlich. Auch wenn das Tornadorisiko in Deutschland von etwa $0.1 \text{ a}^{-1} 10^{-4} \text{ km}^{-2}$ bereits eine robuste Größe zu sein scheint, ist die räumliche Datendichte für eine echte Regionalisierung des Tornadorisikos noch nicht ganz befriedigend.

Das hohe Schadenpotential selbst schwacher Tornados verbunden mit der jeweils nur relativ kleinen betroffenen Fläche zeigt die Notwendigkeit einer möglichst vollständigen Erfassung aller Ereignisse auf. Die Versicherungswirtschaft zöge großen Nutzen aus einer solchen regionalisierten Datenbank bei der Abschätzung des versicherten Schadens im Tornadofall.

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde der Richtlinienkatalog zur Trombenforschung von J. P. Letzmann unter dem Licht der heutigen Tornadoforschung betrachtet. Dabei wurde besonders auf die detaillierten Anweisungen zur nachträglichen Analyse von Tornadoschäden hingewiesen, die es ermöglichen, den einzelnen Ereignissen eine für Mitteleuropa zutreffende Intensitätsstufe aus der im Anhang B beschriebenen T-Skala zuzuordnen. Für die Bereitstellung der so gewonnenen Daten wurde eine kurze und in ihren Merkmalen leicht erweiterbare, standardisierte Form anhand von einzelnen Datengruppen innerhalb eines Tornadoschlüssels vorgeschlagen.

Damit kann erreicht werden,

1. einzelne Teilstatistiken zur Tornadoklimatologie vereinheitlicht zusammenzuführen,
2. zukünftige Tornadoereignisse anhand der vorgestellten Methodik zu erfassen und in die Gesamtstatistik einzufügen,
3. die noch vorhandenen Datenlücken, speziell für Ostdeutschland, zu schließen,
4. in Zukunft verstärkt Doppler Radardaten zur Analyse von Tornados heranzuziehen,
5. die z. Zt. bekannte mittlere Tornadowahrscheinlichkeit von ca. 0.1 pro 10 000 km^2 pro Jahr für den deutschsprachigen Raum zu untermauern,

6. mit Hilfe der weiter vergrößerten Datenbasis gegenüber den derzeit erfaßten gut 410 Tornadoereignissen in Deutschland auch eine stärkere Regionalisierung des Tornadorisikos vorzunehmen,
7. schließlich das volkswirtschaftliche Risiko durch Tornados im Vergleich zu anderen Naturgefahren für die Versicherungsbranche und politische Entscheidungsträger besser kalkulierbar zu machen.

Eine zentrale Stelle, die Daten zu Tornados und anderen Naturgefahren einheitlich archiviert und durch Publikationen regelmäßig zugänglich macht, würde das Vermächtnis Letzmanns erfüllen.

Danksagung

Einer der Autoren (R. P.) dankt der Carl Schirren Gesellschaft in Lüneburg für den Zugang zum Nachlaß von J. P. Letzmann sowie Heino TOOMING (Estnisches Institut für Meteorologie und Hydrologie) für Informationen über Letzmanns Schaffensperiode in Estland.

Kopien der Letzmann'schen Richtlinien und Informationen zum Netzwerk TorDACH sind bei einem der Autoren (N. D.) erhältlich, sowie unter <http://www.op.dlr.de/~pa4p/TorDACH/>.

A Auszug aus Letzmanns Richtlinien

Die vollständigen Richtlinien wurden von PETERSON (1992a, S. 600–611) bereits in englischer Übersetzung wiederveröffentlicht. Zur Anschauung wird daher nur die sowohl für Forstwissenschaftler als auch für Meteorologen bedeutsame Passage der Richtlinien über die Beurteilung der Waldschäden wörtlich wiedergegeben. Orthographie, Querverweise und Fußnotennummerierung entsprechen der Quelle LETZMANN (1937), lediglich die Bildunterschriften wurden angepaßt und Abb. 1 nach PETERSON (1992b) reproduziert.

C. III. Die Untersuchung und Vermessung des Waldbruches (Åsgardsweges).

1. Kleinere Waldbrüche können zusammen mit der übrigen Spur untersucht werden. Grössere beanspruchen mehr Zeit, ihnen müssen gesonderte Tage gewidmet werden, besonders dann, wenn keine Luftbildaufnahme zur Verfügung steht.

2. Als Hilfsmittel eignet sich ein Zeichenbrett (quadriert) auf fester Unterlage mit daran befestigtem Kompass, oder ein Vermessungsbüchlein mit Kompass, Block–Einlage, Tasche, Zirkel, Bleistift (2–3 Farben). Das Blatt wird mit seiner Kante stets einer gegebenen Kompassrichtung parallel gehalten und die Fallrichtung nach der Natur eingezeichnet. Zweckmässig ist die Verwendung von Millimeter–Papier; der Masstab kann dann so gewählt werden, dass 1 mm = 1 m ist. Die Längen können abgeschritten werden, sofern die Schrittlänge vorher bestimmt worden ist. Die Blätter können in einer Ecke eine Zusammenstellung des Schritt- und Metermasstabes enthalten, damit danach die Eintragungen gleich in m gemacht werden können. Das Bandmass dient nur zum Feststellen besonders wichtiger Längen, sowie zum vorbereitenden Festlegen einiger Punkte im Åsgardsweg, wenn in schwer zugänglichen Waldbrüchen durch das Abschreiten mehrerer Teilstrecken die Gesamtstrecke ungenau werden kann, weil die Einzelfehler sich hierbei summieren. Diese vermessenen Punkte dienen nötigenfalls zur Orientierung und Kontrolle.

3. Es ist zweckmässig, zuerst die Umrisse und die Grösse der Bruchstreifen festzulegen, sowie bei dieser Gelegenheit annähernd auch die Breite der Zone ausserhalb des Åsgardsweges, in welcher einzelne gebrochene Bäume vorkommen, und *stichprobenweise* auch deren Fallrichtung.

Wenn im Åsgardsweg oder an seiner Grenze ein Wechsel des Waldbestandes auftritt (Hochwald, gleichmässiger Bestand, Lichtung, Buschwerk, Mischwald, Felder), sollte dies in der Skizzen- und Reinzeichnung angegeben werden. **Assmann** hat regelmässig die Art des Waldbestandes (auch des einheitlichen) an den Rändern des Bruchstreifens vermerkt.

4. Um den *Spurtypus* festzustellen, der uns Rückschlüsse auf die dynamischen Verhältnisse innerhalb der Trombe oder des Tornados bieten kann, sollte die *Methode der Querlinienmessung* angewandt werden. Der Spurtypus tritt im *Spurbilde* hervor.

An bestimmten charakteristischen Stellen, wie z. B. am Anfang der Spur, an Stellen mit gut ausgeprägtem Typus, an Gabelungs- und Vereinigungsstellen, vor und nach Hindernissen, am Ende der Spur, usw., wird eine bestimmte Richtung *senkrecht* zur Spur ins Auge gefasst und im Weiterschreiten dauernd eingehalten. Dabei wird die Fallrichtung derjenigen Bäume eingezeichnet, deren Wurzelweg in dieser Linie oder in ihrer Nähe (bis 4–5 m Abstand) liegt.

Es empfiehlt sich zwei, und im Falle entstehender Unsicherheit eine dritte Querlinie nahe beieinander durchzumessen (etwa in 10–30 m gegenseitigem Abstand).

Als Anhaltspunkt zum Beurteilen der zu erwartenden Spurbilder sind in Abb. 1 die vom

Verfasser nach einem graphischen Verfahren theoretisch abgeleiteten Spurtypen¹ zusammengestellt.

5. Hinzugefügt werden sollte noch ein Typus, der „unregelmässige“, der häufig vorkommt und nur in geringem Grade eine Anlehnung an den einen oder anderen theoretischen Typus zeigt oder auch ganz unregelmässig ist.

Manchmal ist ein scheinbar unregelmässiges Spurbild durch den *Wechsel des Typus* bedingt, wobei die Regelmässigkeit oft erst bei vorliegender Vermessung eines grösseren Flächengebietes bemerkbar wird. Daher erfordert das Auftreten dieses Typus in grösseren, gleichmässigen Wäldern stets mehr Aufmerksamkeit, besonders wenn sehr verschiedene Fallwinkel vorliegen, und eine umfangreichere Untersuchung, wenn eine Fliegeraufnahme nicht den nötigen Überblick gibt.

Eine Aenderung des Typus kann eintreten: beim Uebergang vom Wald zum Felde, vor und nach Hindernissen, Hügeln, Tälern, usw., sowie am Anfang und Ende der Spur.

6. Zur Beschreibung und Gliederung des Spurstreifens im Walde sollten die Ausdrücke: „Seite“, „Rand“, „Mitte“, „Aussenzone“ gemäss Abb. 2 gebraucht werden².

7. Nicht selten findet man, dass am linken Rande mehrere Bäume oder Gruppen aus der Spur *herausfallen* und in die Aussenzone hereinragen. Diese Stellen wären zu vermerken und zu vermessen.

8. Wenn *gekreuzt übereinander* liegende Bäume irgendwie regelmässig verteilt im Åsgardswege vorkommen, etwa in einer singulären Längslinie oder in einer bestimmten Gegend häufiger anzutreffen sind, sollte dies im Spurbilde verzeichnet und angegeben werden, ob in der Reihenfolge der Ueberlagerung vielleicht eine Regelmässigkeit herrschte.

9. Bei unregelmässig vorkommenden gekreuzten Bäumen, z. B. in der Messlinie, sollte derjenige Baum nicht berücksichtigt werden, dessen Standort (Wurzeln) mehr als 4–5 m von der Messlinie entfernt ist.

Wenn der Abstand kleiner ist, soll derjenige Baum berücksichtigt werden, dessen Stärke

¹Die verschiedenen Typen der Spur hängen davon ab, welcher Windgeschwindigkeit innerhalb des Tornados (Trombe) wir die zerstörende Wirkung zuschreiben und davon, wie sich die Geschwindigkeit der Rotation zu derjenigen des Fortschreitens verhält. Dieses Verhältnis ist für jede waagerechte Zeile konstant und nimmt von I–IV zu. Jede dieser Typenreihen zerfällt in eine Anzahl von Formen A–D, je nachdem, wie stark die Windrichtung innerhalb des Tornados vom *Radius* abweicht. Dieser Ablenkungswinkel ist bei A–F entsprechend 0°, 30°, 60°, 90°, 135°, 180°.

²Meteorolog. Zeitschr. 1928, S. 437.

und Art am meisten der Umgebung entspricht; bei einer Gleichheit beider entscheidet die Form und Grösse der Krone, oder es wird die Fallrichtung des unteren vermerkt. Wenn der andere Baum aber besser in das Spurbild passt, sollen beide verzeichnet werden. Die Reihenfolge der Ueberlagerung wird leicht durch Farbstifte bezeichnet oder durch eine bestimmte Numerierung.

10. Dazwischen erfolgen die Ueberlagerungen durch eine gegenseitige Beeinflussung zweier Kronen oder durch die zufällige Form einer Wurzelscheibe, durch welche eine Fallrichtung bevorzugt werden kann. Von derartigen *zufällig* gekreuzten Bäumen braucht nur ein einziger gemäss Punkt 9 verzeichnet zu werden.

11. Das Aufsuchen von Bäumen, deren Stämme, insbesondere aber deren stehengebliebene Stümpfe eine Drehwirkung zeigen (in Fasern zerdreht sind), braucht erst an zweiter Stelle zu erfolgen, d. h. falls dazu die Zeit vorhanden ist, weil, wie nachgewiesen, beide Arten der Drehung auf beiden Seiten der Spur vorkommen können, wenn auch nicht mit gleichem Verhältnis.¹

Sollte diese Untersuchung vorgenommen werden, so wäre eine grössere Anzahl derartiger Bäume zu ermitteln, um das Verhältnis berechnen zu können.

12. Auch an Kornfeldern kann man in einigen Fällen deutlich ausgeprägte Spurbilder antreffen und Konvergenz-Linien feststellen. Auch hier empfiehlt es sich — wenn dazu eine Möglichkeit vorhanden ist — eine Vermessung der Winkel vorzunehmen, unter denen die Halme konvergieren oder gebeugt sind.

13. Eine ausführliche Vermessung eines ganzen Gebietes braucht nicht durchgeführt zu werden, sofern Luftbildaufnahmen vorliegen. Aber auch bei vorhandenen Aufnahmen dürfte mitunter zur Entscheidung von Fragen, die bei der Bildanalyse auftreten, eine Kontrollvermessung einer oder einiger Querlinien nötig sein. (Vgl. Abschnitt A)

Selbst dann, wenn eine Vermessung am Boden schon durchgeführt ist und Luftbildaufnahmen später möglich werden, sollten diese gemacht werden, weil ein Luftbild mehr zeigt als eine Vermessung.

14. Gewöhnliche Lichtbildaufnahmen im Waldbruch sollten stets von einem erhöhten Standpunkt aus gemacht werden. Aufnahmen aus Stativhöhe zeigen wenig charakteristische Einzelheiten.

Eine Angabe über die Brennweite des Apparates ist stets erwünscht.

¹Neuerdings sind vom Verfasser einige deutlich zerdrehte Bäume sogar in einem Waldbruch, der von einer typischen Linienböe verursacht worden war, festgestellt worden.

B T-Skala

Im folgenden wird stichwortartig die Zuordnung der T-Skala zur Windwirkung angegeben; die Darstellung ist für mitteleuropäische Verhältnisse angepaßt und deckt sich daher nicht völlig mit den eher für U.S.-amerikanische Gegebenheiten gültigen Definitionen von MEADEN (1976) oder der von FUJITA (1981) angegebenen Beschreibung der F-Skala. Eine Zuordnung zum für Zentraleuropa repräsentativen mittleren Schadensatz \bar{S} für Bauten in Leicht- oder Massivbauweise erfolgt hier erstmals.

T0 Schadensätze: $\bar{S}_{\text{Leicht}} = 0.05 \%$, $\bar{S}_{\text{Massiv}} = 0.01 \%$.

Leichte Gegenstände werden vom Boden abgehoben. Äste beginnen abzubrechen, in Getreidefeldern ist der Zugweg erkennbar. Baugerüste können umstürzen, leichte Schäden an Markisen und Zelten auftreten. Dachziegel an exponierten Stellen können sich lockern. Keine Schäden an Gebäude-Tragwerken.

T1 Schadensätze: $\bar{S}_{\text{Leicht}} = 0.10 \%$, $\bar{S}_{\text{Massiv}} = 0.05 \%$.

Gartenmöbel und leichtere Gegenstände werden umgeworfen und können durch die Luft gewirbelt werden. Holzzäune werden umgeworfen. Windbruch an Bäumen. Leichte Schäden an Dachziegeln und Verblechungen. Geringe Schäden an Leichtbauten; keine strukturellen Schäden.

T2 Schadensätze: $\bar{S}_{\text{Leicht}} = 0.25 \%$, $\bar{S}_{\text{Massiv}} = 0.10 \%$.

Auch schwerere Gegenstände werden vom Boden aufgehoben und können zu gefährlichen Geschossen werden. Fahrzeuge und Anhänger können umgeworfen werden. Ziegel- und ungesicherte Flachdächer werden teilweise abgedeckt. Geringe bis mittelschwere Schäden an Leichtbauten; erste Schäden an strukturellen Elementen von Massivbauten möglich. An Bäumen werden einzelne starke Äste abgebrochen oder -geknickt, kleine Bäume entwurzelt.

T3 Schadensätze: $\bar{S}_{\text{Leicht}} = 0.80 \%$, $\bar{S}_{\text{Massiv}} = 0.25 \%$.

Einzelne größere Bäume werden entwurzelt. Zahlreiche Fahrzeuge und Anhänger werden umgeworfen. Ziegel- und ungesicherte Flachdächer erleiden größere Schäden. Mittelschwere Schäden an Leichtbauten; einzelne Schäden an strukturellen Elementen von Massivbauten. Fahrende Autos werden von der Straße gedrückt.

T4 Schadensätze: $\bar{S}_{\text{Leicht}} = 3.0 \%$, $\bar{S}_{\text{Massiv}} = 0.80 \%$.

Schwerer Windbruch an freistehenden Bäumen und in Wäldern. Große Schäden an Fahrzeugen und Anhängern. Hohe Gefährdung und Schäden durch herumfliegende Teile. Ganze Dächer werden abgedeckt. Schwere Schäden an Leichtbauten; zunehmend Schäden an strukturellen Elementen von Massivbauten, Einsturz von Giebelwänden möglich.

T5 Schadensätze: $\bar{S}_{\text{Leicht}} = 10.0 \%$, $\bar{S}_{\text{Massiv}} = 3.0 \%$.

Schwere Schäden an Dächern und Anbauten. Schwere Schäden an Leichtbauten; weiter zunehmende Schäden an strukturellen Elementen von Massivbauten. Vollständiger Einsturz einzelner Gebäude, vor allem landwirtschaftlich genutzter Konstruktionen und Lagerhallen. Kraftfahrzeuge werden hochgehoben

T6 Schadensätze: $\bar{S}_{\text{Leicht}} = 30.0 \%$, $\bar{S}_{\text{Massiv}} = 10.0 \%$.

Leichtbauten werden in größerem Umfang zerstört. Schwere Schäden an strukturellen Elementen von Massivbauten. Einsturz einzelner Gebäude. Schwere Kraftfahrzeuge werden hochgehoben.

T7 Schadensätze: $\bar{S}_{\text{Leicht}} = 90.0 \%$, $\bar{S}_{\text{Massiv}} = 30.0 \%$.

Verbreitet völlige Zerstörung von Leichtbauten und schwere Schäden an Massivbauten. Einsturz zahlreicher Gebäude. Deutliche Entrindung stehenbleibender Bäume durch umherfliegende Trümmer.

T8 Schadensätze: $\bar{S}_{\text{Leicht}} = 100 \%$, $\bar{S}_{\text{Massiv}} = 60.0 \%$.

Schwere Schäden an Massivbauten. Verbreiteter Einsturz von Gebäuden, deren Einrichtung weit verstreut wird. Kraftfahrzeuge werden über große Strecken geschleudert.

T9 Schadensätze: $\bar{S}_{\text{Leicht}} = 100 \%$, $\bar{S}_{\text{Massiv}} = 80.0 \%$.

Überwiegend Totalschäden an Massivbauten. Züge werden von den Schienen gerissen. Totale Entrindung stehengebliebener Baumstämme.

T10 Schadensätze: $\bar{S}_{\text{Leicht}} = 100 \%$, $\bar{S}_{\text{Massiv}} = 90.0 \%$.

Überwiegend Totalschäden an Massivbauten.

T11 Schadensätze: $\bar{S}_{\text{Leicht}} = 100 \%$, $\bar{S}_{\text{Massiv}} = 95.0 \%$.

Überwiegend Totalschäden an Massivbauten. Unvorstellbare Schäden entstehen.

Literatur

- Dessens, J., J. T. Snow, 1989: Tornadoes in France. — *Wea. Forecasting* **4**, 110–132.
- Dessens, J., J. T. Snow, 1993: Comparative description of tornadoes in France and the United States. — *Geophys. Monogr.* **79**, 427–434.
- Dotzek, N., R. Hannedes, K. D. Beheng, R. E. Peterson, 1998: Tornadoes in Germany, Austria, and Switzerland. — *Proc. 19th Conf. on Severe Local Storms*, Minneapolis, 93–96.
- Dotzek, N., R. Hannedes, K. D. Beheng, 1999: Tornados in Deutschland. — *Proc. Sympos. „Naturkatastrophen in Mittelgebirgsregionen“*, Univ. Karlsruhe, 12–13.
- Früh, J., 1907: Wasserhosen auf Schweizer Seen. — *Jahresber. d. Geogr.–Ethnogr. Ges. in Zürich 1906–1907*, Zürich, 105–127.
- Fuchs, D., 1981: Gefährdung des Tiefflugs durch Tornados. — *Promet* **81**(4), 8–10.
- Fuchs, H., K.–H. Bock, 1989: Sturmschäden durch eine Groß-Trombe am 16. 3. 1989 im südlichen Düsseldorf. — *Meteorol. Rdsch.* **42**, 17–24.
- Fujita, T. T., A. D. Pearson, 1973: Results of FPP classification of 1971 and 1972 tornadoes. — *Proc. 8th Conf. on Severe Local Storms*, Denver, 142–145.
- Fujita, T. T., 1981: Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. — *J. Atmos. Sci.* **38**, 1511–1534.
- Fujita, T. T., 1992: *Mystery of Severe Storms*. — Univ. Chicago, 298 S.
- Goliger, A. M., R. V. Milford, 1997: A review of worldwide occurrence of tornadoes. — *Proc. 2nd European & African Conf. on Wind Engineering*, Genova, 107–114.
- Hannedes, R., N. Dotzek, H. Gysi, K. D. Beheng, 1998: Case study of a tornado in the Upper Rhine valley. — *Meteorol. Z., N. F.* **7**, 163–170.
- Houze, R. A., 1993: *Cloud Dynamics*. — *Int. Geophys. Ser. Vol. 53*, Academic Press, San Diego, 573 S.
- Kelly, D. L., J. T. Schaefer, R. P. McNulty, C. A. Doswell, 1978: An augmented tornado climatology. — *Mon. Wea. Rev.* **106**, 1172–1183.

- Klemp, J. B., 1987: Dynamics of tornadic thunderstorms. — *Annu. Rev. Fluid Mech.* **19**, 369–402.
- Koschmieder, H., 1940: *Über Tromben*. — *Wiss. Abh. Reichsamt Wetterd.* **6**, 24 S.
- Kühnel, I., 1994: Die Gewitterlage vom 23. 7. 1986 in Baden–Württemberg: der Tornado im Raum Calmbach. — *Schriftenr. Landesforstverw. Baden–Württemberg* **75**, 175–187.
- Letzmann, J. P., 1937: Richtlinien zur Erforschung von Tromben, Tornados, Wasserhosen und Kleintromben. — *Int. Meteorol. Organis., Klimatol. Komm., Salzburg, Publ.* **38**, 91–110.
- Letzmann, J. P., 1944: Richtlinien zur Erforschung von Tromben, Tornados, Wasserhosen und Kleintromben (rev.). — *Forschungsstelle f. atmosph. Wirbel, Graz*, 32 S.
- Martins, C., 1850: Anweisung zur Beobachtung der Windhosen oder Tromben. — *Poggendorfs Ann. Phys.* **81**, 444–467.
- Meaden, G. T., 1976: Tornadoes in Britain: their intensities and distribution in space and time. — *J. Meteorol.* **1**, 242–251.
- Meaden, G. T., 1985: *Tornadoes in Britain*. — TORRO, Bradford–on–Avon, 131 S.
- Palmieri, S., A. Pulcini, 1979: Trombe d’aria sull’ Italia. — *Rivista de Meteorol. Aeronautica* **39**, 263–277.
- Peterson, R. E., 1992a: Letzmann’s and Koschmieder’s “Guidelines for Research on Funnels, Tornadoes, Waterspouts and Whirlwinds”. — *Bull. Amer. Meteorol. Soc.* **73**, 597–611.
- Peterson, R. E., 1992b: Johannes Letzmann: A pioneer in the study of tornadoes. — *Wea. Forecasting* **7**, 166–184.
- Peterson, R. E., 1995: Johannes Peter Letzmann: pioneer tornado researcher. — In: TOOMING und EELSALU (1995), 9–43.
- Piaget, A., 1976: *L’ evolution orageuse au nord des Alpes et la tornade du Jura vaudois du 26 Août 1971*. — *Veröff. d. Schweizerischen Meteorol. Anstalt* **35**, 102 S.
- Pühringer, A., 1973: Windhosen in Österreich. — *Wetter und Leben* **25**, 15–22.

- Reye, T., 1872: *Die Wirbelstürme, Tornados und Wettersäulen in der Erdatmosphäre mit Berücksichtigung der Stürme in der Sonnen-Atmosphäre*. — Carl Rümpler, Hannover, 249 S.
- Schneider-Carius, K., 1955: *Wetterkunde — Wetterforschung*. — K. Alber, Freiburg, 423 S.
- Simpson, J. S., B. R. Morton, M. C. McCumber, R. S. Penc, 1986: Observations and mechanisms of GATE waterspouts. — *J. Atmos. Sci.* **43**, 753–782.
- Tamul, S., 1995: Landesuniversität Dorpat and Peter Johannes Letzmann's first contacts with Germany. — In: TOOMING und EELSALU (1995), 44–48.
- Tooming, H., H. Eelsalu (Hrsg.), 1995: *Meteorology in Estonia in Johannes Letzmann's times and today*. — Estonian Academy Publ., Tallinn, 192 S.
- Tooming, H., H. Kotli, R. E. Peterson, 1997: On tornadoes over Estonia. — *Proc. 2nd European & African Conf. on Wind Engineering*, Genova, 123–129.
- Wakimoto, R. M., J. W. Wilson, 1989: Non-supercell tornadoes. — *Mon. Wea. Rev.* **117**, 1113–1140.
- Wegener, A. L., 1917: *Wind- und Wasserhosen in Europa*. — Vieweg, Braunschweig, 301 S.

NIKOLAI DOTZEK (nikolai.dotzek@dlr.de)
DLR-Institut für Physik der Atmosphäre
Oberpfaffenhofen
D-82234 Weßling

GERHARD BERZ, ERNST RAUCH
Forschungsgruppe Geowissenschaften
Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft
D-80791 München

RICHARD E. PETERSON
Department of Geosciences
Texas Tech University
Lubbock, TX 79409, U. S. A.

Received 10 October 1998, in final form: 18 November 1999

Tabellen

Tabelle 1: TORRO- (MEADEN, 1976) und Fujita–Skala (FUJITA, 1981) zur Abschätzung der Intensität eines Tornados, hier in eine einheitliche äquivalente Windgeschwindigkeit v umgerechnet. Zur Anschauung wird v auch in km h^{-1} mit der zugehörigen Schwankungsbreite angegeben. Mit Δv wird das Geschwindigkeitsintervall der jeweiligen Stufe der T–Skala bezeichnet. Zusätzlich sind die für Zentraleuropa gültigen mittleren Schadensätze \bar{S}_{Leicht} und \bar{S}_{Massiv} aufgetragen.

Table 1: TORRO- (MEADEN, 1976) and Fujita–Scale (FUJITA, 1981) used for the estimation of tornado intensity. Here the intensity has been compiled to a uniform equivalent wind velocity v , also given in km h^{-1} for clarity. Δv denotes the velocity range of each step on the T–scale. The mean loss ratios \bar{S}_{Leicht} and \bar{S}_{Massiv} valid for Central Europe are also given.

	Signifikant (significant)											
	Schwach (weak)				Stark (strong)				Verheerend (violent)			
Fujita	F0		F1		F2		F3		F4		F5	
TORRO	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11
v in m s^{-1}	17 – 25	25 – 33	33 – 42	42 – 51	51 – 61	61 – 71	71 – 82	82 – 93	93 – 105	105 – 117	117 – 130	130 – 143
v in km h^{-1}	76 ± 14	104 ± 14	135 ± 16	167 ± 16	202 ± 18	238 ± 18	275 ± 20	315 ± 20	356 ± 22	400 ± 22	445 ± 23	491 ± 23
Δv in m s^{-1}	8	8	9	9	10	10	11	11	12	12	13	13
\bar{S}_{Leicht} in %	0.05	0.10	0.25	0.80	3.0	10.0	30.0	90.0	100	100	100	100
\bar{S}_{Massiv} in %	0.01	0.05	0.10	0.25	0.80	3.0	10.0	30.0	60.0	80.0	90.0	95.0

Bildunterschriften

Abbildung 1: Verallgemeinerte Spur-Typen. Von Typ I nach Typ IV nimmt das Verhältnis von Rotations- zu Translationsgeschwindigkeit des Wirbels zu. Der Ablenkungswinkel α gibt an, wie stark die Windrichtung innerhalb des Tornados vom Radius abweicht. D. h. $\alpha = 0^\circ$ entspricht reines radiales Einströmen, $\alpha = -90^\circ$ bedeutet eine rein tangentielle zyklonale Strömung, während $\alpha = -30^\circ$ und -60° sowohl radiale als auch tangentielle Komponenten beinhalten.

Figure 1: Generalized swath patterns. From type I through type IV the ratio of rotational to translational components of motion increases. The angle α is measured counterclockwise from the vector pointing toward the vortex center to the horizontal relative wind vector for the vortex; i. e. $\alpha = 0^\circ$ is purely radial inflow, and $\alpha = -90^\circ$ is purely counterclockwise tangential flow, while $\alpha = -30^\circ$ and -60° have both radial and tangential components.

Abbildung 2: Räumliche Gliederung eines Åsgardsweges entsprechend den Letzmann'schen Richtlinien.

Figure 2: Spatial structure of a damage swath according to the Letzmann guidelines.

	Form g $\alpha = 0^\circ$	Form b $\alpha \sim -30^\circ$	Form c $\alpha \sim -60^\circ$	Form d $\alpha = -90^\circ$	
TYP I					
TYP II					
TYP III					
TYP IV					
					Form e $\alpha \sim -135^\circ$
					Form f $\alpha = 180^\circ$

Abbildung 1

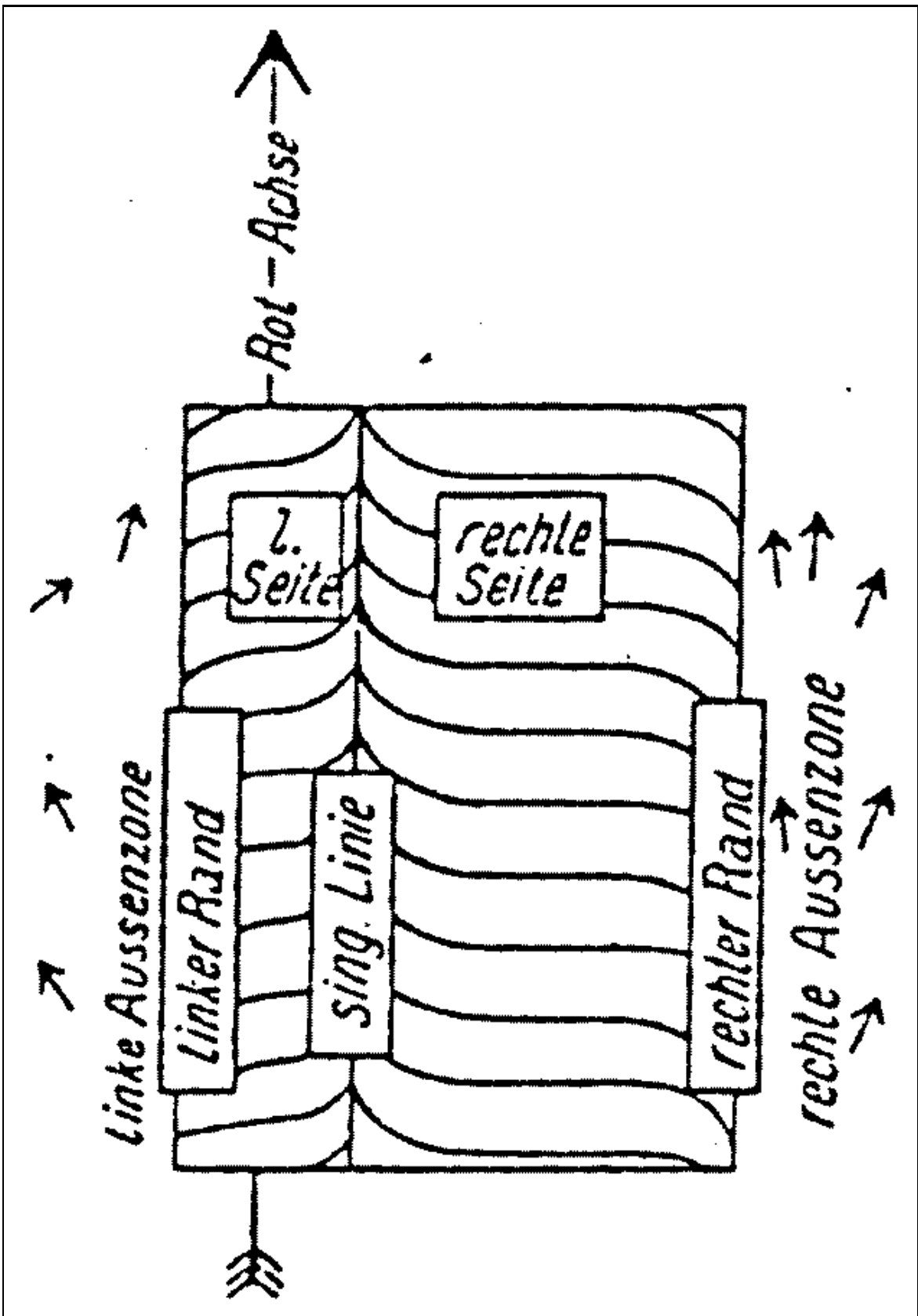


Abbildung 2