

Die Feinstruktur der Strahlstroeme

By
Dr. Elmar R. Reiter

Civil Engineering Department
Colorado State University
Fort Collins, Colorado

October 1961

CER61ERR61

Colorado
State
University

Department of
Atmospheric Science

Paper No. 22

ATMOSPHERIC SCIENCES TECHNICAL PAPER
NUMBER 22

Die Feinstruktur der Strahlstroeme

Dr. Elmar R. Reiter

Civil Engineering Department
Colorado State University
Fort Collins, Colorado

October 1961

CER61ERR61

Die Feinstruktur der Strahlstroeme¹⁾

Dr. Elmar R. Reiter²⁾

- 1) Dieser Bericht wurde unter Kontrakt Nr. N189(188) 538 28A mit U. S. Navy Weather Research Facility, Norfolk, Virginia, zusammengestellt.
- 2) Associate Professor of Atmospheric Sciences, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

Obwohl der moderne Flugverkehr heute bereits im Begriff ist den interplanetarischen Raum zu erobern, sind unsere Kenntnisse ueber die Struktur und die Stroemungsvorgaenge in der oberen Troposphaere und unteren Stratosphaere noch ziemlich mangelhaft. Gerade der Hoehenbereich zwischen 10 und 20 km, in dem sich der Grossteil des modernen Duesenflugverkehrs abspielt, weist auch heute noch eine Anzahl von Problemen auf, deren Erforschung eine der Hauptaufgaben der Flugmeteorologie ist.

Unser Wissen ueber diesen Hoehenbereich entstammt in der Hauptsache den Messungen der Radiosonden. Da die Ballonaufstiege jedoch zeitlich und raeumlich weit voneinander entfernt sind, vermitteln uns diese Messungen bestenfalls einen Eindruck vom grossraeumigen, makrostrukturellen Aufbau der Atmosphaere (1).

Besonders sorgfaeltig durchgefuehrte Ballonaufstiege (2) lassen erkennen, dass den grossraeumigen Stroemungsvorgaengen meso- und mikrostrukturelle Stoerungen ueberlagert sind (3), deren Ausmasse allerdings wegen der Fehler, die den Ballonmessungen anhaften, mit dieser Messmethode nur schwer und unzuellaenglich abgeschaezt werden koennen (4). Um der atmosphaerischen Feinstruktur habhaft zu werden, muss daher auf verfeinerte Messverfahren zurueckgegriffen werden, die es gestatten, meteorologische Parameter, wie etwa Wind, Temperatur, etc. ueber weite Strecken hin moeglichst kontinuierlich zu registrieren.

Hier bietet sich vor allem das Flugzeug an, dessen Verwendung als Instrumententraeger beinahe so alt ist wie die Fliegerei selbst. Vor und waehrend des 2. Weltkrieges brachten die routinemaessig durchgefuehrten Wettererkundungsfluege wertvolle Informationen ueber den Aufbau der unteren Atmosphaerenschichten. Mit der Entwicklung hoeher und schneller fliegender Flugzeugtypen und besserer Navigationsmethoden wurden einerseits die Forschungsmoeglichkeiten, andererseits die von den Meteorologen zu loesenden Probleme vermehrt. So geht z. B. die Entdeckung des Strahlstromes auf die

Langstreckenfluege waehrend des 2. Weltkrieges zurueck. Zunaechst waren es lediglich die enormen Windgeschwindigkeiten, welche im Bereich dieser Strahlstroeme (Jet Streams) von groesster Wichtigkeit fuer den Flugverkehr erschienen. (Den bisherigen Rekord haelt eine Ballonmessung von 540 km/h ueber Tateno (Japan) (5) und eine Flugzeugbeobachtung von 650 km/h ueber Tokio (6)).

Obzwar derartige Windgeschwindigkeiten, falls sie als Gegenwinde auftreten, auch heute noch fuer den Flugverkehr manch schwierige Aufgabe stellen, so bergen sie doch kaum mehr eine direkte Gefahr in sich, da sie ein makrometeorologisches Phaenomen darstellen, das in Analyse und Prognose mit einiger Zuverlaessigkeit bestimmt und bei der Flugplanung beruecksichtigt werden kann. In der Praxis des Duesenflugverkehrs erwies sich eine gewisse Feinstruktur, die den grossraeumigen Stroemungsverhaeltnissen ueberlagert ist und mit den makrometeorologischen Messmethoden nicht erfasst werden kann, als weitaus gefaehrlicher. Diese atmosphaerische Feinstruktur kann bei schnellfliegenden Flugzeugen eine heftige Schuettelbewegung mit Perioden von weniger als 1 sec hervorrufen. In extremen Faellen wurden vertikale Beschleunigungen vom Doppelten der Erdbeschleunigung gemessen (7).

Diese Turbulenz - auch "Clear-Air Turbulence (CAT)" genannt, weil sie ganz unvermutet ohne aeussere Anzeichen im wolkenfreien Raum auftritt - stellt auch heute noch eines der wichtigsten Probleme der Flugmeteorologie dar. Fuer die Flugzeugkonstruktion ist dieser Fragenkomplex von ebensogrosser Bedeutung, denn schliesslich wird nicht nur der Komfort der Passagiere, sondern auch die Lebensdauer der Flugzeuge durch die Turbulenz beeintraehtigt. Durch die auftretenden Beschleunigungen werden manche Verbindungsstellen am Flugzeug ueberbeansprucht und durch fruehzeitig eintretende "Metallmuedigkeit" kann es zum Bruch kommen.

Zur Erforschung der CAT wurden besonders in den USA und in England umfangreiche Messprogramme durchgefuehrt. Dabei wurden Flugzeuge eingesetzt, die mit Beschleunigungsmessern ausgeruestet waren und so eine

objektive Messung der Turbulenz zuliessen. Eine Schwierigkeit, die auch heute noch nicht beseitigt ist, liegt darin, dass in einer derartigen Messanordnung nicht die atmosphärische Turbulenz direkt, sondern nur die Reaktionsbewegung des Flugzeuges gemessen wird, die durch Eigenschwingungen des Tragwerkes stark beeinflusst ist. Es koennen also einerseits turbulente Stroemungsvorgaenge in the Atmosphaere bei voellig ruhigen Flugverhaeltnissen existieren, wenn die Turbulenzkoerper ein zu geringes oder zu grosses Ausmass haben, als dass das Flugzeug darauf ansprechen wuerde. Andererseits koennen hydrodynamisch "laminare" Stroemungen erhebliche CAT vortauschen, etwa dann, wenn regelmaessige Wellen zu Resonanzeffekten in den Tragflaechenschwingungen fuehren. Gewisse Anzeichen in den CAT-Beobachtungen deuten darauf hin, dass derartige Faelle durchaus nicht selten sind. Aus den Beschleunigungsmessungen des Flugzeuges selbst geht nicht hervor, in welchem Masse die Atmosphaere oder der Flugkoerper an der CAT-Registrierung beteiligt ist.

Dieser Resonanzeffekt zwischen Flugzeug und Atmosphaere mag einer der Gruende dafuer sein, dass manche Meteorologen die CAT fuer ein reines Zufallsphaenomen ansehen, das nicht vorhersagbar ist und fuer dessen Eintreten sich bestenfalls statistische Wahrscheinlichkeiten angeben lassen. Im Lichte neuester Untersuchungen wird dieser Pessimismus vom Verfasser nicht ganz geteilt. Darauf soll weiter unten noch naeher eingegangen werden.

Auf Grund umfangreicher und detaillierter Messungen, die von der Amerikanischen Luftwaffe im Verlauf des "Project Jet Stream" mit Duesenflugzeugen des Typs B-47 durchgefuehrt wurden, konnte die Struktur der Atmosphaere mit einer Aufloesegenauigkeit von etwa 20 km in der Horizontalen bestimmt werden. Die Wind- und Temperaturschwankungen, die in dieser Skalengroesse gemessen wurden, lassen sich nicht direkt mit den Beobachtungen der CAT vergleichen, da letztere Windgeschwindigkeitsschwankungen in der Skalengroesse von etwa 200 m voraussetzen. Die Ursachen der Turbulenz koennen also messtechnisch nicht unmittelbar erfasst werden. Trotzdem erwies sich das Studium der Mesostruktur - als solche wollen wir Stoerungen vom horizontalen Ausmass 10^4

bis 10^5 m verstehen - als fruchtbringend fuer das Verstaendnis der Mikrostruktur, der wir die CAT zurechnen wollen.

Zunaechst galt es, sicherzustellen, ob die von den Flugzeugen vermessene Feinstruktur tatsaechlich vorhanden ist, oder ob sie etwa nur durch Vibrationen in den Messinstrumenten vorgetauscht wird. Ein Beweis fuer die Realitaet der Atmosphaerischen Mesostruktur liess sich an Hand von Fluegen erbringen, die dasselbe Gebiet in derselben Hoehe mehrmals durchflogen (8). Abb. 1 zeigt die Auswertung der Temperatur, der Windgeschwindigkeit und der Druckhoehe (pressure altitude) in zwei annaeherd identisch verlaufenden Flugabschnitten ueber den USA. Zeitangaben (Greenwichzeit) sind am Beginn und Ende jedes Flugabschnittes eingetragen. Einzelne, charakteristische Details des Wind- und Temperaturfeldes bewahren demnach ihre Identitaet laenger als eine Stunde. Ihre Verschiebung ist durch Pfeile angedeutet. Die Mesostruktur der Atmosphaere im Bereich eines Strahlstromes stellt also durchaus kein unorganisiertes Zufallsphaenomen dar; es handelt sich vielmehr um ein wohldefiniertes Nebeneinander von Zonen hoeherer und niedrigerer Windgeschwindigkeit und hoeherer und tieferer Temperaturen.

Bei dem in Abb. 1 gezeigten Fall handelt es sich um einen Flug senkrecht zum Verlauf des Jet Stream. Dabei treten lokal begrenzte, horizontale Windscherungen in Erscheinung, die wesentlich groesser sind, als es Radiosondennmessungen bisher vermuten liessen. So ist z. B. bei etwa $34-1/2^0$ N ein Windsprung von etwa 26 Knoten auf 9 Seemeilen zu erkennen. Dies entspricht einer Scherungsvorticity von etwa $8 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$. Die "Wellenlaenge" der kleinen Stoerungen, die dem Wind- und Temperaturfeld ueberlagert sind, besitzen die Groessenordnung von 30 bis 50 km. Mehrere dieser kleinen Stoerungen scheinen sich wiederum in groesseren Stoerungen zusammenzufinden, deren Wellenlaenge - quer zur Stroemung gemessen - bei etwa 200 km liegt.

Ueber die Laengenausdehnung dieser mesostrukturellen Stoerungen des Windfeldes im Strahlstrombereich geben uns ebenfalls Forschungsfluege des "Project Jet Stream" einige Anhaltpunkte (9). Abb. 2 enthaelt die mit Hilfe

von Radiosondenmessungen ergaenzte Analyse der Temperaturmessungen des Fluges Nr. 16 vom 27. Januar 1957. Die schattierten Flaechen geben die Mesostruktur an, die dem analysierten, geglaetteten Temperaturfeld ueberlagert ist. Ein Masstab fuer die Mesostruktur ist der Abbildung beigegeben. Abb. 3 zeigt die Analyse der Windgeschwindigkeit fuer denselben Flug, ebenfalls unter Heranziehung der Ballon-Hoehenwindmessungen. Ein Vergleich der beiden Abbildungen zeigt, dass die mesostrukturellen Details parallel zu den Isothermen in diesem Niveau angeordnet erscheinen und ueber mehrere hundert Kilometer Laenge erhalten bleiben. (Die mesostrukturellen Windgeschwindigkeitsmaxima wurden in Abb. 3 durch schraffierte Baender angedeutet).

Somit ist die Mesostruktur des Windfeldes im Bereich des Strahlstromes ein Phaenomen, das sowohl zeitlich als auch raeumlich signifikante Ausdehnung besitzt. Ein sichtbarer Beweis dieser Struktur ist in den langgestreckten Cirrenbaendern gegeben, die sich oft ueber mehrere hundert Kilometer Laenge verfolgen lassen und ihre Struktur nur sehr langsam aendern (10). Neuere Untersuchungen (11) zeigen auch in den Vertikalgeschwindigkeiten eine bandartige Anordnung. Somit ist ein direkter Zusammenhang zwischen Mesostruktur des Windfeldes und Cirrusbewoelkung gegeben, denn in der Regel lassen sich Aufwaertsbewegungen mit Wolkenfeldern, negative Vertikalbewegungen dagegen mit wolkenfreien Gebieten assoziieren.

Die Flugzeugmessungen lassen uns somit einen Bereich der atmosphaerischen Feinstruktur erfassen, der sich auch sichtbar in grossen Wolkenfeldern manifestiert. Innerhalb dieser Wolkenfelder existiert meist eine deutliche Strukturierung von noch kleinerem Ausmass. Abb. 4, die waehrend der Nordfoehnwetterlage vom 23. Oktober 1959 ueber Innsbruck mit Blickrichtung nach Sueden gewonnen wurde, laesst im Cirrenniveau eine bandartige Struktur in Westostrichtung erkennen. Die einzelnen Baender sind etliche hundert Meter voneinander separiert, deuten also bereits eine Strukturgroesse an, wie sie auch bei CAT in Erscheinung tritt. Ausserdem existiert in dieser Abbildung auch eine sehr schwache Andeutung von ueberlagerten, breiteren Baendern die

von Nordwest nach Suedost verlaufen. Das gesamte Cirrenfeld schliesslich, das in dieser Abbildung sichtbar ist, zeigt einen Verlauf von Nordost nach Suedwest und besitzt mehrere Kilometer Ausdehnung. Es duerfte aller Wahrscheinlichkeit nach durch eine stehende, vom Gebirge hervorgerufene Welle verursacht sein. Der tiefliegende Cumulus lenticularis besitzt eine aehnliche Orientierung. Sein schichtenfoermiger Aufbau laesst deutlich eine blaettrige Struktur der Atmosphaere erkennen, in der feuchte und trockenere Schichten in enger Folge uebereinander gelagert sind.

Dieses Wolkenbild zeigt, dass die Stroemungsverhaeltnisse in der freien Atmosphaere umso komplizierter werden, je kleinraeumigeren Vorgaengen wir unser Augenmerk schenken. Ist die von den Flugzeugmessungen erfasste Mesostruktur noch verhaeltnismaessig wohldefiniert, und laesst sie sich in guenstigen Faellen ueber weite raeumliche und zeitliche Ausdehnungen verfolgen, so sind bei mikrostrukturellen Stoerungen bereits alle moeglichen Interferenzerscheinungen massgeblich. Es ist daher einzusehen, dass die CAT ein Phaenomen darstellt, das sich systematisch nur schwer erfassen laesst. Hier erschliesst das Detailstudium hochliegender Wolkenfelder ein fuer die Flugmeteorologie interessantes Forschungsgebiet.

Da die Clear-Air Turbulence fuer den Duesenflugverkehr von grosser Bedeutung ist, richten sich verstaendlicherweise die Bemuehungen der Meteorologen auf adaequate Vorhersagemethoden dieses Phaenomens. Eine Vorhersage, die ueber rein statistische Wahrscheinlichkeiten hinausgeht, ist jedoch nur dann moeglich, wenn ueber die Ursachen des Phaenomens brauchbare Hypothesen existieren.

Sowohl meso- als auch mikrostrukturelle Details des Stroemungsfeldes koennen als Perturbationen einer mehr oder weniger gleichfoermigen Grundstroemung aufgefasst werden. Das Beispiel der Abb. 5 zeigt die Isotachen dieser geglaetteten "Grundstroemung" fuer Flug Nr. 13 vom 23. Januar 1957. Die Mesostruktur, welche dieser Grundstroemung ueberlagert ist, wird durch die schraffierten Flaechen angedeutet. Die korrespondierende

Temperaturanalyse ist zusammen mit der "Normalkomponente" der Geschwindigkeit in Abb. 6 enthalten. (Die Normalkomponente ist die Geschwindigkeitskomponente normal zur Windrichtung im Punkt maximaler Windgeschwindigkeit entlang des betreffenden Forschungsfluges.)

Aus diesen beiden Abbildungen laesst sich entnehmen, dass in der freien Atmosphaere im Bereich des Jet Stream eine Folge uebereinandergelagerter stabiler und weniger stabiler Schichten vorhanden ist. Manche dieser Schichten sind nur duenn und umfassen kaum hundert Meter, so dass sie in der Auswertung der Ballonaufstiege ausser Acht gelassen werden. Fuer das Zustandekommen der Mesostruktur und der CAT scheinen diese duennen, stabilen Schichten jedoch einige Bedeutung zu besitzen (12). Richardson (13) leitete fuer Laboratoriumsverhaeltnisse ein Kriterium ab, das einen kritischen Grenzwert fuer das Gleichgewicht zwischen thermischer Stabilitaet und den aus der vertikalen Windscherung resultierenden Turbulenzkraefte in einer geschichteten Stroemung ermitteln laesst.

$$Ri = (g/\theta)(\partial\theta/\partial z) / (\partial V/\partial z)^2 \dots \dots \dots (1)$$

In diesem Ausdruck ist g die Erdbeschleunigung, θ die potentielle Temperatur, z die Hoehe und V die Windgeschwindigkeit. Oberhalb des kritischen Grenzwertes ($\cong 1$ fuer viele Grenzflaechenprobleme) verlaeuft die Stroemung laminar, unterhalb des Grenzwertes dagegen vergroessern kleine Stoerungen in der Stroemung ihre Amplituden und fuehren so zu Turbulenz.

Dieses Richardson'sche Kriterium wurde vielfach zur Beurteilung von CAT-Situationen herangezogen, ohne dass man bedachte, dass einerseits der von Richardson bestimmte Grenzwert fuer Laboratoriumsverhaeltnisse, nicht aber fuer die freie Atmosphaere massgeblich ist, und dass andererseits in der Atmosphaere die in die Ri-Zahl eingehenden Groessen makrometeorologischer Natur sind, waehrend die CAT ein mikrometeorologisches Phaenomen darstellt. Eher noch liesse sich eine gewisse Korrelation zwischen makrometeorologisch bestimmter Ri-Zahl und Mesostruktur erwarten, da hier die Diskrepanz in der Skalengroesse geringer ist.

Untersuchungen zeigen (12), dass eine gewisse Tendenz dafuer besteht, dass sowohl Mesostruktur als auch CAT in stabilen, baroklinen Zonen konzentriert ist, waehrend sich an Hand des Ausdrucks fuer Ri eine groessere Wahrscheinlichkeit fuer Turbulenz bei labiler Schichtung erwarten liesse. Diese scheinbare Diskrepanz laesst sich formal ueberwinden indem man in obigem Ausdruck die vertikale Windscherung durch die thermische Windgleichung ersetzt (1) (14). Nach einigen Vereinfachungen gelangt man zu dem Ausdruck

$$Ri^* = \frac{f^2 \theta}{g (\partial\theta/\partial z)(\partial z/\partial n)_\theta^2} \dots \dots \dots (2)$$

Hierin stellt f den Coriolisparameter und $(\partial z/\partial n)_\theta$ die Neigung der Isentropenflaechen (= Flaechen konstanter potentieller Temperatur), also die Baroklinitaet der Schichtung dar, waehrend $g \cdot \partial\theta/\partial z$ ein Mass fuer die Stabilitaet ist. Stabile und barokline Schichten in der Atmosphaere produzieren demnach kleine Ri^* -Zahlen, denn in ihnen ist die vertikale geostrophische Windscherung konzentriert. Diese Schichten sind demnach fuer Wellenstoerungen anfaellig.

Abb. 7 enthaelt eine Korrelation zwischen Amplituden der Mesostruktur und Ri^* -Zahl fuer Flug Nr. 29 am 4. April 1957. Der Zusammenhang weist deutlich in Richtung obiger Gleichung.

Fuer eine Abschaetzung der CAT nach diesen Richtlinien sind die Verhaeltnisse wesentlich schwieriger, denn es wirken sowohl Makro- als auch Mesostruktur ein. Mit einer Berechnung der Ri^* -Zahl aus makrometeorologischen Beobachtung alleine duerfte die CAT kaum ueber eine Zufallsquote hinaus bestimmbar sein.

Die Vorhersagemoeglichkeit fuer CAT erscheint jedoch guenstiger, falls es uns gelingt, gewisse mesostrukturelle Details - besonders des Temperaturfeldes - mit den makrometeorologischen Daten zu korrelieren. Wie neuere Untersuchungen zeigen (11), ist dies im Prinzip moeglich.

In Abb. 8 ist schematisch der Verlauf der Isentropenflaechen im Bereich des Jet Stream gezeigt. In beinahe saemtlichen Fluegen, die quer zur Strahlstromachse ausgefuehrt wurden, liess sich auf der Suedseite dieser Achse eine

Aufwölbung der Isentropenflächen (also eine Zone relativ tiefer Temperaturen) feststellen. Nördlich der Strahlstromachse findet man dagegen meist einen "Isentropengraben", der ein Gebiet mit relativ warmen Temperaturen darstellt und der besonders deutlich oberhalb des Niveaus maximalen Windes ausgeprägt erscheint. Im "Isentropenbuckel" und "-graben" machen sich vertikale Geschwindigkeitskomponenten bemerkbar: Die Aufwölbung in den Isentropenflächen wird durch Aufwärtsbewegungen hervorgerufen, der "Isentropengraben" dagegen durch Absinkbewegung.

Während Faelle mit leichter CAT im gesamten Bereich des Jet Stream beobachtet werden, scheinen die massigen und schweren CAT-Faelle an die Isentropengräben gebunden zu sein. Da sich diese als Zone warmer Temperaturen in den absoluten Topographien der 300-, 250- oder 200-mb-Flächen, die aus den Daten der Radiosondenaufstiege gewonnen werden, leicht feststellen lassen, ist somit die Möglichkeit gegeben, die schweren Faelle von CAT prognostisch zu erfassen. Leichte CAT stellt weder für das Flugzeug noch für die Passagiere eine allzugrosse Belastung dar. Da die Absinkbewegung im "Isentropengraben" zur Auflösung von Wolkenfeldern führt, lässt sich seine Position auch an Hand von Cirrenbeobachtungen feststellen: Im wolkenfreien Raum nördlich von ausgedehnten Cirrenbänken wäre demnach mit erhöhter Turbulenzhäufigkeit zu rechnen.

Über die Ursachen des an Hand der Auswertung amerikanischer Forschungsflüge gefundenen Zusammenhanges zwischen Isentropengräben und massiger, bzw. schwerer CAT kann zu diesem Zeitpunkt noch nichts definitives ausgesagt werden. Möglicherweise führen die in diesem Bereich vorhandenen Absinkbewegungen zur Bildung dünner stabiler und barokliner Schichten, in denen starke horizontale und vertikale Windscherungen konzentriert sind, so dass die durch das Ri^* -Kriterium gegebenen Turbulenzbedingungen realisiert sind.

Es bliebe schliesslich noch die Frage nach dem Ursprung der Perturbationen zu klären, die in der Meso- und Mikrostruktur ihren Ausdruck finden.

Vom mathematischen Standpunkt aus betrachtet werden die Stoerungen, welche einer gleichfoermigen Grundstroemung ueberlagert sind, als zufaellig angesehen. Es wird lediglich berechnet, ob die Amplituden im Laufe der Zeit eine Vergroesserung erfahren und ob somit eine Instabilitaet in den Stroemungsverhaeltnissen vorhanden ist. (Dies wird auch durch Ri oder $Ri^* \leq 1$ angedeutet). Ueber die unmittelbare physikalische Ursache der Turbulenz gibt diese mathematische Betrachtungsweise keine Auskunft; wir sind vielmehr hier auf andere Anhaltspunkte angewiesen.

Eine sehr augenfaellige Quelle fuer Stoerungsenergien, die der Grundstroemung ueberlagert werden, lassen sich Gebirgs- und Huegelketten erkennen. Sie zwingen eine gleichfoermige Grundstroemung zum Ausweichen und rufen so eine Stoerung derselben hervor. Abb. 9 und 10 zeigen den Isotachen- und Isothermenverlauf waehrend des Forschungsfluges Nr. 9 vom 10. Januar 1957. Die Position der Huegelketten der Alleghanies ist durch dicke, strichpunktierte Linien angedeutet. Im Lee des Gebirges erreicht die Mesostruktur besonders im Gebiet staerkerer horizontaler Temperaturgradienten (gleichbedeutend mit der Schnittzone einer baroklinen, stabilen Schicht mit der 300-mb-Flaeche) im warmen Bereich des "Isentropengrabens" beachtliche Ausmasse. Offenbar wird hier im Einklang mit Studien von Scorer (Literatur bei (1) und (3)) die Bildung stehender Leewellen angeregt.

Untersuchungen von Clodman und Ball (15) zeigen, dass die orographisch bedingten Perturbationen auch auf den Spektralbereich der CAT einen gewissen Einfluss besitzen. Abb. 11 und 12 lassen einen deutlichen Zusammenhang zwischen der Orientierung der Huegelketten in der Umgebung des Wright-Patterson-Flugstuetzpunktes und dem Auftreten von CAT erkennen.

Mesostruktur und CAT sind jedoch auch weitab von orographischen Hindernissen ueber ebenem Gelaende und ueber den Ozeanen zu finden. Vermutlich sind es hier Konvektionsbewegungen innerhalb adiabatischer Schichten, oder Reibungsvorgaenge in Bodennaehel, die den ursaechlichen Anstoss fuer Perturbationen in hoeher gelegenen Schichten geben.

Das Studium der Turbulenz und Feinstruktur der Stroemungsverhaeltnisse in der freien Atmosphaere steckt noch sehr in den Anfaengen. Mit der Entwicklung besserer Beobachtungs- und Messmethoden bahnt sich jedoch auf diesem Gebiet ein bedeutender Fortschritt an. Insbesondere laesst das Studium von Wolkenphotographien der "Tiros"-Satellitenserie und hochfliegender Flugzeuge, wie etwa der U-2, berechtigte Hoffnungen fuer ein besseres Verstaendnis dieses Problemkreises zu.

Literaturverzeichnis:

- (1) Reiter, E. R., 1961: Meteorologie der Strahlstroeme (Jet Streams). Wien, Springer-Verlag, 473 pp.
- (2) Barbé, G. D., 1957: Mesure précise du vent en altitude a l'aide de sondages rapprochés dans le temps. Météorologie Nationale, Monographies No. 3.
- (3) Reiter, E. R., 1960: Turbulenz im wolkenfreien Raum (Clear-Air Turbulence). Berichte des Deutschen Wetterdienstes, No. 61, 42 pp.
- (4) Reiter, E. R., 1958: The layer of maximum wind. Journ. Meteorol. 15(1): 27 - 43.
- (5) Arakawa, H., 1959: On the world's strongest winds as revealed by Tateno-Relay-Method Soundings. Bulletin Amer. Meteor. Soc. 40(7): 343 - 347.
- (6) Frost, B. C., 1953: Flying in jet-stream winds. Shell Aviation News, London, No. 186:4 - 8.
- (7) Hislop, G. S., 1949: Clear air turbulence incident encountered by D-H "Comet" aircraft 14th November, 1949. British European Airways Corp. R. S. D. Note No. 41.
- (8) Reiter, E. R., H. Lang, R. Mook und G. Wendler, 1961: Analyse dreier Forschungsfluege des Project Jet Stream. Archiv f. Meteor., Geophys., Biokl., Ser. A, 12(2): 183 - 221.
- (9) Reiter, E. R., 1961: Die nordamerikanische Strahlstromwetterlage vom 23. bis 27. Januar 1957 an Hand von Forschungsfluegen des "Project Jet Stream". Beitrage z. Phys. d. Atmos. 33: 244 - 279.
- (10) Kuettner, J. 1959: The band structure of the atmosphere. Tellus 11 (3): 267 - 294.

- (11) Reiter, E. R., 1961: Die vertikale Struktur des Strahlstromkernes aus Forschungsfluegen des Project Jet Stream. Erscheint: Berichte des Deutschen Wetterdienstes.
- (12) Reiter, E. R., 1961: The detailed structure of the wind field near the jet-stream. Journ. Meteor. 18(1):9 - 30.
- (13) Richardson, L. F., 1920: The supply of energy from and to atmospheric eddies. Proc. Roy. Soc. London, A, 97: 354 - 373.
- (14) Radok, U. und R. H. Clarke, 1958: Some features of the subtropical jet stream. Beitr. z. Phys. d. Atmos. 31 (1/2): 89 - 108.
- (15) Clodman, J. und J. T. Ball, 1959: Clear-air turbulence. New York University, College of Engineering, Research Division, Final Report under Contract No. AF 19(604) - 3068.

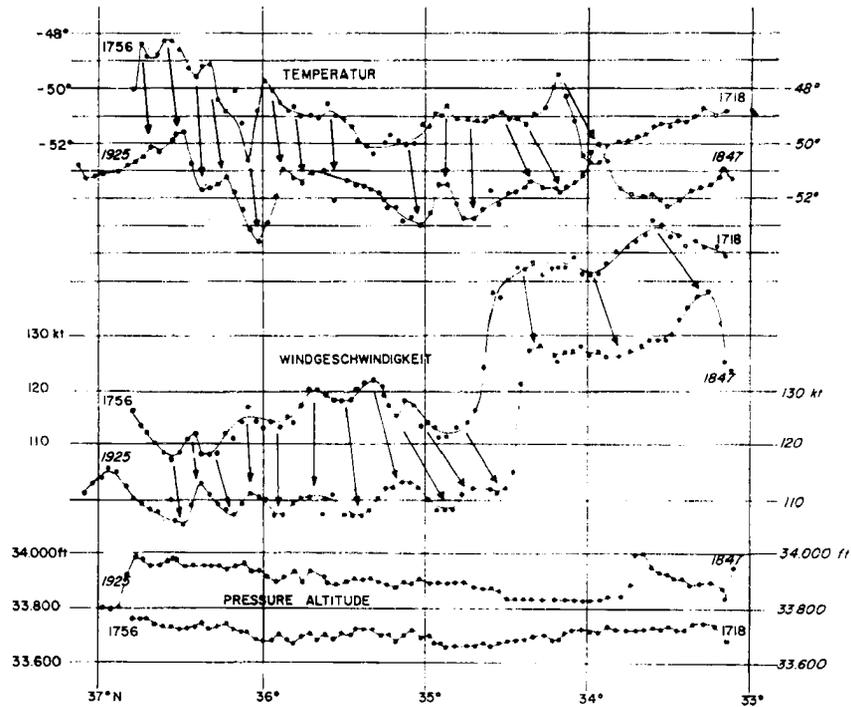


Abb. 1: Messwerte fuer Temperatur, Windgeschwindigkeit und Druckhoehe (Pressure Altitude) fuer ein zweimal durchlaufenes Flugniveau (Flug Nr. 12, 18. Januar 1957). Die Zahlen am Beginn und Ende jeder Punktfolge sind Zeitangaben (GCT). Die Skalenbeschriftung am linken Rand bezieht sich auf den Flugabschnitt zwischen 17.18 und 17.56 GCT, die Beschriftung am rechten Rand auf 18.47 bis 19.25 GCT.

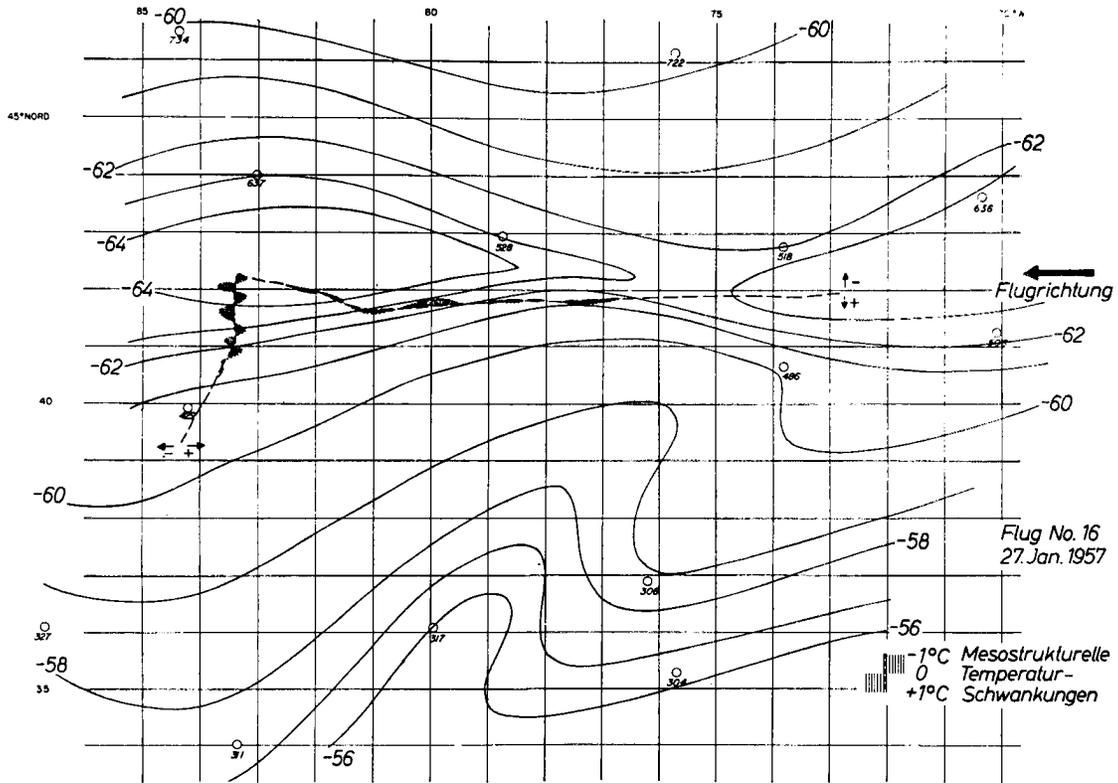


Abb. 2: Isothermen ($^{\circ}\text{C}$) im 212.4-mb-Niveau, am 27. Januar 1957, 15.00 GCT, bzw. Flug Nr. 16. Die Mesostruktur der Temperatur ist durch Schraffierung angedeutet (Amplituden sind laut beigegebenem Masstab in bezug auf die strichlierte Flugroute als Nulllinie abzulesen.) Die Flugrichtung ist durch einen dicken Pfeil angegeben.

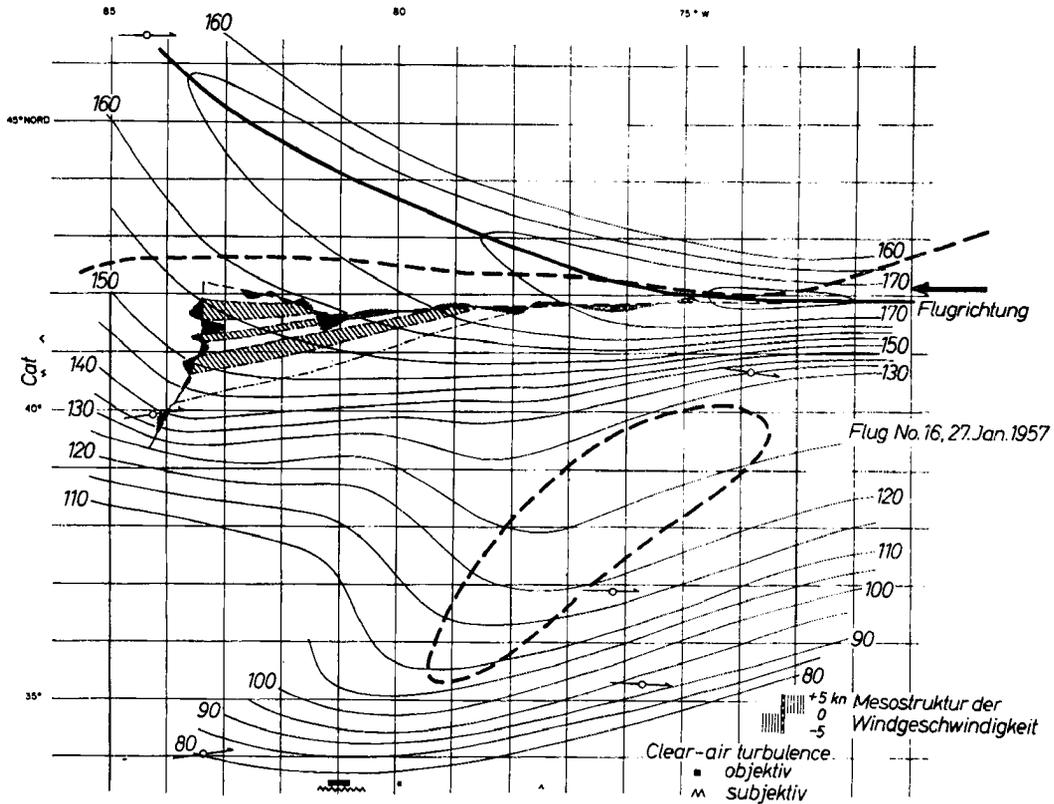


Abb. 3: Isotachen (Knoten) im 212.4-mb-Niveau, am 27. Januar 1957, 15.00 GCT, bzw. Flug Nr. 16. Die Mesostruktur der Windgeschwindigkeit ist durch Schraffierung angedeutet (Amplituden sind laut beigegebenem Masstab in bezug auf die duenn strichlierte Flugroute als Nulllinie abzulesen.) Die dicke, volle Linie gibt die Strahlstromachse an, die dick strichlierten Linien zeigen den Schnitt der Flaechе maximalen Windes mit der 212.4-mb-Flaechе. Die schraeg schraffierten Baender geben Zonen mit positiver mesostruktureller Geschwindigkeitsanomalie an und sind parallel zu den Isothermen in Abb. 2 angeordnet.

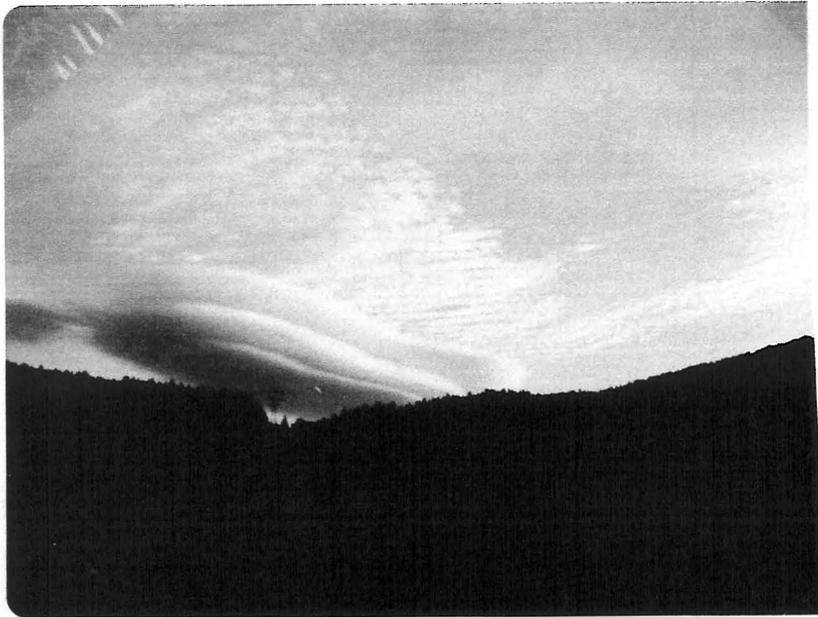


Abb. 4: Wolkenstruktur um ca. 17 Uhr ueber Innsbruck waehrend der Nordfoehnweatherlage vom 23. Oktober 1959. Blickrichtung: Sueden. (Photo: Prof. Dr. S. Hohenleitner).

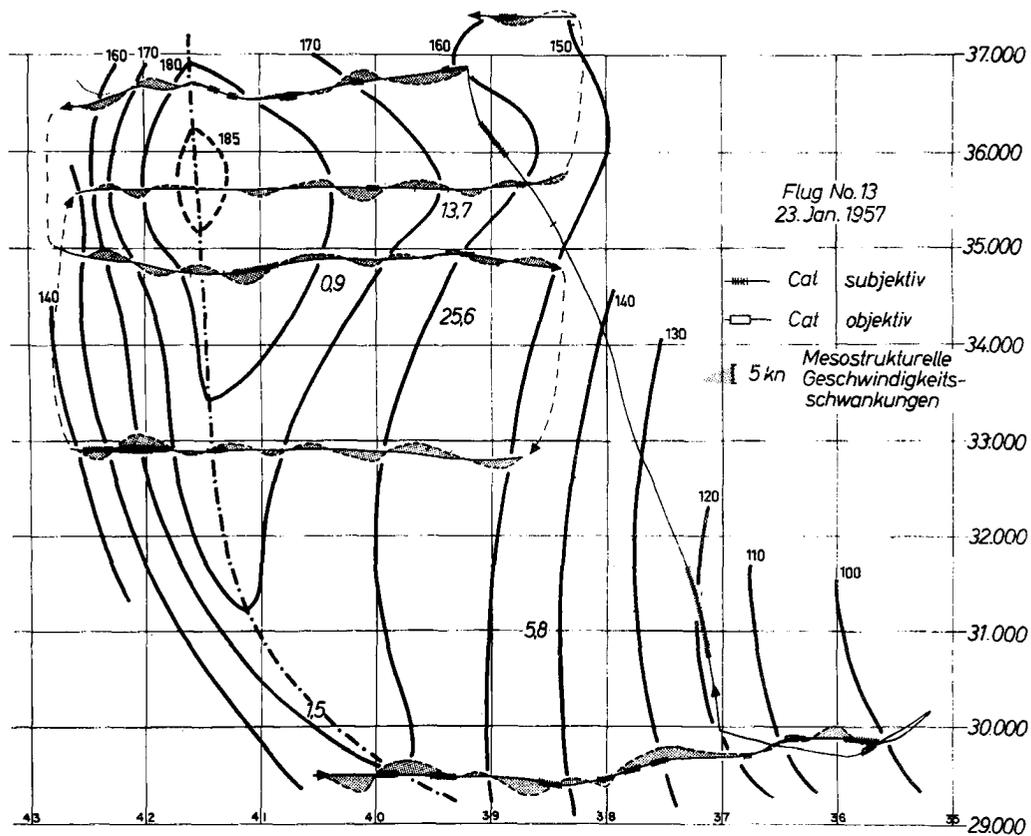


Abb. 5: Querschnitt durch den Strahlstromkern, 23. Januar 1957, 16.30 bis 20.50 GCT, aus Daten des Fluges Nr. 13. In der Abszisse ist die geographische Breite aufgetragen, in der Ordinate die Höhe in Fuss. Die vollen Linien sind Isotachen (Knoten), die mit Pfeilen versehenen, dünnen Linien deuten in idealisierter Form die Flugrichtung an. (Kleinere Höhenaenderungen blieben bei der Eintragung der Route unberuecksichtigt). Die strichpunktierte Linie gibt die Lage der Strahlstromachse wieder. CAT nach objectiven und subjectiven Beobachtungen ist in der angegebenen Form eingetragen. Schattierung kennzeichnet die mesostrukturellen Geschwindigkeitsschwankungen. Ihre Amplitude (Knoten) bezieht sich auf die Flugroutenlinie als Nulllinie. Die schraegen Ziffern sind Werte der Zahl Ri^* (siehe Text).

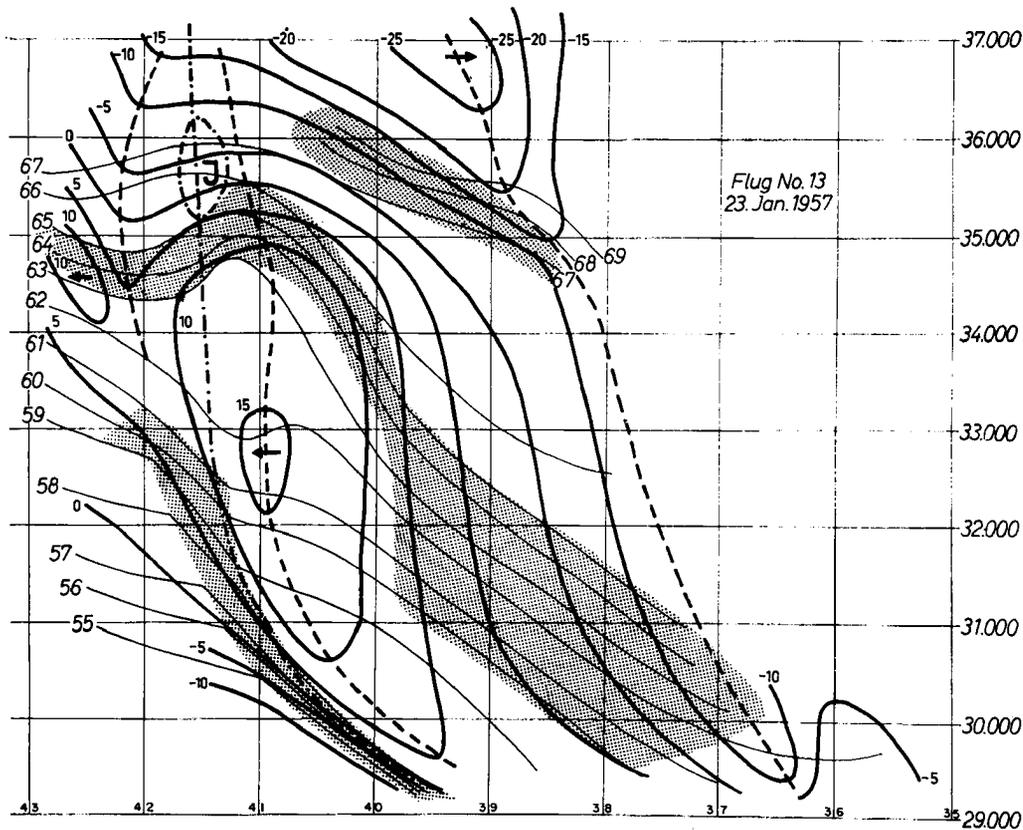


Abb. 6: Querschnitt durch den Strahlstromkern, Flug Nr. 13. Koordinaten und strichpunktierte Linie wie in Abb. 5. Die dicken Linien geben die Isotachen (Knoten, senkrechte Zahlen) der Geschwindigkeitskomponente normal zur Windrichtung im Jet-Maximum an. Maxima und Minima dieser Komponente sind durch dicke strichlierte Linien angedeutet. Die duennen Linien sind Isoplethen der potentiellen Temperatur ($^{\circ}\text{C}$, schraege Zahlen). Stabile Zonen sind durch Raster kenntlich gemacht.

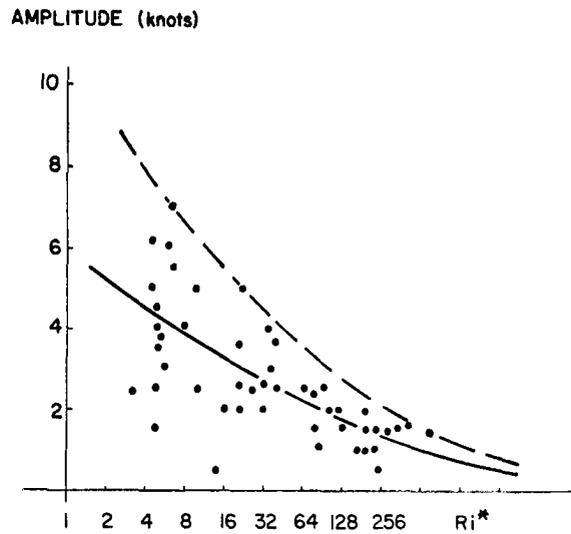


Abb. 7: Korrelation zwischen Amplituden der Mesostruktur der Windgeschwindigkeit (Ordinate) und Ri*-Zahlen (Abszisse) fuer Flug Nr. 29, am 4. April 1957. Die strichlierte Linie gibt die Einhuellende der Punktwolke an, die volle Linie repraesentiert den angenaeherten mittleren Verlauf.

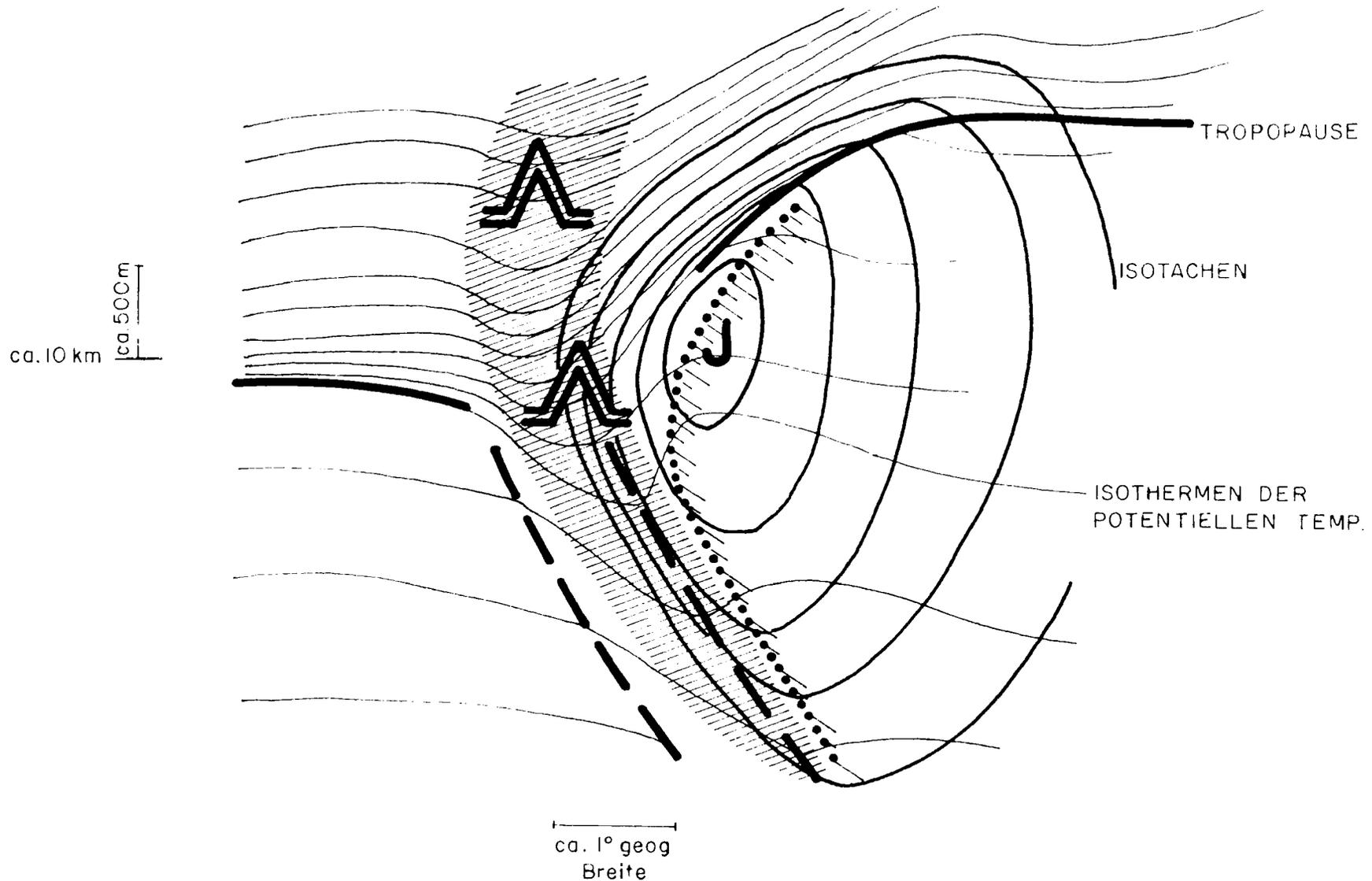


Abb. 8: Schematischer Verlauf der Isothermen potentieller Temperatur (duenne Linien) und der Isotachen (etwas dickere Linien) in einem Schnitt quer durch den Jet-Stream (J). Die Begrenzung der stabilen und baroklinen Frontalzone unterhalb des Jet Stream ist durch dicke, strichlierte Linien, die Tropopause durch dicke volle Linien gekennzeichnet. Die schraffierte Zone gibt den Bereich des "Isentropengrabens" an, in dem mit maessiger und schwerer CAT (☄) zu rechnen ist. Die punktierte Linie zeigt die noerdliche Begrenzung extensiver Cirrenbewoelkung an.

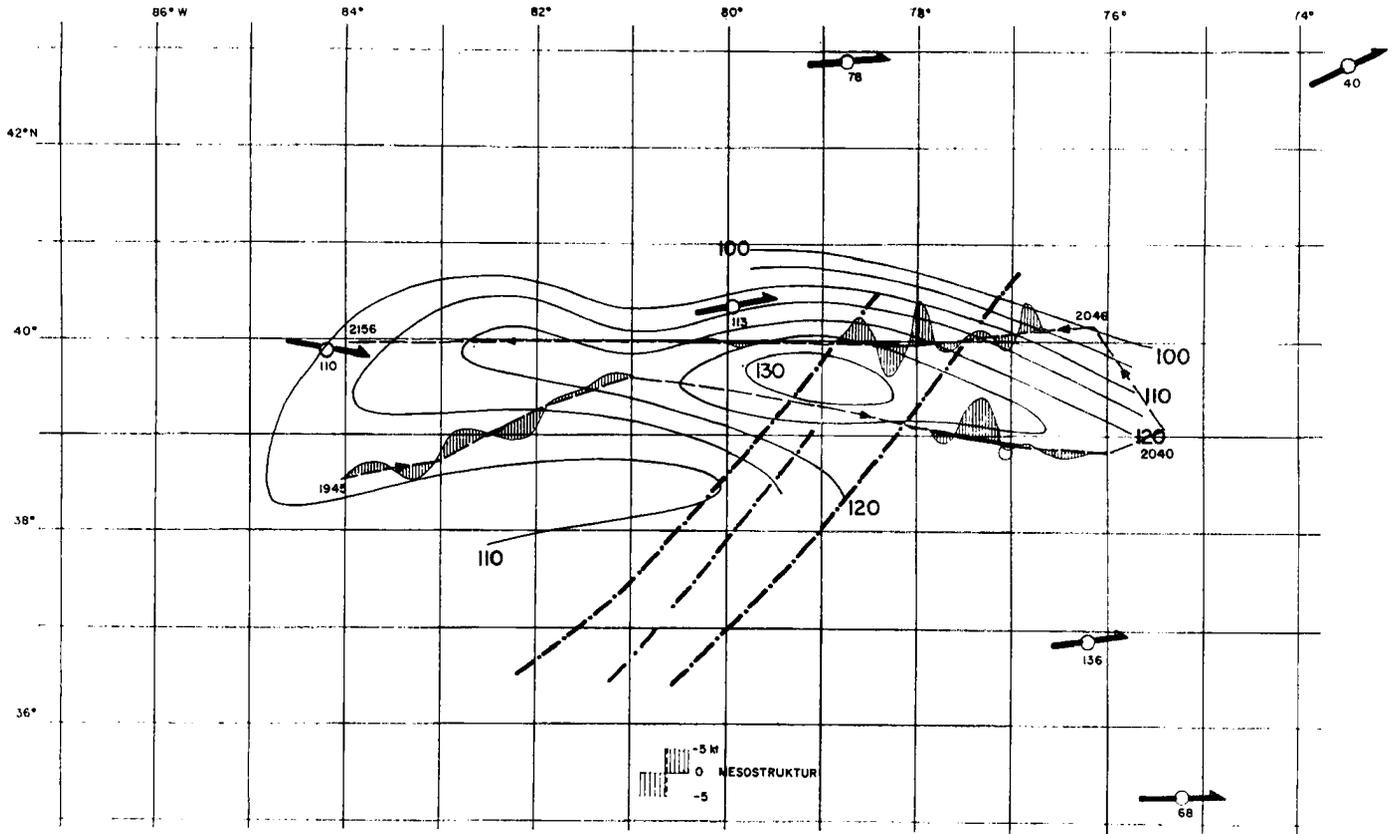


Abb. 9: Isotachen (Knoten) im 300-mb-Niveau, Flug Nr. 9. An den Stationen sind die Windgeschwindigkeiten und -richtungen vom 10. Januar 1957, 15.00 GCT eingetragen. Sonstige Erklärung siehe Abb. 10.

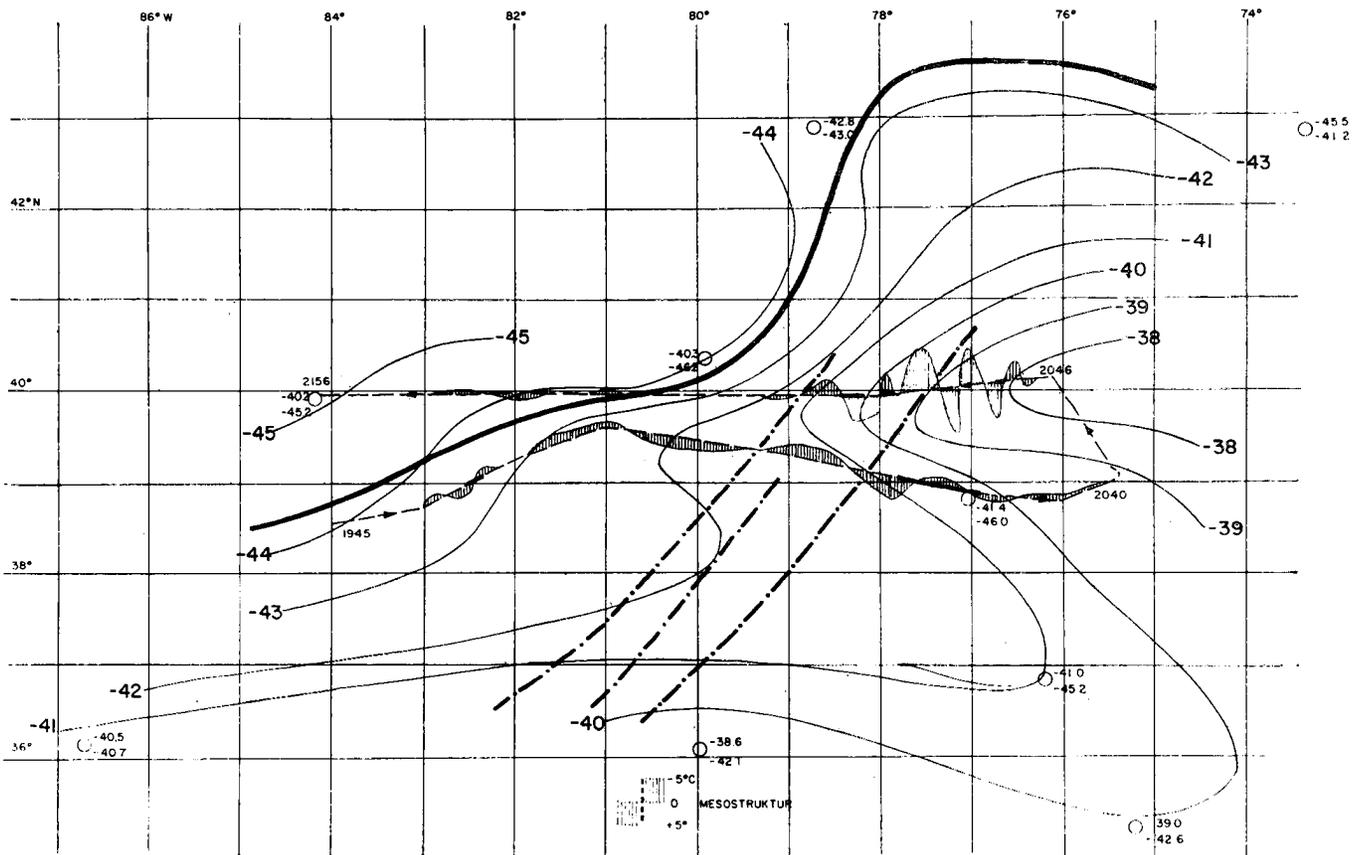


Abb. 10: Isothermen ($^{\circ}\text{C}$) der 300-mb Fläche und Mesostruktur der Temperatur zur Zeit des Fluges Nr. 9. Die Zahlen bei Beginn und Ende jeder Flugstrecke sind Zeitangaben (GCT). An den Radiosondenstationen sind die Temperaturen im 300-mb Niveau fuer 10. Januar 1957, 15.00 GCT (obere Zahl) und 11. Januar 1957, 03.00 GCT (untere Zahl) eingetragen. Der Verlauf der Gebirgsketten der Alleghenies ist durch dicke, strich-punktierte Linien angedeutet. Die dicke Linie zeigt den Schnitt der Tropopause an. Turbulenz nach Beobachtungen des Co-Piloten ist durch dicke Linien entlang der Flugstrecke markiert.

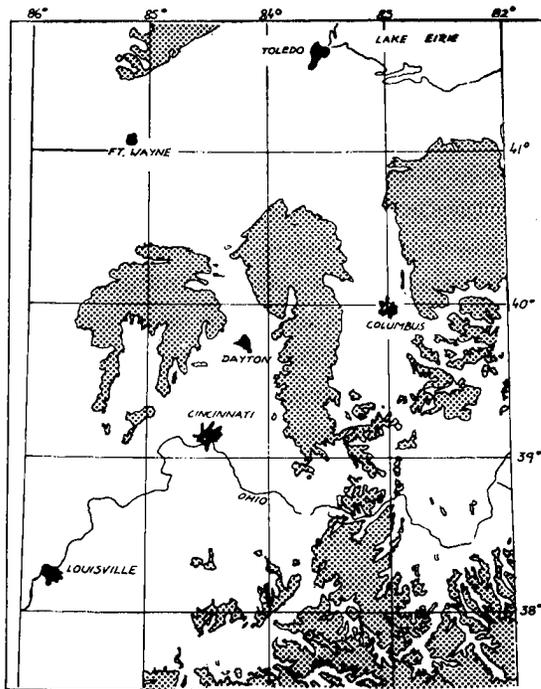


Abb. 11: Gelaende in der Umgebung des Wright-Patterson Flugstuetzpunktes, Ohio. Bodenerhebungen groesser als 300 m sind punktiert (15).

Abb. 12: Prozentuelle Verteilung der CAT in den einzelnen Planquadraten in der Umgebung des Wright-Patterson-Flugstuetzpunktes (15).

