

**Berichte**  
des  
**Deutschen Wetterdienstes**

**Nr. 149**

**Meßtechnische Untersuchung  
der planetarischen Grenzschicht  
mit Hilfe eines instrumentierten Motorseglers**

von  
**H. FORTAK**

Diese Untersuchungen wurden  
von der DFG während des Zeitraumes  
April 1970 – 1978 gefördert

Offenbach am Main 1980  
Im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes

ISSN 0072—4130

ISBN 3—88148—174—5

Herausgeber und Verlag:

Deutscher Wetterdienst, Zentralamt, Frankfurter Straße 135, 6050 Offenbach am Main

Mit der Annahme des Manuskriptes und seiner Veröffentlichung durch den Deutschen Wetterdienst geht das Verlagsrecht für alle Sprachen und Länder einschließlich des Rechtes der photomechanischen Wiedergabe oder einer sonstigen Vervielfältigung an den Deutschen Wetterdienst über; für den Inhalt ist der Verfasser verantwortlich.

INHALTSVERZEICHNIS	Seite
ZUSAMMENFASSUNG	3
1. EINLEITUNG, WISSENSCHAFTLICHE ZIELSETZUNG UND DURCHFÜHRUNG DES PROGRAMMS	4
2. INSTRUMENTELLE REALISIERUNG	
2.1 Charakteristische atmosphärische Variable	18
2.2 Das Leichtflugzeug als Meßträger	21
2.3 Anforderungen an die Meßfühler und an die Datenerfassung	39
2.4 Probleme der Meßstrategie	44
2.5 Probleme der Datenverarbeitung	55
2.6 Zusammenstellung der im Berichts- zeitraum durchgeführten Meßkampagnen mit wissenschaftlicher Zielsetzung	57
3. FEINAEROLOGIE	
3.1 Zeitabhängigkeit der Vertikalstruktur der Atmosphäre am festen Ort	59
3.2 Ortsabhängigkeit der Vertikalstruktur der Atmosphäre in Quasi-EULER'scher Betrachtungsweise	70

	SEITE
4. STRUKTUR KONVEKTIVER ZELLEN	
4.1. Natürliche Konvektion	77
4.2. Kühlturmfahnen-Konvektion	91
5. RAUM-ZEITLICHE VERTEILUNG KONVEKTIVER ZELLEN DARGESTELLT AM BEISPIEL DER VERHÄLTNISSE IM VORALPINEN HÜGEL- UND MOORLAND	
5.1. Die großräumige Wetterlage	106
5.2. Das Flugprogramm	111
5.3. Statistische Eigenschaften relevanter atmosphärischer Variabler in Abhängig- keit von der physikalischen Beschaf- fenheit der Unterlage	115
6. BEEINFLUSSUNG DES LOKALKLIMAS EINER REGION (OBERRHEINGRABEN) DURCH DIE BESONDERHEITEN DER RAUM-ZEITLICHEN VARIABILITÄT DER THERMISCHEN KONVEKTION	
6.1. Einleitung	139
6.2. Ermittlung der zweidimensionalen Struk- tur atmosphärischer Variabler in verti- kal stehenden Querschnittsflächen sowie horizontale Traversierungen in einem Meso-Scale-Gitterelement	143
7. MESSTECHNISCHE ERFASSUNG SONSTIGER CHARAKTERISTISCHER PHÄNOMENE	
7.1. Leewellen-Systeme	154
7.2. Wolkenstraßen	160

---

Anschrift des Autors:  
Prof. Dr. Heinz Fortak, Freie Universität Berlin,  
Theoretische Meteorologie,  
Thielallee 49, 1000 Berlin 33

## ZUSAMMENFASSUNG

In der Arbeit werden die Ergebnisse von Untersuchungen der planetarischen Grenzschicht mit Hilfe eines instrumentierten Motorseglers mitgeteilt. Hauptziel war dabei die Untersuchung konvektiver Prozesse sowie Wechselwirkungen von diesen mit benachbarten Scales. Im einzelnen wurden die durch die Konvektion verursachte starke Variabilität der Vertikalstruktur der Atmosphäre, Lebensläufe von individuellen konvektiven Zellen, zweidimensionale Verteilungen derartiger Zellen in Abhängigkeit von der Unterlage sowie Wechselwirkungen zwischen der Konvektion und Leewellen, bzw. Wolkenstraßen untersucht.

## SUMMARY

In this paper, the results of some research in the planetary boundary layer are described. Research was done by using an instrumental motorglider. The most important task of the experiment was the investigation of convective processes and its interactions with neighbouring scales. In particular there was searched for the strong variability of the vertical structure of the atmosphere caused by the convection, the life-cycle of individual convective cells, the two-dimensional distributions of those cells depending on the surface's properties and the interactions between convection and lee-waves including cloud-streets.

1. EINLEITUNG,

WISSENSCHAFTLICHE ZIELSETZUNG UND DURCHFÜHRUNG DES PROGRAMMS

Das in diesem Bericht beschriebene Forschungsvorhaben verdankt seine Entstehung den Diskussionen, die während der beiden Seminare des Schwerpunktteilprogramms "Simulations-Projekt Allgemeine Atmosphärische Zirkulation" (SPAAZ) unter den Themen "Die planetarische Grenzschicht und ihre Parameterisierung" und "Parameterisierung der thermischen Konvektion", jeweils im Frühsommer 1968 und 1969, in Berlin durchgeführt worden sind. Beim erstgenannten Seminar über die planetarische Grenzschicht und ihre Parameterisierung wurde die freie thermische Konvektion nur am Rande und in pauschalierender Weise erörtert. Gegenstand des zweitgenannten Seminars war das Problem der numerischen Simulation einzelner Konvektionszellen, bzw. von Kollektiven derartiger Zellen, wobei besonders das Problem der Parameterisierung des Entrainment-Detrainment-Mechanismus eine besondere Rolle spielte.

Während beider Seminare trat zutage, daß über die organisierte freie thermische Konvektion nicht nur innerhalb der SPAAZ-Gruppe, sondern auch im internationalen Rahmen sehr wenig Quantitatives bekannt war. Dieser Tatbestand erschien umso verwunderlicher, als in Kreisen von Segelflugzeugpiloten detaillierte Kenntnisse über die "Thermik" in der Atmosphäre vorhanden waren. Diese Kenntnisse trugen jedoch rein empirischen und nur qualitativen Charakter und waren nicht frei von widersprüchlichen Aussagen. Es lag deshalb nahe, auf der Basis von segelfliegerischen Erfahrungen meßtechnisch an das Problem heranzugehen, um einen Beitrag zur Parameterisierung konvektiver Vertikaltransporte in der Atmosphäre liefern zu können.

Dieses Vorhaben erschien auch deshalb lohnend, da besonders in der deutschen Flugmeteorologie bereits kurz nach Ende des ersten Weltkrieges systematische Forschung über die Struktur kleinräumiger Luftbewegungen, und damit auch der thermischen Konvektion, betrieben wurde (H.KOSCHMIEDER (1944)). Hinzu traten die Erfahrungen der deutschen Wetterflieger (zwischen 1920 und 1945), die auf die Existenz des der planetarischen Grenzschicht aufsitzenden Konvektionsraumes aufmerksam machten (K. SCHNEIDER-CARIUS (1953)).

Da bei Wetterlagen mit ausgeprägtem Energieaustausch zwischen Erdoberfläche und freier Atmosphäre die thermische Konvektion eine überragende Rolle spielt, konnte davon ausgegangen werden, daß man an einer Parameterisierung dieser Prozesse für Zwecke der numerischen Simulation der großräumigen atmosphärischen Zirkulation nicht vorbeikommen würde. In derartigen Situationen, d.h. in solchen, bei denen die thermische Konvektion das dominierende physikalische Phänomen ist, kann von einer normalen planetarischen Grenzschicht kaum noch gesprochen werden, da dann u.U. die gesamte Troposphäre in den Energieaustausch zwischen Erdoberfläche und freier Atmosphäre über die Konvektion eingeschlossen erscheint. Während dieser extreme Fall in mittleren Breiten verhältnismäßig selten ist, ist er die Regel in tropischen Breiten und hat unter anderem auch zur Durchführung des internationalen GATE-Experimentes geführt. Aber auch in mittleren Breiten spielt die thermische Konvektion im Rahmen der Gesamtdynamik der Atmosphäre eine viel größere Rolle, als früher angenommen wurde.

So erschien es gerechtfertigt, ein derartiges Forschungsprogramm in Angriff zu nehmen, wobei es völlig klar war, daß wegen der Komplexität des Problems und vor allen Dingen wegen der starken Variabilität der Konvektion natürlich nicht mit einem einzigen Leichtflugzeug und sehr begrenztem personellem

wie finanziellem Aufwand das Gesamtproblem vollständig gelöst werden konnte. Stattdessen ging es darum, in der Forschung auf diesem Gebiet einen Anfangsimpuls zu geben und durch aktuelle Erfahrungen den Rahmen des Problems abzustecken. Trotzdem sind während der Arbeiten innerhalb des Forschungsvorhabens auch unter den vorliegenden begrenzten Möglichkeiten viele neue Erkenntnisse gewonnen worden, bzw. es ist bereits qualitativ Bekanntes quantitativ abgesichert worden.

Im umfassenden Sinne betrachtet, bestand die wissenschaftliche Zielsetzung des Forschungsvorhabens in der meßtechnischen Untersuchung der THERMISCHEN KONVEKTION und ihrer Bedeutung für die Thermodynamik und Dynamik großräumiger atmosphärischer Bewegungsvorgänge.

In detaillierter Form wäre eine wünschenswerte Formulierung dieser Zielsetzung die folgende: Vorgegeben sei eine großräumige Wetterlage mit allen die thermische Konvektion bestimmenden Parametern. Gesucht sei dann das raum-zeitliche Verhalten der Thermik über charakteristischen Erdbodenbeschaffenheiten (einschließlich der Wasserflächen), d.h. der tägliche Lebenslauf der individuellen Thermikelemente sowie die räumlich-statistische Verteilung derselben innerhalb aller horizontalen Gitterelemente eines numerischen Vorhersagemodells für großräumige atmosphärische Bewegungen. Auf der Basis dieses Kenntnis sollte es dann möglich sein, die durch die Wirkung der (im einzelnen organisierten) Konvektionszellen vermittelte Wechselwirkung zwischen Erdoberfläche (planetarische Grenzschicht) und freier Atmosphäre (oberhalb 1,5 - 3 km) zu bestimmen. Das bedeutet letzten Endes die Lösung des Problems der Parameterisierung des konvektiven Scales für Zwecke der großräumigen atmosphärischen Dynamik.

Seit der Entdeckung der Thermik in den frühen 30er Jahren und ihrer Nutzung für den thermischen Segelflug lag diese Zielsetzung in mehr oder weniger "verkürzter" Form schon vielen Bemühungen in der sog. "Aufwindforschung" zugrunde. Die ersten Vermessungen von Thermiksegelflügen über der Darmstädter Ebene unter der Leitung von W. GEORGII (siehe H. KOSCHMIEDER (1944)) waren ein Beginn erfolgreicher Thermikforschung, die bis zum Beginn des zweiten Weltkrieges fast ausschließlich unter Verwendung von Segelflugzeugen durchgeführt wurde. Dabei wurden im wesentlichen nur die den normalen Gleitflug des Segelflugzeuges verändernden thermisch bedingten Vertikalbewegungen beobachtet, und es wurde versucht, qualitative Aussagen über die Struktur und das raum-zeitliche Verhalten der Thermik zu machen. Der sonstige instrumentelle Aufwand war verhältnismäßig gering. Außer Barographen, manchmal Meteorographen, sowie Doppelschnittvisierungen war wenig meteorologische Meßtechnik anwendbar. Außerdem stellt auch das Segelflugzeug dadurch nicht einen idealen Meßträger dar, als es im Bemühen, sich in der Luft zu halten, laufend auf der Suche nach Aufwindgebieten ist und somit nicht vorhergeplante Traversen systematisch abfliegen kann. Trotzdem wurde der allgemeine Charakter der Thermik von den deutschen Segelfliegern zwischen den beiden Weltkriegen auf empirischem Wege sehr gut erforscht.

Im Ausland (Vereinigte Staaten, Großbritannien und Sowjetunion) wandte man sich nach dem zweiten Weltkrieg dem Problem der Thermik meßtechnisch-quantitativ zu und setzte als Meßträger relativ schnellfliegende Motorflugzeuge ein. Infolge der Trägheit dieser Flugzeuge sowie der hohen Geschwindigkeit wurde dabei der apparative Aufwand unverhältnismäßig groß. Es war jedoch die Möglichkeit gegeben, durch gezielte Traversierungen der Atmosphäre statistische Aussagen über den Charakter der Thermik im allgemeinen zu machen, wobei jedoch in den meisten Fällen die Untersuchung von Kumuluswolken im Mittelpunkt stand.

Weitgehend unabhängig voneinander wurde um 1968 vom Verfasser sowie einer Gruppe um Dr. J. R. Milford (University of Reading) sowie - mit begrenzter Zielsetzung - von Dr. M. Reinhardt (DFVLR) erkannt, daß die kurz vorher in der Bundesrepublik entwickelten Motorsegler (Leichtflugzeuge mit sehr guten Segel- flugeigenschaften und einer Motorisierung, die das Flugzeug eigenstartfähig macht) ideale Meßträger zur Untersuchung der Thermik darstellen. Zur gleichen Zeit war außerdem die Entwicklung hochempfindlicher meteorologischer Meßgeräte sowie leichter, batteriebetriebener Analog- und Digitalaufzeichnungsgeräte so weit vorangekommen, daß zum ersten Male die Möglichkeit bestand, die Thermik gezielt und hochauflösend zu vermessen. Es ist ersichtlich, welche Vorteile ein Meßsystem dieser Art gegenüber den vorher beschriebenen beiden Verfahren darstellt: Die Segel- flugeigenschaften eines Motorseglers erlauben die gleichen De- tailuntersuchungen einzelner Thermikzellen, wie sie früher durch die deutsche Segelflugforschung ebenfalls durchgeführt wurden. Die Möglichkeit, mit Hilfe eines Motors gezielte Horizontal- traversen zu fliegen - und dies mit sehr geringen Horizontal- geschwindigkeiten - macht ein derartiges System auch denjenigen, die schwere und schnelle Flugzeuge verwenden, überlegen. Ein weiterer, nicht unwesentlicher Vorteil liegt in dem geringen Aufwand, der für derartige Forschungen betrieben werden muß.

Das Spektrum der möglichen Zielsetzungen innerhalb der Gesamt- problematik wurde durch die Existenz eines derartigen Systems sehr erweitert. Im folgenden soll eine Reihe von derartigen Zielsetzungen genannt werden, die bereits Gegenstand eines An- trages an die Deutsche Forschungsgemeinschaft vom Januar 1970 waren und die auch sämtlich während der Dauer des Forschungs- vorhabens bearbeitet wurden.

Ein relativ einfach zu untersuchendes Problem betrifft die Wechselwirkung zwischen der thermischen Konvektion und der großräumigen Vertikalstruktur der Atmosphäre. Einerseits ermöglicht z.B. die großräumige vertikale Temperaturverteilung im Zusammenwirken mit der Strahlung die Entstehung und Ausbildung der thermischen Konvektion. Andererseits verändert im Laufe eines Tages die Konvektion die großräumige Temperaturverteilung manchmal ganz entscheidend in Richtung auf eine mehr oder weniger hochreichende adiabatische Schichtung. Führt man feinaerologische Serienaufstiege über einer konvektiv aktiven Unterlage in verhältnismäßig rascher Folge durch, dann ist man unter Verwendung hochauflösenden Meßgeräts in der Lage, Aussagen über diese Wechselwirkung machen zu können. Führt man außerdem ein derartiges Programm mit mehreren Flugzeugen über unterschiedlichen Bodenbeschaffenheiten durch, dann kann man neben der zeitlichen Abhängigkeit der genannten Wechselwirkung auch Aussagen über die räumlich differenzierte Struktur der Konvektion und ihrer Wechselwirkung mit den großräumigen Verhältnissen machen. Im vorliegenden Fall, in dem nur ein einzelnes Flugzeug mit relativ geringer Steigfähigkeit zur Verfügung stand, konnte das letztgenannte Problem nur in Quasi-EULER'scher Betrachtungsweise angegangen werden, da zwischen zwei feinaerologischen Aufstiegen über unterschiedlicher Bodenbeschaffenheit eine Zeitdifferenz lag, die in vielen Fällen mit einer vorausgesetzten Stationarität der meteorologischen Bedingungen dieses Zeitintervalls nicht vereinbar war.

Während der Dauer der Untersuchungen stand die numerische Simulation von konvektiven Zellen sehr im Mittelpunkt des wissenschaftlichen Interesses. Hierbei handelte es sich in den meisten Fällen um Versuche hinsichtlich der zweidimensionalen Konvektion. Versuche, die dreidimensionale

Konvektion zu simulieren, wurden zwar unternommen, führten jedoch nicht zu allgemein akzeptierbaren Resultaten. Deshalb war die meßtechnische Erfassung von einzelnen konvektiven Zellen möglichst vom Zeitpunkt ihrer Entstehung in der Nähe der Erdoberfläche an bis zum Eindringen derselben in eine in der Höhe befindliche Inversion eine der wesentlichen Zielsetzungen der geplanten Untersuchungen. Systematische Traversierungen der wichtigsten Parameter (Temperatur, Feuchte, Vertikalgeschwindigkeit) ließen neue Informationen über den Lebenslauf derartiger konvektiver Zellen erwarten. Wünschenswert wäre es gewesen, ein breites Spektrum von individuellen Thermikelementen in dieser Weise zu vermessen, um auch zu statistischen Aussagen über die Struktur der Thermikelemente gelangen zu können. Allerdings ist dieses Spektrum sehr breit und reicht von der sog. zerrissenen Thermik, die noch stochastischen Charakter trägt, letzten Endes bis zu den Aufwindgebieten in Cumulonimben. Von besonderem Interesse für den normalen Energieaustausch zwischen Erdoberfläche und freier Atmosphäre sind jedoch konvektive Elemente, die in strömungsmäßig organisierter Form einen Größenbereich zwischen etwa 100 und max. 1.000 m überdecken. Aber gerade hierfür ist das entwickelte Meßsystem ganz besonders gut geeignet.

Die vorher genannte Vermessung individueller Thermikelemente sollte der Absicherung der deterministischen Simulation derartiger Systeme dienen. Das raum-zeitliche Verhalten der thermischen Konvektion innerhalb eines großräumigen Gitterflächenelementes ist jedoch ein stochastischer Prozeß, der in geeigneter Weise für Modelle der großräumigen Zirkulation parameterisiert werden muß. Daß hierbei formale Parameterisierungen mit Hilfe von turbulenten Austauschkoefizienten nicht angebracht sind, erscheint vom physikalischen

Charakter des Phänomens her selbstverständlich. Stattdessen bietet sich bei Kenntnis der individuellen Struktur der konvektiven Zellen das Verfahren der Modell-Parameterisierung an, das bisher allerdings kaum in numerischen Modellen Verwendung gefunden hat. Es ist jedoch in jedem Fall erforderlich, daß für Parameterisierungen raum-zeitliche Statistiken der Konvektion, oder zumindestens Kenngrößen derartiger Statistiken, bekannt sind, die Schlüsse über die Anordnung der konvektiven Elemente in Raum und Zeit vermitteln. Dies läßt sich nur mit Hilfe von horizontalen Profilflügen ermitteln, wobei es von großer Bedeutung ist, möglichst homogene Bodenverhältnisse zu wählen, da erwartet werden muß, daß die Statistiken über jeder Unterlage verschieden ausfallen. Diese Tatsache ist im Prinzip in Segelfliegerkreisen ebenfalls seit langem bekannt, indem man dort relativ genaue Kenntnisse darüber hat, wo z.B. über dem Gebiet der Bundesrepublik bei bestimmten Wetterlagen mit guter, bzw. mit schlechter Thermik zu rechnen ist. Eine in diesem Zusammenhang auch für die großräumige Dynamik wichtige Zielsetzung wäre beispielsweise eine Kartierung der Bereitschaft des Untergrundes, bei vorgegebenen Wetterlagen konvektive Aktivität zu erzeugen. Dies beinhaltet für das Forschungsvorhaben die Notwendigkeit, horizontale Traversenflüge über stark variierendem Untergrund und für möglichst unterschiedliche großräumige Wetterlagen durchzuführen.

Es ist bekannt, daß die konvektive Aktivität durch überlagerte meteorologische Phänomene der nächstgrößeren Scales stark beeinflusst werden kann. Somit gehört zu einem vollständigen Forschungsprogramm der vorliegenden Art auch die Untersuchung der Wechselwirkung des konvektiven Scales mit den nächsthöheren Scales. Über die Wechselwirkung mit der großräumigen Wetterlage, gegeben durch die großräumige Vertikalstruktur der meteorologischen Parameter, wurde bereits gesprochen. Doch auch Wechselwirkungen mit Mesoscale-Erscheinungen sind ausgeprägt zu beobachten. Es sei hier nur an die Wechselwirkung

der Konvektion mit Leewellen-Systemen im Lee von Hügelsystemen oder Gebirgen gedacht, sowie an Wechselwirkungen im Zusammenhang mit der Instabilität der planetarischen Grenzschicht, die zur Bildung von Wolkenstraßen führt.

Vorstehend ist ein umfangreiches Programm beschrieben worden, dessen volle Realisierung sicherlich erst weitere Forschungsbemühungen bringen kann. Es war jedoch erstaunlich, wie viele wesentlich neue Informationen bereits unter Verwendung eines derart einfachen Meßsystems gewonnen werden konnten.

Während der ersten Hälfte der Untersuchungen wurde ein in-situ-Meßsystem zur hochauflösenden Erfassung wichtiger Parameter der atmosphärischen Grenzschicht einschließlich der zugehörigen digitalen Datenverarbeitung entwickelt. Dieses System besteht aus einem Motorsegler vom Typ ASK 16 als Meßträger sowie Meßfühlern für die meteorologischen Parameter Lufttemperatur und Wasserdampfdruck sowie für die Flugzeugparameter Druckhöhe, Fahrt, Vertikalgeschwindigkeit, Vertikalbeschleunigung, Nickwinkel und Rollwinkel. Sämtliche Meßfühler erlauben eine Abfragefrequenz von 10 Hz. Ein analoges Aufzeichnungssystem von vier Batterieschreibern erlaubt die wahlweise Aufzeichnung von vier der angegebenen Parameter. Das digitale Bandaufzeichnungsgerät ist in der Lage, sämtliche angegebenen Parameter sowie noch einige zusätzliche, die der Datenorganisation dienen, mit einer Abfragefrequenz von je 5 Hz aufzunehmen. Bei einer Fluggeschwindigkeit von  $90 \text{ km/h} = 25 \text{ m/s}$  beträgt die horizontale Auflösung bei Traversen-Flügen für jeden Parameter etwa 5 m. Bei vertikalen Sondierungen mit einer Steiggeschwindigkeit von  $1,5 \text{ m/s}$  ist die entsprechende vertikale Auflösung etwa 30 cm.

Hauptgegenstand der mit diesem System durchgeführten Meßflüge waren Eigenschaften der atmosphärischen Grenzschicht im konvektiven Scale. Insgesamt wurden neben einer größeren Zahl von Testflügen zur Erprobung der Meßfühler sowie zur Entwicklung von Meßstrategien während des Zeitraumes 1.8.1973 - 30.9.1977 insgesamt 20 sorgfältig geplante Meßkampagnen durchgeführt. Das durchgeführte Meßprogramm lehnte sich eng an die ursprüngliche Aufgabenstellung an.

Im einzelnen wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- a) Serien von feinaerologischen Aufstiegen über verschiedenen Unterlagen zur Ermittlung der zeit-/ortsabhängigen vertikalen Struktur der atmosphärischen Grenzschicht bei unterschiedlichen Wetterlagen ergaben, daß die vertikale Struktur der Atmosphäre (z. B. der Temp) unter Bedingungen starker konvektiver Aktivität nicht nur zeitlich sehr variabel ist, sondern auch sehr wesentlich von der Unterlage abhängt. Auch unter Bedingungen starker Warmluftadvektion ergab sich eine unerwartet starke zeitliche Variabilität der vertikalen Struktur der atmosphärischen Grenzschicht mit Schwankungsperioden, die weit unterhalb einer Stunde lagen. Durch diese Ergebnisse wird die Frage nach einem repräsentativen feinaerologischen Aufstieg für eine größere Region und für einen vorgegebenen Zeitraum gestellt.
- b) Große Aufmerksamkeit wurde der Struktur und dem Lebenslauf einzelner konvektiver Elemente gewidmet. Im Anschluß an eine aerologische Feinsondierung wurde ein einzelnes konvektives Element folgendermaßen im LANGRANGE'schen Sinne vermessen: Ein Segelflugzeug markierte im zentrierten Thermikflug ein bestimmtes konvektives Element, während das Meßflugzeug dasselbe auf etwas tieferliegenden horizontalen Meßtraversen meßtechnisch erfaßte.

Bei diesen Untersuchungen gelang es, die in Kreisen von Selgefliegern bekannten Eigenschaften konvektiver Elemente zu bestätigen, wenngleich auch wegen der Schwierigkeit derartiger Messungen und wegen der außerordentlichen Variabilität der Thermikelemente gesetzmäßige Aussagen noch nicht im größeren Rahmen gemacht werden konnten.

Aus diesem Grund wurde die kontinuierliche Ablösung von konvektiven Elementen an den Kronen der Kühltürme von Kraftwerken als Forschungsgegenstand gewählt, weil hier wegen der zeitlichen Stationarität des Vorganges der Lebenslauf derartiger konvektiver Elemente leichter untersucht werden konnte. Vier großangelegte Meßkampagnen zur dreidimensionalen flugmeteorologischen Vermessung von Kühlturmfahnen brachten Ergebnisse, die bisherige Ansätze zur Parameterisierung des Massenaustausches zwischen konvektivem Element und Umgebung in Frage stellen. Darüberhinaus ergab sich das für den Umweltschutz wichtige Ergebnis, daß Kühlturmfahnen größerer Kraftwerke den für den Aufstieg und für die räumliche Ausbreitung erforderlichen Massenzuwachs hauptsächlich an ihrer Unterseite beziehen, so daß sich direkt unterhalb von Kühlturmfahnen offensichtlich stets Umgebungsluft befindet. Auch die Tatsache, daß die spezifische Feuchte im oberen Teil eines konvektiven Elements wesentlich größer ist als in den unteren Bereichen, verdient Beachtung.

Bei den Untersuchungen an Kühlturmfahnen ergab sich außerdem eine außerordentlich starke Abhängigkeit der thermischen Konvektion von der vertikalen Feinstruktur der Atmosphäre, eine Tatsache, die sich mit Sicherheit auf die natürliche Konvektion übertragen läßt.

- c) In Hinblick auf die Parameterisierung der organisierten Konvektion für Zwecke der numerischen Vorhersage im Meso- und Large-Scale ist die Kenntnis der zweidimensionalen Statistik konvektiver Elemente über verschiedenartigen Unterlagen von entscheidender Bedeutung. Aus diesem Grunde wurden Forschungsflüge über stückweise homogenen Unterlagen durchgeführt, und es wurden die Meßwerte einer statistischen Analyse unterzogen. Die während eines längeren Meßfluges unter quasi-stationären großräumigen Bedingungen ermittelten Häufigkeitsverteilungen, Autokorrelationsfunktionen und Powerspektren der verschiedenen Meßvariablen zeigten sich als ganz außerordentlich von der Unterlage abhängig. Dies hat zur Konsequenz, daß der turbulente Austausch von Eigenschaften der Atmosphäre zwischen Unterlage und freier Atmosphäre unter konvektiven Bedingungen sehr stark ortsabhängig sein kann.

Das Problem eines repräsentativen konvektiv-turbulenten Vertikaltransportes atmosphärischer Eigenschaften für Gebiete, die den konvektiven Scale übertreffen, konnte unter Verwendung eines einzelnen Flugzeuges nicht gelöst werden. Doch war es sicherlich von Interesse, gezeigt zu haben, in welcher Größenordnung sich schon kleine topographische Unterschiede und Unterschiede in der physikalischen Beschaffenheit der Erdoberfläche in den statistischen Eigenschaften der meteorologischen Variablen innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht bemerkbar machen.

- d) Wenn immer möglich, wurden besondere meteorologische Erscheinungen während der Meßkampagne meßtechnisch mit-erfaßt. Dabei gelang es z. B., die Struktur außergewöhnlicher Wolkenstraßen sowie diejenige von Leewellen-Systeme-

men im Gebiet des Oberrheingrabens zu untersuchen. Dabei ergab sich, daß über dem Oberrheingraben infolge der Kanalisierung der bodennahen Strömung Windscherungen zustande kommen, unter deren Einfluß sich ein einzelnes Band einer Wolkenstraße zu einem Wirbel derart entwickelt, daß der Kern des Strömungswirbels etwa in der Mitte der sichtbaren Wolkenstraße zu liegen kommt. Auch die Erkenntnis, daß im Lee des Pfälzer Waldes das Auftreten von Leewellen-Systemen unerwartet häufig zu sein scheint, verdient Beachtung.

- e) Im ursprünglichen Forschungsplan (Januar 1970) war erwähnt worden, daß die unter a) - e) durchgeführten Untersuchungen in sehr unterschiedlichen Landschaftsgebieten zur Ausführung gelangen sollten. Dies wurde während des Berichtszeitraumes tatsächlich auch realisiert, indem Meßkampagnen der vorher beschriebenen Art in folgenden Gebieten durchgeführt wurden: Nordwestdeutsche Geest-Niederung (Raum Meppen), Weserbergland und Westfälische Tieflandsbucht, Oberrheingraben mit Pfälzer Wald, Vogesen und Kaiserstuhl, Voralpines Hügel- und Moorland und Nördliche Kalkalpen (Raum Innsbruck).

Die von vornherein vermutbaren Unterschiede in der Struktur und der Intensität der konvektiven Prozesse konnten bei diesen Messungen quantitativ erfaßt werden. Gleiche großräumige Wetterlage vorausgesetzt, zeigt sich die Verteilung der konvektiven Zellen in den Ebenen räumlich unorganisiert und verhältnismäßig großabständig, während im Hügelland bzw. im Gebirge eine sehr enge Kopplung der konvektiven Aktivität an die Topographie besteht, wobei Sonnenstand und Windrichtung eine entscheidende Rolle spielen. Dabei werden, im Gegensatz zu den Verhältnissen in den Ebenen, lokal konzentriert größere konvektiv-tur-

bulente Vertikaltransporte in diesen Räumen erzeugt. Insbesondere wird bei den nach Osten geneigten Hängen (z. B. Pfälzer Wald und Vogesen) eine charakteristische Besonderheit dadurch erzeugt, daß die konvektive Aktivität verhältnismäßig früh am Tage einsetzt und dadurch in diesen Regionen klimabeeinflussende Effekte zur Folge hat.

## 2. INSTRUMENTELLE REALISIERUNG

### 2.1 Charakteristische atmosphärische Variable

Selbstverständlich sind auch bei der Konvektion die normalen atmosphärischen Variablen diejenigen, die das Geschehen bestimmen. Doch im Gegensatz zu den meisten Meso- und Large-Scale-Bewegungsformen spielt das Feld der Vertikalgeschwindigkeit bei der Konvektion eine überragende Rolle. Da die durch sie bewirkten konvektiven Vertikaltransporte atmosphärischer Eigenschaften das Hauptinteresse des Forschungsvorhabens bilden, kommt der Vermessung der Felder der Vertikalgeschwindigkeiten eine ganz besondere Bedeutung zu.

Im konvektiven Scale befindet sich das Strömungsfeld weitgehend in einem organisierten Zustand. Dabei kann jedoch in Strenge von einem echten 'GAP' zwischen der kleinräumigen Turbulenz und dem konvektiven Scale im Spektrum der Bewegungsformen nicht gesprochen werden. Trotzdem kommt es häufig zu einer deutlichen Trennung beider Scales, wobei die konvektiven Zellen innerhalb ihrer organisierten Struktur noch einen sehr energiereichen Anteil an kleinräumiger Turbulenz enthalten. Allgemein kann aber davon ausgegangen werden, daß horizontale Änderungen der Vertikalgeschwindigkeit mit Wellenlängen ab 30 - 50 m dem organisierten konvektiven Scale angehören. Dieser Tatbestand war bereits der frühen "Aufwindforschung" bekannt, die ihre Aufmerksamkeit Bewegungsvorgängen mit Scales zwischen etwa 50 und 500 m zuwandten.

Daß das Vertikalgeschwindigkeitsfeld bei bestimmten Wetterlagen neben der Strahlung das meteorologische Geschehen insgesamt dominierend beeinflusst, ist nicht nur aus dem Bereich der Tropen, sondern auch während sommerlicher Hochdruckwetterlagen in mittleren Breiten bekannt. Vertikalgeschwindigkeiten zwischen 3 und 6 m/s (d.h. zwischen 10 und 20 km/h) sind für Bedingungen voll entwickelter thermischer Konvektion über den Ebenen mittlerer Breiten charakteristisch. Unter Voraussetzung gleicher Wetterlage kann im Gebirge oft mit Werten gerechnet werden, die fast doppelt so groß sind. Bei derartigen Wetterlagen spielen die großräumigen Felder des horizontalen Windvektors in den meisten Fällen keine das Gesamtgeschehen sehr beeinflussende Rolle. Nur in seltenen Fällen wird die dynamisch-thermodynamische Wirkung der Konvektion durch überlagerte großräumige Windfelder entscheidend unterdrückt.

Hieraus folgt, daß das eigentliche Ziel des Forschungsvorhabens, nämlich die Messung, bzw. danach die Parameterisierung der konvektiv bedingten Vertikaltransporte atmosphärischer Eigenschaften, nur erreicht werden konnte, wenn die Möglichkeit eröffnet wurde, Felder der Vertikalgeschwindigkeit meßtechnisch zu erfassen.

Aber auch hinsichtlich der Temperatur- und Feuchtefelder, die ja den thermischen Auftrieb erzeugen, werden hohe Anforderungen an die Meßtechnik gestellt, da diese Variablen auch unter ausgesprochen stark konvektiven Bedingungen nur sehr geringe Abweichungen von denjenigen des großräumigen Scales aufweisen. Beide Variablenfelder sind charakteristische Variable im Gesamtprogramm und müssen den Feldern der Vertikalgeschwindigkeit gleichrangig an diese Seite gestellt werden. Dies erleuchtet

allein auch schon daraus, daß die konvektiven Vertikaltransporte von Energie (fühlbare, latente) hierdurch bestimmt werden.

Hinzu treten charakteristische Variable des Umfeldes der Konvektion, d.h. diejenigen der großräumigen Wetterlage. Hier ist es nicht nur die feinaerologische Vertikalstruktur der Temperatur- und Feuchtefelder des großräumigen Scales, sondern auch das Vertikalprofil des horizontalen Windvektors, das den vertikalen Austauschprozeß entscheidend mitbestimmen kann.

Aus Vorstehendem folgt zunächst, daß man von den folgenden Anforderungen an das Meßsystem wird ausgehen können:

Variable	Auflösung
Temperatur	0.1 K
Spezifische Feuchte	0.05 g/kg
Vertikalgeschwindigkeit	0.1 m/sec

## 2.2 Das Leichtflugzeug als Meßträger

Von der Zielsetzung des Forschungsvorhabens her standen die ausgezeichneten aerodynamischen Eigenschaften moderner Motorsegler im Vordergrund der Entscheidung bei der Auswahl eines Meßträgers, da hierdurch ein weitgehend sensibles Reagieren des Gesamtsystems auf die Vertikalbewegungen innerhalb der Atmosphäre garantiert erschien. Im folgenden wird auf diese Eigenschaften unseres Meßsystems noch näher eingegangen werden. Wir führen nun jedoch weitere Vorteile dieses Meßträgers gegenüber anderen aus:

1. In Hinblick auf fast alle Meßaufgaben besitzen die hohe Wendigkeit, die sehr guten Gleitflugeigenschaften, die sehr niedrige Mindestgeschwindigkeit und die relativ geringe Masse besondere Bedeutung.
2. Bezüglich der Einsatzfähigkeit schlagen folgende Eigenschaften positiv zu Buche: Wegen der geringen Lärmentwicklung und der hohen Flugsicherheit besteht die Möglichkeit, in den von der Flugsicherung freigegebenen bodennächsten Höhenbereichen Messungen durchzuführen, und dies selbst über dichtbesiedelten Gebieten. Außerdem besteht die Möglichkeit, zeitlich bis zu etwa 8 Stunden ausgedehnte Meßflüge mit Hilfe der angebauten Zusatzbenzintanks durchzuführen.

3. Hinsichtlich der üblichen technischen Probleme beim Betrieb eines Meßflugzeuges kann ein Motorsegler durch keinen anderen Flugzeugtyp geschlagen werden:

Das System ist so flexibel, daß es zu jedem gewünschten Zeitpunkt innerhalb von weniger als einer Stunde messend in die Luft gebracht werden kann; es kann außerordentlich leicht zerlegt werden, und somit besteht die Möglichkeit, es über weite Strecken über Land oder über See zu transportieren; Wartung sowie Unterhalt bewegen sich in einem Rahmen, der denjenigen eines mittleren Automobils nicht übersteigt.

Ähnliche vorteilhafte Eigenschaften besitzen neben dem Motorsegler auch viele moderne Sportflugzeuge. Diese besitzen darüberhinaus noch die Vorteile einer größeren Zuladung sowie größerer Steig- und Reisegeschwindigkeiten. Sie sind für viele der im Kapitel 1. angeführten Zielsetzungen gleich gut oder besser als ein Motorsegler einsetzbar. Dies ist z.B. der Fall bei der aerologischen Feinsondierung und bei der großflächigen Vermessung der Thermik. Es besteht jedoch dann nicht mehr die Möglichkeit, individuelle konvektive Zellen in derart optimaler Weise meßtechnisch zu erfassen, wie dies mit einem Motorsegler möglich ist. Die Aerodynamik sowie die Langsamflugeigenschaften moderner Sportflugzeuge reichen an diejenigen eines Motorseglers nicht heran.

Es war bei der Planung der Untersuchungen bereits klar, daß ein ideales System für die gesteckte Zielrichtung die Kombination eines Motorseglers mit

einem Sportflugzeug sein müßte. Gegen Ende des Forschungsvorhabens wurde aus diesem Grunde ein älteres Sportflugzeug angemietet, behelfsmäßig instrumentiert und gemeinsam mit dem Motorsegler zum Einsatz gebracht. Viele der gegen Ende dieser Arbeit mitgeteilten Ergebnisse wurden mit diesem kombinierten System gewonnen.

Hinsichtlich der Vermessung von Vertikalgeschwindigkeitsfeldern innerhalb individueller konvektiver Elemente, bzw. der Vermessung ihrer statistischen Verteilung im Raum werden an einen fliegenden Meßträger vom Scale des einzelnen Phänomens her gesehen die folgenden Anforderungen gestellt:

1. Aerodynamik und Gewicht müssen es ermöglichen, daß der Meßträger als ganzes den konvektiven Schwankungen der Vertikalgeschwindigkeit für alle "Wellenlängen", die größer als etwa 50 m sind (Aufwindgebietsdurchmesser 25 m) möglichst trägheitslos folgt. Es muß dann weiterhin möglich sein, unter Benutzung aerodynamischer Beziehungen, die durch die Eigenbewegung des Meßträgers gemessene Vertikalgeschwindigkeit in die Vertikalgeschwindigkeit der Luft umzurechnen.
2. Die Fluggeschwindigkeit muß einerseits so groß sein, daß größere Höhenänderungen des Meßträgers beim Durchflug durch ein Thermikelement vermieden werden, andererseits aber so klein, daß beim Durchflug durch ein Thermikelement genügend viele Meßwerte (5 Hz-Meßfrequenz) für statistische Untersuchungen gewonnen werden

können. Ferner sollen durch die Fluggeschwindigkeit auch die unter 1. angegebenen Forderungen optimal erfüllt werden.

Für die folgenden Betrachtungen spielt die Flugmethode, die bei diesen Untersuchungen angewendet wird, eine entscheidende Rolle. Dabei unterscheiden wir die folgenden drei Idealfälle:

1. Methode der konstanten Steuerstellung:  
Hierbei wird vom Piloten keines der Ruder betätigt; das Flugzeug wird der Thermik passiv überlassen. Dieser Fall ist mit Hilfe von aerodynamischen Rechnungen nachvollziehbar und liefert die später noch zu diskutierenden Ergebnisse. Es kann schon gesagt werden, daß diese Flugmethode in Kombination mit der im folgenden zu beschreibenden Methode angewendet worden ist.
2. Methode der Konstanthaltung des Nickwinkels (constant attitude): Hierbei wird versucht, den Horizont zu halten, d.h. es wird versucht, die Fluglage im Raum konstant zu halten, was mit Hilfe eines künstlichen Horizonts im Flugzeug relativ leicht zu bewerkstelligen ist. Es ist bemerkenswert, daß sich diese Flugmethode in der Thermik mit außerordentlich geringen Steuerbewegungen durchführen läßt und daß außerdem die dabei auftretenden Fahrtänderungen des Flugzeuges selbst in der sehr starken Thermik von Kühlturmfahnen gering sind.

3. Methode der Konstanthaltung des Anstellwinkels: Hierbei wird versucht, während der durch das Vertikalgeschwindigkeitsfeld verursachten dreidimensionalen Bewegung des Meßträgers durch Konstanthaltung der Fahrt auch eine Konstanthaltung des Anstellwinkels zu erzielen. Bei dieser Methode sind in der Thermik die größten Steuerbewegungen erforderlich, was eine ausgeprägt persönliche Komponente, nämlich die Flugmethode des Piloten, in das ganze hineinbringt. Die folgende Abb. 1 stellt schematisch zwei der o.a. Flugmethoden dar und läßt erkennen, daß die Flugbahnen, je nach Flugmethode, sehr unterschiedlich ausfallen können.

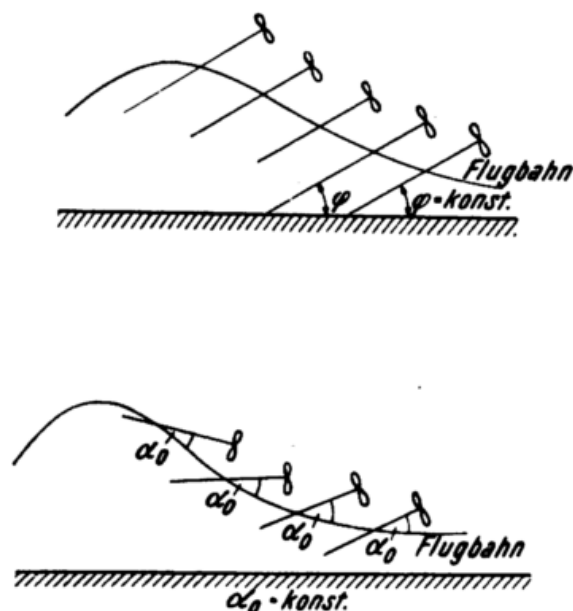


Abb.1 Flugbahnen bei den Methoden "constant attitude" (oben) und konstanter Anstellwinkel (unten).

Zur Auswahl der optimalen Flugmethode und Fluggeschwindigkeit zur Vermessung der Vertikalgeschwindigkeit in der Atmosphäre das folgende: Zunächst betrachten wir die sog. Gleitflug-Geschwindigkeitspolare (stehender Motor) des Motorseglers ASK 16, die in Abb.2 wiedergegeben ist. Liest man die ausgezogene Kurve von links nach rechts, dann erkennt man, daß bei der vorgegebenen Flächenbelastung die Abkippsgeschwindigkeit bei etwa 82 km/h liegt. In der Praxis geht dieses Flugzeug jedoch in einen kontrollierbaren Sackflug über und kippt nicht im eigentlichen Sinne ab, d.h. geht nicht in eine Trudelbewegung über. Diese Eigenschaft des Motorseglers ASK 16

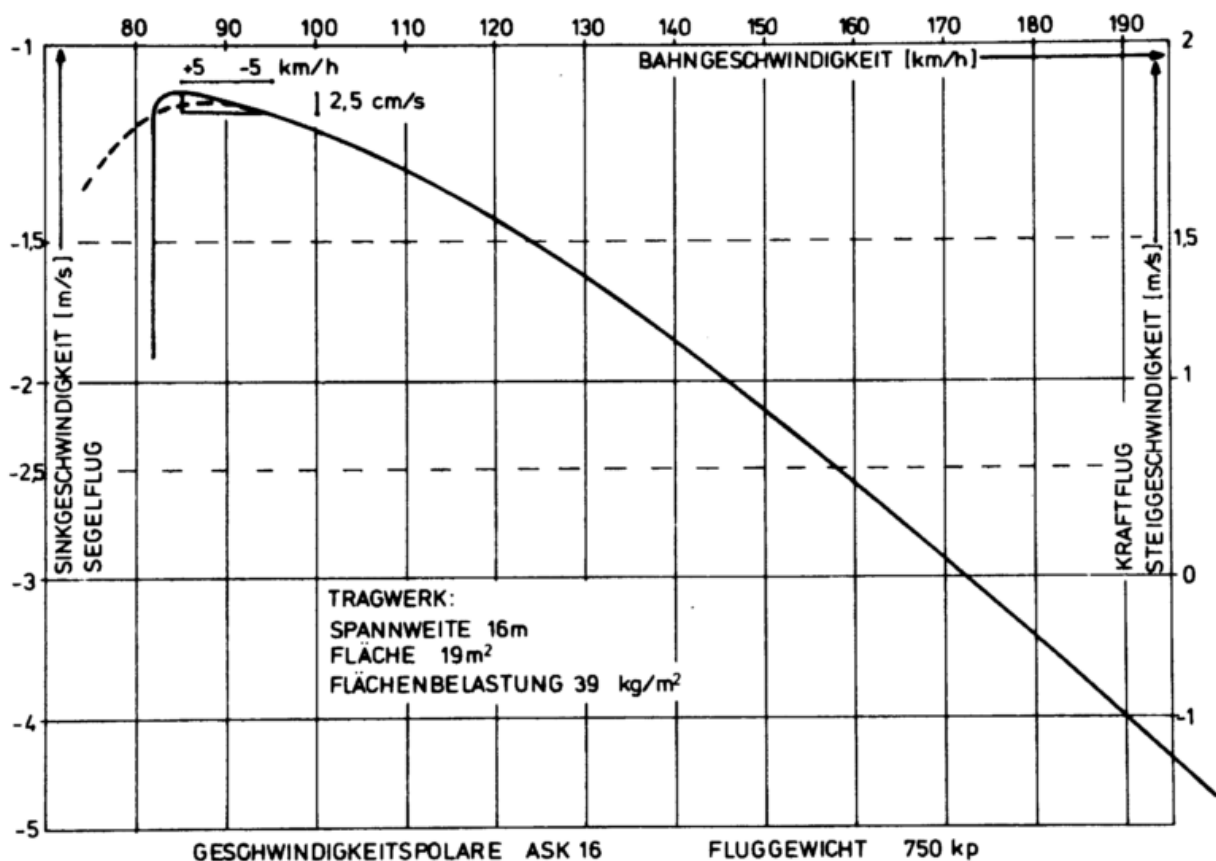


Abb.2 Segelflug- und Kraftflugpolare  $W = f(V_F)$  des Motorseglers ASK 16.

wirkt sich auf die Flugsicherheit bei Meßkampagnen außerordentlich günstig aus und hat sich insbesondere beim Durchfliegen von Kühlturmfahnen als entscheidender Sicherheitsfaktor bemerkbar gemacht. Der für das folgende interessanteste Bereich der Polaren befindet sich um etwa 90 km/h Fluggeschwindigkeit. Hier bewirken Fahrtänderungen von  $\pm 5$  km/h die geringsten Änderungen der Sinkgeschwindigkeit des Fluges im motorlosen Gleitflug. Im Kraftflug kann approximativ die gleiche Polare verwendet werden, wenn man die rechte Skala für die Steiggeschwindigkeit benutzt und im Bereich um 90 km/h das gestrichelte Polarenstück verwendet. Hier liegen die Verhältnisse wesentlich günstiger, indem die Variation der Vertikalgeschwindigkeit bei Fahrtänderungen um 90 km/h herum noch geringer werden, denn bei 90 km/h befindet sich das Extremum der Kraftflugpolaren. Da sämtliche Meßflüge mit konstanter Motorleistung geflogen werden, ist dieser Teil der Kraftflugpolaren von größtem Interesse. Gelingt es nämlich, mit einer der o.a. Flugmethoden, auch beim Durchflug durch starke konvektive Elemente die Fahrtschwankungen um 90 km/h in einem Bereich von  $\pm 5$  km/h zu halten, dann hat man die Gewähr, daß die durch die Polare gegebenen aerodynamisch bestimmten Variationen der Vertikalgeschwindigkeit in einem Bereich liegen, der weit unterhalb der angestrebten Meßgenauigkeit für die Vermessung der Vertikalgeschwindigkeit der Luft liegt. Man kann der Polaren entnehmen, daß unter diesen Verhältnissen etwa 1 bis 2 cm/s aerodynamische Vertikalbewegung zu erwarten ist. Man erkennt anhand der Abb.2 weiter, daß sich diese Verhältnisse verschlechtern, wenn man zu höheren Fluggeschwindigkeiten übergeht, wobei man noch beachte, daß die Skala der Ordinate logarithmisch geteilt ist.

Auf der Kenntnis dieser Verhältnisse wurde bei den Thermikuntersuchungen fast ausschließlich eine Fluggeschwindigkeit von 90 km/h (25 m/s) gewählt, und nur in Ausnahmefällen, bei denen es auf das Abfliegen größerer horizontaler Strecken ankam, mit Fluggeschwindigkeiten um 110 km/h geflogen. Erfahrungsgemäß ergab sich, daß sich bei Fluggeschwindigkeiten um 90 km/h und unter Verwendung der Flugmethode "constant attitude" (zweite Methode) die besten Bedingungen ergaben, um die Struktur der Thermik, d.h. die Struktur des Feldes der Vertikalgeschwindigkeit innerhalb eines Thermikelements, optimal zu erfliegen.

Diese Erfahrungen wurden durch theoretische Untersuchungen der folgenden Art gestützt. Und zwar wurde zunächst die Methode der Konstanthaltung aller Steuer in folgender Weise theoretisch untersucht: Vorgegeben wurde ein idealisiertes Profil der Vertikalbewegung eines Aufwindgebietes in der folgenden Form

$$(1) \quad v_z(t) = (1 - \cos \omega t) \frac{v_{z, \max}}{2}$$

Mit  $v_z$ : Vertikalgeschwindigkeit der Luft als Funktion der Flugzeit nach Einflug in die Bö,  $\omega$ : vorgegebbarer Parameter und  $v_{z, \max}$ : Maximale Vertikalgeschwindigkeit in der Bö. Der angewendeten Theorie (SCHÖNLEBER, Technische Universität Berlin, persönliche Mitteilung, 1976) lagen folgende Voraussetzungen zugrunde: Neben der Voraussetzung eines symmetrischen und starren Flugzeuges wurde vor allem noch vorausgesetzt, daß das Flugzeug neben Vertikalbewegungen nur noch Nickbewegungen, d.h. Schwingungsbewegungen um die Querachse ausführt, was eine Beschränkung der Bewegung des Flugzeuges auf die XZ-Ebene zur Folge hat. Dazu tritt die Voraussetzung, daß es sich um im Sinne der Störungstheorie kleine Abweichungen vom stationären Flugzustand handeln soll.

Auf das System der in der Theorie verwendeten aerodynamischen Störungsgleichungen soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden. Es sei nur bemerkt, daß es in der für den Motorsegler ASK 16 verwendeten Form ursprünglich für die Behandlung des Einschwingverhaltens des "Airbus" beim Durchflug durch Böen des in Gleichung (1) angegebenen idealisierten Typs entwickelt wurde. In der folgenden Abb.3 ist im oberen Teil die idealisierte Böe so dargestellt, wie sie vom Flugzeug durchflogen wird.

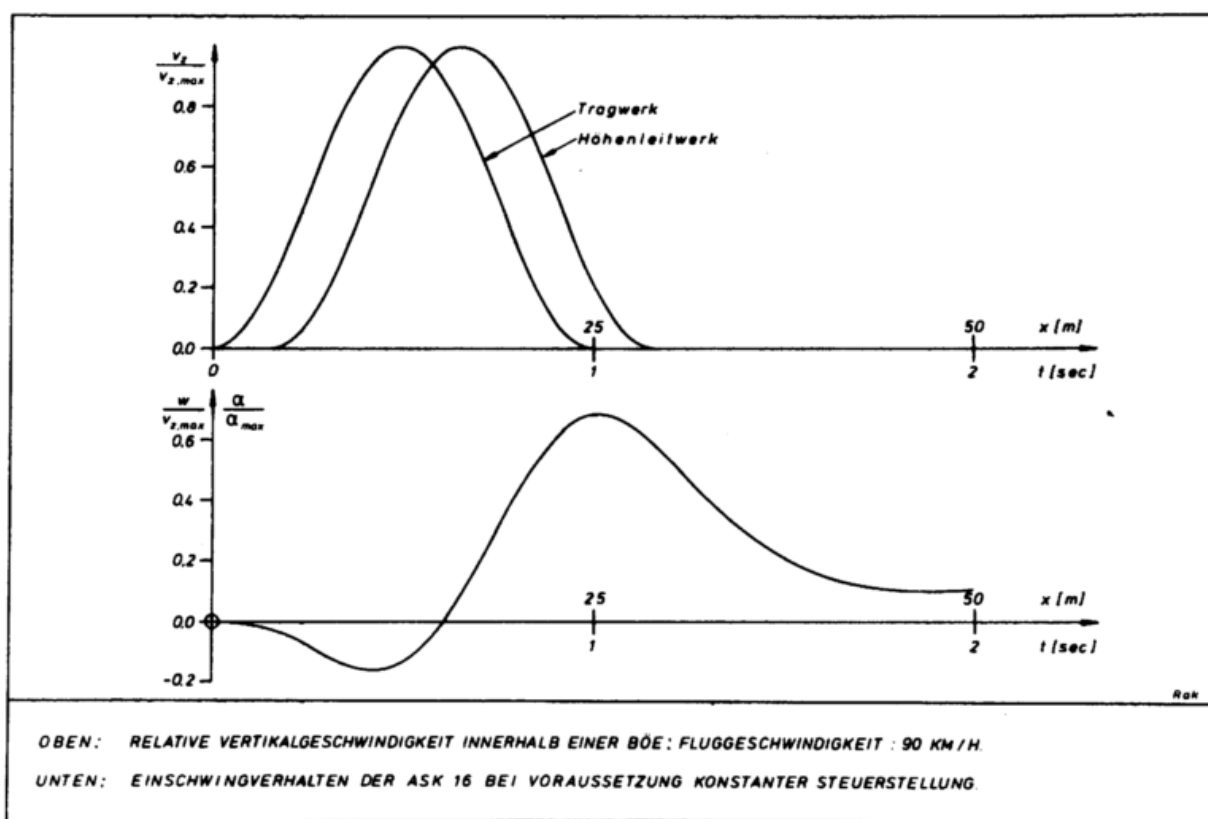


Abb.3 Einschwingverhalten der ASK 16 beim Durchflug von Böen unterschiedlicher Durchmesser.

Die Bö erfaßt zunächst das Tragwerk und, in Abhängigkeit von der Fluggeschwindigkeit und dem Abstand zwischen Tragwerk und Höhenleitwerk (4,6 m), zeitlich verschoben das Höhenleitwerk selbst. Durch diese Verhältnisse wird das stabilisierende Drehmoment des Höhenruders wirksam und führt zu Drehungen um die Querachse des Flugzeuges. Die Bewegung des Flugzeuges im Raum unter der Wirkung der Vertikalgeschwindigkeit der Luft, der gerade erzeugten Anstellwinkel und aller sonstigen aerodynamischen Parameter wird im unteren Teil der Abb.3 wiedergegeben, wobei die Ordinate entweder als Maß für die Vertikalgeschwindigkeit des Flugzeuges oder als Maß für den Anstellwinkel, und somit auch für die Fahrtänderungen des Flugzeuges, angesehen werden können. Im wiedergegebenen Beispiel der Abb.3 ist die Beschriftung der Abzisse so vorgenommen worden, daß sie einer Fluggeschwindigkeit von 90 km/h d.h. 25 m/s entspricht. Die geometrische Breite der Bö beträgt im Beispiel 25 m, und sie wird innerhalb von einer Sekunde durchflogen. Kurz nach Einflug in die Bö verringert sich der Anstellwinkel gegenüber demjenigen des horizontalen Kraftfluges und erreicht seinen geringsten Wert, wenn sich das Flugzeug in der ersten Hälfte der räumlichen Ausdehnung der Bö befindet. Dieser Effekt wird bereits durch das stabilisierende Drehmoment des Höhenleitwerks bewirkt, wobei ein Hebelarm von der Länge 4,6 m wirksam wird. Dadurch erfährt das Flugzeug nach Einfliegen in die Bö zunächst eine geringe negative Vertikalbewegung und durch die Verringerung des Anstellwinkels eine Fahrtzunahme. Wie man der Abb.3 entnimmt, ist die Vertikalgeschwindigkeit des Flugzeuges unmittelbar bei Verlassen der Bö am größten und besitzt dabei eine Amplitude, die 70% derjenigen der Bö beträgt. Während dieser Phase des Einschwingvorganges nimmt der Anstellwinkel gegenüber demjenigen des horizontalen Kraftfluges seinen größten Wert an, woraus folgt, daß die

Fahrt den geringsten Wert des gesamten Einschwingvorganges annimmt. Beide Erscheinungen, die Fahrtzunahme beim Einflug in ein Thermikelement und die starke Fahrtabnahme beim Ausflug, sind Segelfliegern seit langem bekannt, so daß unter Berücksichtigung der beim Segelflug vorgenommenen Ausgleichsbewegungen mit Hilfe des Höhenruders das der Abb.3 zu entnehmende Verhalten eines Flugzeuges beim Durchflug durch eine Bö als reell angesehen werden kann. Als besonders bemerkenswert muß die Tatsache gelten, daß der Motorsegler ASK 16 selbst auf eine Bö dieser geringen horizontalen Erstreckung mit Vertikalbewegungen reagiert, die bis zu 70% an diejenige der wirklichen Vertikalbewegung der Bö herankommen, und daß außerdem die Struktur der registrierbaren Vertikalbewegung des Flugzeuges weitgehend derjenigen der natürlichen Bö entspricht. Es besteht lediglich eine zeitliche Verzögerung von etwa 0,6 Sekunden zwischen dem wirklichen Durchfliegen der Bö und einer trägheitslosen Anzeige der Vertikalbewegung des Flugzeuges. Das weitere Einschwingverhalten des Flugzeuges geschieht aperiodisch erst nach längerer Zeit.

In weiteren numerischen Experimenten wurden die Dimensionen der durchflogenen Böen schrittweise verändert und zwar so, wie es Abb.4 erkennen läßt. Der Fall der Böenbreite der Abb.3 ist als Fall Nr. 1 noch einmal mit aufgenommen und zeigt den weiteren Einschwingvorgang des Flugzeuges für diesen Fall. Daneben sind Böenbreiten von 50 m, bzw. 200 m mit den dazugehörigen Vertikalgeschwindigkeiten (bzw. Anstellwinkeln) dargestellt. Hierbei wird erkennbar, daß die vom Flugzeug durchgeführte Vertikalbewegung sich umso mehr derjenigen der Luft angleicht, je breiter die Bö selbst ist. Bei einer Böenbreite von 50 m wird bereits 80% der Vertikalbewegung der Luft durch die Flugzeugbewegung repräsentiert. Bei einer Böenbreite von 200 m (voll entwickeltes

Thermikelement) kann davon ausgegangen werden, daß nach einer kurzen Einschwingperiode das Flugzeug die Vertikalbewegung der Luft voll mitmacht. Die Zeitdifferenz

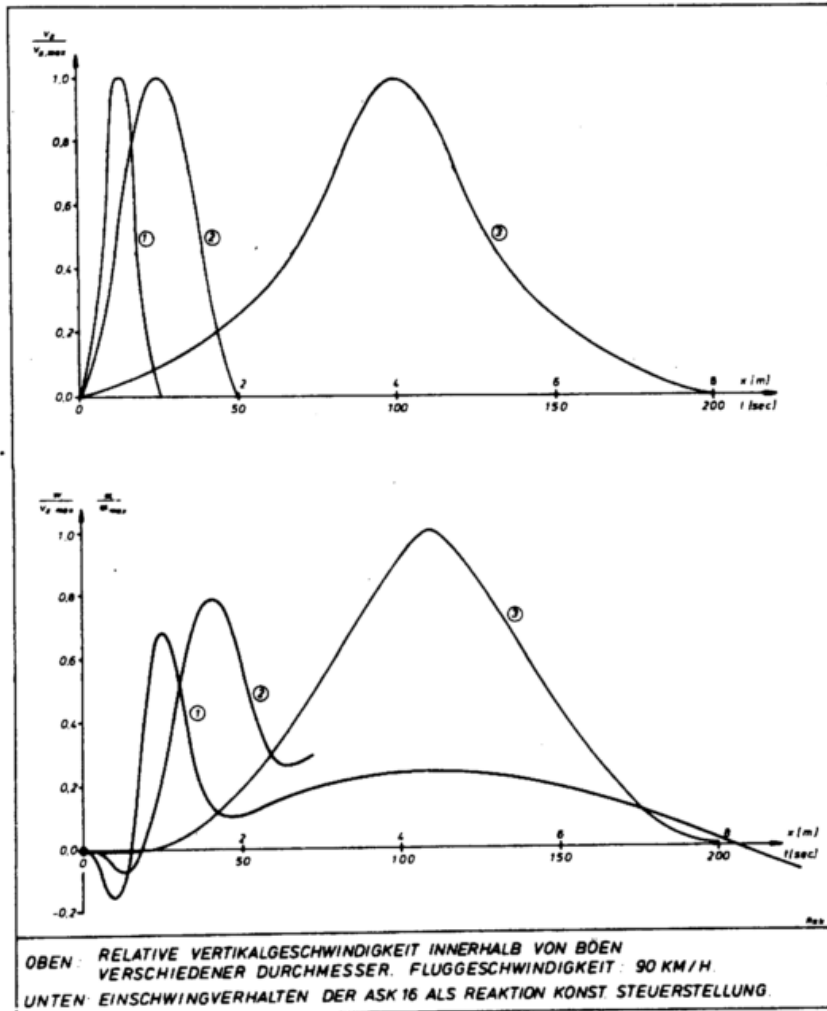


Abb.4 Einschwingverhalten der ASK 16 beim Durchflug von Böen unterschiedlicher Durchmesser.

zwischen dem Maximum der Vertikalbewegung innerhalb der Bö und derjenigen, die das Flugzeug repräsentiert, beträgt in allen Fällen etwa 0,6 Sekunden. Diese Zeit dürfte somit eine charakteristische Zeitkonstante des Motorseglers ASK 16

bezüglich seines Ansprechverhaltens auf Vertikalbewegungen der Luft sein, wenn die Flugmethode des Typs 1 (keine Steuerbewegungen) angewendet wird. Diese Tatsache rechtfertigt aber die Auswahl des Meßträgers und bestätigt alle Vermutungen, die bei dieser Auswahl aufgrund von segelfliegerischen Erfahrungen vorlagen.

In der Praxis sehen diese Verhältnisse noch wesentlich günstiger dadurch aus, daß der Pilot nicht nach der Methode konstanter Steuerstellung fliegt, sondern, wie bereits angedeutet, geringe Ausgleichsteuerbewegungen im Sinne der Methode "constant attitude" durchführt. Dadurch werden die Verkleinerungen der Anstellwinkel beim Einfliegen in eine Bö verringert, was mit einer Verringerung der Fahrtzunahme verbunden ist, und außerdem wird beim Ausflug aus der Bö die starke Vergrößerung des Anstellwinkels und damit auch die Fahrtabnahme verhindert. Durch geringe Steuerausschläge ist es somit möglich, das in den Abb.3 und 4 dargestellte Einschwingverhalten zu dämpfen, ohne daß dabei der zentrale Verlauf der Registrierung der Vertikalgeschwindigkeit verändert wird. Insbesondere wird auch das lange Ausschwingverhalten, das in Abb.4 zu erkennen ist, verhindert. Man kann als Resultat dieser Untersuchungen davon ausgehen, daß das Flugzeug ASK 16 mit einer Zeitkonstante von weniger als 1 Sekunde den Vertikalbewegungen der Luft folgt, wobei aus Trägheitsgründen alle konvektiven Schwankungen mit Böenbreiten unterhalb 50 m amplitudenmäßig nicht voll wiedergegeben werden können, jedoch alle größeren mit einer Amplitudentreue von mindestens 80%. Durch Verwendung eines Hochpaßfilters sollte man alle konvektiven Schwankungen mit Wellenlängen unterhalb etwa 50 m ausfiltern, wobei Wellenlängen in der Größenordnung von 100 m (Böenbreite 50 m) voll interpretiert werden. Dies ist in der Praxis auch immer durchgeführt worden.

Trotz dieses an sich schon sehr günstigen Ergebnisses wurde im Verlaufe des Forschungsvorhabens versucht, durch geeignete Korrekturverfahren aus der Registrierung der Beschleunigung sowie des Nickwinkels Korrekturen zu berechnen, die eine rechnerischere Verbesserung der vom Flugzeug ermittelten Vertikalgeschwindigkeit erlauben. Im einfachsten Falle geht man hierbei von der Auftriebsformel

$$(2) \quad Mg = F c_A \frac{\rho}{2} v_F^2$$

aus und verwendet sie in differentieller und geeignet umgeformter Gestalt

$$(3) \quad v_z = W + \frac{M \Delta g}{F \frac{\partial c_A}{\partial \alpha} \frac{\rho}{2} v_F} - \frac{2Mg \Delta v_F}{F \frac{\partial c_A}{\partial \alpha} \frac{\rho}{2} v_F^2} - v_F \Delta \alpha$$

als Korrekturgleichung zur Berechnung der realen Vertikalgeschwindigkeit aus den Registrierungen von Flug- und Vertikalgeschwindigkeit, Beschleunigung und Nickwinkel. In den Gleichungen (2) und (3) bedeuten:  $M$  = Masse des Flugzeuges,  $g$  = Schwerebeschleunigung,  $\rho$  = Luftdichte,  $v_F$  = Fluggeschwindigkeit (Fahrt),  $c_A$  = Auftriebsbeiwert des Tragflügels,  $F$  = Gesamtfläche des Tragwerks,  $\alpha$  = Nickwinkel.

Die Vertikalgeschwindigkeit der Luft setzt sich somit aus vier Anteilen zusammen:

1. Aus der Vertikalgeschwindigkeit des Flugzeuges, das infolge seiner Trägheit nicht sofort den Vertikalgeschwindigkeiten innerhalb einer Bö folgt;
2. Aus einem von der Massenträgheit bestimmten Ausgleichseffekt;
3. Aus einem Anteil, der die Wirkung von Horizontalgeschwindigkeitsänderungen beschreibt;

4. Aus einem Einfluß, der von den Nickwinkeländerungen herrührt und der in der vorher beschriebenen theoretischen Analyse den wesentlichen Teil der Effekte brachte.

Durch Gleichung (3) wird jedoch nicht der Einfluß der Vertikalbewegung der Luft relativ zum Flugzeug beschrieben, der besonders im kürzeren Wellenlängenbereich und bei wachsender Trägheit des Flugzeuges von großer Bedeutung ist.

Die durch Formel (3) beschriebene Korrektur der Vertikalgeschwindigkeit aus registrierten Flugdaten verbessert die durch das Variometer gelieferte Vertikalgeschwindigkeit erheblich, wie im folgenden noch gezeigt werden wird. Es kann hier angemerkt werden, daß sich bei diesem Korrekturverfahren die Zeitkonstante des Flugzeuges in derselben Größenordnung ergibt, wie sie in den theoretischen Untersuchungen herauskam. Darüberhinaus gelingt aber eine weit bessere Korrektur der Amplituden der Vertikalgeschwindigkeit auch in den kleinräumigen Wellenlängenbereich hinein, so daß es gelingt, die Ergebnisse der theoretischen Betrachtungen fliegerisch und meßtechnisch entscheidend zu verbessern.

In der Praxis muß noch die Trägheit des verwendeten elektronischen Differentialvariometers berücksichtigt werden. Dessen Zeitkonstante liegt bei 0,4 Sekunden, so daß sich als Differenz zwischen der Vertikalgeschwindigkeitsregistrierung und derjenigen, die in der Atmosphäre vorhanden war, maximal etwa 1 Sekunde ergibt. Bei der digitalen Datenverarbeitung wird diese Korrektur aus den gemessenen Daten gemäß Gleichung (3) laufend durchgeführt und gibt in Abhängigkeit von der Struktur des Vertikalgeschwindigkeitsfeldes variierende Zeitkonstanten, wobei man jedoch unter

allen Bedingungen von einem Mittelwert in der Größenordnung von 0,8 ausgehen kann.

Während der Testperiode, die nach Auslieferung des Flugzeuges durchgeführt wurde, wurde das o.a. Korrekturverfahren extremen Verhältnissen folgender Weise ausgesetzt: Vom Piloten wurde durch Betätigung des Höhenruders eine extreme Variation der Vertikalgeschwindigkeit des Flugzeuges vorgenommen. Dabei wurden Vertikalgeschwindigkeiten zwischen rund  $\pm 4$  m/s erzeugt. Der folgenden Abb.5 ist zu entnehmen,

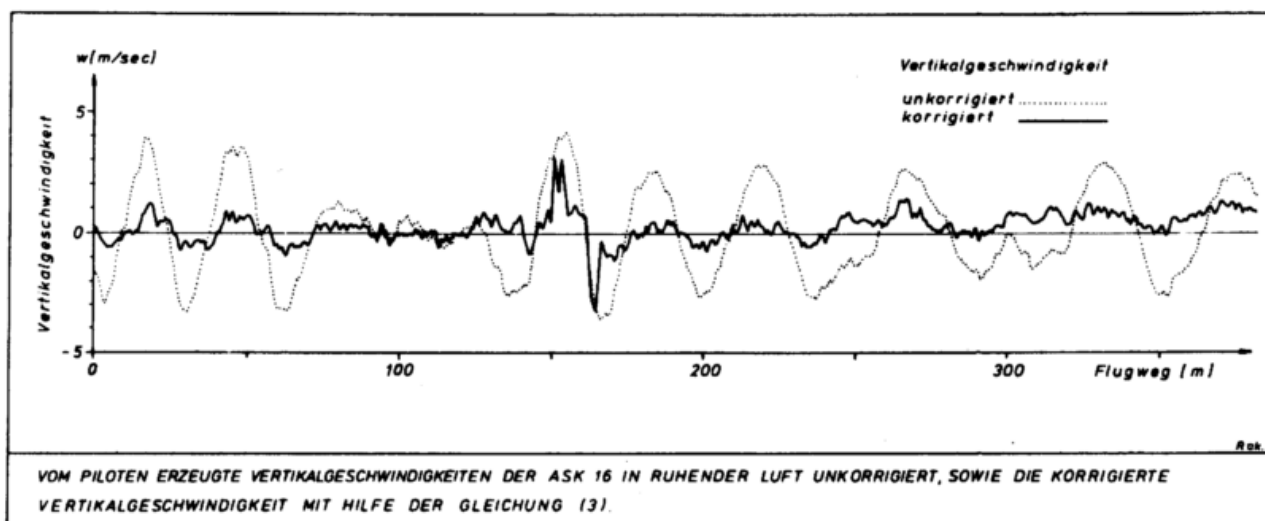


Abb.5 Wirkung des Korrekturverfahrens der Gleichung (3) bei willkürlichen Steuerbewegungen in ruhender Luft.

daß diese Variationen der Vertikalgeschwindigkeit des Flugzeuges in rascher Folge durchgeführt wurden. Da das verwendete Korrekturverfahren die Vertikalgeschwindigkeit der Luft aus den Flugdaten berechnet, mußte dieses Experiment in völlig ruhender Atmosphäre durchgeführt werden, und es mußte erwartet werden, daß das Korrekturverfahren für die Vertikalgeschwindigkeit der Luft den exakten Wert Null ergibt. Daß dies im überwiegenden Teil der Registrierung der Abb.5 recht befriedigend der Fall ist, erkennt man sehr gut, mit Ausnahme des Mittelteils der Abbildung, wo durch Überziehen des Flugzeuges, d.h. infolge Unterschreitung der Mindestgeschwindigkeit, Verhältnisse entstanden, die das Korrekturverfahren nicht anwendbar machten. Unter diesen extremen, vom Piloten erzeugten Vertikalbewegungen des Flugzeuges werden nur sehr gedämpfte virtuelle Vertikalgeschwindigkeiten der Luft produziert, die die Größenordnung von 1 m/s nicht überschreiten. Wenn man bedenkt, daß bei realen Meßflügen Ruderbewegungen von seiten des Piloten weitgehend vermieden werden, dann kann man annehmen, daß das Korrekturverfahren unter realen Bedingungen optimal arbeiten müßte. Dies ist auch aus Abb.6 zu ersehen, bei der es sich um einen Thermikmeßflug handelt. Man erkennt, daß die Verläufe zwischen unkorrigierter und korrigierter Vertikalgeschwindigkeit sehr ähnlich verlaufen und außerdem, daß die bereits mehrfach erwähnte Differenz im zeitlichen Ablauf zwischen der unkorrigierten und der korrigierten Vertikalgeschwindigkeit deutlich erkennbar ist. Bei Betrachtung der Abb.6 beachte man, daß die Registrierung der unkorrigierten Vertikalgeschwindigkeit gegenüber der korrigierten nach oben verschoben ist, um die Unterschiede zwischen beiden Registrierungen besser kenntlich zu machen.

Abschließend kann festgestellt werden, daß es möglich ist, mit dem Motorsegler ASK 16, in Verbindung mit einer digitalen

Datenerfassung und entsprechenden Korrekturprogrammen, die wirkliche Vertikalgeschwindigkeit der Atmosphäre mit einer relativ hohen Auflösung zuverlässig zu messen. Die Auflösung geht aufgrund des Korrekturverfahrens bis in Bereiche hinein, die knapp unterhalb derjenigen Scales liegen, die der Konvektion angehören.

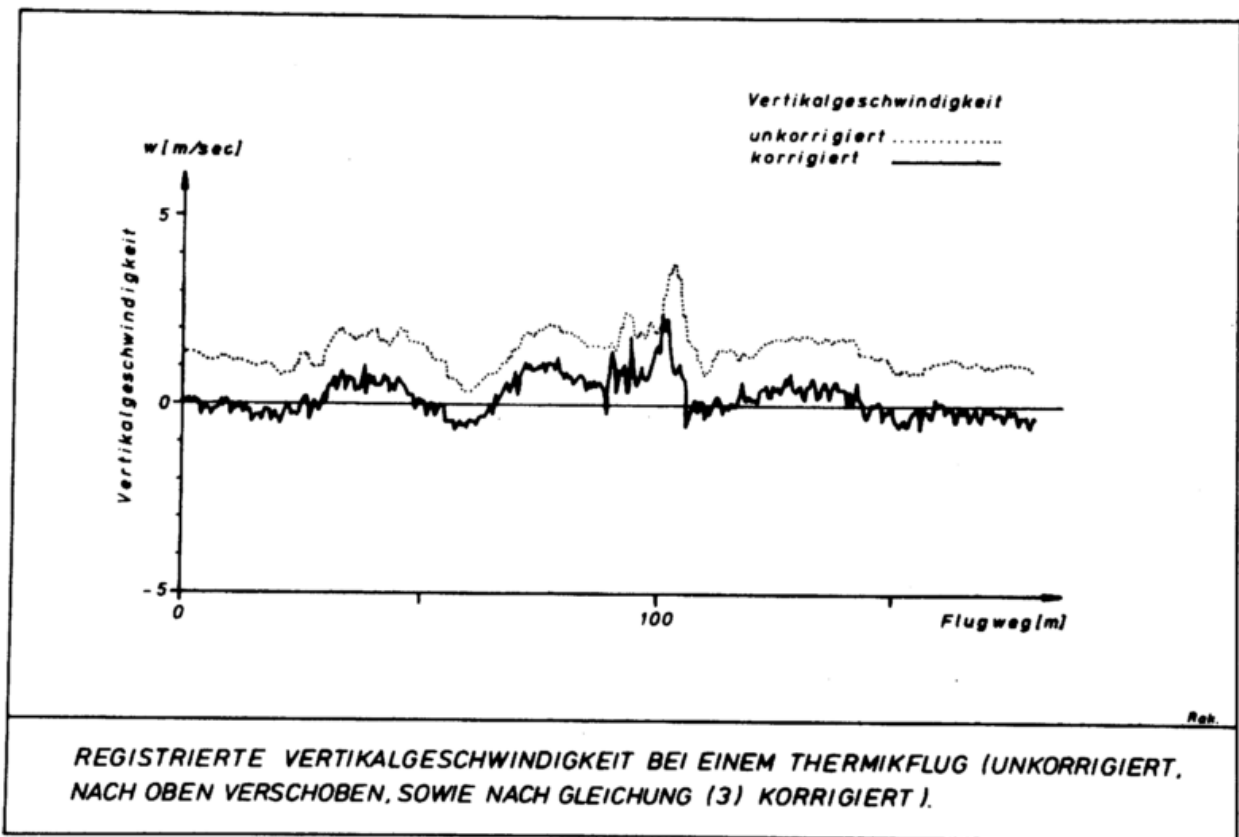


Abb.6 Wirkung des Korrekturverfahrens der Gleichung (3) bei einem realen Thermikmeßflug.

### 2.3 Anforderungen an die Meßfühler und an die Datenerfassung

Für alle Fühler eines Meßsystems zur Messung der Konvektion muß die Bedingung gleicher Ansprechcharakteristik erfüllt sein. Der Erfüllung dieser Bedingung wurde bei der Auswahl der Meßfühler große Bedeutung zugemessen. Aus Gründen, die aus dem Scale der Konvektion abzuleiten sind, ist außerdem eine relativ hohe Meßfrequenz erforderlich. Im vorigen Kapitel war ausgeführt worden, daß Aufwindgebiete der Luft durch die Eigenbewegung des Flugzeuges in Verbindung mit geeigneten Korrekturprogrammen fehlerfrei vermessen werden können. Zur Anwendung der Korrekturprogramme benötigt man jedoch eine höhere Meßfrequenz für die in den Gleichungen (2) und (3) auftretenden Parameter. Unabhängig von den 1972 verfügbaren Datenerfassungssystemen wurde deshalb bei allen Fühlern gleichmäßig eine Abfragefrequenz von 10 Hz angestrebt, eine Leistung, die fast alle in Abb.8 angegebenen Fühler erbringen.

Der folgenden Abb.7 sind der Höhengewinn sowie die Verweilzeit des Flugzeuges beim Durchflug von Aufwindgebieten verschiedener Durchmesser unter Zugrundelegung einer Flugeschwindigkeit von 90 km/h (25 m/s) zu entnehmen. Hierbei dient das mittlere Steigen des Flugzeuges im Aufwindgebiet als Parameter. Nimmt man z.B. in kräftiger Thermik innerhalb eines Thermikelementes ein mittleres Steigen von 2 m/s an (dem entspricht ein maximales Steigen von etwa 4 m/s), und ordnet diesem Aufwindgebiet einen realistischen Durchmesser in der Größenordnung von etwa 400 m zu, dann gewinnt das Meßflugzeug beim Durchflug durch das Thermikelement bei einer Thermikverweilzeit von 16 Sekunden nur etwa 30 m Höhe. Je nach Aufnahmefrequenz der Datenerfassungssysteme wären unter diesen Bedingungen unter Zugrundelegung einer Meßfrequenz von 10 Hz maximal 160 Meßwerte erhaltbar. In Hinblick

auf die gestellte Aufgabe kann man dies als eine recht hohe Zahl ansehen. Die um 1972/73 allein auf dem Markt erhältliche batteriebetriebene digitale Datenerfassungsanlage METRODATA DL 620 besitzt im kontinuierlichen Betrieb pro Kanal allerdings nur eine Abfragerate von 4,8 Hz bei einer Gesamtregistrierdauer von einer Stunde. Dadurch halbiert sich die durch die Meßfühler gelieferte Information, und im obigen Beispiel erhielte man eine Zahl von 80 Meßwerten pro Parameter, eine Zahl, die sich in Hinblick auf die Auflösung der Vertikalgeschwindigkeit durch die Eigenbewegung des Flugzeuges als völlig ausreichend erweist.

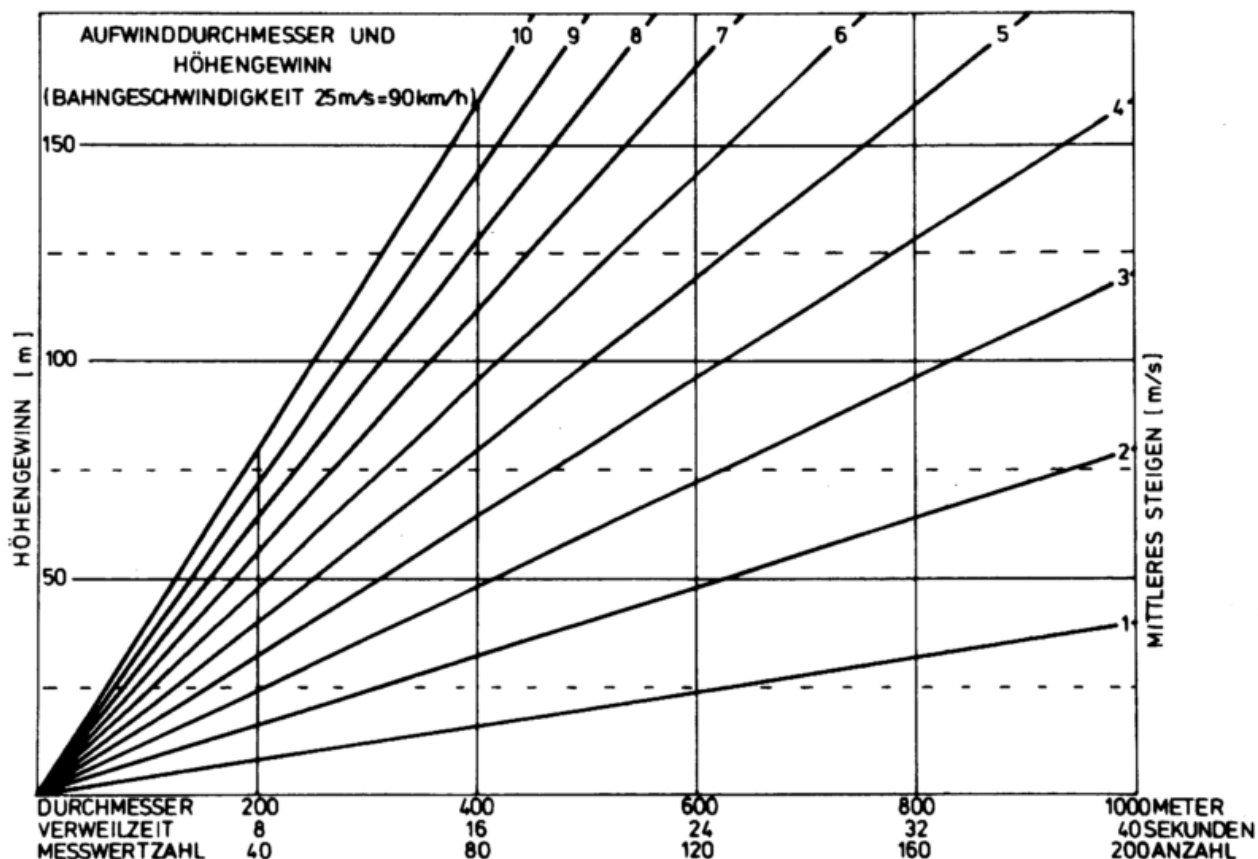


Abb.7 Verweilzeit und Meßwertzahl beim Durchflug von konvektiven Zellen.

Die folgende Abb.8 gibt einen Überblick über das in der ASK 16 verwendete Meßsystem. Es ist zu erkennen, daß die beiden meteorologischen Parameter Lufttemperatur und Luftfeuchte je mit zwei verschiedenen Systemen gemessen werden. Die Temperatur mit einem PT 100 sowie mit einem ROSEMOUNT-Fühler, die Feuchte einerseits über die Dampfdruckmessung mit einem LYMAN-ALPHA und andererseits über die Messung der relativen Feuchte mit dem VÄISÄLÄ HUMICAP. Diese Kombination von Meßfühlern dient der Erhöhung der Redundanz des gesamten Systems und erlaubt durch Vergleich der Meßergebnisse verschiedener Fühler einen Rückschluß auf die Genauigkeit des ganzen Systems. Aus der Messung von Druckwerten

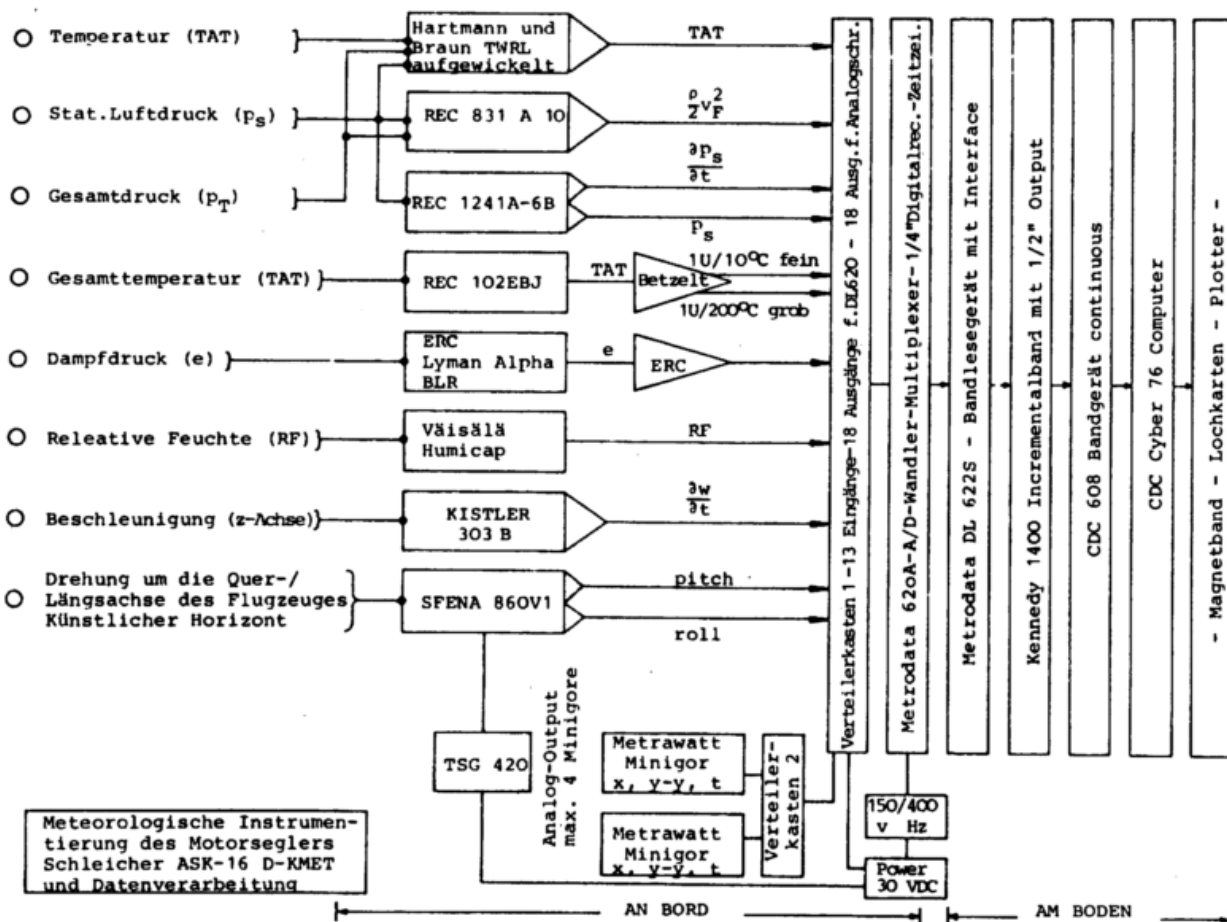


Abb.8 Schematische Darstellung des Gesamtmeßsystems.

wird nach bekannten Verfahren die Fahrt ermittelt sowie aus der zeitlichen Änderung des statischen Luftdruckes mit Hilfe des elektronischen Differentialvariometers die Vertikalgeschwindigkeit des Flugzeuges. Neben einem Gerät zur Messung der Vertikalbeschleunigung des Flugzeuges werden mit Hilfe des künstlichen Horizonts sowohl der Pitch- als auch der Rollwinkel erhalten.

Das Datenerfassungssystem besteht aus der bereits erwähnten digitalen Datenerfassungsanlage METRODATA DL 620 sowie aus vier batteriebetriebenen Linienschreibern vom Typ METRAWATT MINIGOR. Die digitale Datenerfassungsanlage besitzt 18 Kanäle und erfaßt nicht nur die in dem Diagramm angegebenen Meßgrößen, sondern auch noch Daten, die der Organisation des gesamten Datenfalls dienen. Ein Verteilerkasten erlaubt die wahlweise Ansteuerung von insgesamt vier Meßgrößen zum Zwecke der analogen Aufzeichnung auf den Linienschreibern MINIGOR.

Die folgende Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Meßparameter und die Kenngrößen der in Abb. 8 angegebenen Meßfühler. Bezüglich der Zeitkonstanten erkennt man, daß die Messung von Staudruck, statischem Druck, Beschleunigung, Temperatur und Dampfdruck der eingangs gestellten Bedingung genügt. Lediglich die Messung der Vertikalgeschwindigkeit mit Hilfe des elektronischen Differentialdosenvariometers und die Messung der relativen Feuchte mit dem VÄISÄLÄ-HUMICAP besitzen größere Zeitkonstanten. Auch die früher erwähnten Werte für die Auflösung charakteristischer Parameter werden sämtlich durch die in Tabelle 1 angegebenen Fühler erfüllt. Es kann somit festgestellt werden, daß der Motorsegler ASK 16 in Verbindung mit den in ihm verwendeten Fühlersystemen ein in sich abgerundetes Gesamtmeßsystem bildet, das optimal an die gestellte Aufgabe angepaßt erscheint.

TABELLE 1

**ÜBERSICHT ÜBER MESSPARAMETER UND KENNGRÖSSEN  
DES SYSTEMS MOTORSEGLER ASK 16, D-KMET**

Vertikal- und Horizontalsondierung  
Fluggeschwindigkeit 90 ... 120 km/h

Gemessene Parameter deren Kenngrößen	Staudruck	statischer Druck	Vertikalgeschwindigkeit	Beschleunigung	Temperatur 2 x	Feuchte	Nick- und Rollwinkel	Relative Feuchte
Fühlerart	Dose	Dose	Dose differ.	Servo- pendel	Platindraht offen	Strahlungs- absorption	Kreisel	Absorption
Meßbereich	0 ÷ 160 km/h	-300 ÷ 3000 m	+7,5 m/s	± 2 g	± 100 ° C	2 - 28 mb	±10/±20°	0-98%
Zeitkonstante	0,025 s	0,05 s	0,55 s	0,02 s	0,1 s	0,01 s	0,05 s	0,8 s
Auflösung der Registrierung	0,16 km/h	0,1 m	0,0075 m/s	0,01 g	0,005 ° C	0,03 mb	0,01/0,02°	0,1 %
Horizontale Auflösung	10 m	10 m	2,5 m	2,5 m	2,5 m	5 m	10 m	5 m
Absolutgenauigkeit	0,1 km/h	10 m	0,05 m/s	0,005g	0,3°C z.z.	0,5 mb	0,25 °	2 %
Art der Registrierung: Digital auf Magnetband mit Metrodata DL 620 / 0,1% Genauigkeit max. Analog mit Metrawatt Minigor Batterieschreiber / 1% Genauigkeit								

Software-Korrekturen sind berücksichtigt.

## 2.4 Probleme der Meßstrategie

Im einleitenden Kapitel wurde der Umfang der zu untersuchenden Probleme angegeben. Jetzt soll erörtert werden, wie durch Entwicklung geeigneter Meßstrategien zur Lösung der gestellten Probleme beigetragen werden konnte.

1. Zur Ermittlung der zeitabhängigen Vertikalstruktur der Atmosphäre am festen Ort sind Serienaufstiege in sehr rascher Folge erforderlich. Dabei hatte es sich herausgestellt, daß an konvektiv interessanten Tagen die zeitliche Veränderlichkeit so groß war, daß zwischen jeweils zwei Aufstiegen nicht gelandet werden konnte. Hier bestand die Strategie darin, nach Durchführung eines Aufstieges auf dem Flugplatz nur ein touch-and-go zu machen. Durch Registrierung sowohl des Aufstieges als auch des Abstieges konnte auf diese Art infolge der geringen Steiggeschwindigkeit des Motorseglers innerhalb einer halben Stunde nur ein Auf- und Abstieg im Höhenbereich bis 1500 m durchgeführt werden, so daß sich für die Registrierung auf der digitalen Datenerfassungsanlage, die nur eine Stunde kontinuierlichen Betrieb erlaubt, insgesamt zwei Auf- und zwei Abstiege hintereinander durchführen ließen. Bei Verwendung der analogen Datenerfassung konnte mit weniger Anspruch an die Genauigkeit eine weit längere Aufstiegsreihe erhalten werden. In den meisten Fällen wurden jedoch nach Durchführung einer Zwischenlandung diese Aufstiegsreihen sowohl mit digitaler Datenerfassung als auch mit analoger Datenerfassung über längere Zeiten

hin durchgeführt. Für diese Art der Untersuchung der Vertikalstruktur der Atmosphäre eignet sich der Motorsegler wegen seiner geringen Steiggeschwindigkeit tatsächlich nicht besonders gut. Wie bereits angedeutet worden war, wäre es wünschenswert, diese Aufgabe einem schnell steigenden Sportflugzeug zu überlassen, währenddessen der Motorsegler seine eigentlich Aufgabe, nämlich die Vermessung der individuellen Thermik-elemente, erfüllen kann.

2. Die letztgenannte Problematik macht sich besonders bemerkbar bei der Ermittlung der ortsabhängigen Vertikalstruktur der Atmosphäre für einen "festen Zeitpunkt". Hier hat der Motorsegler nicht nur den vertikalen Aufstieg durchzuführen, sondern er muß auch noch im Horizontalflug diejenige Unterlage erreichen, die sich bezüglich der Thermik in charakteristischer Weise von der zuerst vermessenen unterscheidet. Man kann deshalb nicht von Vertikalsondierungen für eng benachbarte Zeiten an verschiedenen Orten sprechen. Hier bestand die Meßstrategie darin, daß nach dem Aufstieg über dem ersten Untergrund in der Höhe schnell horizontal zur nächsten Unterlage geflogen und dort die Sondierung von oben her durchgeführt wurde. Da es sich bei diesen Messungen um räumliche Unterschiede von etwa 30 km handelte, lag eine Zeitdifferenz von etwa 12 Minuten (bei einer Fluggeschwindigkeit von 150 km/h in der Höhe) zwischen dem Aufstieg über

dem ersten Ort und dem Abstieg am nächsten Ort, so daß der Zeitverlust durch den Horizontalflug gegenüber der Seriensondierung am festen Ort in gewisser Weise ausgeglichen wurde. Mit einer leistungsfähigeren Datenerfassungsanlage ließe sich auf diese Art und Weise eine Serie von Aufstiegen über dem einen Ort und Abstiegen über dem anderen in lückenloser Weise durchführen, und es ließe sich auch die zeitliche Zuordnung der einzelnen Vertikalstrukturen auf interpolatorische Weise sehr gut erhalten.

3. Die Meßstrategie zur Untersuchung der Struktur einzelner konvektiver Zellen bestand in folgendem: Zunächst mußte ein konvektives Element so markiert werden, daß der Pilot des Motorseglers gezielte Horizontaltraversen fliegen konnte. Dies wurde dadurch erreicht, daß ein Mitarbeiter des Projektes mit einem Segelflugzeug in einem konvektiven Element zentriert aufstieg. Für den Piloten des messenden Motorseglers war es dann nicht schwer, seine Traversen so zu legen, daß sie annähernd Durchmesser durch das Zentrum der konvektiven Zelle bildeten. Bei diesen Experimenten zeigte sich, daß bei geeigneter Durchführung des Verfahrens das mittlere Steigen beider Flugzeuge übereinstimmte, und daß somit der vertikale Abstand zwischen beiden Flugzeugen konstant blieb. Das beinhaltete, daß sich beide Flugzeuge stets in derselben Thermikblase befanden und daß somit während des gemeinsamen Aufstieges der Lebenslauf dieses individuellen Thermikelementes von der Höhe an, in der man in dieses eingestiegen war, verfolgt werden konnte. Zur Meßstrategie

dieser Art gehört, daß durch Bodenbeachtung auch die Abdrift während des gesamten Aufstieges festgehalten wird. Zur Veranschaulichung sei auf die Abb.9 verwiesen, bei der die prinzipielle Struktur einer individuellen konvektiven Zelle dargestellt ist. Es scheint möglich zu sein, durch die angegebene Flugmethode die in Abb.9 dargestellte Konvektionszelle fortlaufend in der Nähe der maximalen Vertikalgeschwindigkeit zu traversieren.

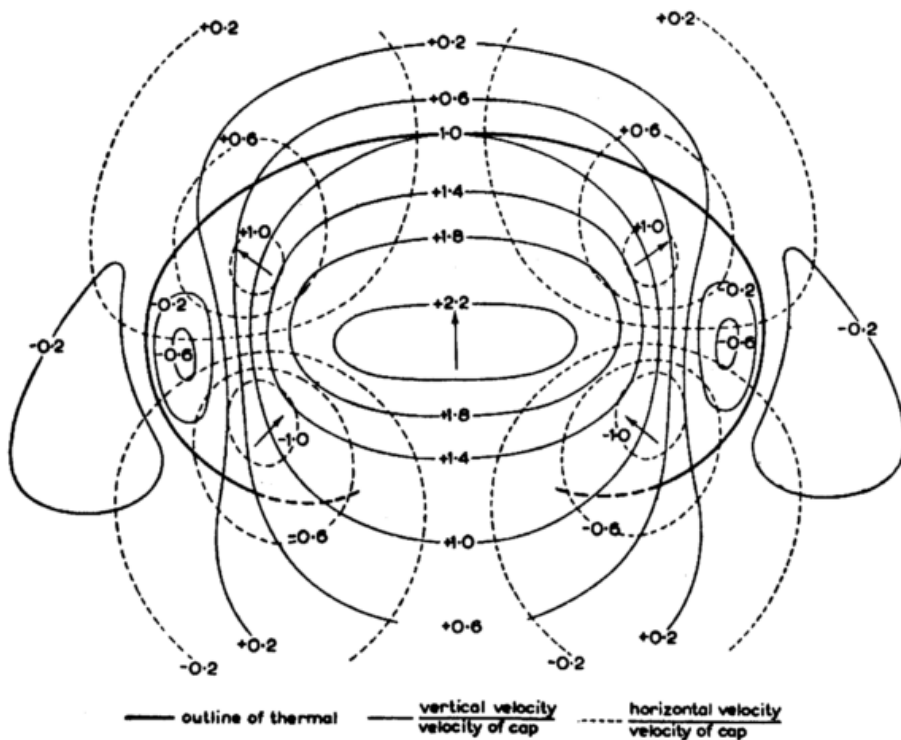


Abb.9 Zirkulation im Querschnitt einer konvektiven Zelle (nach B. WOODWARD).

Die folgende Abb.10 veranschaulicht die Meß- und Flugstrategie, die zur Vermessung der dreidimensionalen Struktur von Kühlturmfahnen verwendet worden ist. Die Grundaufgabe war hier, die Ausbildung der pulsierenden thermischen Konvektion, die als Ganzes eine stationäre Kühlturmfahne aufbaut, in Abhängigkeit von der vertikalen Schichtung der Atmosphäre des großräumigen Scale meßtechnisch zu erfassen. Dabei wurde versucht, durch eine Vielzahl von horizontalen, zur Windrichtung orthogonalen Traversenflügen in vertikal stehenden Querschnittsflächen unterschiedlichen Abstandes

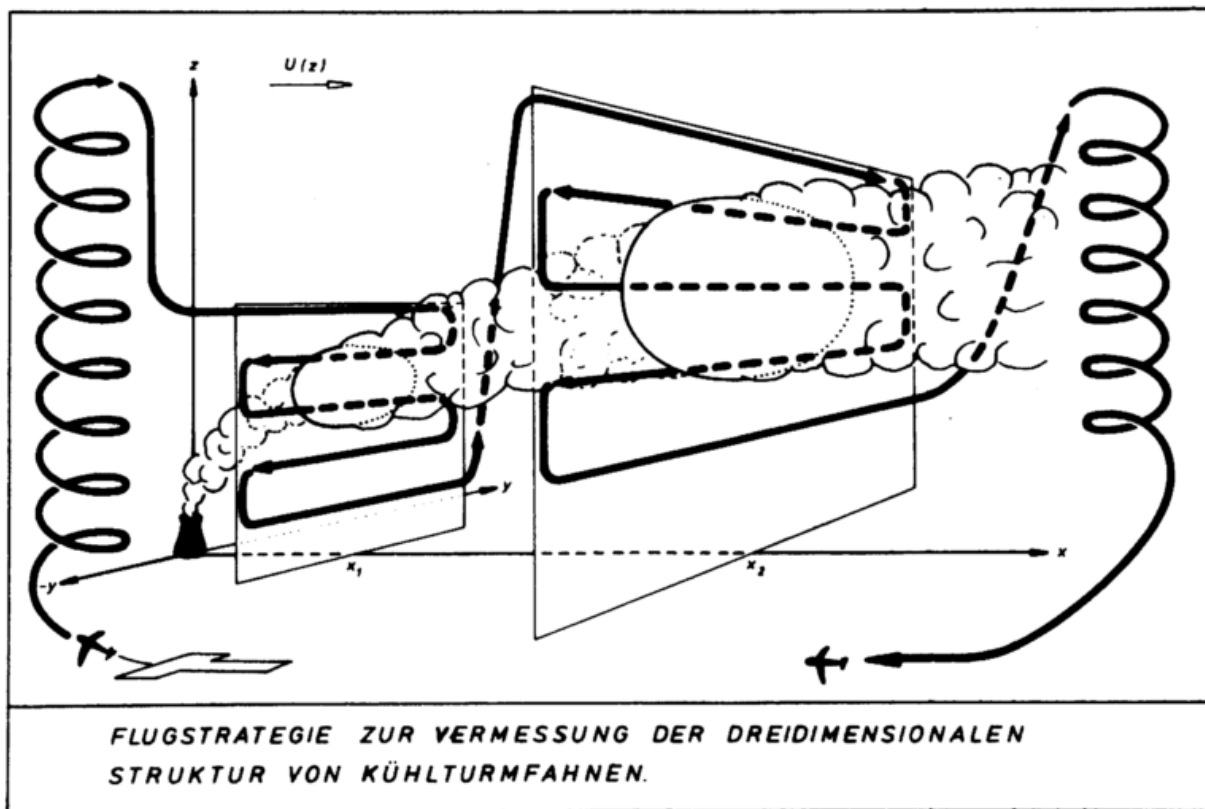


Abb.10 Flugtraversen innerhalb einer Kühlturmfahne.

von der Quelle ein Bild über die dreidimensionale Struktur dieser Kühlturmfahnen zu gewinnen. Wegen der Stationarität des ganzen Vorganges konnte davon ausgegangen werden, daß durch Betrachtung der Verhältnisse in mehreren senkrecht stehenden Querschnittsflächen Aussagen über den Lebenslauf eines mit der mittleren Windgeschwindigkeit  $U(z)$  driftenden und aufsteigenden konvektiven Elements zu gewinnen wären.

Nach Durchführung des ersten feinaerologischen Aufstieges wurde soweit abgestiegen, daß auf der höchsten Quertraverse der erste Kontakt mit der Kühlturmfahne gewonnen werden konnte. In manchen Fällen wurden bis zu 20 Quertraversen in einer Querschnittsebene geflogen, wobei auch Fälle berücksichtigt wurden, in denen in einer Flughöhe mehrmals hin- und hergeflogen wurde, um die zeitliche Variation der konvektiven Zellen am festen Ort untersuchen zu können. Zur Durchfliegung einer Traverse wurde im Mittel etwas mehr als eine Minute benötigt, so daß in etwa einer halben Stunde eine einzelne Querschnittsflächen-Traversierung vorgenommen werden konnte. Der daran anschließende Aufstieg zur obersten Traverse der nächsten Querschnittsfläche benötigte wieder etwa 15 Minuten, und dann lief das Verfahren analog ab. Am Ende einer Anzahl derartiger Querschnittsflächen-Traversierungen folgte ein erneuter feinaerologischer Aufstieg über die nun bekannte Höhe der Kühlturmfahne hinaus und der entsprechende Abstieg mit Rückkehr zum Flugplatz. Bei dieser Meßstrategie kommt der feinaerologischen Sondierung vor und nach der Querschnittsflächen-Traversierung besondere Bedeutung zu, da sich die Vertikalstruktur der Atmosphäre im Verlaufe von zwei Stunden in manchen Fällen schon wesentlich verändert hatte.

5. Die Problematik der Meßstrategie zur Ermittlung der raum-zeitlichen Verteilung konvektiver Zellen in einem größeren Gebiet veranschaulicht Abb.11. Auf der linken Seite der Abbildung ist über einer homogenen Unterlage eine regelmäßige Anordnung von konvektiven Zellen eingezeichnet. In der Natur sind diese Zellen weder räumlich regelmäßig angeordnet noch zeitlich in dieser Weise vorhanden. Trotzdem kann man davon ausgehen, daß bei einer stark konvektiven Wetterlage in verhältnismäßig regelmäßigen Abständen von etwa 2 bis 3 km ein aktives konvektives

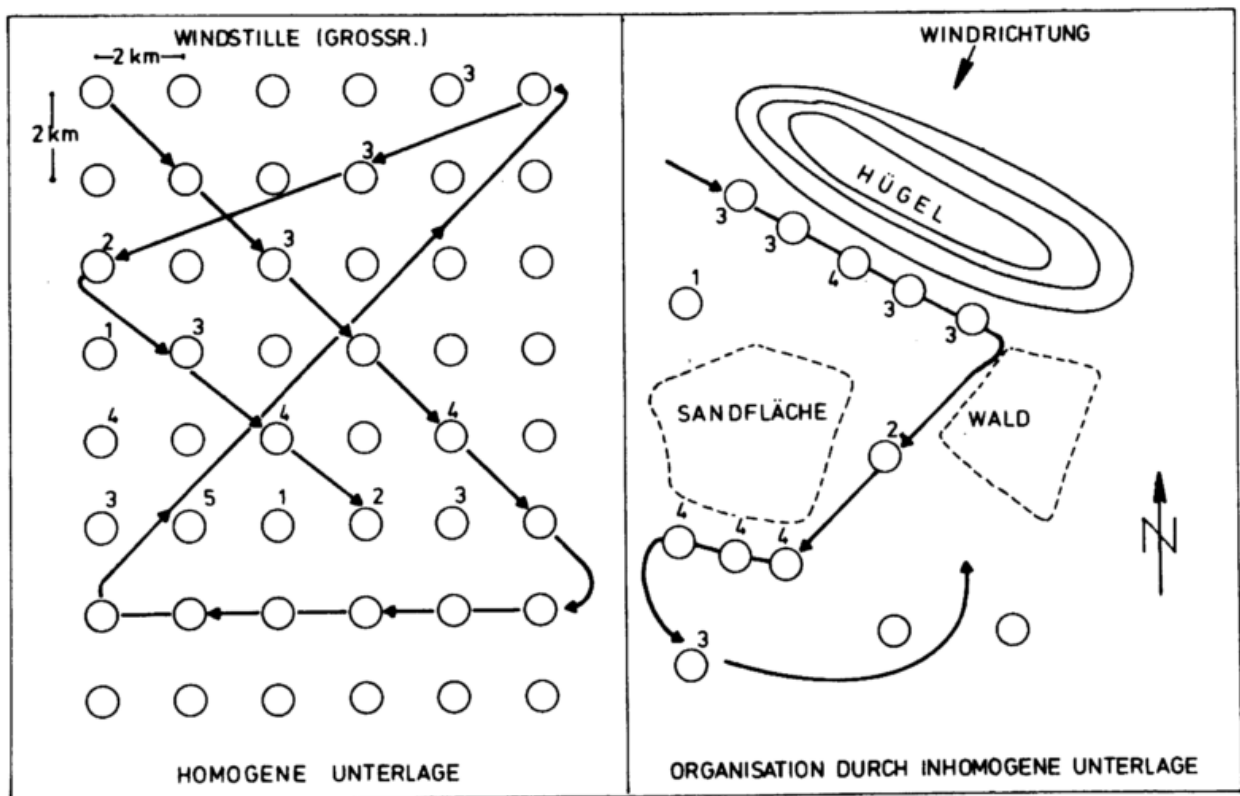


Abb.11 Zum Problem der zweidimensionalen Vermessung der thermischen Konvektion.

Element angetroffen wird. Nimmt man an, daß es sich bei den Verhältnissen in Abb.11 auf der linken Seite um ein Gitterelement eines mesoskaligen Simulationsmodells handelt, dann entsteht die Aufgabe, durch eine geeignete Anordnung der Flugtraversen einen raschen Überblick über die raum-zeitliche Verteilung der konvektiven Zellen zu gewinnen. Mit einem einzigen Flugzeug ist dies natürlich nicht in der erforderlichen kurzen Zeit möglich, besonders nicht mit einem langsam fliegenden Motorsegler. Aus diesem Grund muß versucht werden, aus einer einzigen Traverse den statistischen Charakter der raum-zeitlichen Verteilung der Konvektion in diesem Gebiet zu erfassen. Daß dies nicht unproblematisch ist, erkennt man aus den eingezeichneten Flugtraversen, die, je nach Flugrichtung, jeweils andere statistische Verhältnisse liefern werden. Die Zahlen an den Kreisen sollen symbolisch das mittlere Steigen innerhalb der einzelnen Zellen andeuten.

Um trotz dieser Unsicherheit zu statistisch verlässlichen Aussagen zu gelangen, wurde von T. BLOEM, Freie Universität Berlin, 1976, eine Theorie zur "Bestimmung der Verteilungsfunktion der Durchmesser kreisförmiger Aufwindgebiete aus der Verteilungsfunktion der Längen durchzogener Aufwindstrecken" entwickelt. Diese Theorie führt auf eine ABEL'sche Integralgleichung, deren Lösung angegeben werden konnte. Hierdurch wird die Möglichkeit eröffnet, sich über ebenem und homogenem Gelände die Flugtraverse zur Ermittlung der raum-zeitlichen Struktur der Verteilung konvektiver Elemente fast beliebig auszusuchen.

Vom thermischen Segelflug her ist allerdings bekannt, daß über strukturiertem Gelände ein sehr enger Zusammenhang zwischen dem Auftreten der Thermik und der speziellen Unterlage besteht. Dies soll die rechte Seite der Abb.11 veranschaulichen. So ist z.B. anschaulich klar, daß auf der nach Südwest geneigten Seite des eingezeichneten Hügels bei Nordostwind um die Mittagszeit im Lee des Hügels starke konvektive Aktivität herrschen muß. Eine Traverse im Lee des Hügels wird somit mit hoher Wahrscheinlichkeit die Kette der dort entstehenden konvektiven Zellen erfassen. Aber auch noch andere charakteristische Beschaffenheiten der Erdoberfläche lassen auf mehr oder weniger starke Entwicklung von thermischer Aktivität schließen. Z.B. wird man bis zur Mittagszeit über Waldgebieten keine Thermik erwarten, wohl aber wiederum im Lee von großen Sandflächen. Die in der Abb.11 eingezeichnete Traverse würde z.B. auch von einem erfahrenen Segelflieger gewählt werden, der bestrebt ist, sich möglichst lange in der Luft zu halten. Verfährt man bei der Meßfliegerei zur Ermittlung des Zusammenhanges zwischen Unterlage und Thermik genau wie es ein Segelflieger aus seiner Erfahrung heraus tun würde, dann hat man die Gewähr, eine weitgehend optimale Meßstrategie gewählt zu haben.

6. Die Meßstrategie zur Ermittlung des Einflusses der raum-zeitlichen Variabilität der thermischen Konvektion auf die großräumige Wetterlage und eventuell auf das Lokalklima lehnt sich eng an diejenige an, die zur Vermessung der Kühlturmthermik verwendet worden ist. Hier wählt man sich ebenso eine ausgezeichnete

vertikale Fläche, z.B. quer über den Oberrheingraben, und fliegt horizontale Meßtraversen in möglichst vielen, übereinanderliegenden Höhen. Gleichzeitig muß, gesondert, durch ein zweites Flugzeug die Feinaerologie gemessen werden, da für die Horizontaltraversierungen, je nach Größe des Gebietes, wesentlich mehr Zeit gebraucht wird als dies bei den Kühlturmfahren der Fall war. Benötigte man für eine Traversierung in einer Kühlturmfahne etwa 1 Minute, so ist im Mesoscale bei Traversenlängen von 30 km und Fluggeschwindigkeiten um 110 km/h mit bis zu 20 Minuten für eine einzelne Traverse zu rechnen. In der Praxis lassen sich aufgrund der begrenzten Aufnahmekapazität der Datenerfassungsgeräte innerhalb einer bis eineinhalb Stunden nur drei bis vier Traversen in einer Vertikalebene vermessen. Um zu statistischen Aussagen zu kommen, muß man sich während einer ganzen Reihe von Meßkampagnen auf den gleichen Querschnitt beschränken.

7. Ein die Meßstrategie des Punktes 6 ergänzendes Programm betrifft die Traversierung entlang der Seitenflächen eines horizontalen Gitterelements. Eine derartige Traversierung wird man so legen, daß die Ränder charakteristische topographische Besonderheiten mitenthalten. Derartige Traversierungen erfordern etwa die gleiche Zeit wie diejenigen in einer vertikal stehenden Querschnittsfläche. Mit einem einzigen Flugzeug ist es wiederum unmöglich, eine derartige Traversierung gleichzeitig in mehreren Höhen durchzuführen, was durchaus von Vorteil wäre.
8. Vielfach treten besondere charakteristische meteorologische Phänomene kombiniert mit der thermischen Konvektion auf. Es war schon erwähnt worden, daß der

Wechselwirkung zwischen der Konvektion und grösser-skaligen Phänomenen eine erhebliche Bedeutung zukommt. Hierbei wird insbesondere an Leewellen-Systeme, an Wolkenstraßen und an spezielle Verhältnisse im Gebirge gedacht. Über die bei diesen Phänomenen anzuwendenden Meßstrategien läßt sich keine allgemeine Aussage machen. In der Praxis wurde die Strategie der Messung zu Beginn des Meßfluges entwickelt, nachdem die Beobachtungen auf den Analogschrieben charakteristische Phänomene gezeigt hatten. Es handelt sich aber in allen Fällen stets um horizontale Traversenflüge, deren Anordnung im Raum so gewählt wird, daß die erwähnte Wechselwirkung zwischen diesen Phänomenen und der Konvektion erfaßt werden kann.

## 2.5 Probleme der Datenverarbeitung

Während der Laufzeit des Forschungsvorhabens wurden bei jedem Meßflug gleichzeitig bis zu 12 Datenreihen registriert. Dabei handelte es sich um direkt gemessene Daten, bzw. um solche, die bereits im Flugzeug aus gemessenen Daten gewonnen wurden. Unter Zugrundelegung einer Abfragerate von 4,8 Hz wurde somit pro Stunde Meßflug eine Zahl von ziemlich genau 200.000 Einzeldaten gewonnen. Im Durchschnitt über alle durchgeführten Meßkampagnen konnte pro Meßkampagne mit einem Datenanfall in der Größenordnung von  $5 \times 10^6$  Meßwerten gerechnet werden. Die Auswertung dieser Daten wurde auf der Großrechenanlage CDC Cyber 72 der Freien Universität Berlin durchgeführt.

Im Kapitel 2.3 wurde angedeutet, daß die digitale Datenerfassungsanlage vom Typ METRODATA in Abhängigkeit von den jeweiligen äußeren Bedingungen des Meßfluges mehr oder weniger viele bit-Fehler erzeugte. Über die Schwierigkeiten zur Behebung dieser Fehler soll an dieser Stelle nicht weiter berichtet werden; sie wurden während der ersten beiden aktiven Meßjahre (Juli 1973 bis Juli 1975) überwunden und bereiteten für den Rest der Laufzeit des Forschungsvorhabens (bis Ende 1977) keine Probleme mehr.

Es wurde die folgende Programmbibliothek erstellt:

1. Programme zur Auswertung gemessener meteorologischer Variabler
  - 1.1 Berechnung von Eichkurven, Verwendung derselben zur Eichung der Rohdaten
  - 1.2 Umrechnung der Rohdaten auf physikalische Variable
  - 1.3 Berechnung von abgeleiteten meteorologischen Variablen (Luftdichte, Feuchte-Maße, potentielle Temperaturen u.s.w.)

- 1.4 Berechnung der Vertikalgeschwindigkeit der Luft aus der registrierten Flugzeugbewegung im Raum
  - 1.5 Auswertung feinaerologischer Serienaufstiege
  - 1.6 Berechnung von Korrelationen verschiedener meteorologischer Variabler (z.B. momentane vertikale Flüsse von fühlbarer und latenter Wärme)
2. Programme zur statistischen Auswertung horizontaler Traversenflüge
    - 2.1 Berechnung von Häufigkeitsverteilungen der Variablen einschließlich der Berechnung der zugehörigen statistischen Kenngrößen
    - 2.2 Berechnung von Autokorrelationen und Kreuzkorrelationen sowie von Korrelationskoeffizienten
    - 2.3 Berechnung von Powerspektren sowie der zugehörigen charakteristischen Parameter
3. Programme zur automatischen Zeichnung der Ergebnisse (Plotter-Programme)
    - 3.1 Zeichnerische Darstellung des zeitlichen Verlaufs gemessener meteorologischer Variabler (Herstellung eines Analogschreibers)
    - 3.2 Zeichnerische Darstellung von Häufigkeitsverteilungen, Autokorrelationen, Kreuzkorrelationen und Powerspektren, letztere in verschiedenen Darstellungen.

Außer der digitalen Erfassung der Meßgrößen wurden bis zu vier Meßgrößen parallel analog registriert. Neben ihrer Bedeutung für die Entwicklung der Flugstrategien hatten die Analogregistrierungen ihre Bedeutung als back-up-Daten für die digital gewonnenen, bzw. als einzige Datenerfassung in denjenigen Fällen, in denen es Schwierigkeiten mit der digitalen Datenerfassungsanlage gegeben hatte.

## 2.6 Zusammenstellung der im Berichtszeitraum durchgeführten Meßkampagnen mit wissenschaftlicher Zielsetzung

Nach Lieferung des Motorseglers ASK 16 im Frühsommer 1973 wurde die Instrumentierung gegen Ende Juli 1973 abgeschlossen und mit einer Reihe von Testflügen begonnen. Die folgende Tabelle 2 gibt einen Überblick über die während der vier Jahre vom 31.7.1973 bis 29.9.1977 durchgeführten, insgesamt 20 Meßkampagnen, welche diejenigen umfassen, die besonders geplant waren. Zusätzlich wurde je nach Wetterlage versucht, spezielle Phänomene des Gesamtprogramms im Momentaneinsatz des Flugzeuges meßtechnisch zu erfassen. Dies ließ sich wegen der hohen Flexibilität des Gesamtsystems relativ oft durchführen, so daß neben dem Datenmaterial, welches bei den angeführten Meßkampagnen gewonnen wurde, eine größere Datenmenge zusätzlich gewonnen werden konnte.

TABELLE 2: MESSKAMPAGNEN NACH ERHALT DER ASK 16

ZEITRAUM	STANDORT	ZIEL	REGISTRIERUNG ANALOG (A) DIGITAL (D)	FLUG- STUNDEN	ZIELSETZUNG IN VER- BINDUNG MIT "EIN- LEITUNG..." (KAP. 1)
31. - 16. 8.73	Oerlinghausen	Therm. Konvektion	A	55	a, c
26. - 27. 8.73	"	Therm. Konvektion	A	12	a, c
8. 9.73	"	Therm. Konvektion	A	6	a, c
1. - 10. 4.74	Köln-Wahn		A,D	23	a, c
19. - 25. 4.74	Meppen	Therm. Konvektion	A,D	25	a, c
31. 8.74	Oerlinghausen	Therm. Konvektion	A,D	5	c
28.9. - 3.10.74	"	Therm. Konvektion	A	15	c
8. - 20.11.74	Mönchengladbach		A,D	40	a, c
11. - 20. 2.75	Meppen		A	32	a, c
21. - 27. 4.75	"		A	25	a, c
1. - 5. 7.75	Oerlinghausen	Therm. Konvektion	A,D	18	a, c, d, f
16. - 22. 8.75	Innsbruck	Therm. Konvektion, Wellen	A	28	a, c, e
8. - 9. 9.75	Oerlinghausen	Therm. Konvektion	A	10	a, c
5. - 11. 5.76	Oberpfaffenhofen	Therm. Konvektion	A,D	30	a, b, c, d, f
21. - 29. 8.76	Oerlingh., Höxter Paderborn	Therm. Konvektion	A,D	25	a, b, c, d, f
25. - 28. 9.76	Oerlinghausen	Therm. Konvektion	A	12	a, c
15. - 24. 6.77	Speyer	Oberrhein	A,D	39	a - f
11. 7.77	Oerlinghausen	Therm. Konvektion	A	4	c
6. - 15. 9.77	Speyer	Oberrhein	A,D	46	a - f
26. - 29. 9.77	Eschwege	Therm. Konvektion	A	15	a
7. - 18. 3.78	Speyer	Oberrhein	A	45	a, b, d, e, f
14. - 19. 7.78	Freiburg	Oberrhein	A,D	26	a, b, d, f

### 3. FEINAEROLOGIE

#### 3.1 Zeitabhängigkeit der Vertikalstruktur der Atmosphäre am festen Ort

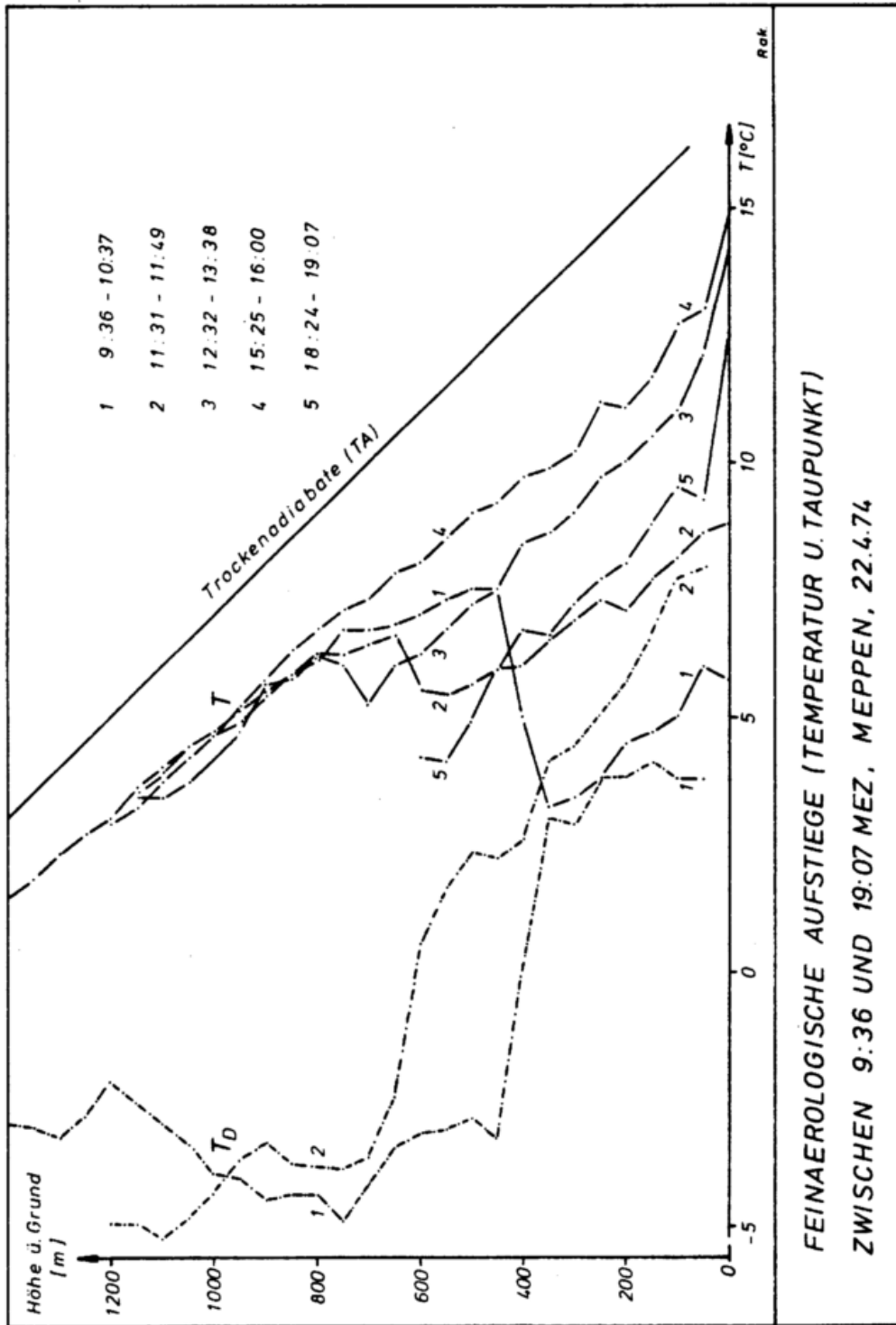
Die zeitabhängige vertikale Feinstruktur der Atmosphäre im großräumigen Scale besitzt nicht nur für die großräumige Dynamik der planetarischen Grenzschicht ihre Bedeutung, sondern in besonderem Maße für die Ausbildung der thermischen Konvektion und damit für den Energiehaushalt der Troposphäre. Vor Beginn des Forschungsvorhabens war bekannt, daß die Vertikalstruktur der Atmosphäre mit Hilfe von konventionellen aerologischen Meßmethoden nicht in der Weise aufgelöst werden kann, wie es nötig wäre, um die Wechselwirkung zwischen großräumiger Vertikalstruktur und thermischer Konvektion zu untersuchen. Deshalb bildeten hochauflösende Vertikalsondierungen während des Forschungsvorhabens wesentliche Bestandteile jedes der durchgeführten Meßprogramme.

Die Zeitabhängigkeit der großräumigen Vertikalstruktur der Atmosphäre kommt einerseits durch Advektionsvorgänge zustande, andererseits durch die Wirkung der thermischen Konvektion, die durch die Energiebilanz an der Erdoberfläche ausgelöst wird. Während die Zeitabhängigkeit der Vertikalstruktur als Folge von Advektionsvorgängen nur gelegentlich untersucht werden konnte, wurde derjenigen, die durch die thermische Konvektion verursacht wird, stets besondere Aufmerksamkeit zugewandt. Dies geschah vor allen Dingen deshalb, um die Abhängigkeit der thermischen Konvektion von der vertikalen Schichtung zu untersuchen, jedoch auch in begrenzterem Maße zur Untersuchung der Energetik der planetarischen Grenzschicht. Im Folgenden sollen einige charakteristische Beispiele derartiger Seriensonierungen wiedergegeben werden.

Das erste Beispiel wurde während der Teilnahme der Forschungsgruppe am Grenzschicht-Experiment GREIV I innerhalb des Schwerpunktprogramms gewonnen. Dort wurden zwecks Fortsetzung der Boden- und Mastmessungen nach oben hin neben der Vermessung der Thermik auf Traversen unterschiedlicher Höhe vor allem feinaerologische Serienaufstiege über dem gesamten Bereich der planetarischen Grenzschicht durchgeführt. Abb.12 zeigt eine derartige Seriensondierung vom 22. April 1974 über dem Meßgebiet bei Meppen.

Dabei handelte es sich um einen in der Höhe weitgehend advektionsfreien Tag, an dem die Einstrahlung das Geschehen entscheidend bestimmte. Es ist zunächst der zeitliche Abbau der noch gegen 9.30 h vorhandenen stabilen Schichtung unterhalb von etwa 400 m, sowie derjenige der darüber befindlichen starken Ausstrahlungsinversion innerhalb von zwei Stunden deutlich zu erkennen (Kurven 1 und 2). Neben einer starken Erwärmung unterhalb von 400 m tritt im Höhenbereich zwischen 400 und 800 m eine beachtliche Abkühlung auf. Bereits eine Stunde später (Kurve 3) entstehen unterhalb 400 m konvektiv-indifferente Schichtungsverhältnisse und innerhalb der PRANDTL-Schicht sogar ausgesprochen instabile. Die Abkühlung in der Höhe setzt sich dabei noch zwischen 600 und 800 m fort und ermöglicht damit die weitere vertikale Ausdehnung des Konvektionsraumes. Am frühen Nachmittag (Kurve 4) reicht der Konvektionsraum mit weitgehend indifferenter Schichtung bis über 1.500 m Höhe hinauf. Gegen Abend (Kurve 5) findet sich in der Schicht unterhalb 600 m (Ende des Aufstieges bei 600 m) bereits eine starke Abkühlung, wobei innerhalb der PRANDTL-Schicht verstärkte überadiabatische Gradienten entstehen.

Während das Beispiel der Abb.12 als charakteristisch für den täglichen Gang der Vertikalsondierungen bei Strahlungswetterlagen im Frühjahr angesehen werden kann, zeigt das folgende



FEINAEROLOGISCHE AUFSTIEGE (TEMPERATUR U. TAUPUNKT)

ZWISCHEN 9:36 UND 19:07 MEZ, MEPPEN, 22.4.74

Abb.12 Feinaerologischer Serienaufstieg in Hinblick auf die Verbesserung der "klassischen" Energetik der planetarischen Grenzschicht.

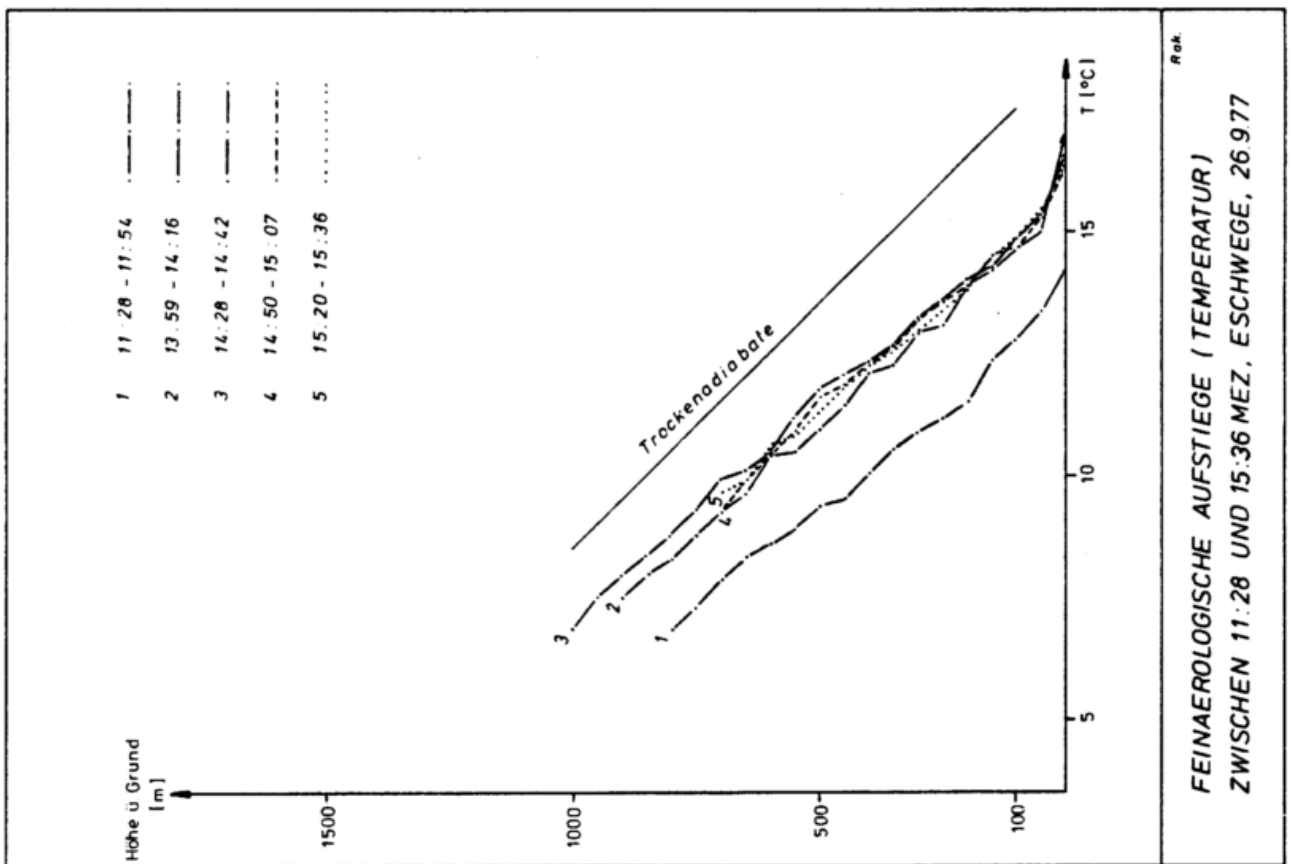
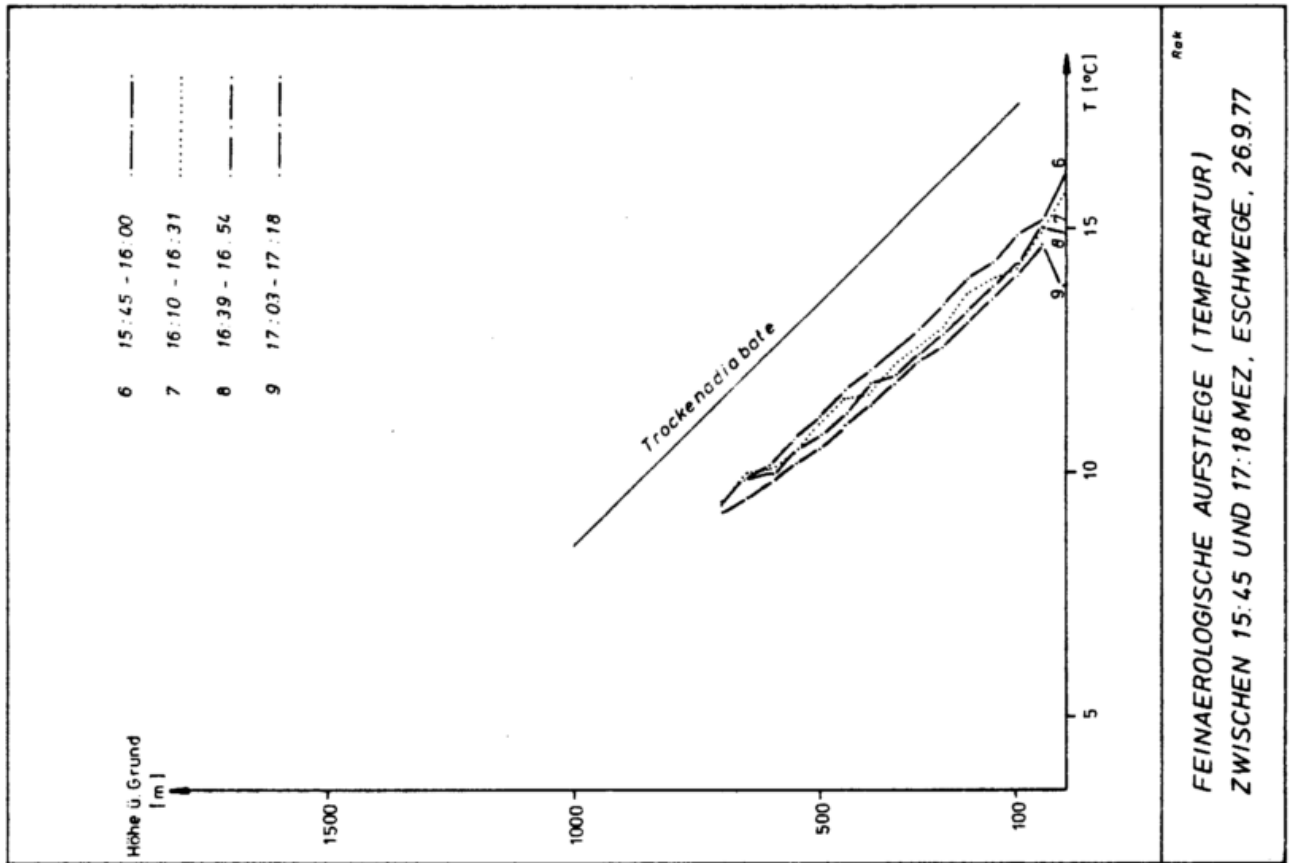


Abb.13 Feinaerologischer Serienaufstieg (s.Text).

Beispiel vom September 1977 den überlagerten Einfluß der Advektion. Die Abb. 13-16 sind einer Reihe von Seriensonierungen zwischen dem 26. und 29.9.1977 entnommen, die im Raum Eschwege durchgeführt wurden. Am 26.9.1977 (Abb. 13) herrschte trotz weitgehend adiabatischer Schichtung unterhalb 1000 m nur relativ schwache thermische Konvektion. Diese war in den Vormittagsstunden stärker als während des restlichen Tages, und auch die am Nachmittag einsetzende Abkühlung der gesamten Schicht mit leichter Inversionsbildung in Bodennähe war nicht sehr ausgeprägt. Die anfängliche Erwärmungsrate von etwa  $0,9^{\circ}$  C/h ging auf knapp  $0,6^{\circ}$  C/h zurück, während die Abkühlungsrate am Nachmittag um  $0,4^{\circ}$  C/h lagen. Die Schichtung blieb insgesamt schwach stabil, abgesehen von den Verhältnissen in Nähe der Erdoberfläche.

Die Verhältnisse des Folgetages (Abb. 14) deuten eine Veränderung der großräumigen Situation an. Die in der Nacht gebildete Strahlungsinversion wird durch einsetzende thermische Konvektion bis zum frühen Nachmittag (Kurve 7) weitgehend abgebaut. Dabei finden sich anfänglich Erwärmungsraten von mehr als  $2^{\circ}$  C/h und eine vertikale Divergenz des Wärmestroms von etwa  $0,6$  W/m<sup>2</sup>/m. Unter Annahme eines maximalen Wärmestroms am Boden und einer Abnahme desselben auf den Wert Null in Höhe von 450 m ergibt sich so ein Bodenwert des Wärmestroms in Größe von  $250$  W/m<sup>2</sup>. Die strahlungsbedingte Abkühlung und die dadurch bedingte Stabilisierung der Schicht unterhalb 500 m ist in den Kurven 8-10 zu erkennen.

In der folgenden Nacht setzten advective Prozesse ein, die am Folgetag (Abb. 15) adiabatische Schichtungsverhältnisse bis in Höhen von über 1000 m mit sich brachten, zugleich aber auch beachtliche turbulente Schwankungen knapp unterhalb des Bereiches der in der Höhe stabilen Schichtung. Die in Abb. 15 oben dargestellten drei Aufstiege besitzen einen zeitlichen Abstand von etwa 20 Minuten (Kurven 1 und 2), bzw. von zwei Stunden

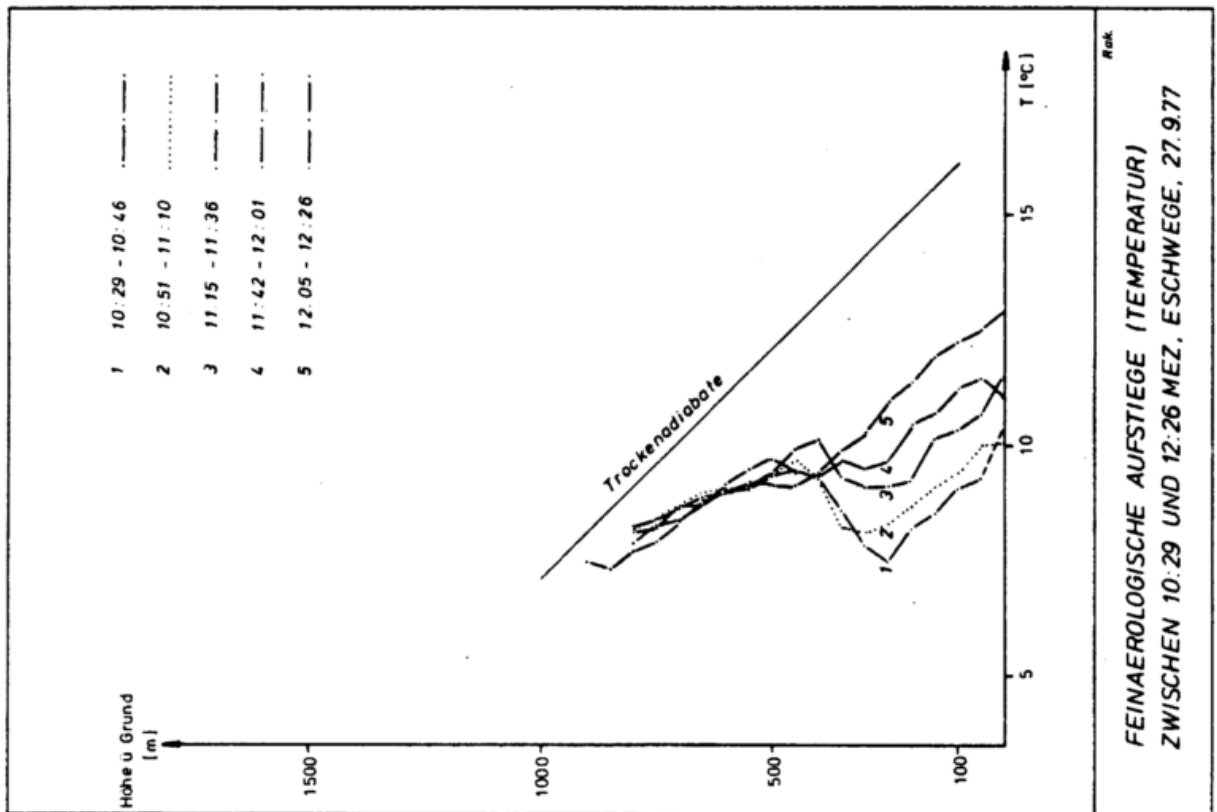
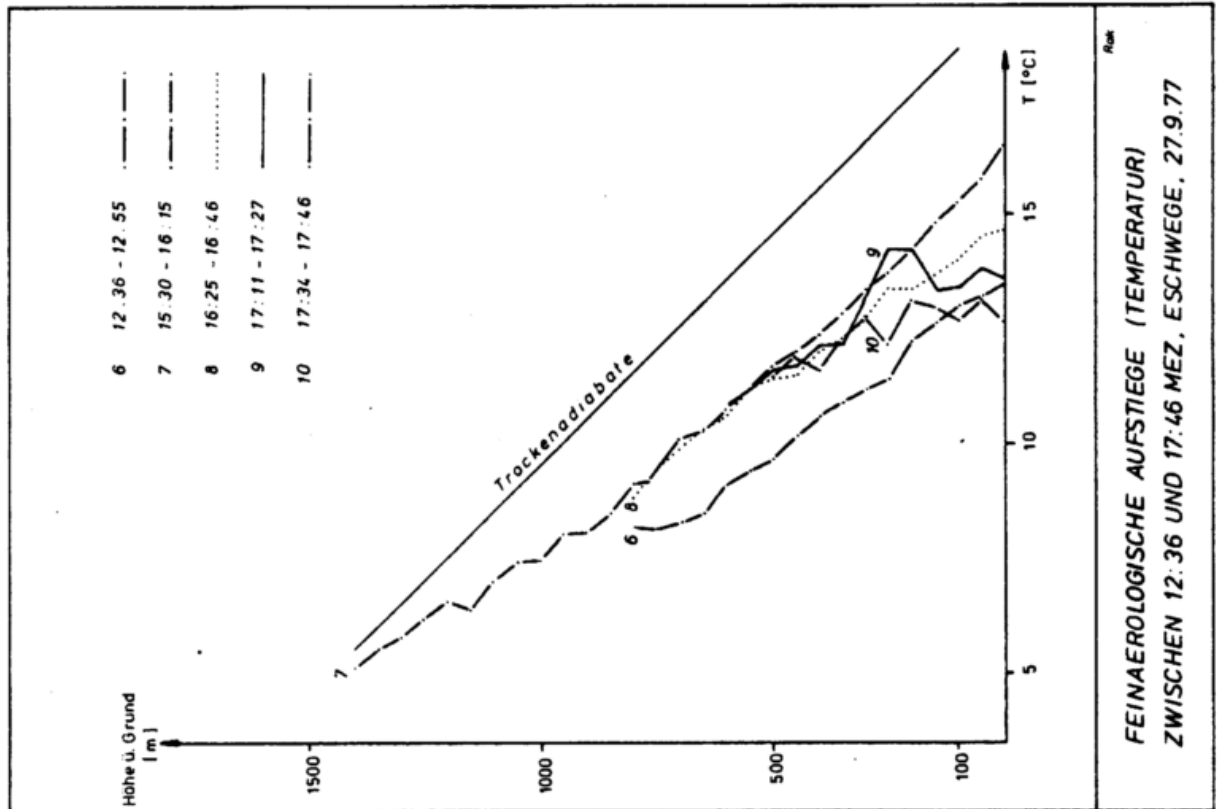


Abb.14 Feinaerologischer Serienaufstieg (s.Text).

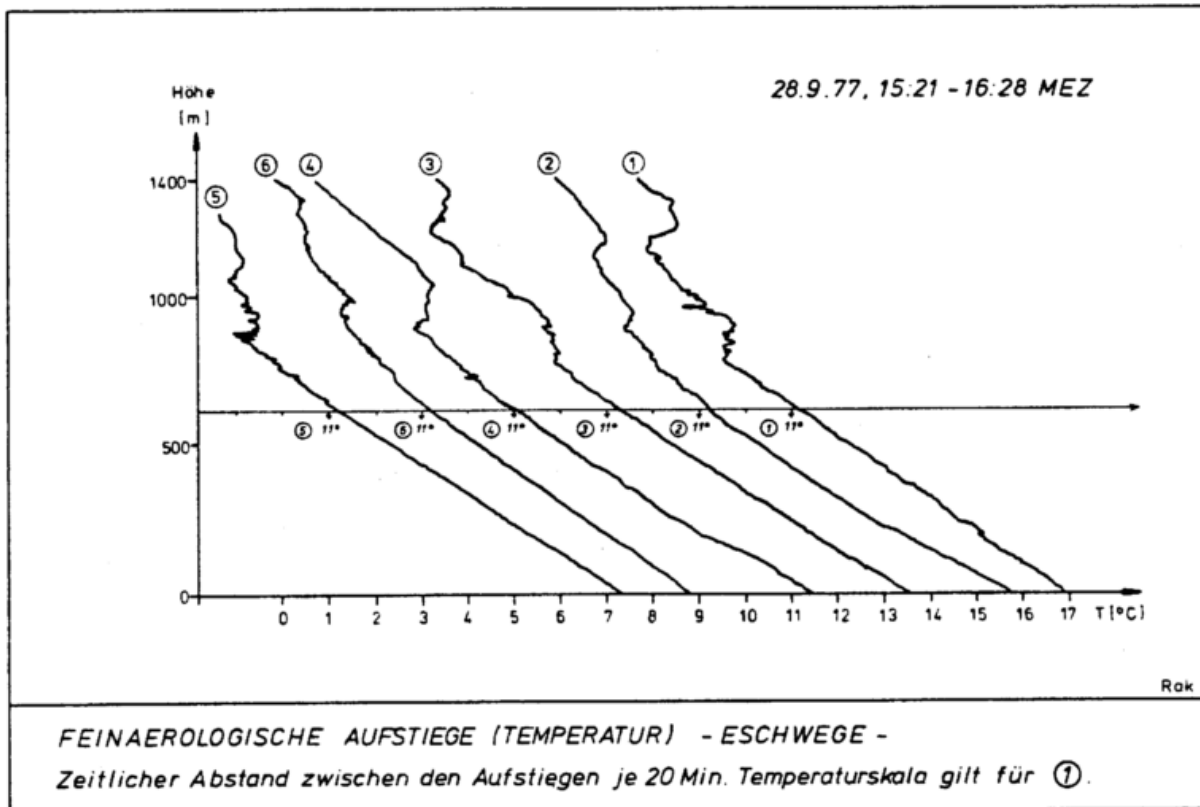
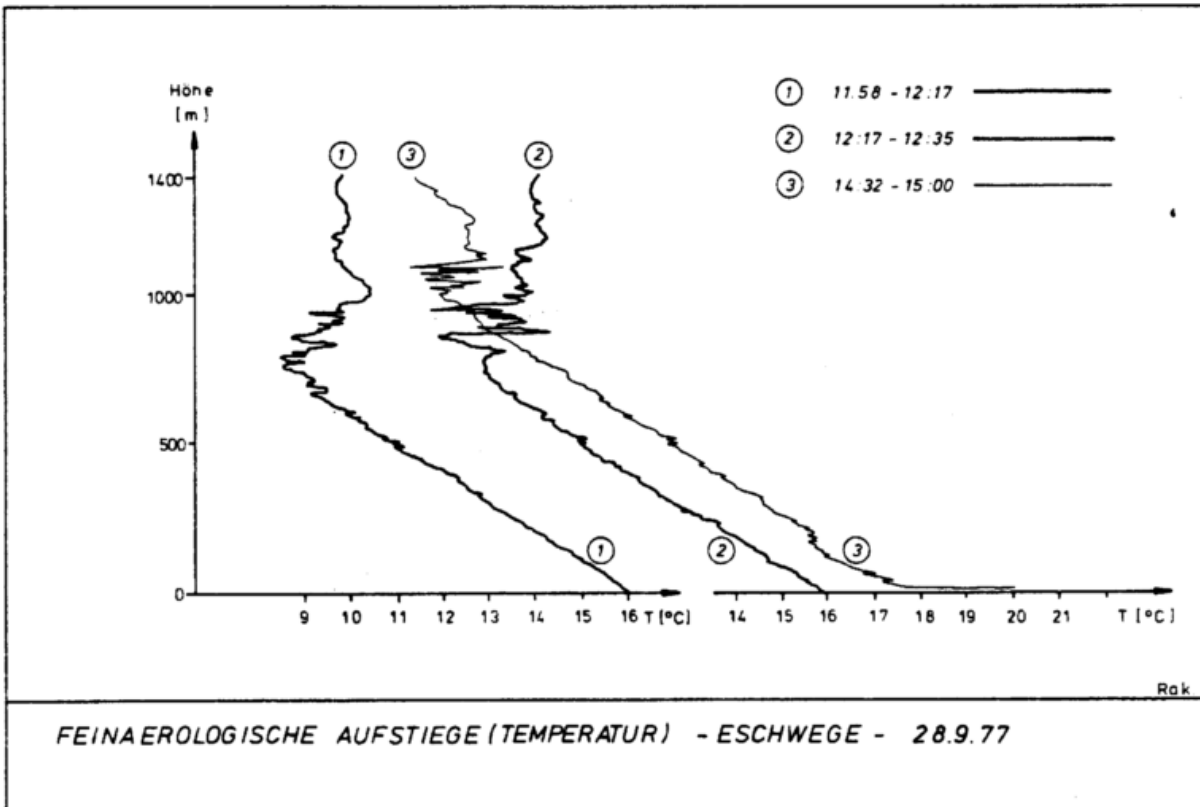


Abb.15 Feinaerologischer Serienaufstieg (s.Text).

(Kurve 3). Sie zeigen im Bereich der Inversion unterhalb von 1000 m außerordentlich starke turbulente Schwankungen der Temperaturstruktur. Da bei dem zwei Stunden später erfolgten Aufstieg die konvektive Schicht bis auf eine Höhe von über 1000 m ausgedehnt war, und da sich außerdem weiterhin starke turbulente Temperaturschwankungen unterhalb der Inversion zeigten, wurde anschließend mit einer Seriensonddierung begonnen, die in Abb.15 unten wiedergegeben ist. Jeder Aufstieg besitzt einen zeitlichen Abstand von 20 Minuten voneinander, wobei die Temperaturskala nur für den ersten Aufstieg gilt; alle folgenden sind um jeweils  $2^{\circ}$  nach links versetzt gezeichnet, um eine visuelle Trennung der Aufstiege zu ermöglichen. Man erkennt an Abb.15 die weiterhin starke zeitliche Variabilität der Vertikalstruktur zwischen etwa 800 und 1200 m, wobei die Obergrenze der konvektiven Schicht starken Höhenveränderungen unterworfen ist. Es war unter den Bedingungen starker Warmluftadvektion in der Höhe nicht auszuschließen, daß sich aufgrund der herrschenden Windverhältnisse ein Leewellen-System bemerkbar machte, welches jedoch nicht zur Bildung von Lenticularis-Wolken geführt hat.

Der nächste Tag trug, ohne daß sich in der Nacht eine Abkühlungsinversion gebildet hatte, ausgeprägt konvektiven Charakter mit Ausbildung von Cumulus-Wolken. Abb.16 zeigt einen Aufstieg im konvektiven Kern einer Cumulus-Wolke und läßt den wolkenadiabatischen Temperaturgradienten erkennen. Die an der Obergrenze der Wolke angetroffenen stark turbulenten Vertikalbewegungen führten dabei zu charakteristischen Temperaturschwankungen. Die Verhältnisse der Abb.16 sind in gewisser Weise auch charakteristisch für Vertikalsonddierungen, die mit dem Motorsegler unter Ausnutzung des Aufwindes von konvektiven Zellen innerhalb von diesen durchgeführt worden sind. Derartige Sonddierungen sind im Vergleich zu denjenigen der Umgebung systematisch zu warm, woraus zu folgern ist, daß feinaerologische

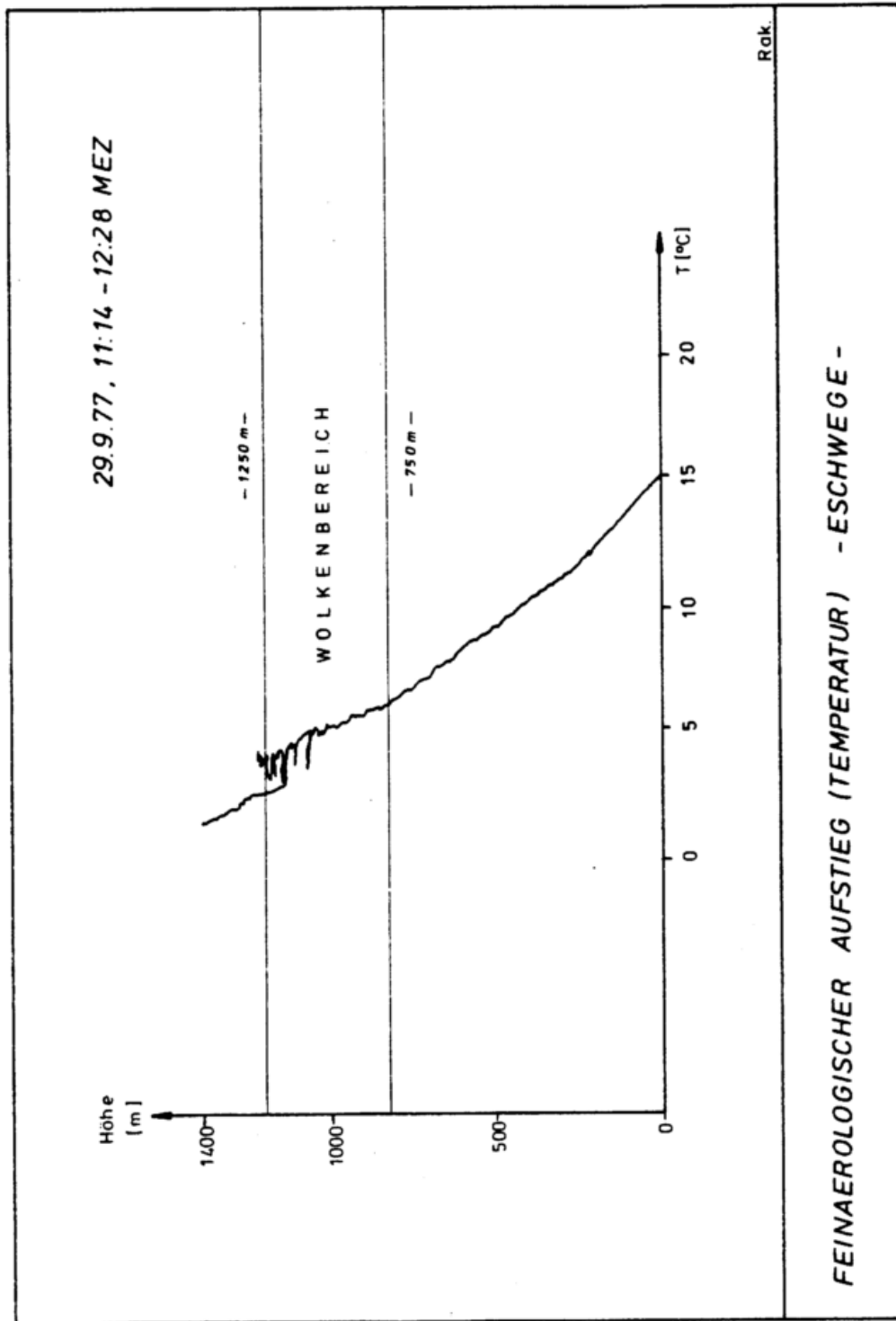


Abb.16 Feinaerologischer Serienaufstieg (s.Text).

Sondierungen möglichst außerhalb aktiver konvektiver Zellen durchzuführen sind.

Bezüglich der durch die thermische Konvektion bewirkten Erwärmungsraten sei auf die folgende Tabelle 3 verwiesen.

TABELLE 3

HÖHE	ERWÄRMUNGSRATEN			SOMMER			FRÜHLING/HERBST		
	N	(°C/h)	$\sigma$	N	(°C/h)	$\sigma$	N	(°C/h)	$\sigma$
0 m	81	1.03	0.56	37	1.01	0.39	42	1.07	0.69
400	82	0.60	0.37	40	0.65	0.32	46	0.55	0.39
800	81	0.30	0.31	36	0.40	0.36	46	0.25	0.27
1200	67	0.14	0.32	34	0.21	0.30	33	0.11	0.35
1600	34	0.13	0.23	24	0.14	0.21	7	0.15	0.33
2000	5	0.33	0.36	5	0.33	0.36	-	-	-

In dieser Tabelle sind die Ergebnisse fast aller während des Forschungsvorhabens durchgeführter Vertikalsondierungen zusammengefaßt. Dabei handelt es sich um Aufstiege, die zwischen Sonnenaufgang bis ca. 15.00 h durchgeführt wurden, um jeweils nur die Erwärmungen und nicht bereits die Strahlungsabkühlungen in das Material hineinzubekommen. Zusätzlich wurden diese Daten noch in Daten des meteorologischen Sommers und solche der beiden Übergangsjahreszeiten aufgeschlüsselt. In Tabelle 3 sind die Erwärmungsraten für jede Höhe angegeben. Die Zahl der verwendeten Aufstiege ist durch den Buchstaben (N) gekennzeichnet, die zweite Spalte gibt jeweils die mittlere Erwärmungsrate pro Stunde an und die dritte Spalte die Standardabweichung ( $\sigma$ ). Die Tabelle spiegelt das wider, was dem erfahrenen Meteorologen qualitativ bekannt ist. Insbesondere sind die Ursachen für die Unterschiede der Erwärmungsraten während des meteorologischen Sommers und während der Übergangsjahreszeiten leicht erklärbar. Lediglich die Größenordnung sowie die Schwankungen um die mittleren Erwärmungsraten sowie die Abnahme der Erwärmungsraten mit der Höhe sind hier in quantitativ befriedigender Form wiedergegeben. Man erkennt, daß am Energieaustausch mit der Erdoberfläche

hauptsächlich die Schicht bis etwa 500 m über Grund beteiligt ist. Darüber kommt es als Folge der Erweiterung des Konvektivraumes nach oben hin in der Höhe in der Regel zu korrespondierenden Abkühlungen. Dabei wird zur Erweiterung des Konvektivraumes etwa 20% des in Bodennähe vorhandenen vertikalen Wärme-flusses als negativer Wärmefluß benötigt.

Abschließend kann zu diesem Problem gesagt werden, daß die Genauigkeit des Meßsystems in Verbindung mit Serienaufstiegen hoher Frequenz die Möglichkeit eröffnet, u.a. die Divergenz der vertikalen Wärmeströme als Funktion der Zeit meßtechnisch zu erfassen. Hierbei wird nicht der turbulente Wärmetransport selbst gemessen, sondern es wird aus der Wirkung der konvektiv-turbulenten Prozesse auf die Temperaturprofile ein indirekter Schluß auf die Divergenz der vertikalen Wärmeströme gezogen. Neben dieser verfeinerten klassischen Methode wird in späteren Teilen des Berichtes auch auf die direkte Messung der konvektiv-turbulenten, bzw. organisiert konvektiven Wärmetransporte eingegangen werden.

### 3.2 Ortsabhängigkeit der Vertikalstruktur der Atmosphäre in Quasi-EULER'scher Betrachtungsweise

Unterschiede in der Vertikalstruktur der Atmosphäre über verschiedenen Bodenbeschaffenheiten finden sich in Scale-Bereichen, die ein vielfaches der Scales der organisierten thermischen Konvektion betragen. Man kann davon ausgehen, daß sich über einer annähernd homogenen Unterlage ein mehr oder weniger großes Kollektiv von individuellen Thermikzellen bildet, wobei die Bildung dieses Kollektivs durch die dynamischen Verhältnisse innerhalb der Konvektionsschicht bestimmt ist. Zur Homogenisierung der Thermik über nicht zu stark strukturiertem Untergrund trägt auch fast immer die großräumige Luftbewegung bei. Trotzdem ist bekannt, daß bei gleicher großräumiger Wetterlage starke Unterschiede der konvektiven Aktivität in Scale-Bereichen zu finden sind, die über dem Gebiet der Bundesrepublik z.B. den Maschenweiten eines in einem großräumigen Modell eingebetteten Nesting-Modells entsprechen. So dürfte am unteren Ende der Scales, über die in diesem Zusammenhang gesprochen werden muß, vielleicht ein Gebiet von der Größe 20 x 20 km zu gelten haben. Ein typisches Beispiel ist die Warburger Börde, wo in der Regel wesentlich geringere thermische Aktivität gefunden wird als sonst in der Umgebung. Es kann jedoch auch vorkommen, daß über weit größeren Gebieten der Bundesrepublik die thermisch aktiven Flächen Gitterflächenelementen entsprechen, wie sie in großräumigen Vorhersagemodellen benutzt werden. Dies ist insbesondere der Fall im Gebiet der deutschen Mittelgebirge und, bei geeigneten Wetterlagen, im Gebiet der gesamten Alpen. Daß aber auch kleinräumig erhebliche Unterschiede in der thermischen Aktivität und damit erheblich unterschiedliche Einflüsse auf die Vertikalstruktur der Atmosphäre gefunden werden können, hat sich bei den Messungen im Oberrheingebiet gezeigt. Hier sind die Unterschiede zwischen den Verhältnissen im Oberrheingraben

und denjenigen über den Randgebirgen derart verschieden, daß es nicht nur zu einer zeitlich stark unterschiedlichen Auslösung der Konvektion kommt, sondern auch zu starken Unterschieden in der Intensität der Konvektion. Obgleich in der Folge auf diese Untersuchungen im Oberrheingraben noch näher eingegangen werden wird, sei hier schon festgestellt, daß der frühe Einsatz der thermischen Konvektion an den nach Osten abfallenden Hängen des Pfälzer Waldes und der Vogesen einen systematischen klimabeeinflussenden Effekt in dieser Region liefert.

Die folgende Tabelle 4 läßt die Unterschiede der Sondierungen zwischen den Aufstiegsorten Speyer und Pfälzer Wald erkennen. Die Bedeutung der Symbole ist gleich derjenigen in Tabelle 3. Als Ergebnis der verstärkten konvektiven Aktivität über dem Pfälzer Wald findet sich dort ein vertikaler Verlauf der Erwärmungsrate, der schwächer mit der Höhe abnimmt als über dem Rheingraben und insgesamt größer ist als dort. Dabei sind die Standardabweichungen über dem Pfälzer Wald ebenfalls kleiner als über dem Rheingraben. Auch längere Meßreihen würden an diesen Unterschieden, die sich in der Feinaerologie über verschiedenen Unterlagen zeigen, prinzipiell nichts ändern.

TABELLE 4

HÖHE	SPEYER			PFÄLZER WALD		
	N	(°C/h)	$\sigma$	N	(°C/h)	$\sigma$
0 m	21	1.22	0.56			
400	22	0.72	0.44	4	0.54	0.21
800	20	0.27	0.32	6	0.48	0.19
1200	14	0.25	0.25	9	0.29	0.25
1600	2	0.19	0.04			

Die folgende Abb.17 läßt den Unterschied zwischen zwei Vertikalsondierungen im Gebiet des Oberrheingrabens deutlich erkennen. Während über Speyer als Folge der bis etwa 500 m

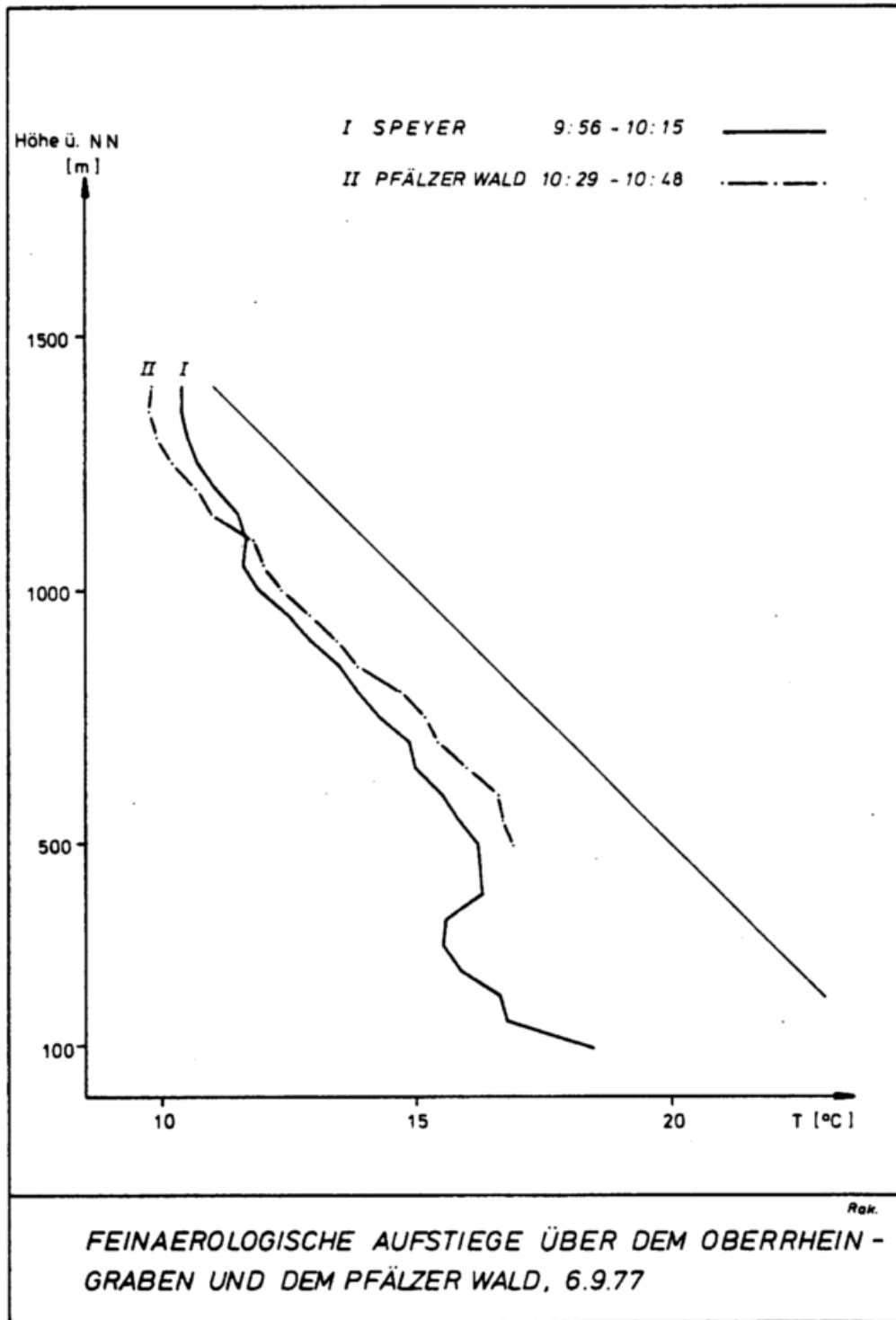


Abb.17 Feinaerologischer Serienaufstieg (s.Text)

heraufreichenden sehr stabilen Bedingungen die Konvektion noch nicht eingesetzt hatte, fand sich bei der nur etwa eine halbe Stunde später durchgeführten Sondierung über dem Pfälzer Wald bereits voll ausgebildete starke thermische Aktivität mit dem entsprechenden Einfluß auf die vertikale Struktur der Atmosphäre. Oberhalb 1100 m schneiden sich beide Temps und man erkennt, daß über dem Pfälzer Wald (Kurve 2) die über dem Rheintal noch deutlich vorhandene Inversion bereits abgebaut ist und der Temp nun etwa  $0,5^{\circ}\text{C}$  niedrigere Temperaturen zeigt.

Für eine spezielle Höhe (ca. 720 m) sind charakteristische Daten gewonnen worden, die den Unterschied zwischen den Verhältnissen über beiden Gebieten auch numerisch klar herausarbeiten. Die folgende Tabelle 5 zeigt neben der potentiellen Temperatur in diesem Niveau die Standardabweichungen von potentieller Temperatur, von Vertikalgeschwindigkeit und von spezifischer Feuchte. Diese Standardabweichungen lassen die starke konvektive Aktivität über dem Pfälzer Wald im Gegensatz zu den Verhältnissen über dem Oberrheingraben wieder deutlich erkennen.

TABELLE 5

SPEYER → NEUSTADT/W. (RHEINGRABEN) Höhe 720m	NEUSTADT/W. → BERGGRABEN (PFÄLZER WALD) Höhe 720m	BERGGRABEN → KARLSRUHE Höhe 720m
$\theta$ $19.89^{\circ}\text{C}$	$\theta$ $20.29^{\circ}\text{C}$	$\theta$ $19.89^{\circ}\text{C}$
$\sigma_{\theta}$ $0.13^{\circ}\text{C}$	$\sigma_{\theta}$ $0.35^{\circ}\text{C}$	$\sigma_{\theta}$ $0.14^{\circ}\text{C}$
$\sigma_w$ $0.34\text{m/s}$	$\sigma_w$ $1.09\text{m/s}$	$\sigma_w$ $0.65\text{m/s}$
$\sigma_q$ $0.10\text{g/kg}$	$\sigma_q$ $0.45\text{g/kg}$	$\sigma_q$ $0.29\text{g/kg}$
$K(q/\theta)$ $0.09$	$K(q/\theta)$ $0.37$	$K(q/\theta)$ $0.32$

Besonders stark werden die Unterschiede in der Vertikalstruktur, wenn man z.B. die Verhältnisse im Alpenvorland mit denjenigen im Alpengebiet miteinander in Beziehung setzt. Im Alpengebiet findet

sich eine Vergrößerung der Heizflächen zur Entwicklung der thermischen Konvektion, verbunden mit einer durch die Berge verminderten, zur Erwärmung zur Verfügung stehenden Luftmenge. Zunächst sei in der Tabelle 6 der Bodentemperaturverlauf für die Tage 5./6.Mai 1976 und für verschiedene Stationen des Nordalpengebietes wiedergegeben. So beträgt die Bodentemperatur um 06 GMT sowohl in Innsbruck als auch in München 9° C.

TABELLE 6

BODENTEMPERATUREN (°C) FÜR DEN 5. UND 6.5.1976 FÜR VERSCHIEDENE STATIONEN IM VORALPEN- UND ALPENGEBIET

ZEIT/GMT	5.5.1976							6.5.1976						
	00	03	06	09	12	15	18	00	03	06	09	12	15	18
Innsbruck 560 m			9		21		20			10		24		22
München-R. 529 m	10	7	9	15	18	19	18	9	7	10	17	21	23	21
Hohenpeiss. 983 m	8	8	9	11	14	16	15	12	10	11	14	18	20	18
Zugspitze 2970 m	-4	-4	-4	-3	0	2	3	1	2	3	5	3	5	5
Garmisch-P. 719 m			3	5	19	20	18			7	18	21	23	21
Augsburg 499 m	10	9	9	15	18	20	20	12	9	8	17	22	24	23

Die Verhältnisse ändern sich jedoch im Laufe des Tages durch die Wirkung der thermischen Konvektion derart, daß die Erwärmungsraten über dem Inntal im Vergleich zu denjenigen von Oberpfaffenhofen/Starnberg so groß werden, wie es die folgende Abb.18 wiedergibt. Es wurde sowohl über Oberpfaffenhofen/Starnberg als auch über Innsbruck unter Ausnutzung der Thermik aufgestiegen und dabei eine durch die Konvektion bedingte Variationsbreite der Vertikalstruktur gefunden, die in beiden Fällen recht erheblich ist. Dies sowohl bezüglich der Temperatur als auch bezüglich der Feuchte. Durch die Thermik bedingte Temperaturunterschiede von 0,5 ° C und mehr sind

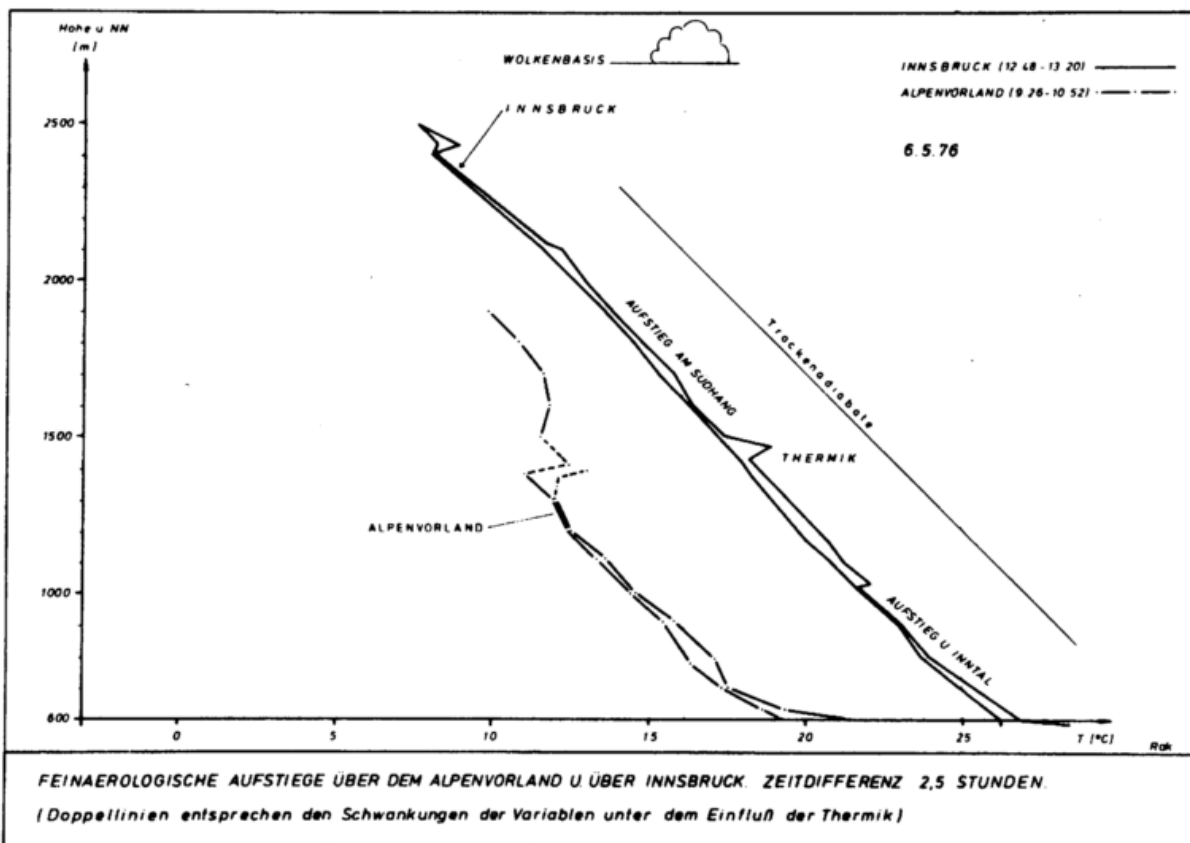
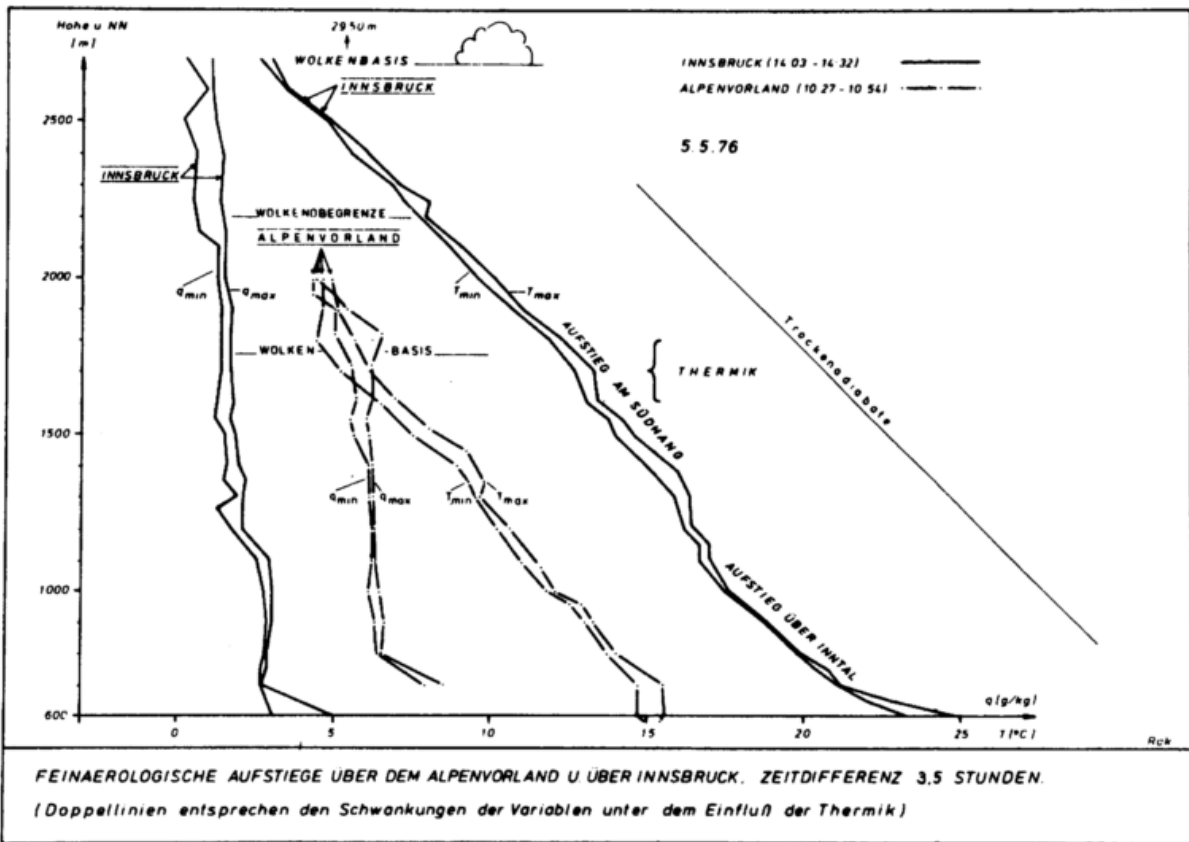


Abb.18 Feinaerologischer Serienaufstieg (s. Text)

oberhalb 1200 m charakteristisch. Auch unter Berücksichtigung der Zeitdifferenz zwischen beiden Aufstiegen (3,5 Stunden) kann festgestellt werden, daß die Temperaturdifferenz zwischen beiden Aufstiegen in der Größe von fast durchweg  $6^{\circ}\text{C}$  nicht allein dieser Zeitdifferenz zugeschrieben werden kann, sondern eindeutig den regional unterschiedlichen konvektiven Verhältnissen. Die Konvektion über Innsbruck reicht außerordentlich hoch hinaus (bis über 2500 m), während man dies über dem Alpenvorland nicht erwarten konnte. Beachtet man bei diesem Vergleich, daß beide Aufstiegsorte nur etwa 70 km voneinander entfernt sind, dann fällt der durch die Bodentopographie modifizierte thermische Konvektion für die Ausbildung der vertikalen Struktur der Atmosphäre doch eine sehr entscheidende Rolle zu. Auch am Folgetag (Abb.18 unten) finden sich die gleichen charakteristischen Unterschiede.

#### 4. STRUKTUR KONVEKTIVER ZELLEN

##### 4.1 Natürliche Konvektion

Gegen Ende des Kapitels 3.2 wurde bei der Diskussion der Unterschiede der Feinaerologie zwischen dem Alpenvorland und dem Inntal bei Innsbruck in der Abb.18 darauf hingewiesen, daß feinaerologische Aufstiege stark vom Charakter der thermischen Konvektion abhängig sind. Dies möge an einem weiteren Beispiel verdeutlicht werden. Die folgende Abb.19 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Temperatur und Höhe sowie der jeweils zugehörigen Vertikalgeschwindigkeit während eines Meßfluges, der bei starker thermischer Konvektion über dem Gebiet der Senne bei Oerlinghausen durchgeführt wurde. Dabei wurde auf einer horizontalen Traverse vor der Kammlinie des Teutoburger Waldes hin- und hergeflogen und während einer Zeit von 18 Minuten durch die Wirkung der Thermik ein Höhengewinn von 300 m erzielt. Dieser Höhengewinn war als Integral über sämtliche Steig- und Fallgebiete längs der Traversen zustande gekommen und ließ erkennen, daß die sonnenbeschienene Seite des Teutoburger Waldes ein geschlossenes größerräumiges Gebiet mit überwiegend positiver Vertikalbewegung darstellte. Die Zuordnung zwischen Höhe, Temperatur und Vertikalgeschwindigkeit in Abb.19 läßt erkennen, daß diese Art "passiver" Feinaerologie für jede Höhe eine beachtliche Schwankungsbreite der Temperatur ergibt, welche allein auf die Wirkung der thermischen Konvektion zurückzuführen ist. Diese Schwankungen betragen im unteren Teil der Abbildung bis zu  $1^{\circ}$  C, nehmen in Richtung auf die Inversion sehr stark ab und werden wieder besonders groß im Bereich der Inversion bei etwa 1050 m. Man erkennt ferner, daß positive Temperaturabweichungen mit positiven Vertikalgeschwindigkeiten verknüpft sind, so wie es für die thermische Konvektion charakteristisch ist.

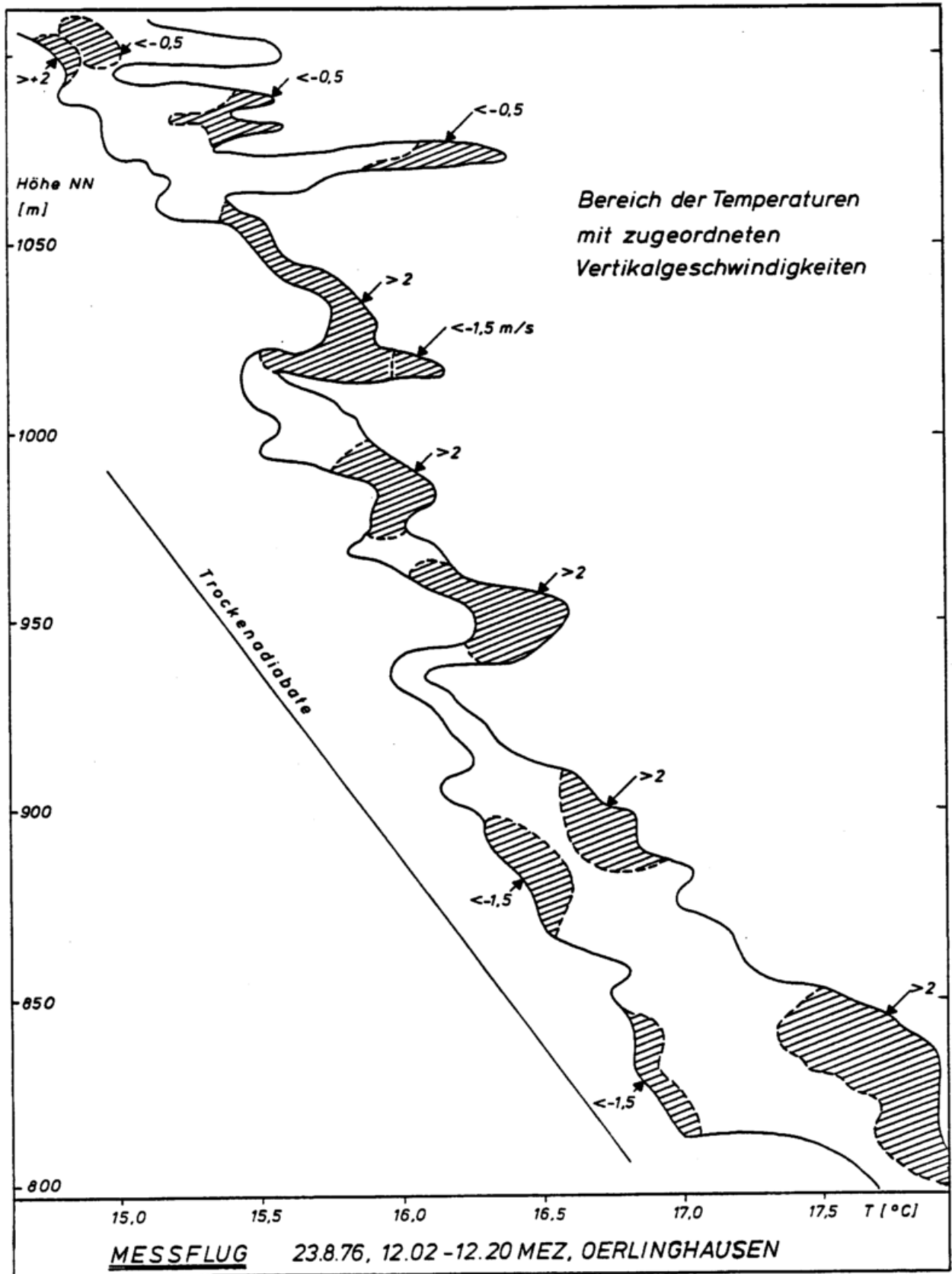


Abb.19 Feinaerologischer Aufstieg innerhalb eines Systems von konvektiven Zellen.

Das gleiche gilt für negative Temperaturabweichungen und die damit gekoppelten Absinkbewegungen. Im Bereich der Inversion drehen sich diese Verhältnisse um, und man erkennt, daß positive Temperaturabweichungen mit absinkender Luftbewegung verbunden sind und negative Temperaturabweichungen mit Aufwärtsbewegung der Luft. Diese Verhältnisse sind für die in stabile Schichtung eindringende thermische Konvektion charakteristisch. Im folgenden wird hierüber noch zu berichten sein.

Die in Abb.19 verwendeten Traversen hatten den Charakter der in Abb.20 dargestellten Traverse. Hierbei handelt es sich um die Registrierung eines Meßfluges über demselben Gebiet wie in Abb.19. Abb.20 kann als typische horizontale Traversierung der thermischen Konvektion angesehen werden. Man erkennt auf der linken Seite der Abbildung auf einer Strecke von rund 1000 m ein großflächiges Absinkgebiet mit Sinkgeschwindigkeiten um 1 m/s. Hiermit verbunden ist eine positive Temperaturabweichung sowie eine negative Abweichung der spezifischen Feuchte. Dies deutet darauf hin, daß in einer Höhe geflogen wurde, in der die thermische Konvektion bereits in Wechselwirkung mit einer Inversion gestanden hatte. Die daran anschließende konvektive Zelle besitzt eine Breite von etwa 670 m, gemessen zwischen den Minima der Vertikalgeschwindigkeit an den Flanken der Zelle. Ein Maximum der Vertikalgeschwindigkeit von 5 m/s im zentralen Bereich ist mit einer Temperaturabweichung von fast  $1^{\circ}$  C gegenüber der Umgebung verbunden. Das Übergangsstück der Traverse bis zur nächsten konvektiven Zelle (rund 2000 m) läßt kein eindeutiges Absinkverhalten erkennen und deutet eher auf die Existenz von konvektiven Zellen in einem untergeordneten Scale-Bereich hin. Die folgende konvektive Zelle hat einen Durchmesser von rund 600 m, weist jedoch mit maximalen Vertikalgeschwindigkeiten um 3 m/s und positiven Temperaturabweichungen um  $0,3^{\circ}$  C eine geringere Intensität als die links stehende Zelle auf. Für beide Zellen ist die Absinkbewegung an den Flanken ebenso

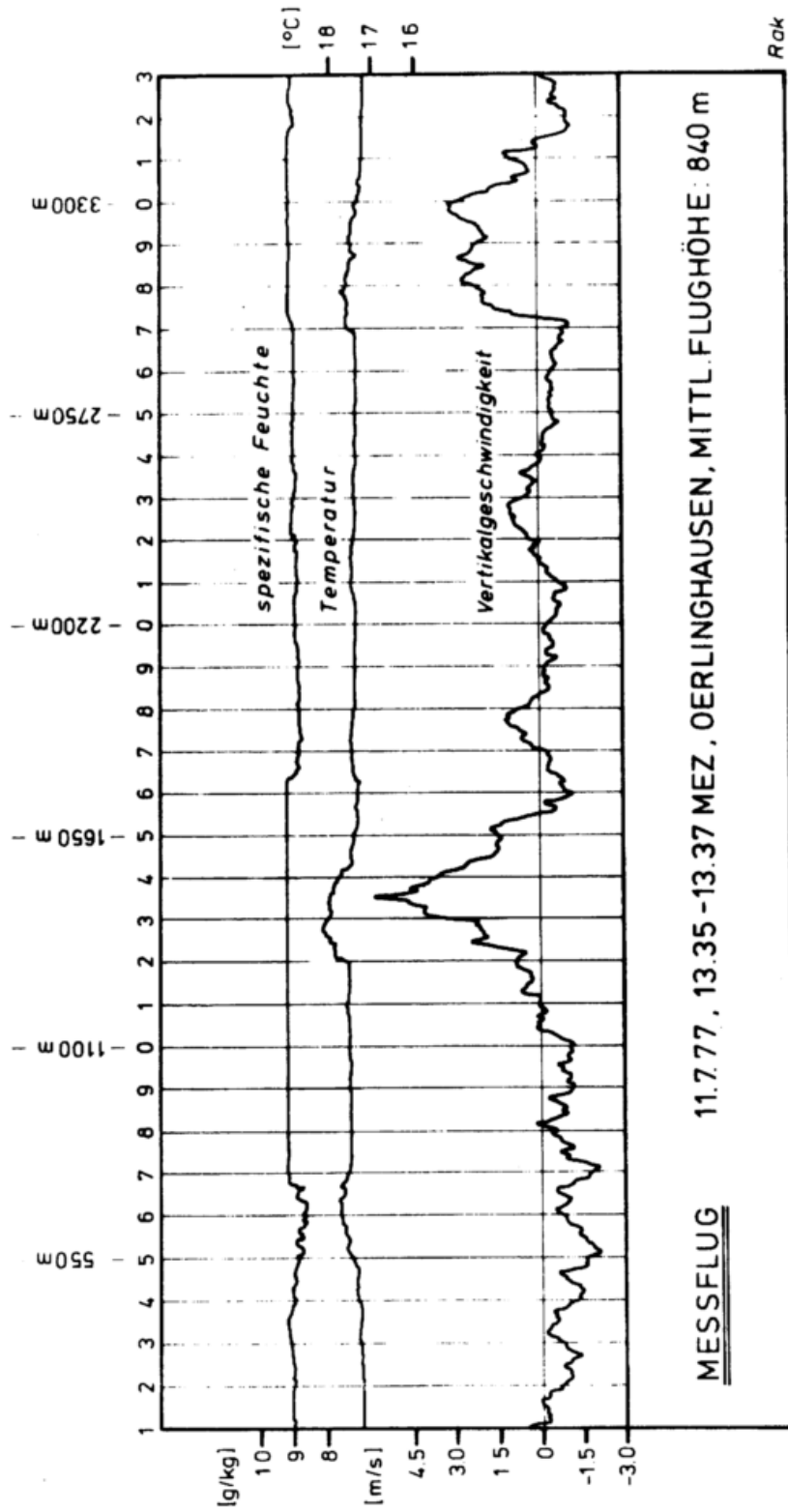


Abb.20 Typischer horizontaler Traversenflug in thermisch aktiver Atmosphäre.

charakteristisch wie an den Flanken von Kühlturmfahnen, wie im nächsten Kapitel 4.2 noch ausgeführt werden wird.

Eine Besonderheit der in Abb.20 dargestellten Meßtraverse stellt die Tatsache dar, daß bereits Wechselwirkung mit einer in etwa 1650 m befindlichen Inversionsschicht besteht. In den oberen Absinkgebieten findet eine turbulente Durchmischung von oben her statt, verbunden mit einem nach unten gerichteten vertikalen turbulenten Fluß von fühlbarer Wärme.

Erste Versuche zur Untersuchung der vertikalen Struktur einer einzelnen Thermikzelle begannen im Frühjahr 1975 während des Grenzschichtexperiments GREIV. Hierbei wurde in einer bestimmten Höhe ein Thermikelement traversiert und versucht, dasselbe in einer niedrigeren Höhe wiederzufinden. Abb.21 möge eines dieser Beispiele repräsentieren. Das Wald- und Hügelgebiet zwischen der Bundesstraße Meppen/Leer und dem Moor östlich davon wies am 22.4.1975 im Gegensatz zur gesamten Umgebung starke thermische Aktivität auf. Auf dem gesamten Stück zwischen Meppen und dem eigentlichen Meßgebiet des Experiments GREIV, d.h. auf einer Strecke von etwa 16 km, wurde im mittleren Abstand von etwa 1500 m jeweils eine thermische Zelle gefunden. Die Anordnung der Thermik war relativ stationär, so daß unter Berücksichtigung der Windrichtung eine einzelne konvektive Zelle im Raume identifiziert werden konnte. In Abb.21 ist ein konvektives Element mit maximalen Vertikalgeschwindigkeiten bei 4 m/s und positiven Temperaturabweichungen von etwa  $0,5^{\circ}$  C in einer Höhe von 580 m zu erkennen. Der Durchmesser der Zelle dürfte etwa 500 m betragen haben. Dieselbe Zelle konnte nach Durchführung eines schnellen Abstieges in einer Höhe von 265 m erneut traversiert werden und ergab Verhältnisse, wie sie ebenfalls in Abb.21 dargestellt sind, nämlich eine Struktur, die auf wesentlich größere Intensität der Zelle schließen läßt. Bemerkenswert ist an diesem Tage, daß die spezifische Feuchte innerhalb der Zelle kaum meßbare Abweichungen gegenüber der Umgebung zeigt.

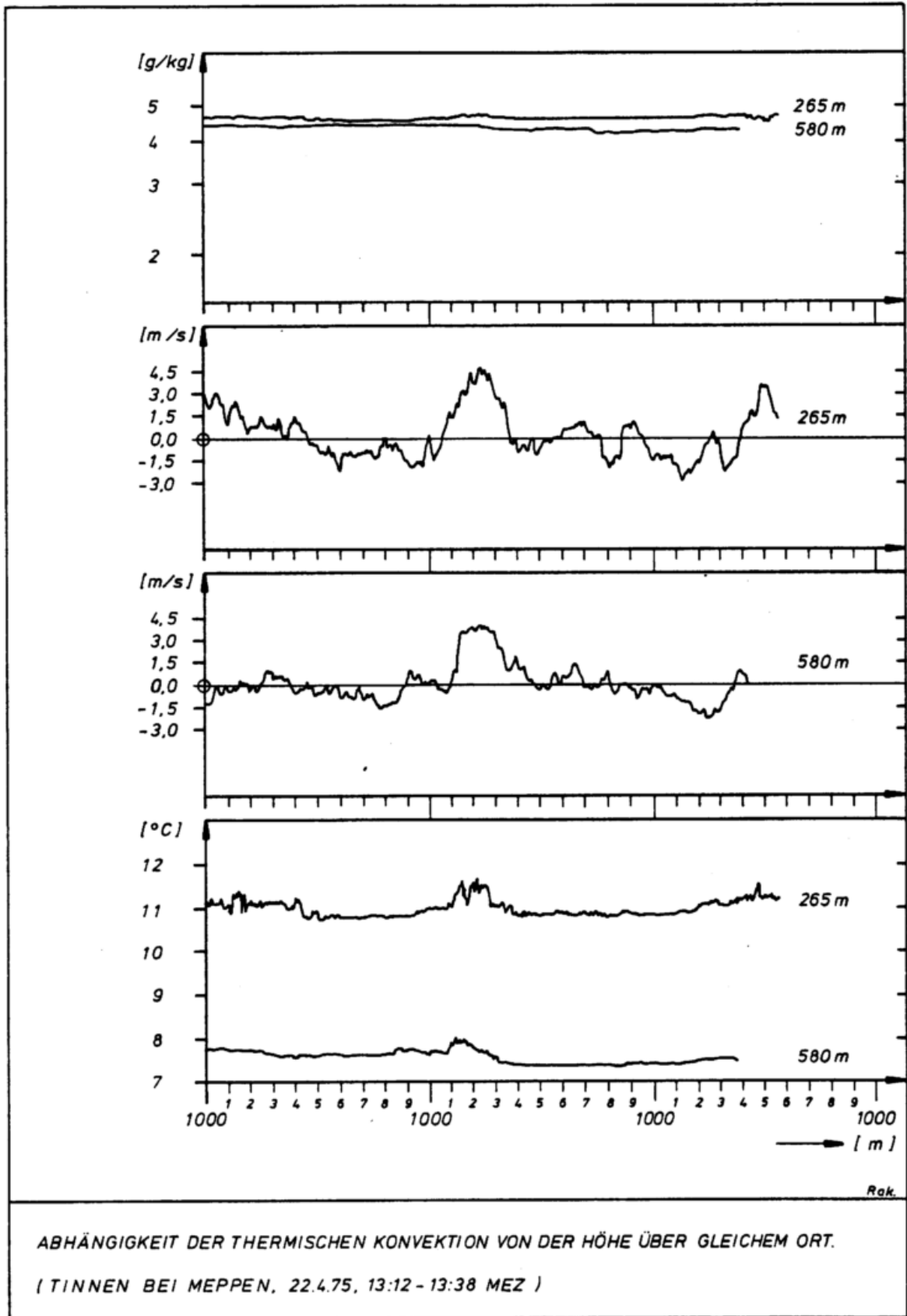


Abb.21 Vertikale Struktur einer einzelnen konvektiven Zelle.

Leider ist bei Messungen dieser Art durch den Zeitverlust während des Abstieges und wegen der Unsicherheit, die gleiche konvektive Zelle auf einer tieferen Etage orthogonal zu traversieren, ein solches Verfahren nur über Gebieten anwendbar, bei denen man von ausgesprochen enger Kopplung zwischen thermischer Konvektion und Untergrund ausgehen kann. Dies war der Fall über dem beschriebenen Gebiet nördlich von Meppen. Wesentlich ausgeprägter ist die Korrelation zwischen Untergrund und thermischer Konvektion im Gebirge, wie anhand der folgenden Abb.22 gezeigt werden möge. Hier wurde südwestlich von Schwaz (Inntal) in 1500 m über Grund eine Traverse in südöstlicher Richtung auf das Kellerjoch (2344 m) hin gelegt. Die Flughöhe betrug relativ konstant 2150 m NN.

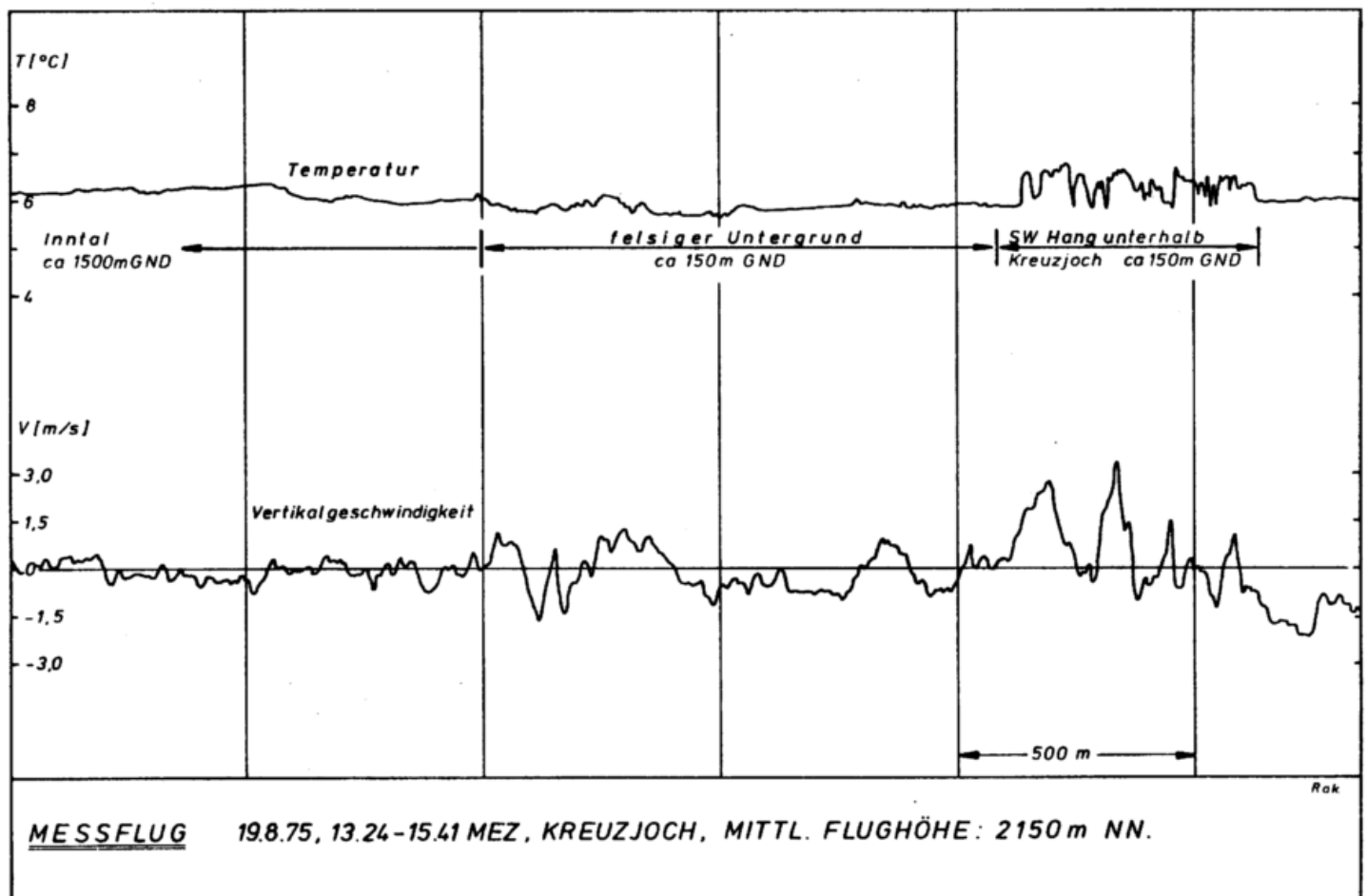


Abb.22 Horizontaler Meßflug mit Veränderung der thermischen Konvektion bei Annäherung an ein Gebirgsmassiv.

Infolge des ansteigenden Geländes verringerte sich die Höhe über Grund fortlaufend, bis sie über dem Südwesthang des Kreuzjochs nur noch etwa 150 m über Grund betrug. Die Registrierung zeigte über dem Inntal keine ausgeprägte Thermik und auch nicht über den nach Nordwesten abfallenden Hängen des Kreuzjochs. Bei Erreichen des felsigen Untergrundes in Höhe des Arbeser Kogel (2026 m, siehe Abb.22) zeigte sich starke thermische Unruhe, allerdings mit in der Summe absinkender Luftbewegung und negativen Temperaturfluktuationen. Die voll entwickelte thermische Konvektion fand sich über dem Hang südwestlich des Kreuzjochs mit positiven Temperaturabweichungen von etwa  $1^{\circ}$  C und Vertikalgeschwindigkeiten, die, in kleinräumige Zellen aufgelöst, bis zu 3 m/s betragen. Dieses Beispiel zeigte die bekannte Tatsache, daß die thermische Aktivität in den Alpen bezüglich ihrer orts-zeitlichen Abhängigkeit eng mit der Beschaffenheit und der Neigung der Bergabhänge (in Relation zum Sonnenstand) verknüpft ist. Aus diesem Grunde ist es möglich, die thermische Konvektion über derartigen Hängen als quasi-stationär zu betrachten und systematisch so zu traversieren, wie es im Kapitel 2.4 beschrieben worden ist. Leider ergaben sich während der Laufzeit des Forschungsvorhabens keine Gelegenheiten mehr, systematische Thermikuntersuchungen im Gebiet der Alpen durchzuführen. Stattdessen wurde versucht, der Vertikalstruktur der Thermik auf statistischem Wege meßtechnisch näherzukommen.

Das Beispiel des 8.9.1975 möge den Fall der normalen thermischen Konvektion repräsentieren. Die konvektiv-indifferente Schicht reichte an diesem Tage etwa bis 1300 m. Erst der Traversenflug in Höhe von etwa 600 m NN (430 m über Grund) führte zur Identifizierung der dann weiter untersuchten intensiven konvektiven Zelle. Das nach der Methode "constant attitude" geführte Flugzeug flog durch diese Zelle Traversen möglichst orthogonal durch das Zentrum und wurde dabei von derselben Zelle bis in eine Höhe von 1200 m nach oben getragen. Nach

Abklingen der Vertikalgeschwindigkeiten knapp unterhalb der Inversion wurde im Motorsteigflug versucht, das Eindringen der konvektiven Zelle in die Inversion hinein meßtechnisch mit zu erfassen. Das Ergebnis dieser Traversierung (ab 430 m GND) sowie einige Folgetraversierungen nach Durchführung des Abstieges auf 400 m ist in Abb.23 dargestellt. In der Mitte der Abbildung ist die vertikale Temperaturverteilung in Beziehung zur Trockenadiabaten dargestellt, und es ist angedeutet, wie, analog zur Abb.19, Temperaturabweichungen vom mittleren Temp mit Vertikalgeschwindigkeiten korreliert sind. Im unteren Teil des Temp sind durchweg positive Temperaturabweichungen mit positiven Vertikalgeschwindigkeiten korreliert, während ab 1000 m positive

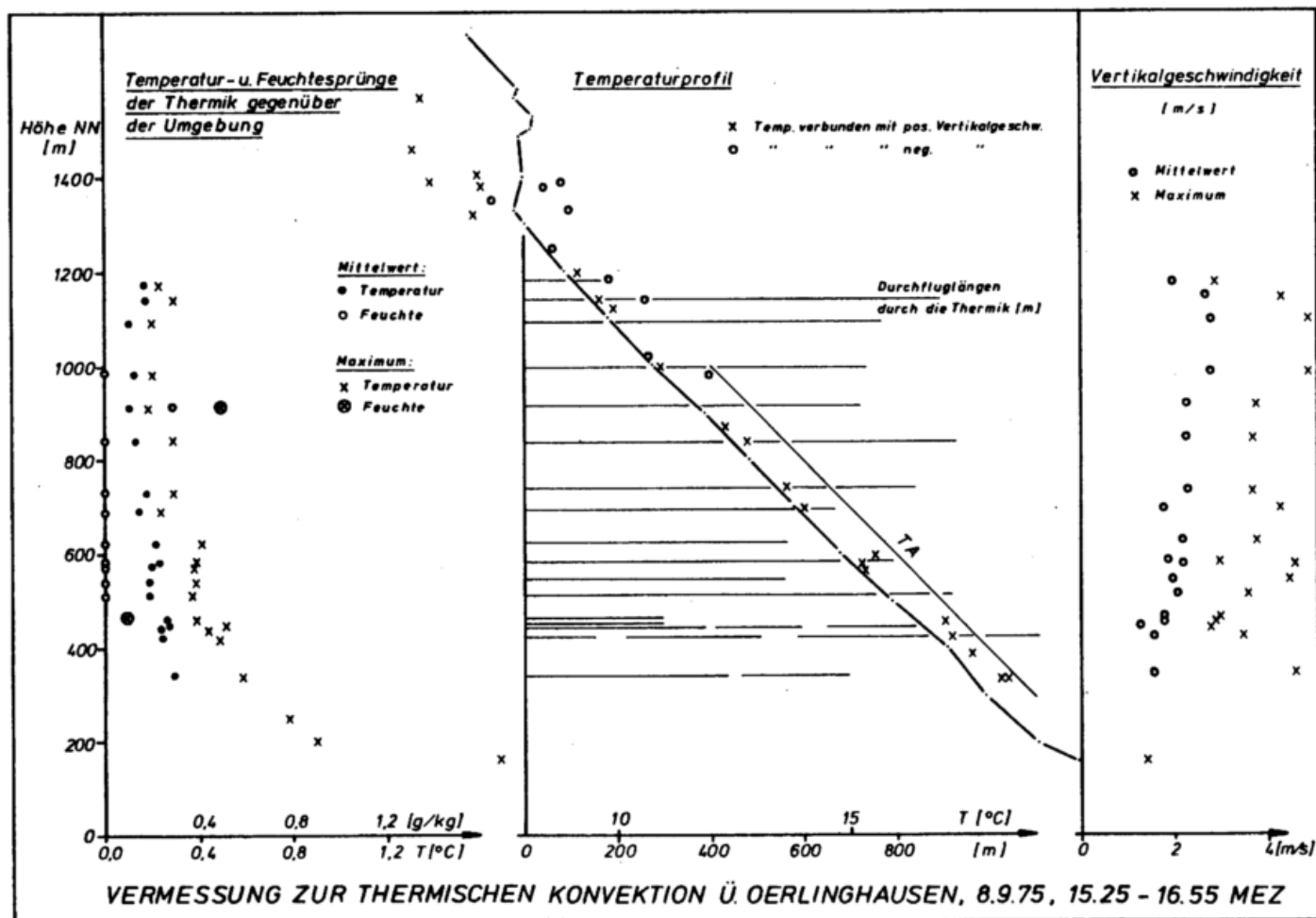


Abb.23 "EULERSche" Vermessung einer thermischen Zelle unter der Annahme, daß diese quasistationär ist.

Temperaturabweichungen vorwiegend mit Absinkbewegung der Luft verbunden sind. Dies ist insbesondere im Bereich der Inversion, d.h. um 1300 m zu erkennen. Die Durchfluglängen durch die konvektive Zelle betragen im Mittel etwa 700 m und sind relativ gleichmäßig über den Höhenbereich zwischen 400 und 1100 m verteilt. Die beim Durchflug durch die Zelle ermittelten Vertikalbewegungen sind auf der rechten Seite der Abbildung dargestellt und zeigen mit der Höhe leicht ansteigende Mittelwerte der Vertikalgeschwindigkeit von Werten um 1,5 m/s auf Werte knapp unterhalb 3 m/s. Die in der konvektiven Zelle gemessenen maximalen Vertikalgeschwindigkeiten liegen im unteren Bereich um 3 m/s und steigen auf über 4 m/s in der Höhe an, um knapp unterhalb der Inversion stark zurückzugehen. Auf der linken Seite der Abbildung sind sowohl die Temperaturabweichungen innerhalb der Zelle im Vergleich zur Umgebung als auch die zugehörigen Feuchteabweichungen wiedergegeben, und zwar nach Mittelwert und Extremwert der Zelle getrennt. Die Mittelwerte der Temperaturabweichung bewegen sich zwischen  $0,1^{\circ}\text{C}$  in der Höhe und  $0,3^{\circ}\text{C}$  in 400 m. Die Extremwerte sind doppelt so groß und erreichen insbesondere nach durchgeführtem Abstieg im untersten Teil der möglicherweise nicht mehr gleichen Zelle Werte etwa von  $0,8^{\circ}\text{C}$ . Sprünge der Feuchte sind über der gesamten Höhererstreckung kaum zu beobachten mit Ausnahme zweier Niveaus knapp unterhalb 500 m und bei 900 m.

Eine detailliertere Analyse der Traversenflüge ist in Abb.24 dargestellt und zeigt, daß es sich um eine doppelte konvektive Zelle gehandelt haben muß, die in der Höhe zusammenfließt. Dieses Zusammenfließen einzelner konvektiver Zellen in der Höhe ist durchaus realistisch und wird von Segelfliegern häufig beobachtet. Dabei finden sich zwei Segelflugzeuge, die in niedriger Höhe in zwei verschiedenen Aufwindgebieten gekreist hatten, in der Höhe in einem gemeinsam genutzten Aufwindgebiet wieder.

Traversenflüge dieser Art wurden während der Laufzeit des Forschungsvorhabens in großer Zahl durchgeführt. Unter ihnen waren

auch solche, bei denen die Flugstrategie angewendet wurde, wie sie in Kapitel 2.4 dargestellt wurde. Durch die Markierung der einzelnen thermischen Zelle durch ein mitfliegendes Segelflugzeug war die Treffgenauigkeit der durch den Kern der Zelle gelegten Traversen stark erhöht, und es hätten sich im Prinzip noch bessere Ergebnisse erzielen lassen als diejenigen, die in Abbn.23 und 24 exemplarisch wiedergegeben sind. Leider ergab sich bei dieser Art von Messungen die folgende Schwierigkeit: Es mußte in der Nähe des Segelflugplatzes Oerlinghausen gearbeitet werden, da dort die Voraussetzungen für den Start des Segelflugzeuges gegeben waren. Diese Messungen wurden begreiflicherweise an Tagen mit starker konvektiver Aktivität durchgeführt, so daß nach Auswahl einer konvektiven Zelle selten eine ungestörte

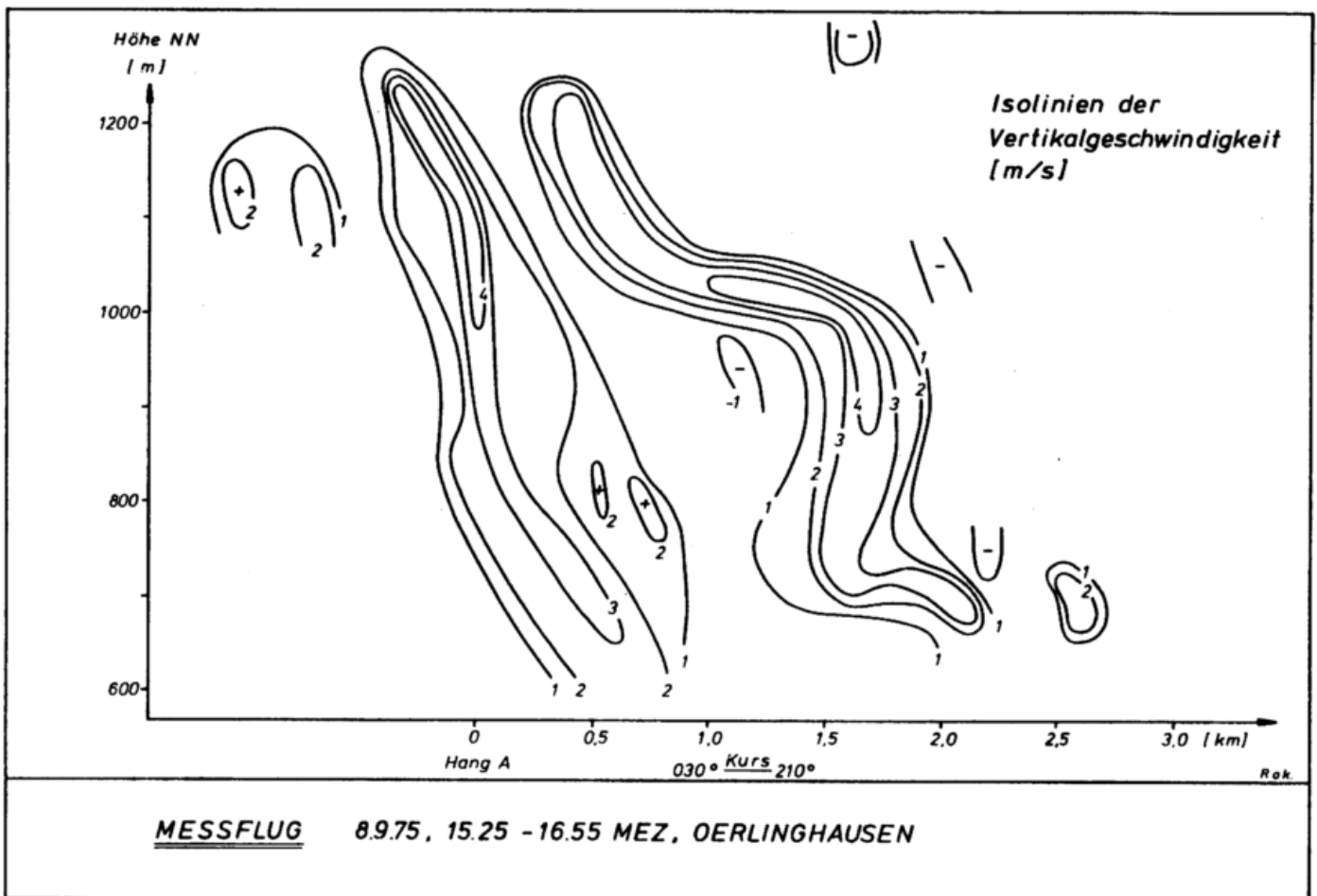


Abb.24 Versuch der Rekonstruktion der räumlichen Lage einer Thermikzelle.

Traversierung mit dem Motorsegler durchgeführt werden konnte, da in der Regel bald andere Segelflugzeuge in die Zelle einstiegen und der Motorsegler durch seine gradlinigen Durchflüge ordnungswidriges Flugverhalten zeigte. Ordnungsgerechtes Verhalten besteht, wenn sämtliche Segelflugzeuge innerhalb einer Zelle in gleichem Drehsinn kreisen. Da es während der Versuche, einzelne konvektive Zellen auf diese Weise zu untersuchen, zu gefährlichen Begegnungen zwischen Segelflugzeugen und dem Motorsegler kam, wurde zunächst auf die Weiterführung dieser Art von Untersuchungen verzichtet. Es ist jedoch geplant, diese Untersuchungen unter der Voraussetzung wieder aufzunehmen, daß es gelingt, den Luftraum durch Absprache in Umgebung der zu untersuchenden Zelle freizuhalten.

Die folgende Abb.25 faßt die Ergebnisse einer großen Zahl von Traversierungen konvektiver Zellen zusammen. Auf der linken Seite der Abbildung ist die vertikale Verteilung der mittleren und maximalen Temperaturabweichungen innerhalb der Zelle gegenüber derjenigen der Umgebung dargestellt, in der Mitte der Abbildung die Vertikalverteilung des Aufwindes, wieder nach mittleren und maximalen Werten getrennt, sowie eine ungefähre geometrische Vertikalstruktur einer konvektiven Zelle. Der aus den digitalen Meßwerten abgeleitete mittlere vertikale Fluß fühlbarer Wärme wird durch den rechten Teil der Abbildung repräsentiert und zeigt die Abhängigkeit des konvektiven Wärmeflusses mit der Höhe mit negativen Werten im Bereich von Inversionen, die im Mittel um 1100 bis 1200 m liegen.

Bei vielen dieser Traversenflüge wurde auch das Verhalten der konvektiven Zellen im Bereich der Inversionsschicht untersucht. Faßt man alles zusammen, dann ergibt sich ein ungefähres Bild, wie es Abb.26 wiedergibt. Die dünn ausgezogenen Isolinien repräsentieren Linien gleicher Abweichung der potentiellen Temperatur zwischen konvektiver Zelle und Umgebung, die stark ausgezogenen Isolinien geben die Verteilung der Vertikalgeschwindigkeit in

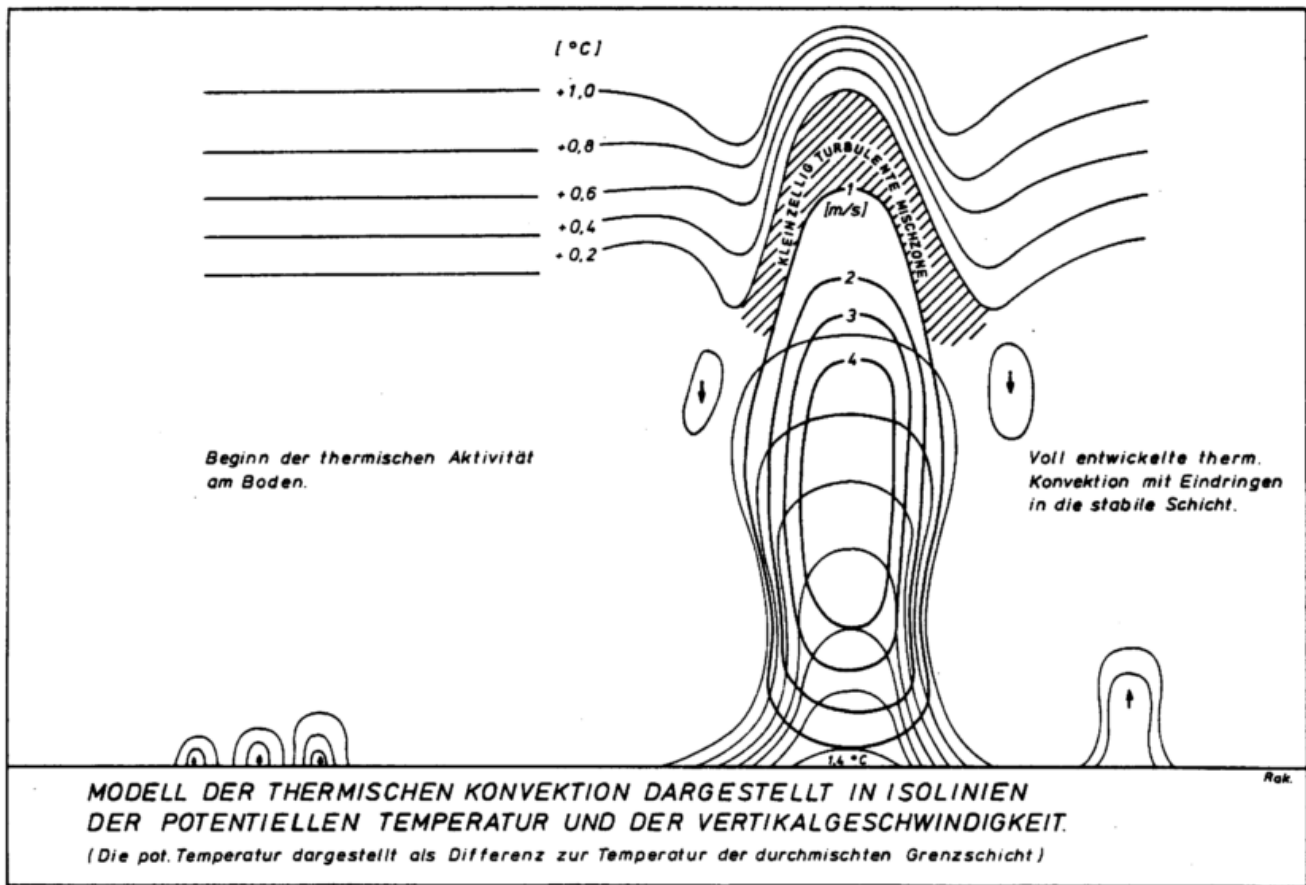
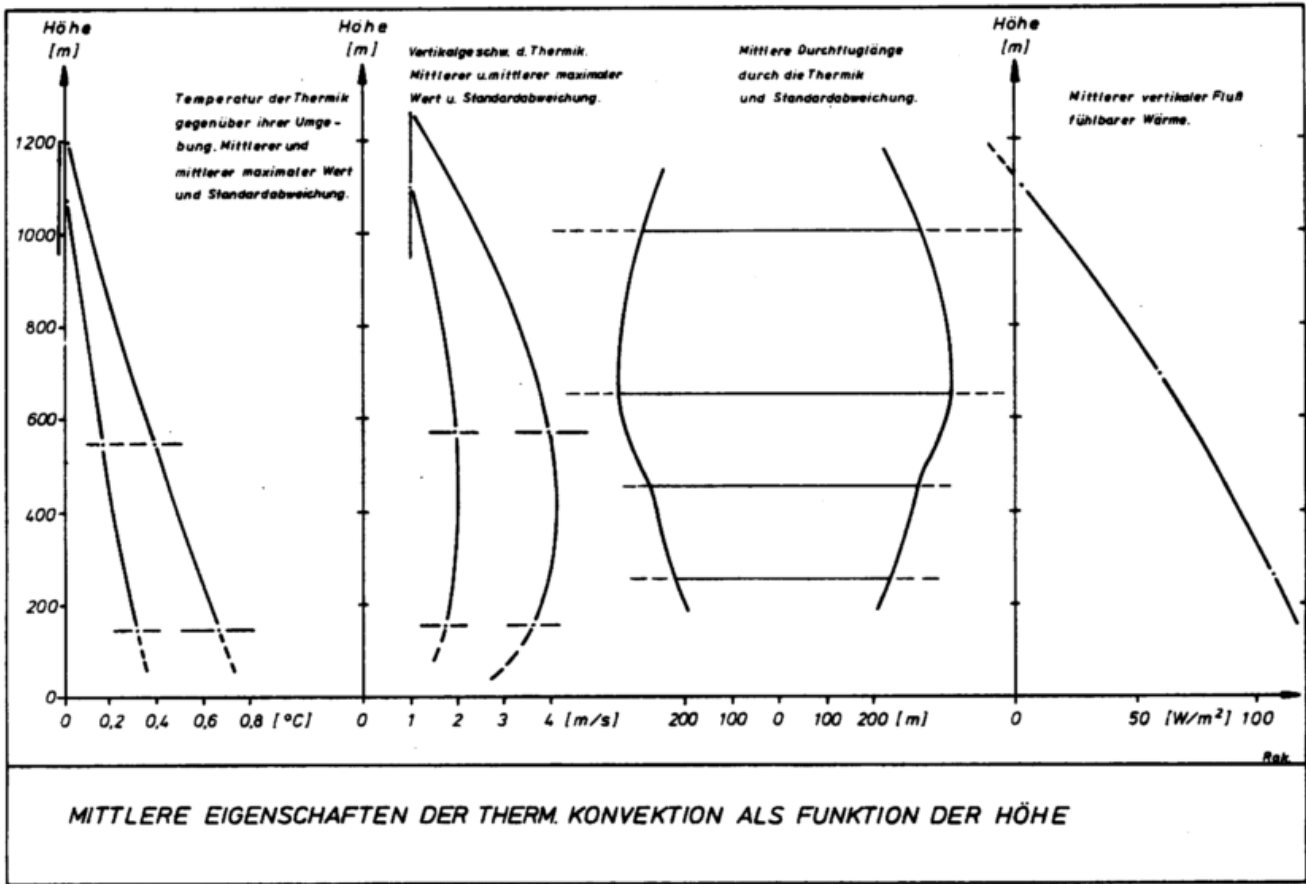


Abb.25 Ergebnis einer Vielzahl von "EULERSchen" Traversierungen von konvektiven Zellen.  
 Abb.26 Verhalten der Thermik in der Umgebung einer Inversion.

schematischer Weise wieder. Die Zirkulation im oberen Teil der Zelle führt meist zu einer starken Deformation der Inversionsschicht, dargestellt durch die Deformation der Linien gleicher potentieller Temperatur. Dieses Verhalten konvektiver Zellen in der Nähe von Inversion wird im Folgenden bei der Behandlung der Kühlturmfahnen-Konvektion noch erörtert werden.

#### 4.2 Kühlturmfahnen-Konvektion

In den bisherigen Ausführungen wurde bereits darauf hingewiesen, daß bei der Planung des Forschungsvorhabens beabsichtigt war, die stationäre Erzeugung konvektiver Zellen in der Atmosphäre durch Kühltürme von Kraftwerken als Forschungsgegenstand zu wählen. Es konnte erwartet werden, daß die durch Kühltürme erzeugte Konvektion gleiche charakteristische Eigenschaften haben müßte wie die natürliche. Der große Vorteil bei der Untersuchung der anthropogen erzeugten Konvektion besteht darin, daß wegen der Stationarität des Vorganges beliebig viele Experimente, d.h. gezielte Traversendurchflüge während einer gegebenen großräumigen Situation durchgeführt werden können.

Da in der Mehrzahl der Fälle, und besonders über Tage bei geringerer relativer Feuchte der Umgebungsluft, die sichtbare Fahne nur einen sehr, sehr kleinen Teil der tatsächlichen konvektiven Fahne kenntlich macht, wurden im überwiegenden Teil dieser Untersuchungen die nicht sichtbaren Kühlturmfahnen zwischen Höhen von etwa 150 m über Grund bis zur obersten Aufstiegshöhe derselben vermessen. Die Strategie dieser Vermessung wurde mit Hilfe von Abb.10 erläutert.

Aus der Fülle des Materials von insgesamt vier umfangreichen Meßkampagnen an den Kühltürmen der Kraftwerke Neurath und Meppen möge nur ein kleiner Teil ausgewählt werden, der es erlaubt, charakteristische Eigenschaften dieser Art von Konvektion zu erläutern. Zu den zunächst überraschenden charakteristischen Eigenschaften, und damit auch jeder starken natürlichen Konvektion, gehören die folgenden: Bis Entfernungen, die das 10 bis 20-fache der Kühlturmhöhe ausmachen, bildet die Fahne ein kompaktes, von der Umgebungsluft deutlich getrenntes Phänomen, bei dem die entrainment- detrainment-Prozesse, außer an der Unterseite der

Fahne, sonst offensichtlich nur eine untergeordnete Rolle spielen. Dies wird besonders deutlich durch scharfe Sprünge der gemessenen thermodynamischen Variablen (Temperatur, Feuchte), die auf eine Distanz von maximal 10 m von den Umgebungswerten auf diejenigen innerhalb der Fahne springen. Die Turbulenz im konvektiven Scale innerhalb der Fahne ist sehr energiereich und bezüglich ihrer statistischen Eigenschaften deutlich von derjenigen der Umgebung unterschieden. Der Einfluß selbst kleiner Inversionen, bzw. stabiler werdender Schichtungen auf die vertikale Ausbreitung der Kühlturm-fahne konnte klar nachgewiesen werden. Es konnte jedoch auch nachgewiesen werden, daß die Kühlturm-fahne in der Lage ist, mit Hilfe von dynamischer Erosion, erzeugt durch die in ihr eingelagerten Zirkulationsmechanismen, Inversionen beachtlicher Stärke in weiterer Distanz vom Kühlturm zu durchbrechen und sich oberhalb dieser Inversion neu als Fahne zu formen. Es kann angenommen werden, daß sich auch die starke natürliche Konvektion, die zur Bildung von Cumuluswolken führt, in gleicher Weise verhält.

Im folgenden sollen Beispiele von Querschnittstraversierungen unter drei verschiedenen Bedingungen diskutiert werden. Ein Normalfall wird durch indifferente bis leicht stabile Schichtung repräsentiert, so wie er am 18.2.1975 in Meppen vorlag. Die folgende Abb.27 zeigt insgesamt 15 horizontale Traversen durch die Fahne quer zur mittleren Windrichtung, wobei die horizontalen Striche eine mittlere Flughöhe auf der jeweiligen Traverse charakterisieren und durch ihre Breite den Bereich der ausgeprägten Feuchtestörung durch die Fahne wiedergeben. In der angegebenen Entfernung von 900 m vom Kühlturm ergibt sich für den Querschnitt der Fahne annähernd eine elliptische Form, die bis zu einer Höhe von 800 m aufgestiegen ist. Die eingezeichnete vertikale Temperaturverteilung (T) ist im Vergleich zur trockenadiabatischen Schichtung (TA) bis 100 m Höhe instabil und darüber leicht stabil geschichtet. Die synoptische

Situation am Boden ist durch das eingezeichnete Stationssymbol gekennzeichnet, der Höhenwind ist hier und in den folgenden Abbildungen entlang der Höhenskala für die Vertikalgeschwindigkeit auf der rechten Seite der Abbildung eingetragen. Die

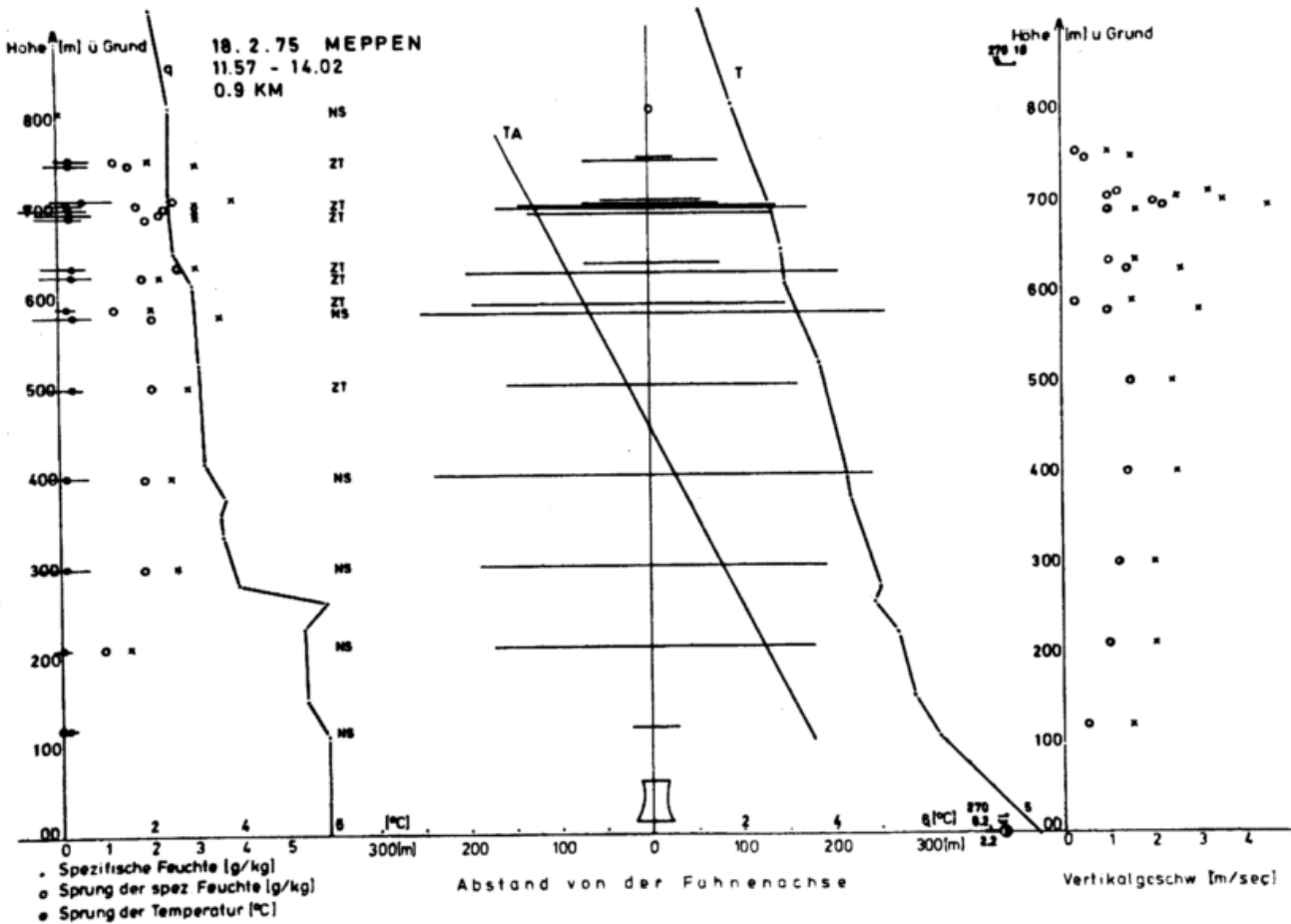


Abb.27 Querschnittstraversierung einer Kühlturm- fahne unter "normalen" Umgebungsbedingungen.

Vertikalgeschwindigkeit ist aus den Analog- bzw. Digitalaufzeichnungen einmal als Mittelwert (o) über die gesamte in der Fahne verlaufenden Traverse gebildet, andererseits sind die Maximalwerte eingezeichnet (+). Man erkennt, daß die mittlere Vertikalgeschwindigkeit ab einer Höhe von etwa 120 m stetig bis zu

einem Wert von etwa 1,5 m/s in 500 m zunimmt und dann im oberen Teil der Fahne starken Schwankungen unterworfen ist, und zwar dort, wo die Kondensation, d.h. die Bildung einer sichtbaren Fahne einsetzt. Während sich die maximalen Vertikalgeschwindigkeiten in der Fahne bis etwa 600 m ebenfalls relativ stetig entwickeln, kommt es zu sehr starken Schwankungen mit extremen Werten bis über 4 m/s im obersten Bereich der Fahne. Ähnliche Verhältnisse zeigen sich auch bei den entsprechenden Mittel- bzw. Maximalwerten der Abweichungen von Temperatur und Feuchte von den Werten der Umgebung, so wie sie auf der linken Seite der Abbildung wiedergegeben sind. Da die Temperatursprünge (o) sowie ihre Variation, angedeutet durch die horizontalen Striche, im unteren Teil der Fahne sehr klein sind, kommt es in einer Höhe von 700 m, ebenso wie es bei der Vertikalgeschwindigkeit der Fall war, zu sehr starken Schwankungserscheinungen. Am deutlichsten ausgeprägt ist das Verhalten der spezifischen Feuchte, die bis über 600 m, genau wie die Vertikalgeschwindigkeit, ein stetiges Anwachsen, sowohl der Mittelwerte als auch der Maximalwerte, aufweist und darüber den gleichen Schwankungen unterworfen ist wie die beiden bisher besprochenen Variablen. Die spezifische Feuchte der Umgebung ist durch die ausgezogene Linie auf der linken Seite der Abbildung wiedergegeben. Die Sichtbarkeit, bzw. die Nichtsichtbarkeit der Fahne ist durch die Symbole S (sichtbar), ZT (zum Teil sichtbar) und NS (nicht sichtbar) charakterisiert. Man erkennt, daß die Fahne, repräsentiert durch die Vertikalgeschwindigkeit sowie durch die Sprünge in der spezifischen Feuchte und der Temperatur, physikalisch auch deutlich unterhalb derjenigen Höhe ausgeprägt ist, in der sie durch Kondensation sichtbar wird. Diese Verhältnisse entsprechen denjenigen der natürlichen Konvektion, wo sich unterhalb der Basis jeder Cumulus-Wolke ein ausgeprägtes Aufwindgebiet befindet.

Die beim Durchflug durch die Fahne infolge Wolkenbildung erkennbare Zellenstruktur der Konvektion legte die Vermutung nahe, daß in einer Höhe von 700 m eine starke Variabilität der Konvektion zu finden sein müßte. Aus diesem Grunde wurde in der genau gleichbleibenden Höhe von 700 m mehrmals traversiert. Die folgenden Abbn. 28 und 29 lassen die Variabilität der Verhältnisse in gleicher Höhe in zeitlichem Ablauf erkennen. Lediglich die Traverse Nr. 30 ist weggelassen worden, da sie große Ähnlichkeit mit Traverse Nr. 29 besaß. In Abb. 28 links ist zu erkennen, wie sich das Flugzeug ohne wesentliche Schwankungen der Vertikalgeschwindigkeit der Fahne nähert. An derjenigen Stelle, an der die spezifische Feuchte ihren charakteristischen Sprung zeigt (oberer Teil der Abb.), zeigt die Vertikalgeschwindigkeit die größte Abwärtsbewegung in Größe von etwa 0,5 m/s. Dieses Verhalten hat sich als typisch für die Flanken-zirkulation in Beziehung zu den Sprüngen von Temperatur und Feuchte erwiesen. Beim Durchflug durch die Fahne nimmt die Vertikalgeschwindigkeit rasch bis auf Werte um 3 m/s zu, um dann ebenso rasch bei Annäherung an die Ausflugflanke wieder abzunehmen. Diese glatte Registrierung der Vertikalgeschwindigkeit ist der früher beschriebenen Flugmethode (minimale Steuerbewegungen zur Einhaltung der Methode "constant attitude") zu verdanken. Die Temperaturregistrierung im untersten Teil der Abbildung zeigt ähnlich scharfe Sprünge wie diejenige der spezifischen Feuchte und weist eine Fahnenbreite von 290 m ebenso aus, wie dies auch die spezifische Feuchte andeutet. Der 1 1/2 Minuten später erfolgende Einflug in die Fahne, rechte Seite der Abbildung, zeigt bereits eine deutliche Strukturveränderung derselben, indem sie verbreitert erscheint und etwas geringere Vertikalgeschwindigkeiten aufweist. Außerdem ist beim Ausflug ein Absinkgebiet mit Vertikalgeschwindigkeiten um 1,5 m/s besonders ausgeprägt. Dieses Gebiet entspricht dem Absinkgebiet der links stehenden Abbildung beim Einflug, da es dieselbe Seite der Fahne ist. Die nächste Traverse, die knapp drei Minuten später geflogen wurde, zeigt in der gleichen

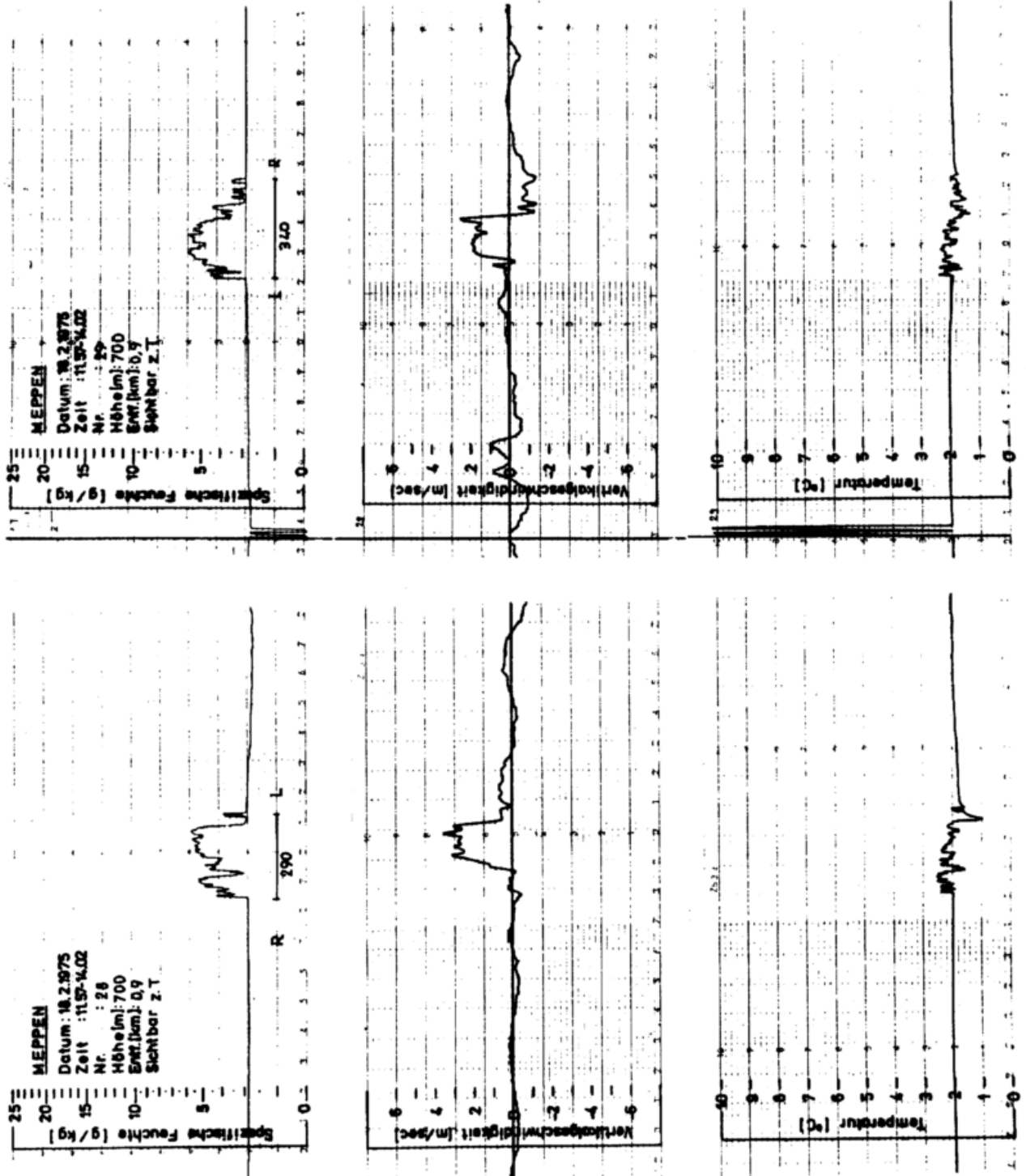


Abb.28 Wiederholte Querschnittstraversierung in gleicher Höhe, Traverse 28 und 29.

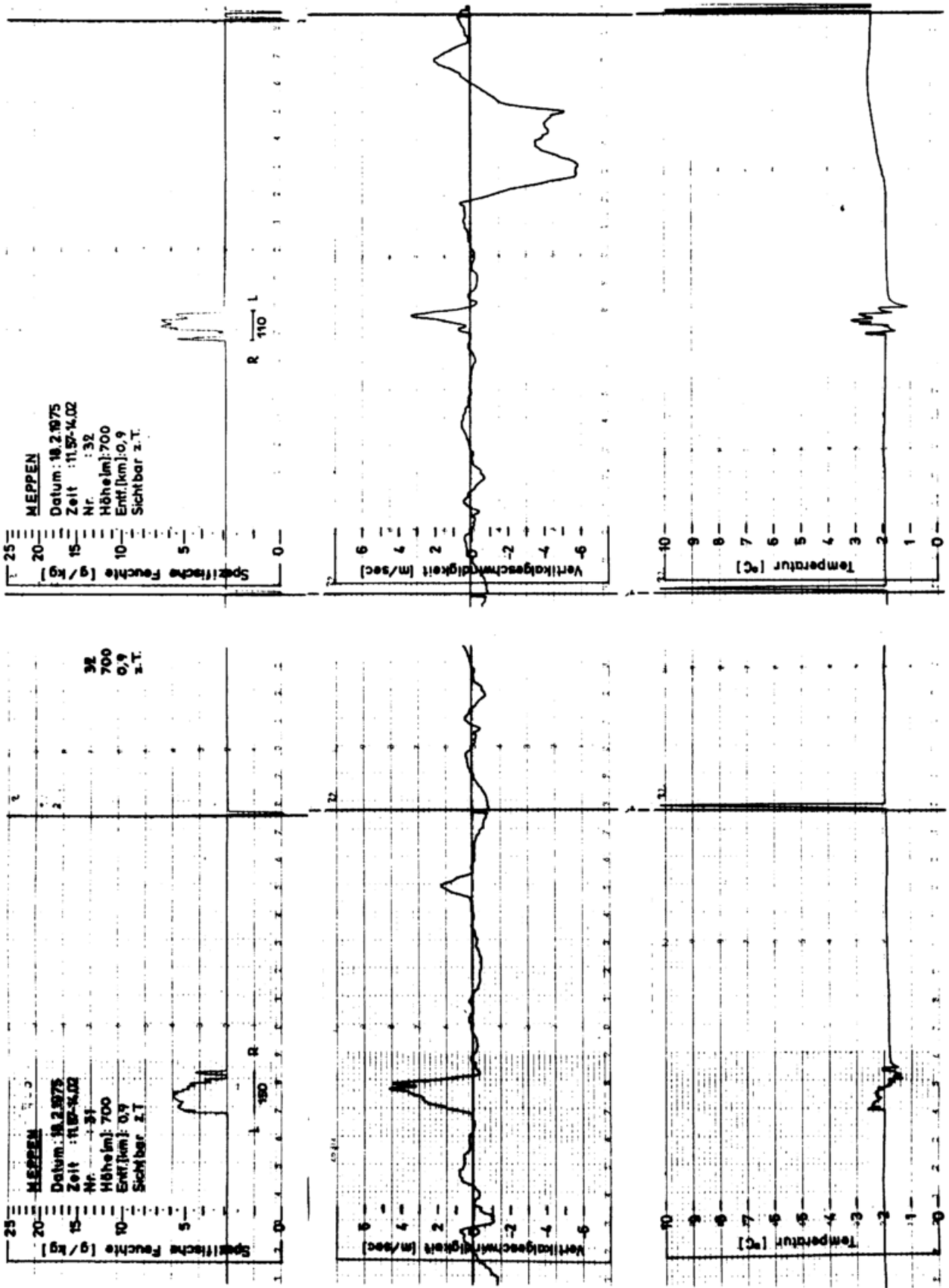


Abb.29 Wiederholte Querschnittstraversierung in gleicher Höhe, Traverse 31 und 32.

Höhe eine wesentliche Veränderung der Fahnunstruktur, indem die Fahnenbreite auf 150 m abgenommen hat, die Vertikalgeschwindigkeit jedoch gegenüber den vorigen Fällen bis auf fast 5 m/s angestiegen ist. Hierbei kann es sich nur um eine andere konvektive Zelle innerhalb des Verbandes der Fahne handeln, deren Lebenslauf etwas verschieden von demjenigen war, der vorher vermessen wurde. Eine weitere Veränderung wird 1 1/2 Minuten später bei der nächsten Traversierung angetroffen, indem die Fahne sich weiterhin verkleinert hat, aber deutlich größere Temperaturabweichungen gegenüber der Umgebung aufweist.

Dasselbe Experiment wurde am Nachmittag desselben Tages in einer Höhe von rund 500 m wiederholt. Es ist in der übernächsten Abb.31 dargestellt und gibt zwei Traversen im Abstand von nur 3 Minuten wieder. Dabei war es aufgrund von überlagerter Thermik schwierig, sich der Fahne mit einer Vertikalgeschwindigkeit zu nähern, die exakt Null war. Trotzdem können sowohl das Absinkgebiet vor, als auch dasjenige hinter der Fahne als reell angesehen werden. Hier ist ganz besonders deutlich zu erkennen, daß sich die scharfen Sprünge von spezifischer Feuchte und Temperatur genau dort finden, wo die Absinkgeschwindigkeit an den Fahnenflanken am größten ist. Hier wie auch in den anderen Abbildungen von Traversendurchflügen möge beachtet werden, daß aufgrund der Konzentration auf einen horizontalen Einflug die Vertikalgeschwindigkeitsregistrierungen in der Regel etwa 300 m beiderseits der Fahne als reell angesehen werden können und daß alle Registrierungen außerhalb mit der bei Wendemanövern, bzw. Abstiegsmanövern erzeugten Vertikalgeschwindigkeit des Flugzeuges verbunden sind.

Um die Abhängigkeit der Eigenschaften der Kühlturmkonvektion von der Entfernung vom Kühlturm zu untersuchen, möge für den soeben diskutierten Fall die Serie von zwei Querschnittstraversierungen dienen, die in Abb.30 wiedergegeben ist. Die vertikale

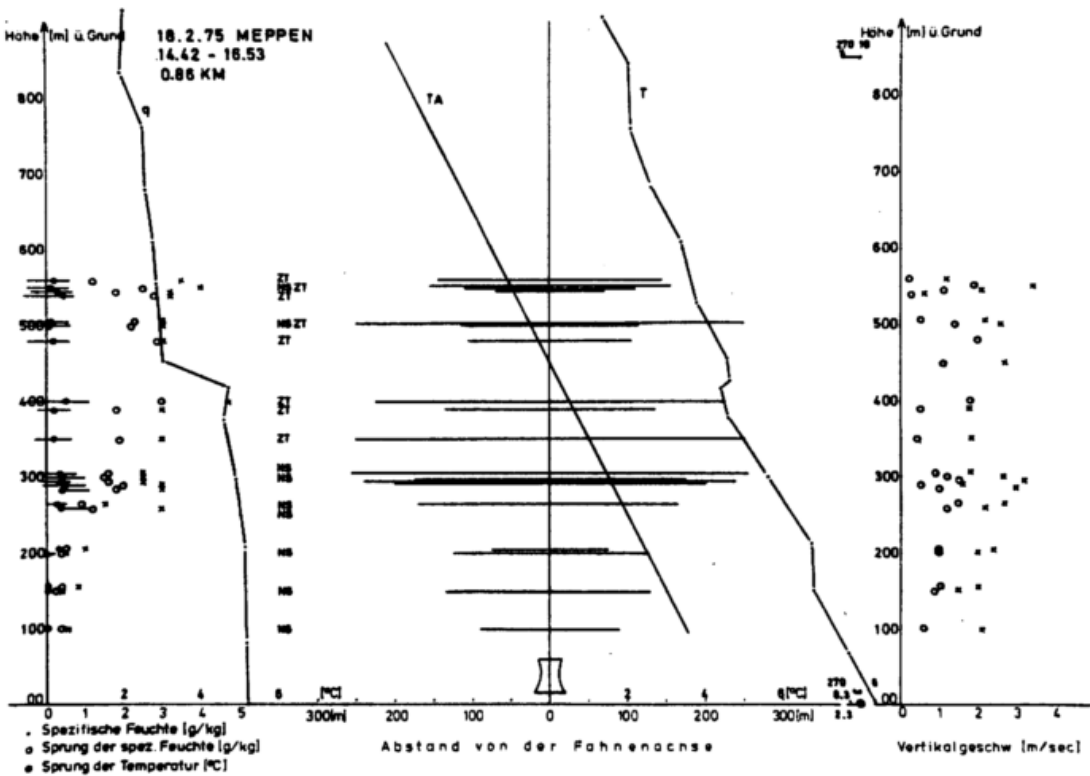
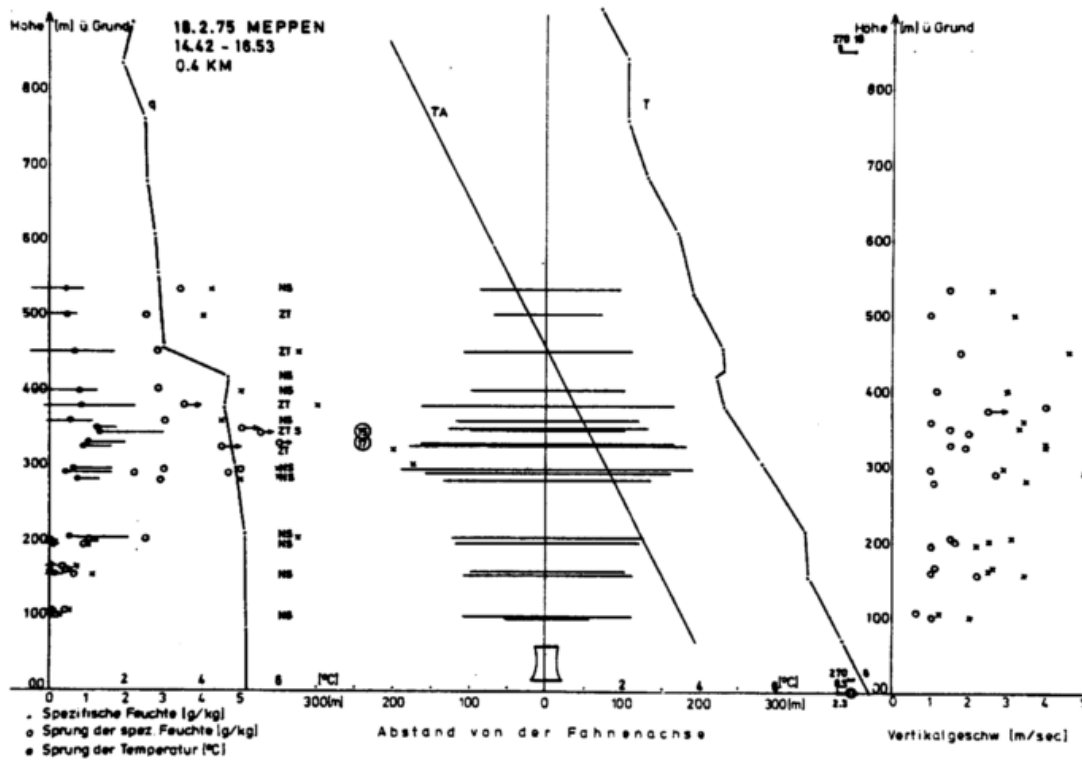


Abb.30 Querschnittstraversierung in verschiedener Entfernung bei Vorhandensein einer eingelagerten Inversion geringer Mächtigkeit.

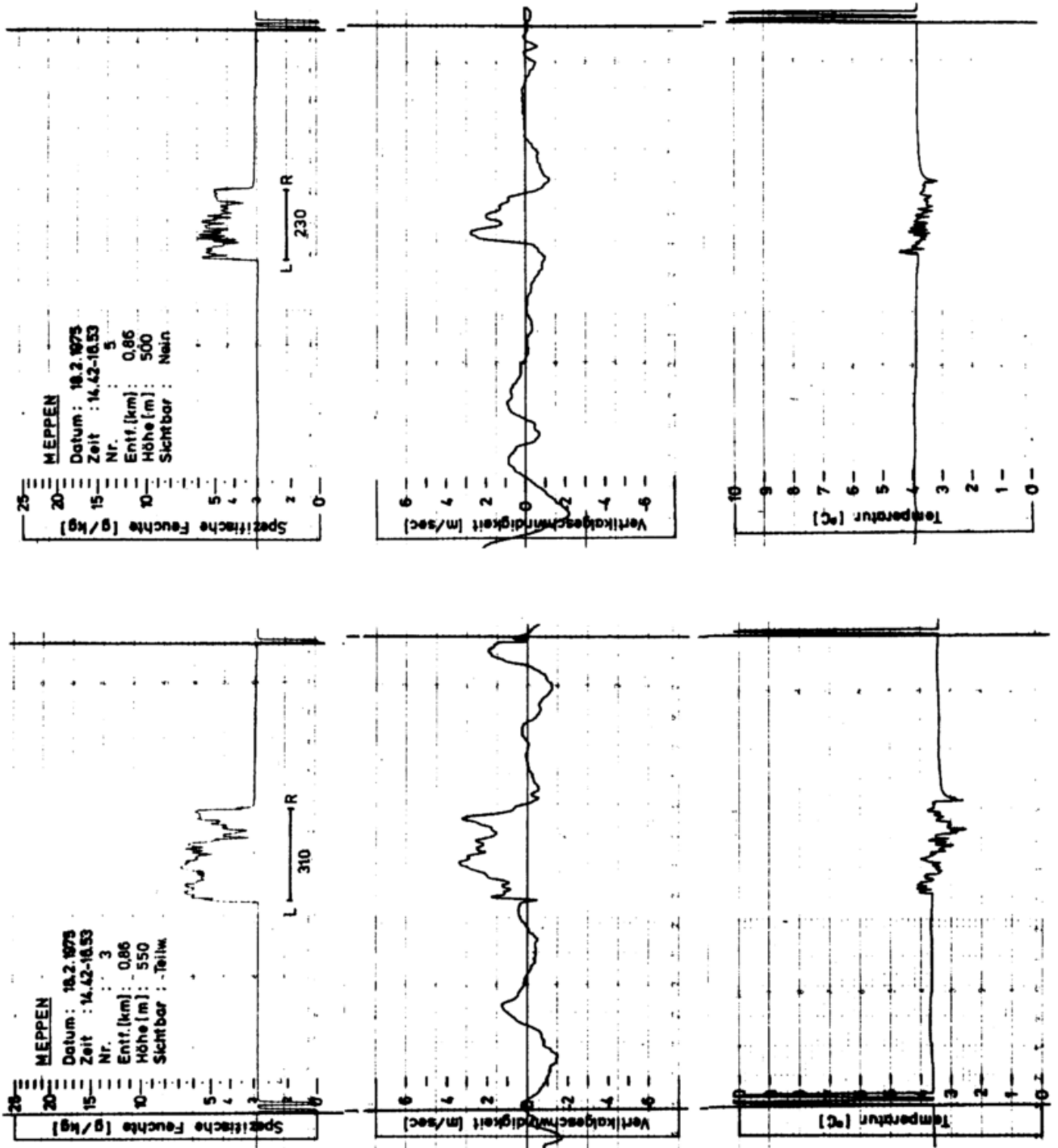


Abb.31 Querschnittstraversierung in angenähert gleicher Höhe.

Temperaturschichtung der Umgebung zeigt eine kleine Inversion knapp oberhalb 400 m. Diese macht sich auch in der Feuchtesondierung, wie auf der linken Seite der Abbildung zu sehen ist, deutlich bemerkbar. Dies führt dazu, daß die Vertikalgeschwindigkeiten unterhalb der Inversion in einer Kühlturmentfernung von 400 m deutlich die größten Schwankungen aufweisen, was auch für diejenigen der Temperatur und der Feuchte gilt. Da die Fahne die kleine Inversion bereits im Begriff ist zu durchstoßen, nehmen die Vertikalgeschwindigkeiten und die Sprünge der Variablen im oberen Teil der Fahne nicht mehr ab. In einer Kühlturmentfernung von 860 m ist die Durchstoßung der kleinen Inversion schon zu erkennen, indem die großen Werte der Vertikalgeschwindigkeit an der Untergrenze der Inversion verschwunden sind und sich neue große Werte in einer Höhe von 500 - 600 m finden, die darauf hinweisen, daß sich die Fahne in dieser Höhe neu formiert. Ein ähnliches Verhalten zeigen auch die Sprünge der Feuchte wie der Temperatur. Es ist an diesem Beispiel zu erkennen, daß die Ausbildung der Konvektion in starkem Maße von der Feinstruktur der vertikalen Schichtung der Atmosphäre abhängt und dies bereits bei der außerordentlich intensiven Konvektion, die innerhalb von Kühlturmfahnen angetroffen wird. Eine derartige Abhängigkeit ist noch stärker bei der schwächeren natürlichen Konvektion zu erwarten.

Die folgende Abb.32 möge den Einfluß einer stärkeren Inversion auf den Ausbreitungsvorgang der Kühlturmfahnenkonvektion verdeutlichen. In einer Höhe von etwa 300 m befindet sich eine Inversion, die mit konventionellen aerologischen Methoden wahrscheinlich nicht in dieser Form gefunden worden wäre. Trotzdem behindert sie das vertikale Aufsteigen der Fahne ganz entscheidend. In Abb.32 oben ist zu erkennen, daß, gemessen an den registrierten Vertikalgeschwindigkeiten und den Sprüngen von Feuchte und Temperatur, die Konvektion an der Untergrenze der Inversion praktisch ihr Ende findet. Dies ist noch in einer Entfernung von 800 m der Fall. Im folgenden führt diese Sperrwirkung der

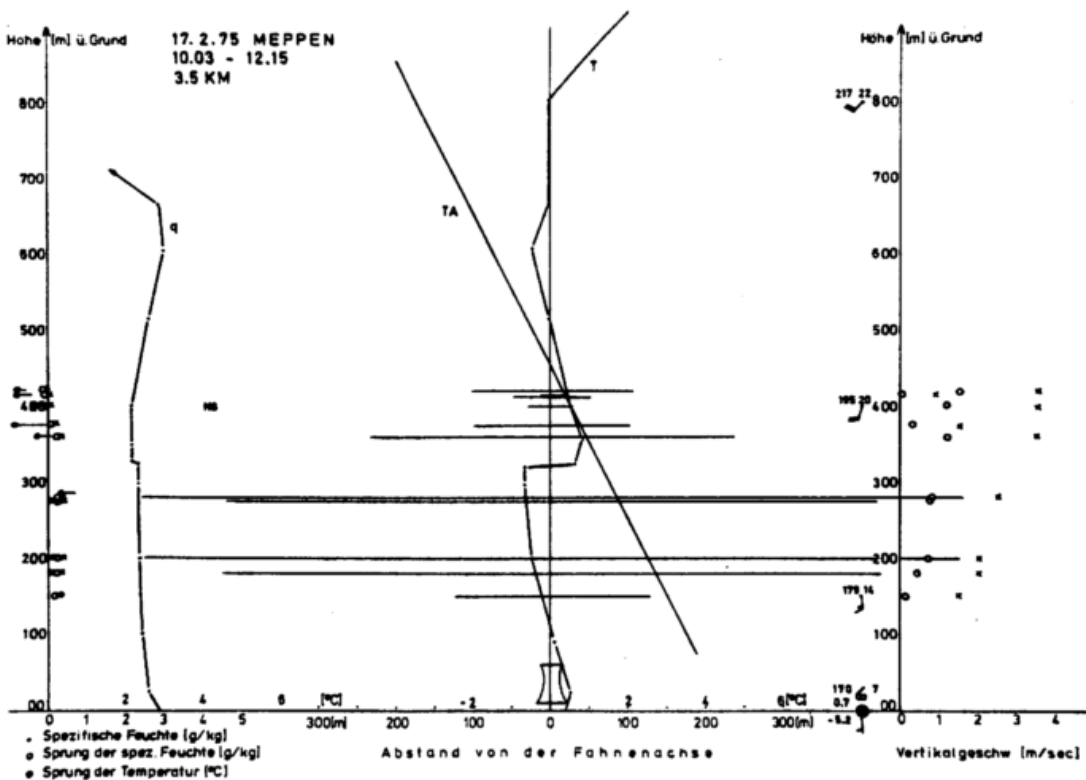
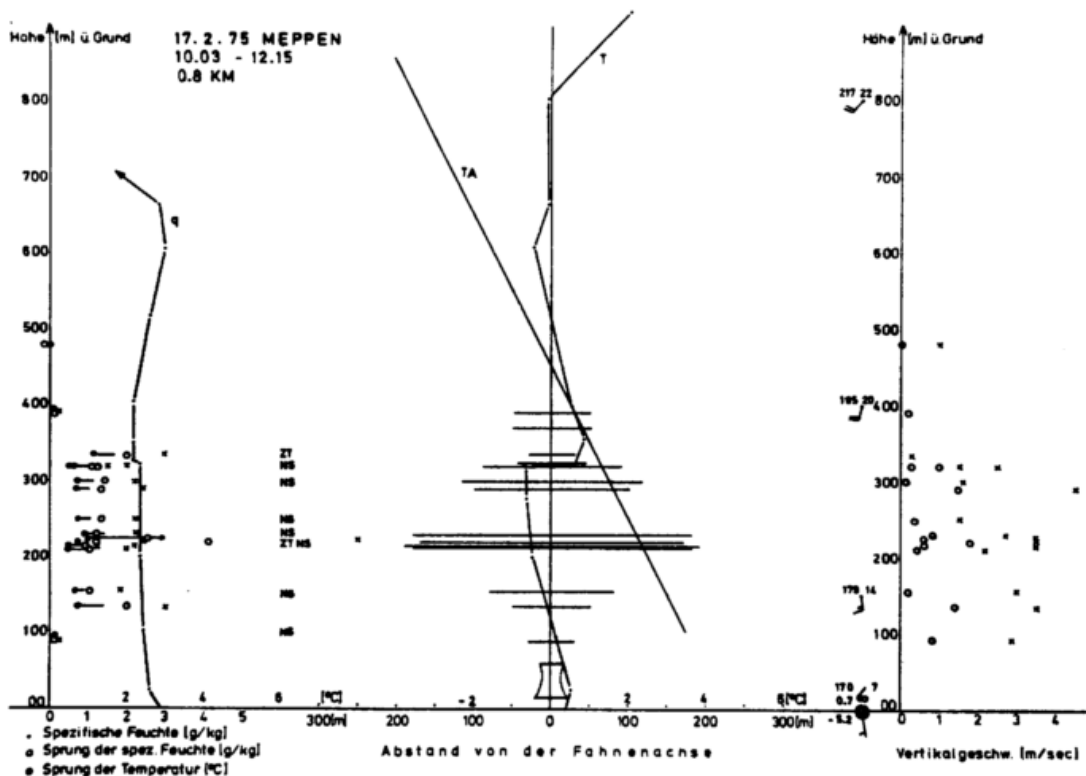
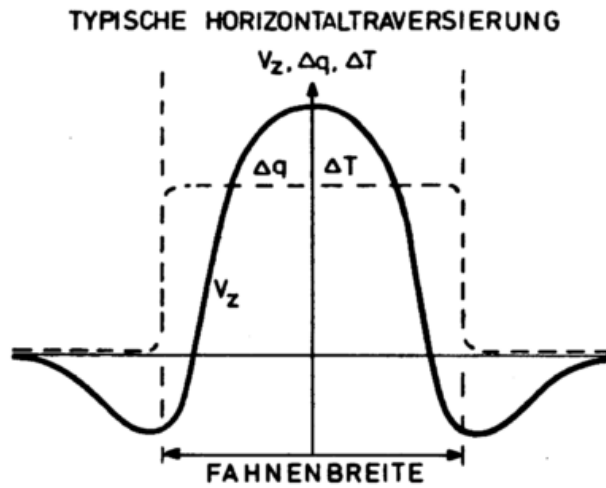


Abb.32 Querschnittstraversierung in verschiedenen Entfernungen bei Vorhandensein einer starken eingelagerten Inversion geringerer Mächtigkeit.

Inversion dazu, daß sich die konvektiven Zellen unterhalb der Inversion horizontal weit ausbreiten, wie im unteren Teil der Abb.32 bei einer Kühlturmentfernung von 3.500 m zu sehen ist. Es treten dort immer noch große Vertikalgeschwindigkeiten auf, wenn auch die Sprünge von Temperatur und Feuchte infolge der großen Entfernung vom Kühlturm sehr klein geworden sind. Dieses Ergebnis ist insofern wichtig, als der weitere Lebenslauf der Konvektion weniger durch die thermodynamischen Variablen bestimmt wird als durch die vorher durch diese induzierte Vertikalzirkulation, die sich offensichtlich lange erhält. Sie ist sogar so stark, daß sie die Fahne in die Lage versetzt, die Inversion erodierend zu durchbrechen und in einer Höhe von 400 m Vertikalgeschwindigkeiten von der Größe zu erzeugen, wie sie auf der rechten Seite der Abbildung zu erkennen sind.

Zusammenfassend kann über die intensive Kühlturmfahnen-thermik, die starker natürlicher Thermik entspricht, festgestellt werden, daß die in der folgenden Abb.33 wiedergegebenen Eigenschaften charakteristisch zu sein scheinen: Die einzelnen konvektiven Elemente, die die Fahne bilden, steigen aufgrund ihres Auftriebes kompakt und von der Umgebung scharf getrennt auf, wobei sie zu diesem Aufstieg und zur Vergrößerung des Querschnittes ihre Massenzufuhr durch entrainment hauptsächlich an ihrer Unterseite beziehen. Der obere Teil der Abbildung zeigt eine typische Transversierung, etwa in der Mitte der Fahne, mit deutlich ausgeprägter Flankenzirkulation und scharfen Sprüngen von Temperatur und Feuchte, die sich dort finden, wo die Vertikalgeschwindigkeit die größten abwärts gerichteten Werte annimmt.

Es war ein glücklicher Umstand, daß die von seiten des Forschungsplans ins Auge gefaßte Untersuchung der Kühlturmthermik zur gleichen Zeit in den Mittelpunkt des öffentlichen Interesses rückte, und daß deshalb durch diese Untersuchungen als Nebenprodukt von seiten der Meteorologie ein Beitrag auf dem Gebiet des Umweltschutzes abfiel. Es konnte nämlich hinsichtlich der Probleme des



QUERSCHNITTVERTEILUNG IN MITTL. ENTFERNUNG VOM KT.

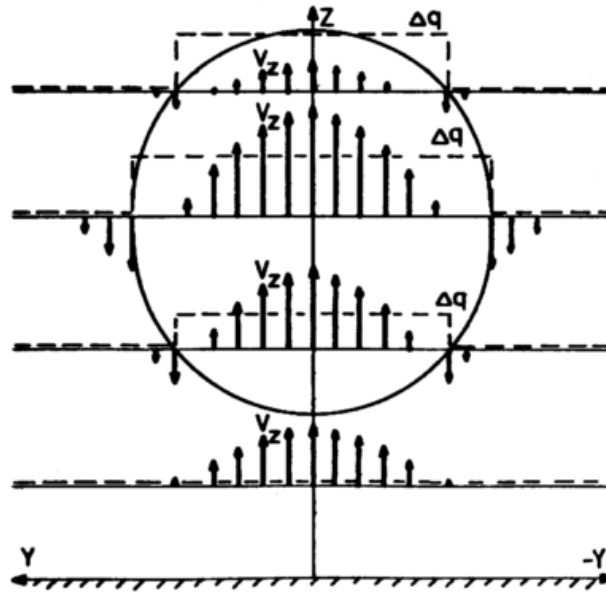


Abb.33 Typische Querschnittseigenschaften einer Kühlturmfahne.

Umweltschutzes im Zusammenhang mit Kühltürmen die Feststellung gemacht werden, daß die Eigenschaften der Kühlturmfahne mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit den Erdboden nicht berühren und zwar deshalb, weil nachgewiesen werden konnte, daß aufgrund des starken entrainment-Mechanismus an der Unterseite der Fahne sich dort stets Umgebungsluft befindet. Somit konnte das Problem der mikroklimatischen Beeinflussung der Umgebung von Kühltürmen auf das Problem der Abschattung der Sonnenstrahlung durch die sichtbare Kühlturmfahne reduziert werden. Da die Länge der sichtbaren Fahne in einem direkten Zusammenhang mit der relativen Feuchte der Luft steht, konnte die weitere Aussage gemacht werden, daß während der Tageszeiten mit Strahlung infolge abnehmender relativer Feuchte auch stets mit einer Abnahme der Fahnenlänge zu rechnen ist, so daß von einer eigentlichen Beeinflussung der Umgebung durch die Kühlturmthermik und deren kondensierter Teile nicht gesprochen werden kann.

5. RAUM-ZEITLICHE VERTEILUNG KONVEKTIVER ZELLEN  
DARGESTELLT AM BEISPIEL DER VERHÄLTNISSE IM  
VORALPINEN HÜGEL- UND MOORLAND

5.1 Die großräumige Wetterlage

In Hinblick auf die Untersuchung des Zusammenhanges zwischen thermischer Aktivität und Beschaffenheit des Untergrundes wurde einerseits auf eine möglichst stationäre Wetterlage gewartet und andererseits nach einem Gebiet gesucht, über dem sich mit großer Wahrscheinlichkeit eindeutige Zusammenhänge zwischen Unterlage und thermischer Aktivität würden finden lassen. Als Untersuchungsgebiet bot sich aus vielen Gründen, u.a. aus fliegerischer Erfahrung, das voralpine Hügel- und Moorland besonders an. Großflächige und langgestreckte Seen, ebenes Wiesen- und Waldgelände, niedrige Hügelketten sowie Moorgebiete von der räumlichen Ausdehnung der Seen ließen das Gebiet zwischen München und Alpenrand für derartige Untersuchungen als besonders geeignet erscheinen.

In den ersten Maitagen des Jahres 1976 ließ sich die Bildung einer stationären Wetterlage vermuten. Diese Vermutung bestätigte sich während der Meßkampagne, die zwischen dem 5. und 10. Mai 1976 vom Flugplatz Oberpfaffenhofen aus durchgeführt wurde. Die Wetterkartenausschnitte der Abbn.34 und 35 für die genannten Tage zeigen für die vier aufeinanderfolgenden Tage vom 5. - 8. Mai ein erstaunlich stationäres Bild. Im Untersuchungsgebiet südlich von München wurde während dieser vier Tage unter meteorologischen Bedingungen geflogen, die hinsichtlich der Ausbildung und Vermessung der thermischen Konvektion als ideal angesehen werden konnten. Im gesamten Untersuchungsgebiet herrschte wolkenloses Strahlungswetter verbunden mit konstanten Windverhältnissen. Erst am 9. Mai stellte sich die Wetterlage

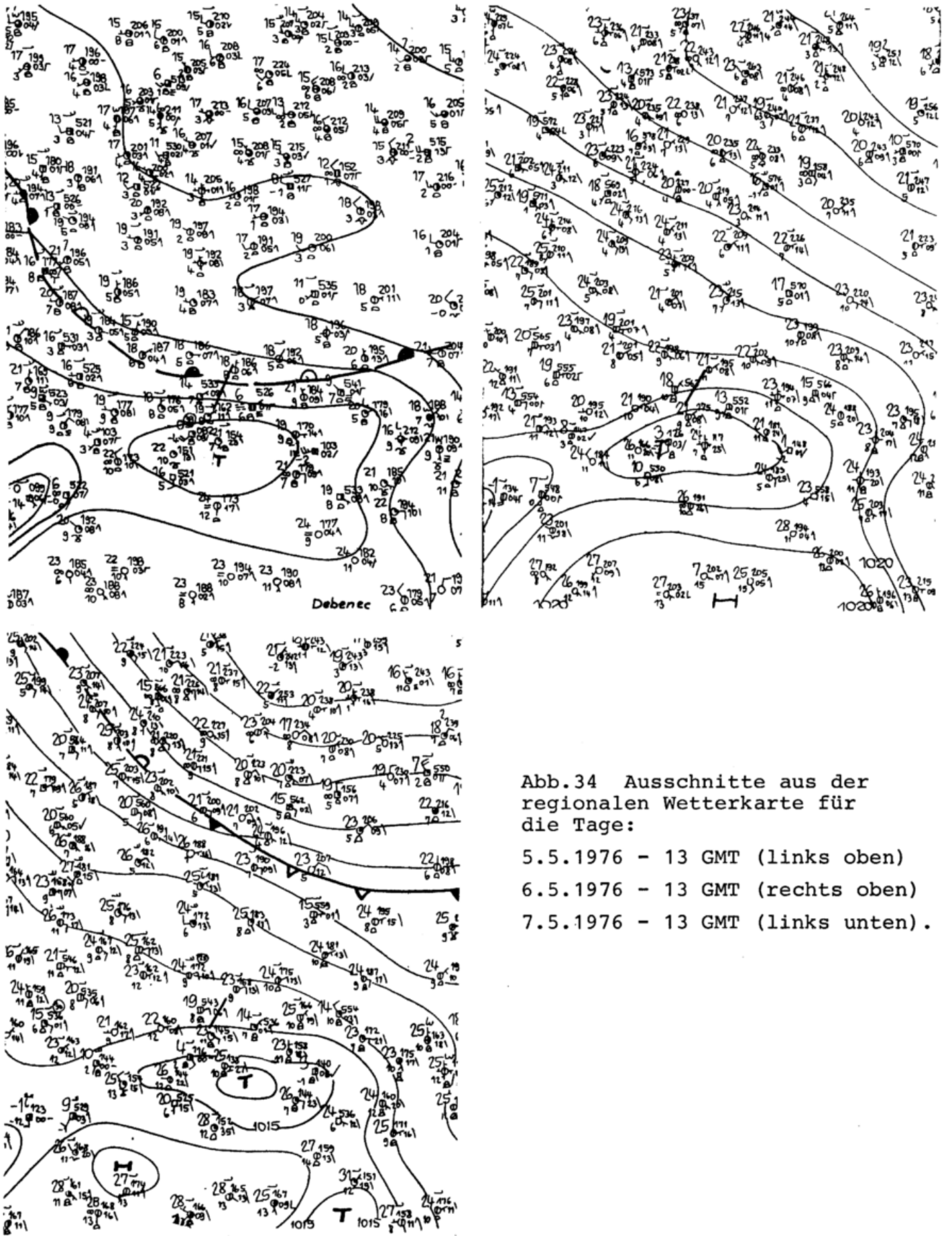


Abb.34 Ausschnitte aus der regionalen Wetterkarte für die Tage:

- 5.5.1976 - 13 GMT (links oben)
- 6.5.1976 - 13 GMT (rechts oben)
- 7.5.1976 - 13 GMT (links unten).

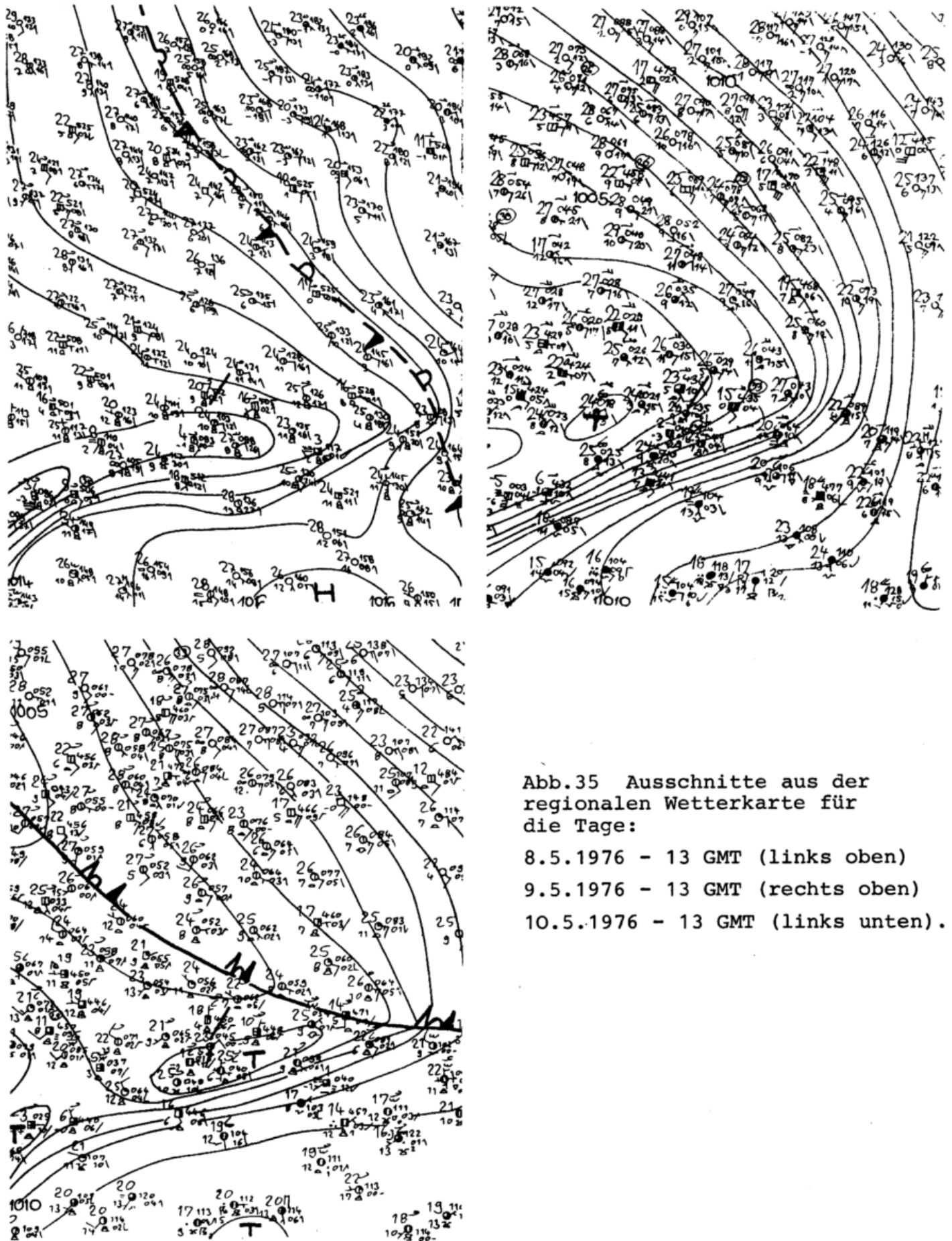


Abb.35 Ausschnitte aus der regionalen Wetterkarte für die Tage:  
8.5.1976 - 13 GMT (links oben)  
9.5.1976 - 13 GMT (rechts oben)  
10.5.1976 - 13 GMT (links unten).

allmählich um und führte durch zunehmende Kaltluftadvektion in der Höhe zu einer merklichen Labilisierung bis in größere Höhen. Dementsprechend wurden am 9. Mai auch die größten Vertikalgeschwindigkeiten gemessen, die während des gesamten Forschungsprogramms aufgetreten sind.

Von besonderer Bedeutung war das Windfeld im Untersuchungsgebiet, das mit einer Windstärke von 5-10km/h und einer Richtung um Nordost in Hinblick auf die Untersuchung der Thermik entlang einer Traverse zwischen Gauting und Garmisch-Partenkirchen als sehr günstig angesehen werden konnte. Daher konnte mit ausgeprägter Thermikablösung an den Südwesthängen der Hügel gerechnet werden, in dem Sinne, wie es früher in Abb.11 dargestellt worden ist. Am 9. Mai stellte sich das Bodenwindfeld derart um, daß in Hinblick auf die Homogenität des Meßmaterials die Ziele der Meßkampagne geändert werden mußten.

In Abb.36 auf der folgenden Seite ist die Feinaerologie der Meßtage wiedergegeben.

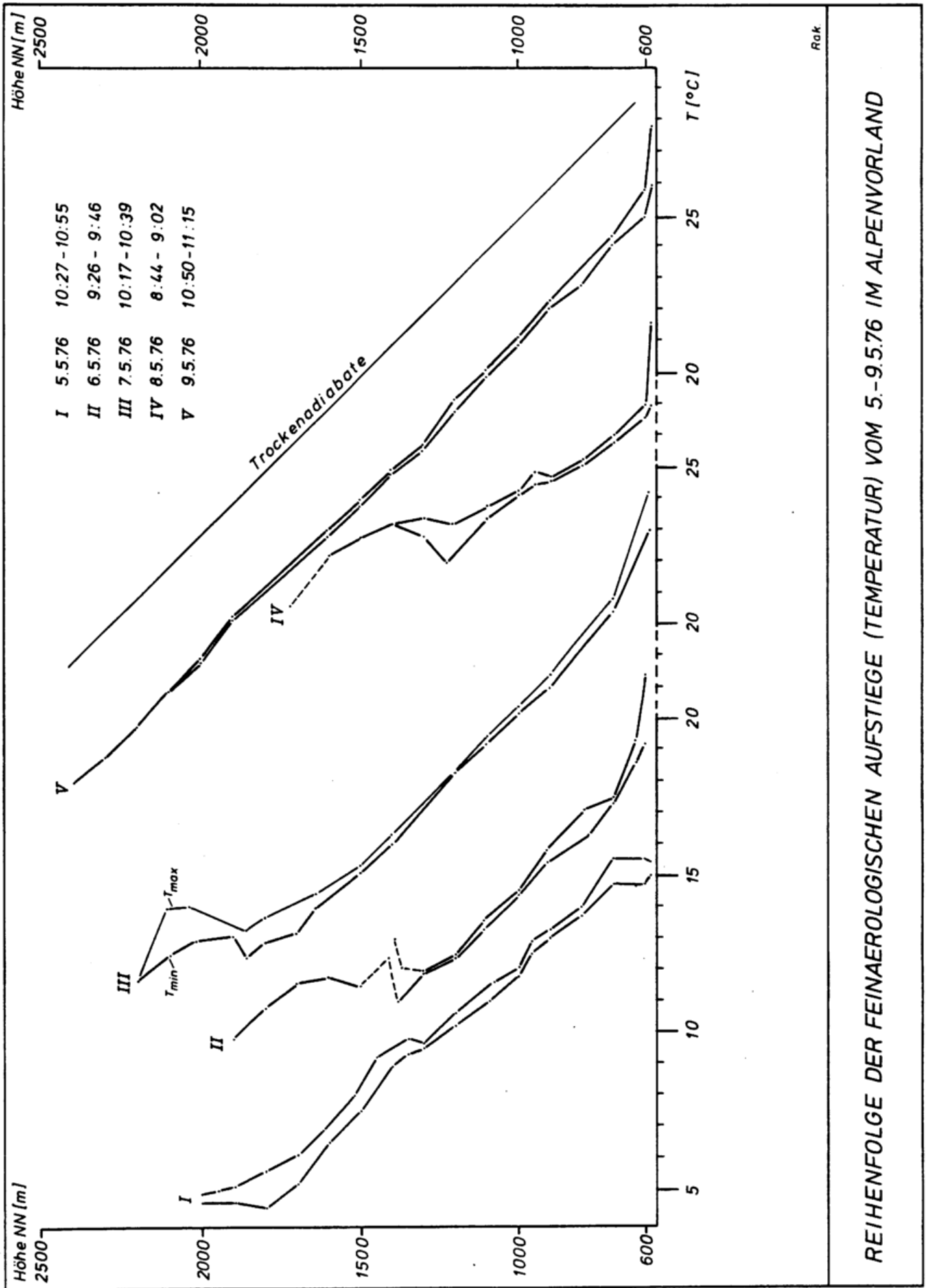


Abb.36 Feinaerologische Aufstiege während der fünf Meßtage, bei denen längs der Gesamttraverse geflogen wurde.

## 5.2 Das Flugprogramm

In Abhängigkeit vom Windfeld des 4. Mai wurde eine Traverse zwischen Gauting und Garmisch-Partenkirchen derart gewählt, daß, unterstützt durch die nördlichen Windkomponenten, bevorzugte Thermikablösung an der Südseite der Hänge zum Tragen kommen mußte, und daß entlang der Traverse mit Gegenwind, bzw. mit Rückenwind geflogen werden konnte.

Folgende sechs Traversenstücke wurden gewählt (in den Abbildungen durch ① bis ⑥ gekennzeichnet).

- ① : Gauting bis Starnberg-Seeufer.  
Hierbei handelt es sich um das stark gegliederte Würmtal mit seiner Verbreiterung am Nordufer des Starnberger Sees. Hier konnte im Gebiet von Leutstetten von vornherein mit starker Thermikablösung gerechnet werden und außerdem mit thermischer Aktivität über dem Gebiet östlich von Starnberg.
- ② : Starnberg-Seeufer bis Seeshaupt-Seeufer.  
Die thermische Aktivität über dem Starnberger See mußte von vornherein als schwach angesehen werden. Aufgrund der herrschenden Windrichtung konnte jedoch damit gerechnet werden, daß bei Flügen über der Seemitte konvektive Zellen vom Gebiet östlich des Seeufers mit dem Wind über den Starnberger See gedriftet werden würden.
- ③ : Seeshaupt-Seeufer bis Sindelsdorf/Mühleck.  
Dieses Traversenstück zeigt südlich des Starnberger Sees ebenes Wiesen- und Waldgelände, anfänglich durchsetzt durch die Kette der Osterseen südlich von Seeshaupt und fortgeführt durch Wiesen- und Feldgebiete zwischen Iffeldorf und Sindelsdorf. Die mittlere

Höhe des Geländes längs dieses Traversenstücks weicht von derjenigen des Starnberger Sees (590 m NN) kaum ab. Sie beträgt auf der überflogenen Traverse etwa 610 m NN.

- ④ : Sindelsdorf/Mühleck bis Moosrain.  
Hier handelt es sich um die Hügelkette, die sich zwischen Habach/Sindelsdorf über Murnau bis südlich des Staffelsees hinzieht. Bei der herrschenden Windrichtung konnte im Lee dieser Hügelkette mit ausgeprägter Thermikablösung bis über Murnau hinaus gerechnet werden.
- ⑤ : Moosrain bis Eschenlohe/Asamklamm.  
Vom Wendepunkt östlich Moosrain führt diese Traverse über völlig homogenes Moorgebiet bis zur Hügelgruppe im Zentrum des Murnauer Moores und dann wieder über homogenes Moorgebiet bis nach Eschenlohe. Über beiden Moor-Traversen wurde zu dieser Jahreszeit nicht mit thermischer Aktivität gerechnet. Es wurde jedoch erwartet, daß die Hügelgruppe im Zentrum des Murnauer Moores, die sich 50 bis 100 m über das Niveau des Moores (620 m NN) erhebt, Anlaß zu isolierter thermischer Aktivität geben müßte.
- ⑥ : Eschenlohe/Mitte bis Farchant.  
Längs dieser Traverse über dem relativ engen Loisachtal sollte untersucht werden, ob sich überhaupt thermische Aktivität in Anwesenheit der flankierenden Berge über der Talmitte entwickeln kann oder nicht.

Für die Befliegung dieser Gesamttraverse war es nicht ohne Bedeutung, daß das Gelände zwischen Starnberg und Oberau nur um maximal 70 m ansteigt. Der Anstieg des Geländes von Starnberg

bis vor Eschenlohe beträgt sogar nur 30 m. Deshalb konnte bei konstanter Flughöhe über NN auch davon ausgegangen werden, daß die Höhe über Grund annähernd konstant bleiben würde. Allerdings mit einer Ausnahme, nämlich längs des Traversenstückes ④ zwischen Sindelsdorf/Mühleck und Moosrain, wo versucht wurde, über der Hügelkette den Kurs entlang der 700 m Höhenlinie zu halten. Beim Vergleich der Traversenstücke untereinander muß man somit beachten, daß das Traversenstück ④ relativ zum Grund 80 - 100 m niedriger liegt als die anderen.

Um den Zusammenhang zwischen thermischer Aktivität und Untergrund eindeutig erfassen zu können, wurde entlang der Traverse eine relativ niedrige Flughöhe gewählt. Erfahrungen früherer Meßkampagnen zur Untersuchung der thermischen Aktivität ließen eine Flughöhe von etwa 250 m über Grund als besonders geeignet erscheinen. Unter Berücksichtigung des leicht ansteigenden Geländes vor Farchant wurde deshalb als Norm eine Flughöhe von 850 m NN gewählt, die unter anderem die Einhaltung der Sicherheitsflughöhe von 150 m über Grund entlang der Traverse ④ gewährleistete. Insgesamt wurde die Traverse siebzehn mal, davon zehn mal während der vier Tage vom 5. - 8.5.1976, geflogen. Die Traversen ① und ⑥ wurden seltener befliegen, da z.B. die Traverse ① von Gauting bis Starnberg infolge starker thermischer Aktivität zu großen Änderungen der Flughöhe führte - auf einem Traversenstück von 5 km Länge wurde bei Anwendung der Flugmethode "constant attitude" mehr als 250 m an Höhe gewonnen - und da längs des Traversenstückes ⑥ zwischen Eschenlohe und Farchant das Umgekehrte stattfand. Über der Mitte des Loisachtales war die Absinkbewegung in der Regel so stark, daß sich die Höhe selbst bei voller Motorleistung nicht halten ließ. Dies ist der starken Konvektion an den Berghängen zu verdanken, die, wie über dem Inntal, kompensierende Absinkbewegungen über der Talmitte auslöst. Am 9. Mai wurde dieses Traversenstück über dem Loisachtal abermals befliegen, wobei infolge der starken Labilisierung der umgekehrte Effekt zustande kam: An den Flanken der sehr intensiven konvektiven Zellen

traten so starke abwärts gerichtete Beschleunigungen auf, daß sich die leichter befestigten Geräte aus den Befestigungen lösten und die Traversierung aus Flugsicherheitsgründen abgebrochen werden mußte. Trotzdem liegen für das Traversenstück  
⑥ einige digitale Datensätze vor, die es erlauben, die statistischen Eigenschaften dieses Traversenstücks zu denjenigen der anderen in Beziehung zu setzen.

### 5.3 Statistische Eigenschaften relevanter atmosphärischer Variabler in Abhängigkeit von der physikalischen Beschaffenheit der Unterlage

Die im vorigen Kapitel beschriebenen Vermutungen hinsichtlich der Ausbildung thermischer Aktivität im Untersuchungsgebiet bestätigten sich bereits bei den ersten durchgeführten Traversenflügen. Der Charakter jeder Registrierung entlang einer speziellen Traverse blieb während des Meßzeitraums völlig erhalten. Aus der Registrierung entlang der Traversenstücke ② bis ⑤ wurde je ein etwa 4 km langes typisches Teilstück herausgegriffen und in der folgenden Abb.37 gemeinsam dargestellt. Über dem Starnberger See (Traverse ②) zeigt sich durchaus eine gewisse thermische Aktivität mit maximalen Vertikalgeschwindigkeiten um 1,5 m/s. Die zugehörigen Temperatureffekte sind kaum merklich. Es bestand kein Zweifel daran, daß es sich bei dieser schwachen Thermik, die sich in knapp einem Kilometer Entfernung vom östlichen Seeufer und in einer Höhe von 250 m über Grund fand, um abgelöste Thermik handelte, die von jenseits des Ufers stammte. Das folgende Traversenstück ③ ist charakteristisch für das Gebiet südlich von Seeshaupt bis in die Gegend von Iffeldorf. Dort fand sich fast nie thermische Aktivität, so daß die Registrierung der Vertikalgeschwindigkeit auf Abb.37 unter den herrschenden Umständen für dieses Gebiet als typisch angesehen werden kann. Lediglich am rechten Rand der Registrierung zeigt sich thermische Aktivität, die zeitweise knapp südlich von Iffeldorf einsetzte. Auch die Temperaturregistrierung zeigt kaum Anhalte für thermische Effekte. Starke Thermik setzte regelmäßig über der 700 m NN Höhenlinie im Gebiet zwischen Sindelsdorf und Mühleck ein und war auf der Südseite des Königswaldes am stärksten. Auf dem Traversenstück ④ kam es bis nach Moosrain zu einer regelmäßigen Anordnung der konvektiven Zellen mit Abständen von etwa 1 - 1,5 km und Zellendurchmessern von knapp 500 bis 600 m, so wie dies auch für die thermische Konvektion

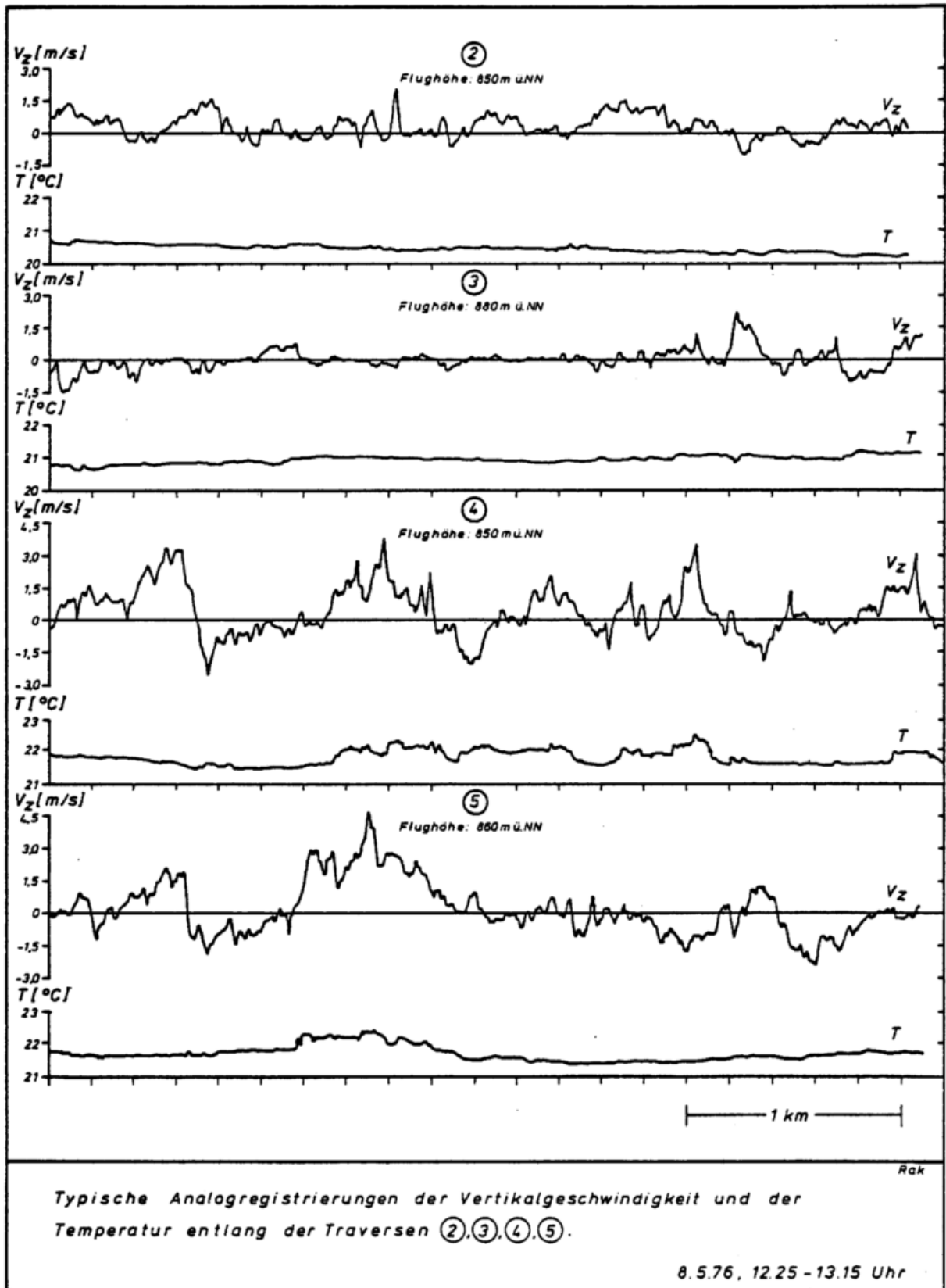


Abb.37 Charakteristika der Thermik über verschiedenen Unterlagen auf der Gesamttraverse.

in Meppen charakteristisch war. Die zugehörigen Temperatureffekte sind sehr ausgeprägt, was nicht zuletzt darauf zurückzuführen ist, daß in nur 150 m Höhe über Grund geflogen worden ist. Es ist erstaunlich, daß die thermische Konvektion in dieser niedrigen Flughöhe über Grund bereits so stark ausgebildet ist, wie es die Traverse (4) auf Abb.37 zu erkennen gibt. Charakteristisch für dieses Traversenstück war eine fast stationäre thermische Aktivität an beiden Flanken des Einschnittes in der Hügelkette bei Murnau. Hier waren regelmäßig konvektive Zellen mit Vertikalgeschwindigkeiten um 3 m/s anzutreffen. Die gleiche Regelmäßigkeit der thermischen Aktivität zeigte sich auch über der Hügelgruppe mitten im Murnauer Moos. Dies läßt die Traverse (5) auf Abb.37 ebenfalls sehr deutlich erkennen. Die dort gefundene konvektive Zelle war fast regelmäßig die intensivste, die längs der Gesamttraverse gefunden wurde. Auch die Temperatureffekte sind sehr ausgeprägt. Deutlich ist aber auch zu erkennen, daß, wie auf der rechten Seite der Abbildung zu sehen ist, das Moorgebiet keine thermische Aktivität erzeugt und daß dort offensichtlich kompensierende Abwärtsbewegungen der Luft vorhanden sind.

Es ist interessant, die maximale Temperaturabweichung innerhalb einer konvektiven Zelle mit der maximalen Vertikalgeschwindigkeit in Beziehung zu setzen. Abb.38 zeigt diesen Zusammenhang. Mit Ausnahme der drei Punkte, die über dem Wasser des Starnberger Sees als charakteristisch zu gelten haben, besteht über allen anderen Gebieten ein ungefähr linearer Zusammenhang zwischen beiden Größen. Die in der Abbildung angegebene Regressionsgerade mit ihren Daten dürfte als gute Abschätzung dieses Zusammenhanges gelten. Die geringen Temperaturabweichungen über dem Starnberger See und die damit trotzdem korrelierten relativ großen maximalen Vertikalgeschwindigkeiten sind darauf zurückzuführen, daß bereits kühlere Seeluft durch entrainment in die vom Wind über den See verdrifteten konvektiven Zellen einbezogen ist.

Aus dem Gesamtmaterial mögen nun zwei charakteristische Tage herausgegriffen werden, für die die digitale Auswertung aller Meßwerte

wiedergegeben werden soll. Insgesamt wurden die folgenden fünf Meß- bzw. Rechengrößen statistisch ausgewertet: Potentielle Temperatur, spezifische Feuchte, Vertikalgeschwindigkeit der Luft, lokaler vertikaler Fluß von fühlbarer Wärme und lokaler vertikaler Fluß von latenter Wärme.

Im einzelnen wird bei der Datenverarbeitung das Folgende vorgenommen: Aus der geeichten Temperaturmessung wird die potentielle Temperatur für jeden Meßpunkt berechnet, aus der Messung des Dampfdruckes wird die spezifische Feuchte errechnet, die Vertikalgeschwindigkeit wird nach früher angegebenen Verfahren korrigiert und schließlich werden zusammengehörige Werte von Vertikalgeschwindigkeit und Temperaturüberschuß, bzw. Feuchteüberschuß als lokale vertikale Flüsse von fühlbarer, bzw. latenter Wärme errechnet. Sämtliche so erzeugte Zeitreihen werden einer Tiefpaß-Filterung unterzogen und nach Durchführung einer Klasseneinteilung werden Häufigkeitsverteilungen der Meßwerte, Autokorrelationsfunktionen sowie Spektren berechnet.

Die Erörterungen über die Messung der Vertikalgeschwindigkeit der Luft mit Hilfe der Eigenbewegung des Flugzeuges legten nahe, mit der Auflösung der Meßwerte nicht allzusehr in den sub-konvektiven Bereich hineinzugehen. Es kommt jedoch aber noch ein anderer Punkt hinzu, der eine Filterung der Meßwerte als wünschenswert erscheinen läßt. Es hat sich gezeigt, daß sich die persönliche Komponente des Piloten, d.h. die Charakteristika der Steuerbewegungen, im Frequenzbereich bei einer Sekunde befindet. Aus diesem Grunde war es wünschenswert, auch die persönliche Komponente des Piloten herauszufiltern und nur Wellenlängen oberhalb von 25 m ungefiltert für die weitere Verarbeitung der Daten zu verwenden.

Im Folgenden wird jede Meßreihe als eine Zeitreihe angesehen; die Umrechnung auf eine räumliche Wellenlänge müßte mit Hilfe der registrierten Fahrt des Flugzeuges unter Berücksichtigung der Wind-dreieckbeziehung vorgenommen werden. In den meisten Fällen ließe

sich dieses Verfahren dadurch vereinfachen, daß während des Fluges an markanten Punkten über Grund Zeitmarken gesetzt werden und somit in einfachster Weise zeitliche Meßwerte mit Meßwerten über Grund identifiziert werden könnten. Dies liefert das numerische Auswerteverfahren z.Zt. noch nicht, so daß man nicht exakt davon ausgehen kann, daß alle Wellenlängen, die im Folgenden in den Spektren angegeben werden, sich auf Wellenlängen beziehen, die über Grund gemessen worden sind.

Bezeichnet  $L$  (m) die Länge des Meßintervalls und  $T$  (s) die Zeit für den Durchflug des Meßintervalls, dann läßt sich die mittlere Geschwindigkeit über Grund,  $V_{\text{GND}}$ , aus der der Karte entnommenen Strecke  $L$  und der auf dem Magnetband registrierten Zeit leicht bestimmen. Die Zahl der Meßwerte (Frequenz rund 5 Hz), die auf dem Meßintervall gewonnen wird, hängt von der Geschwindigkeit über Grund ab. So wird auf einem Traversenstück von 10 km Länge bei einer mittleren Fluggeschwindigkeit von 25 m/s über Grund und einer Meßfrequenz von 5 Hz eine Datenmenge von rund 2000 Werten gewonnen. Bezeichnet  $\Delta x$  die während 1/5 Sekunden über Grund zurückgelegte Strecke, dann ist  $L/n\Delta x$  die Wellenlänge in Einheiten von  $\Delta x$ . Sollen alle Wellenlängen herausgefiltert werden, die gleich oder kleiner als das Fünffache des Meßwertabstandes sind, dann kann der folgende Tiefpaßfilter verwendet werden.

$$\begin{array}{l} X(i) \quad \quad \quad : \quad 0,600 \ 000 \\ ( 4 ) \quad X(i+1), X(i-1) : \quad 0,295 \ 982 \\ \quad \quad X(i+2), X(i-2) : \quad -0,065 \ 443 \\ \quad \quad X(i+3), X(i-3) : \quad -0,030 \ 539 \end{array}$$

Die folgende Abb.39 gibt die Dämpfungsfunktion dieses numerischen Tiefpaßfilters wieder. Danach können alle Wellenlängen ab  $2,5\Delta x$  als völlig ausgefiltert betrachtet werden, der Übergangsbereich von  $5\Delta x$  bis  $2,5\Delta x$  wird graduell gedämpft, während das gesamte langwellige Spektrum ab  $5\Delta x$  mit großer Amplitudentreue erhalten bleibt. Bei einer Fluggeschwindigkeit von 25 m/s über Grund und

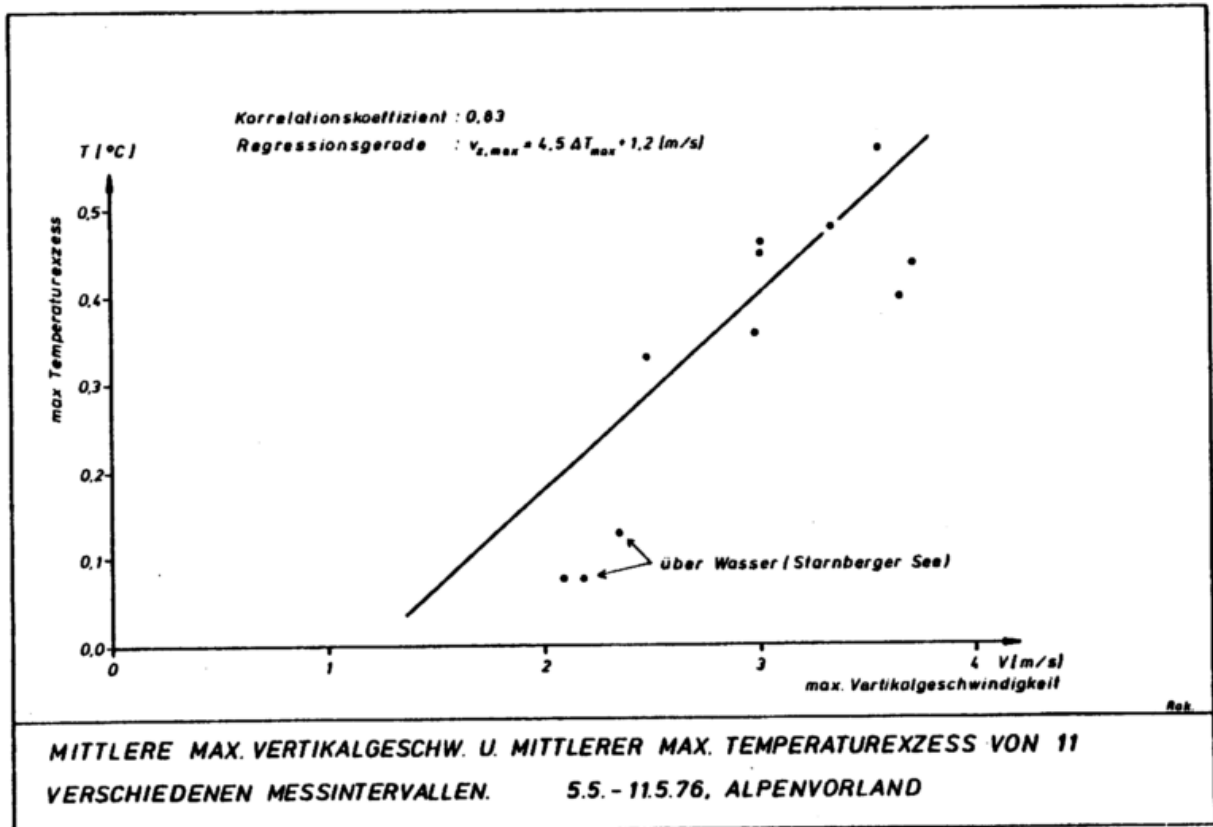


Abb.38 Zusammenhang zwischen maximaler Vertikalgeschwindigkeit und maximaler Temperaturabweichung.

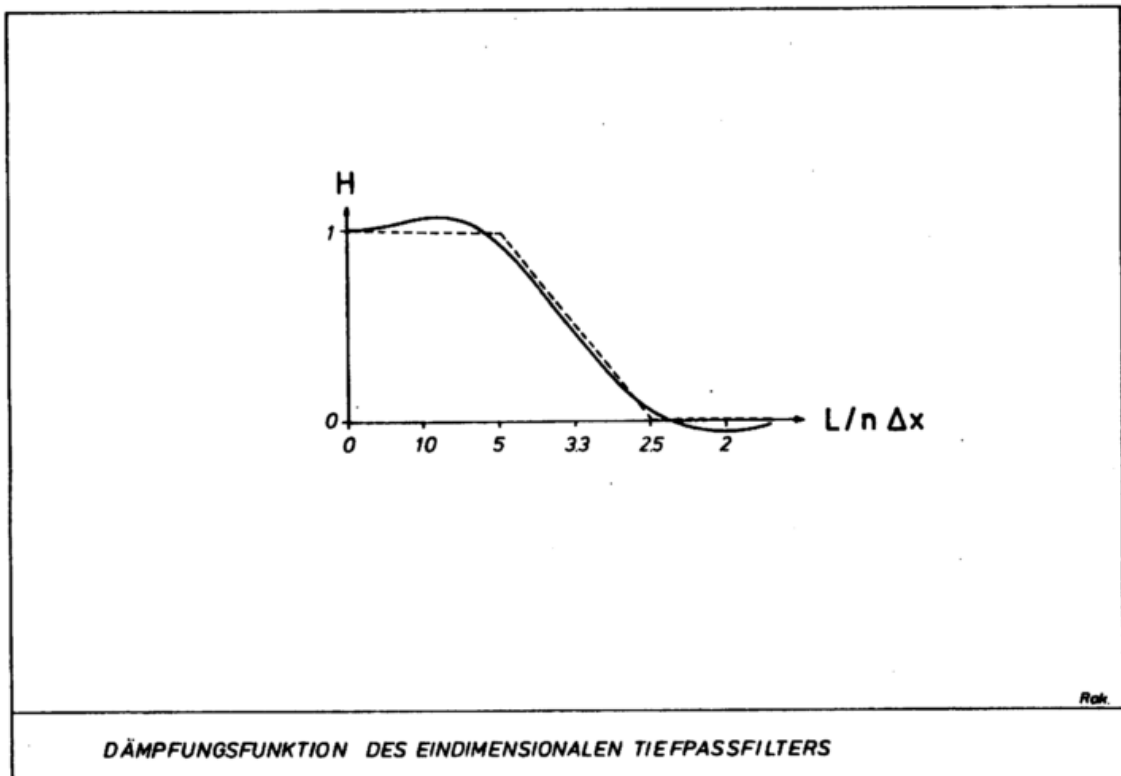
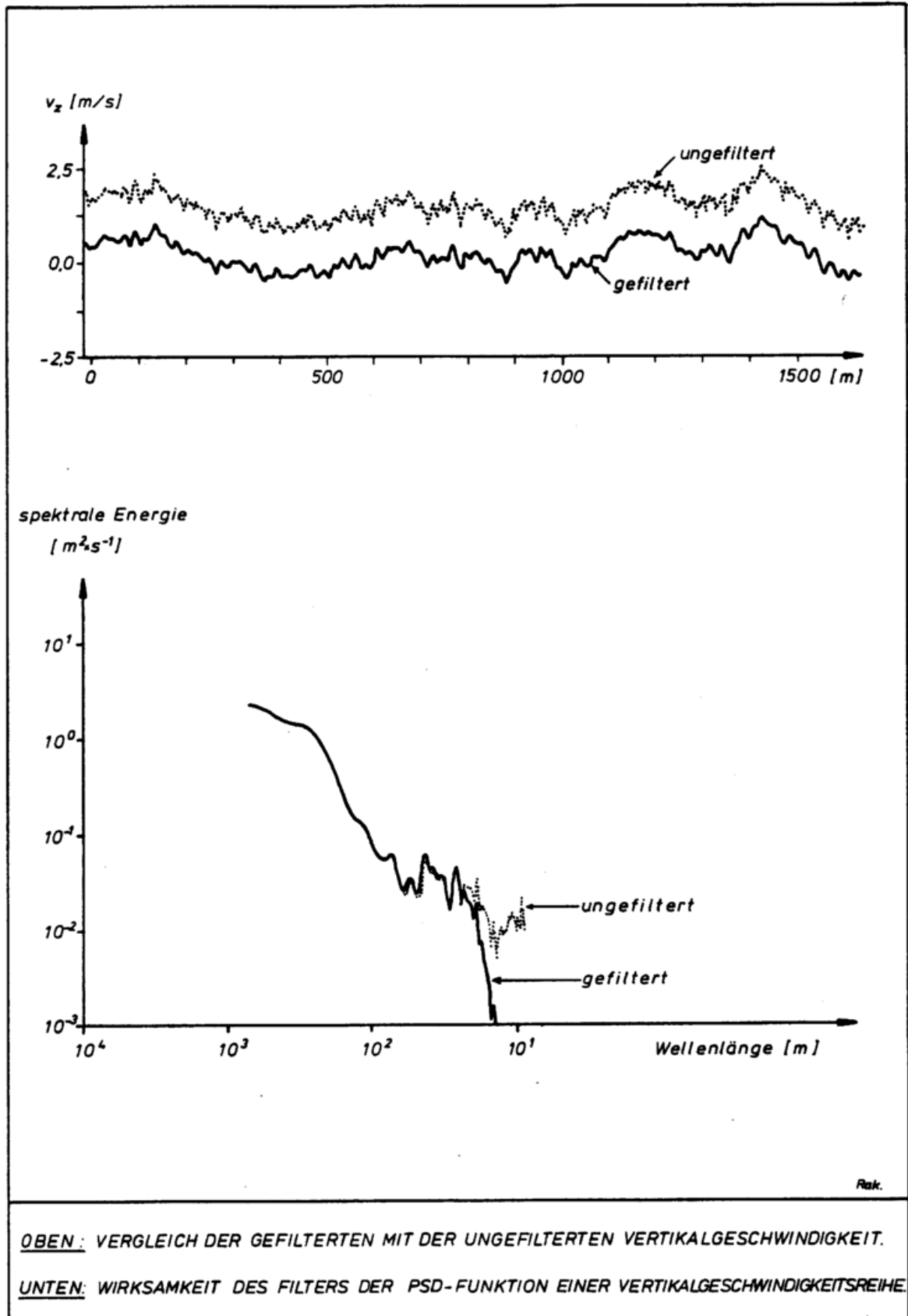


Abb.39

einer Meßfrequenz von 5 Hz ist  $\Delta x$  gleich 5 m. Dies würde im vorliegenden Fall bedeuten, daß alle Wellenlängen ab 25 m ausgefiltert werden und die größeren erhalten bleiben. Aus vielen Gründen wurde schon früher darauf hingewiesen, daß dies eine sinnvolle Abschneidevorschrift bedeutet. Bei größerer Geschwindigkeit verschiebt sich die Abschneidewellenlänge zur Seite größerer Wellenlängen hin.

Die Wirkung des Tiefpaßfilters (4) auf eine registrierte Zeitreihe der Vertikalgeschwindigkeit sowie auf ein Spektrum ist anhand von Abb.40 zu erkennen. In Abb.40 oben ist die Registrierung der Vertikalgeschwindigkeit in ungefilterter und gefilterter Form dargestellt, wobei zur optischen Trennung die ungefilterte Registrierung um 1 cm nach oben verschoben gezeichnet ist. Die Wirkung der Filterung ist deutlich zu erkennen, es ist aber auch zu erkennen, daß die Hauptcharakteristika der Registrierung voll erhalten sind. Auf Abb.40 unten ist das Powerspektrum einer Vertikalgeschwindigkeitsregistrierung dargestellt, und man erkennt hier sehr deutlich die Wirkung des Filters, der das Spektrum im Bereich der Wellenlänge 20 m abrupt abschneidet. Derjenige Teil des Spektrums, der auf dieser Abbildung ungefiltert erscheint, ist physikalisch nicht realistisch, und es ist gezeigt worden, daß das Maximum bei einer Wellenlänge von 10 m mit großer Wahrscheinlichkeit die persönliche Komponente des Piloten repräsentiert.

Für die statistische Auswertung der Meßwerte einer einzelnen Flugtraverse wurde davon ausgegangen, daß diese ein statistisches Kollektiv ausreichend großen Umfanges aufbauen. In der Regel wurden die Traversenlängen so gewählt, daß das Kollektiv durch mindestens 2000 Meßwerte aufgebaut wird. Würden alle Meßwerte über demselben Ort gewonnen werden, wäre die Zeitreihe aufgrund des Charakters der thermischen Konvektion mit Sicherheit kein stationärer oder gar ergodischer Prozeß. Dies ist umso weniger der Fall, wenn Meßwerte zu verschiedenen Zeitpunkten an verschiedenen Raumpunkten gewonnen werden, wie dies bei einem horizontalen Traversenflug der Fall ist. Da dieser stochastische Prozeß weder stationär noch



OBEN: VERGLEICH DER GEFILTERTEN MIT DER UNGEFILTERTEN VERTIKALGESCHWINDIGKEIT.

UNTEN: WIRKSAMKEIT DES FILTERS DER PSD-FUNKTION EINER VERTIKALGESCHWINDIGKEITSREIHE.

Abb.40 Wirksamkeit des in Gleichung (4) angegebenen Tiefpaßfilters.

ergodisch ist, können statistische Erwartungswerte allgemeiner Art nicht aus zeitlichen Mittelwerten der raum-zeitlichen Registrierung ermittelt werden.

Unbedenklich erscheint es, für jedes Traversenstück Häufigkeitsverteilungen der Meßwerte zu berechnen. Wenn auch aufgrund o.g. Schwierigkeiten die Zeitregistrierung ein weitgehend stochastisches Verhalten zeigt, so ist doch nicht zu verkennen, daß, wie auf früheren Abbildungen deutlich zu erkennen war, die organisierte Konvektion innerhalb der Zeitreihen Charakteristika erzeugt, die eindeutig konvektiven Zellen zuzuordnen sind. Diese Tatsache muß sich auch in den Häufigkeitsverteilungen der gemessenen Variablen wiederfinden. Die folgenden Abbn.41-44 geben hierfür Beispiele. In Abb.41 sind die Häufigkeitsverteilungen für die potentielle Temperatur und die spezifische Feuchte für die Traversenstücke ② ⑥ des 6. Mai 1976 wiedergegeben. Zwecks höherer Auflösung in den Bereichen geringer Häufigkeit ist eine logarithmisch geteilte Ordinate verwendet worden. Zunächst ergibt sich aus diesen Häufigkeitsverteilungen, daß die Temperatur in Richtung zum Gebirge ansteigt. Die Häufigkeitsverteilungen verschieben sich mit wachsender Annäherung an die Alpen nach rechts. Die in starker Thermik vorhandenen Übertemperaturen machen sich entlang der Traversen ④ und ⑤ schon in der Häufigkeitsverteilung deutlich bemerkbar. Beide Häufigkeitsverteilungen weisen eine erhebliche Schiefe auf und lassen somit die Wirkung der organisierten thermischen Konvektion erkennen. Dies ist z.B. auf der Traverse ② (über dem Starnberger See) durchaus nicht der Fall und steht im Einklang mit dem, was früher hierzu gesagt wurde. Das Verhalten der spezifischen Feuchte, Abb.41 unten, zeigt ein gegenläufiges Verhalten, indem die Schiefe der Häufigkeitsverteilung bei den Traversen ② und ③ auf der Seite geringerer spezifischer Feuchte zu finden sind. Die Häufigkeitsverteilung der Vertikalgeschwindigkeit findet sich auf Abb.42 und 43 oben und zeigt für alle Traversenstücke die durch thermische Konvektion verursachte Schiefe. Trotz der erheblichen Unterschiede der Thermik entlang

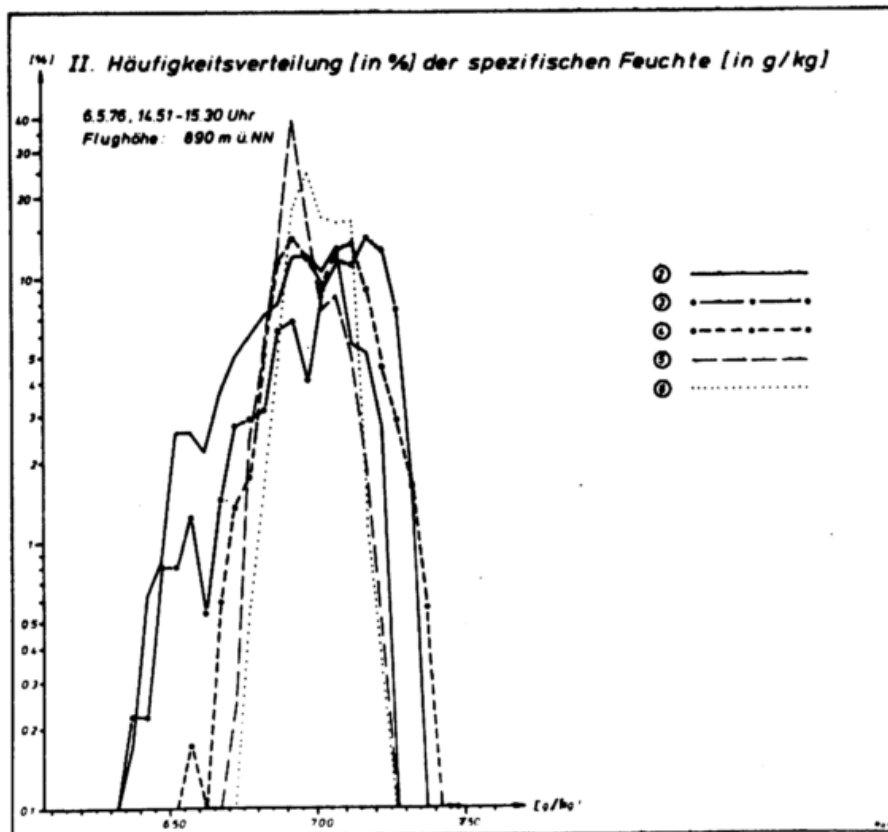
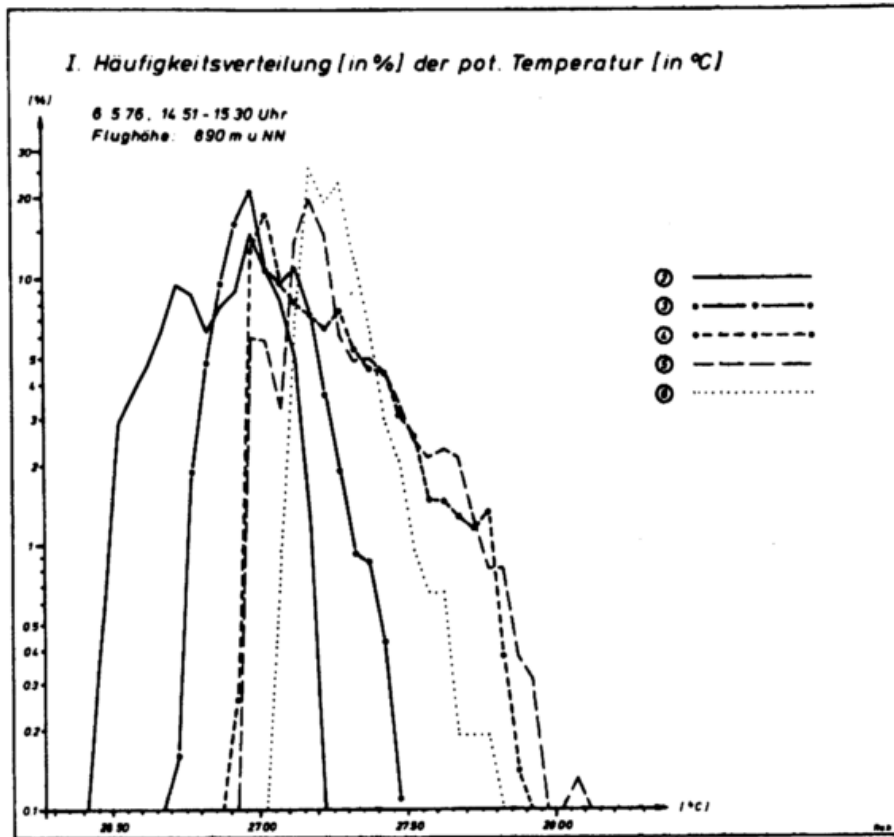


Abb.41 Siehe Text.

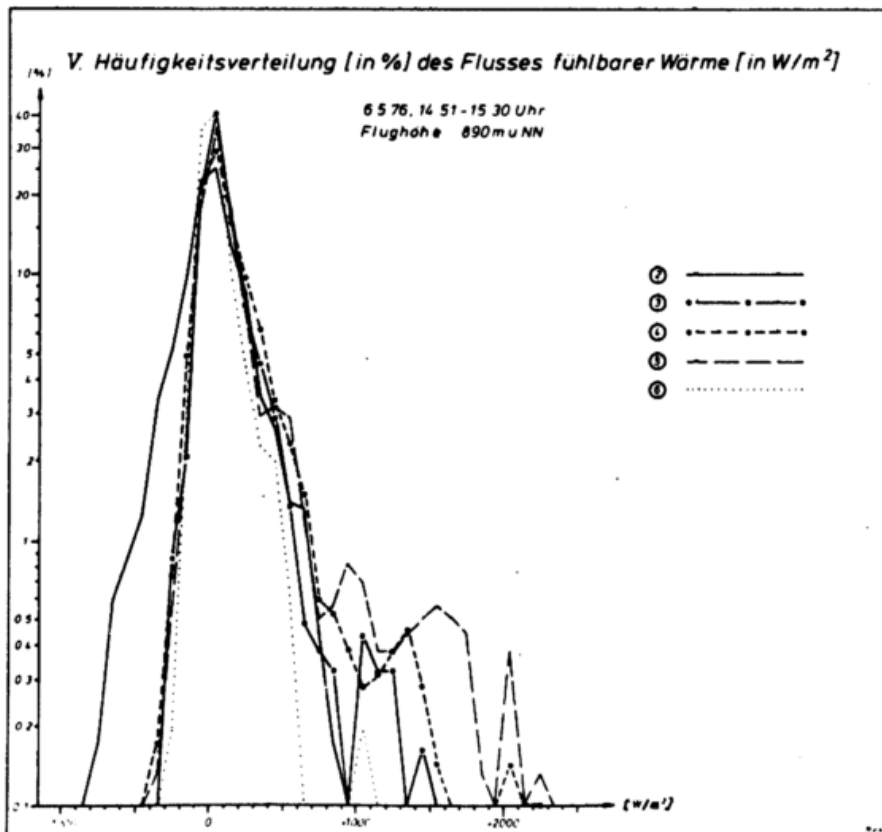
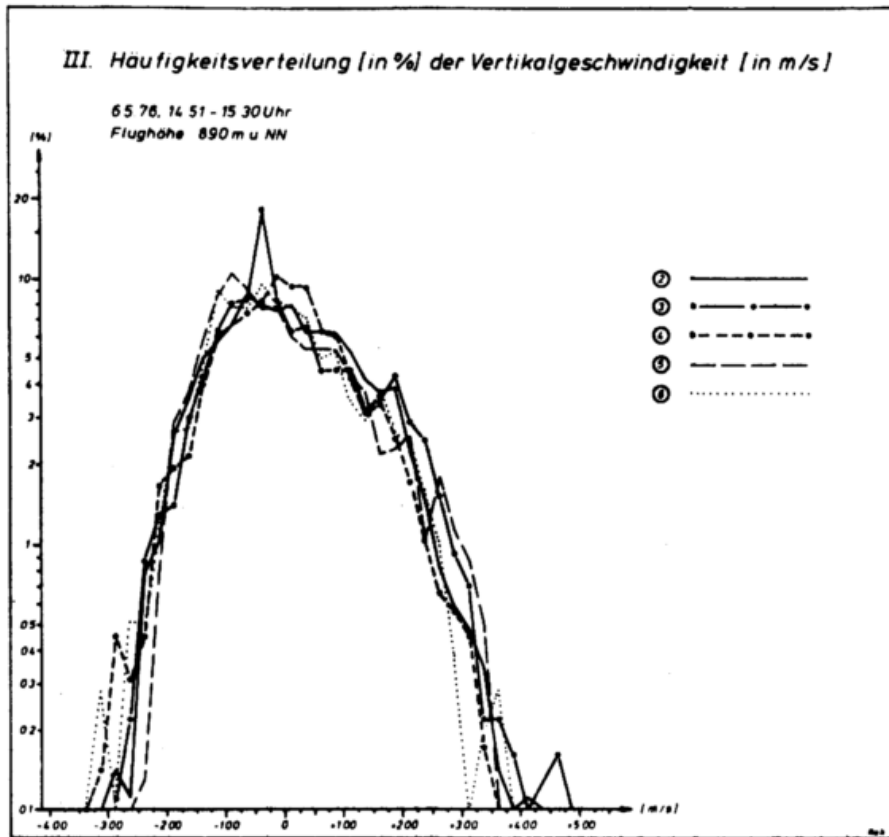


Abb.42 Siehe Text.

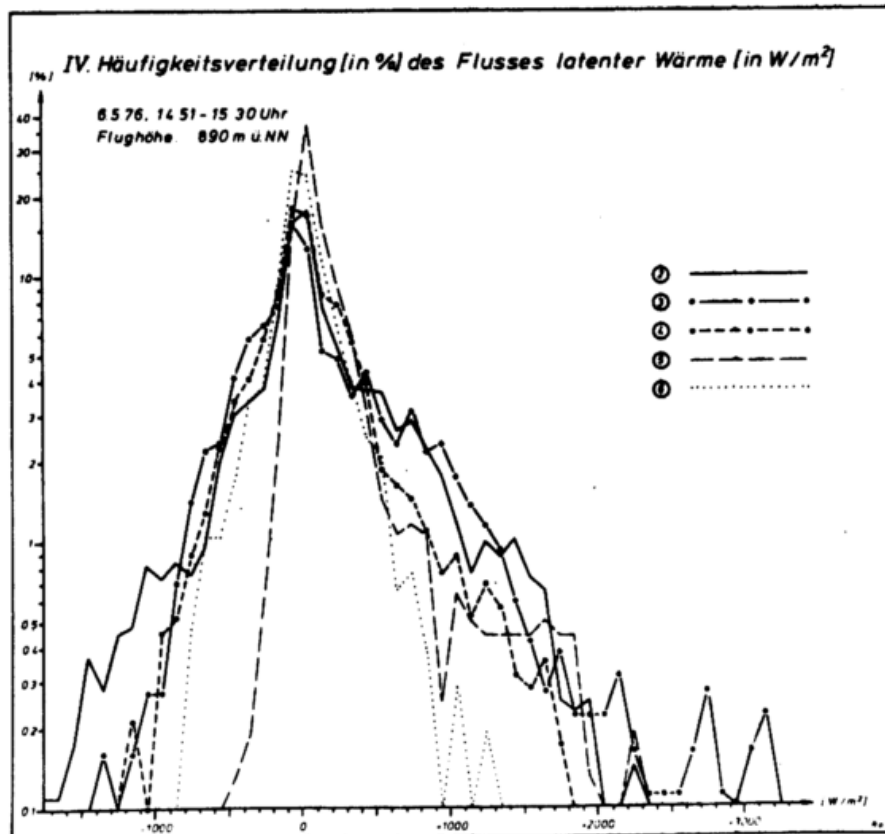
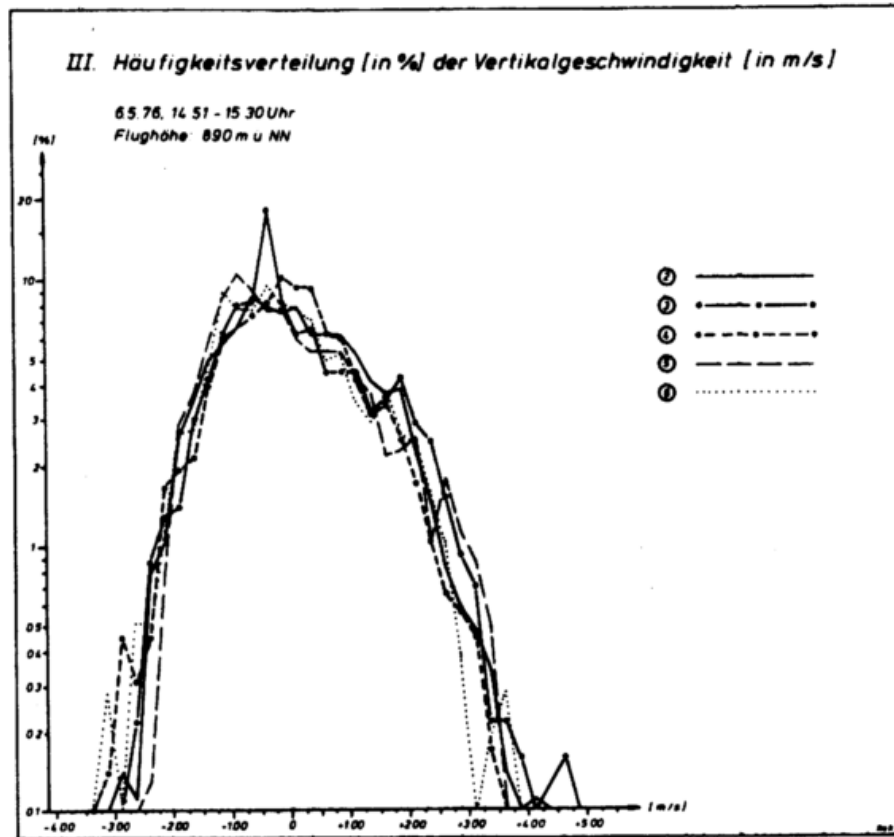


Abb.43 Siehe Text.

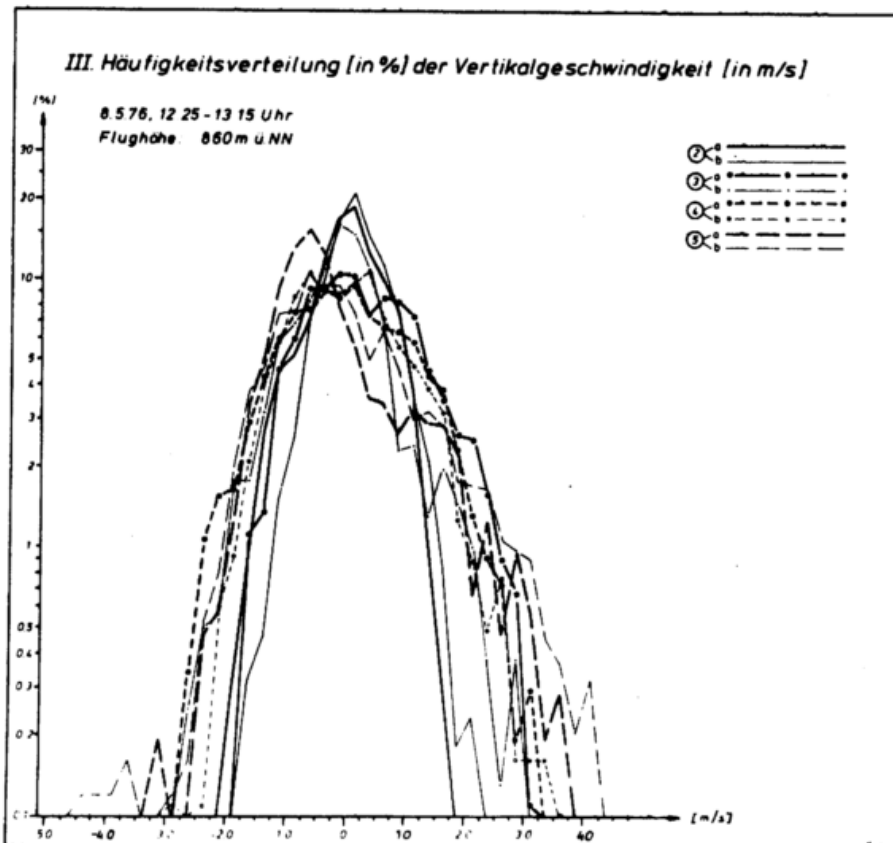
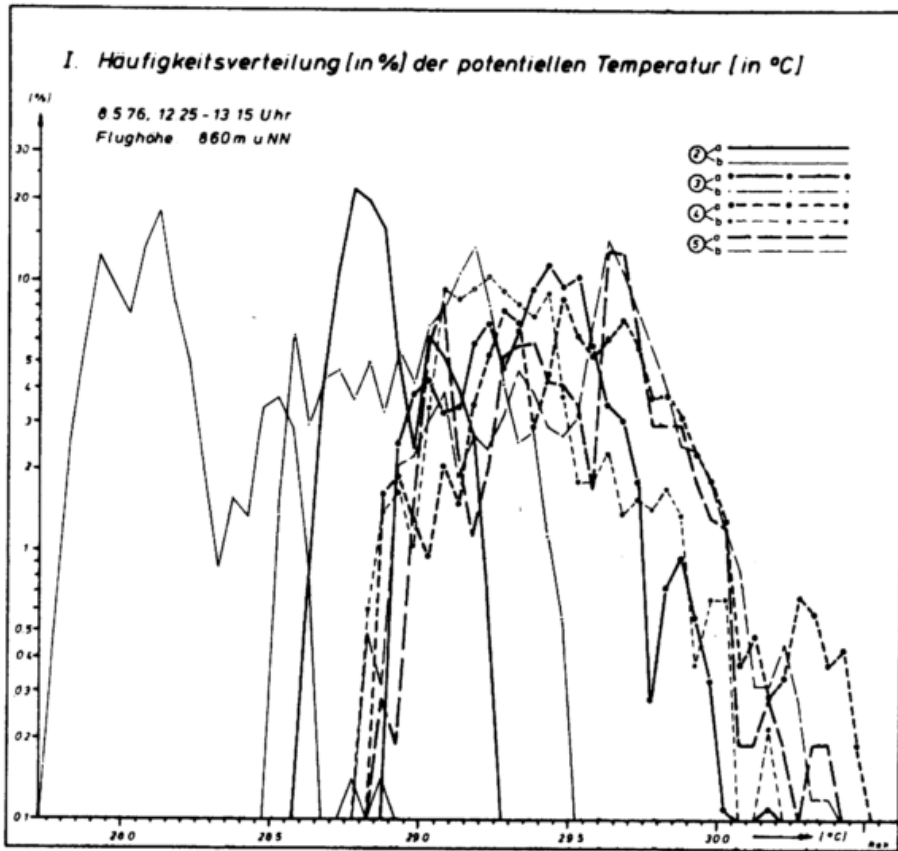


Abb.44 Siehe Text.

der Traversen (siehe Abb.37) weichen die Häufigkeitsverteilungen der Vertikalgeschwindigkeit relativ wenig voneinander ab. Lediglich eine nähere Diskussion der sekundären Maxima der Häufigkeitsverteilung auf der Seite positiver Vertikalgeschwindigkeiten läßt, wenn auch mit Schwierigkeiten, die Unterschiede der thermischen Aktivität entlang der einzelnen Flugtraversen erkennen.

Versuchsweise wurde durch Kombination zusammengehöriger Werte von Vertikalgeschwindigkeit und Temperatur-, bzw. Feuchteabweichung vom Mittelwert der Traverse eine Art lokaler vertikaler Fluß von fühlbarer Wärme, bzw. von latenter Wärme berechnet. Die aus diesen abgeleiteten Meßreihen gewonnenen Häufigkeitsverteilungen zeigen eine erheblicher Schiefe und lassen auf den überwiegenden Einfluß der thermischen Konvektion auf den vertikalen Energietransport quantitativ schließen.

Die aus den Häufigkeitsverteilungen folgenden statistischen Kenngrößen des 8.5.1976 mögen nun in anschaulicher Form anhand von Abb.45 diskutiert werden. In dieser Abbildung ist die Gesamttraverse innerhalb von 50 Minuten in beiden Richtungen durchflogen worden. Die Längen der Teiltraversen sind maßstabsgerecht angegeben sowie die zugehörigen Flughöhen über Grund. Dargestellt sind für jede Teiltraverse die für die Traverse insgesamt ermittelten statistischen Kenngrößen: Mittelwert, Standardabweichung und Extremwerte. Die Mittelwerte sind durch einen Punkt, die Standardabweichung durch vertikale Linien und die Extremwerte durch Kreuze angegeben.

Bei der Darstellung der potentiellen Temperatur erkennt man die geringe Variationsbreite über dem Starnberger See, die infolge der intensiven bodennahen Thermik auf der Traverse (4) stark zunimmt. Interessant ist jedoch, daß die Standardabweichungen nicht wesentlich voneinander abweichen. Der Erwärmungseffekt während der nur 50 Minuten dauernden Traverse ist an den Mittelwerten sehr deutlich zu erkennen und macht über dem Gebiet des

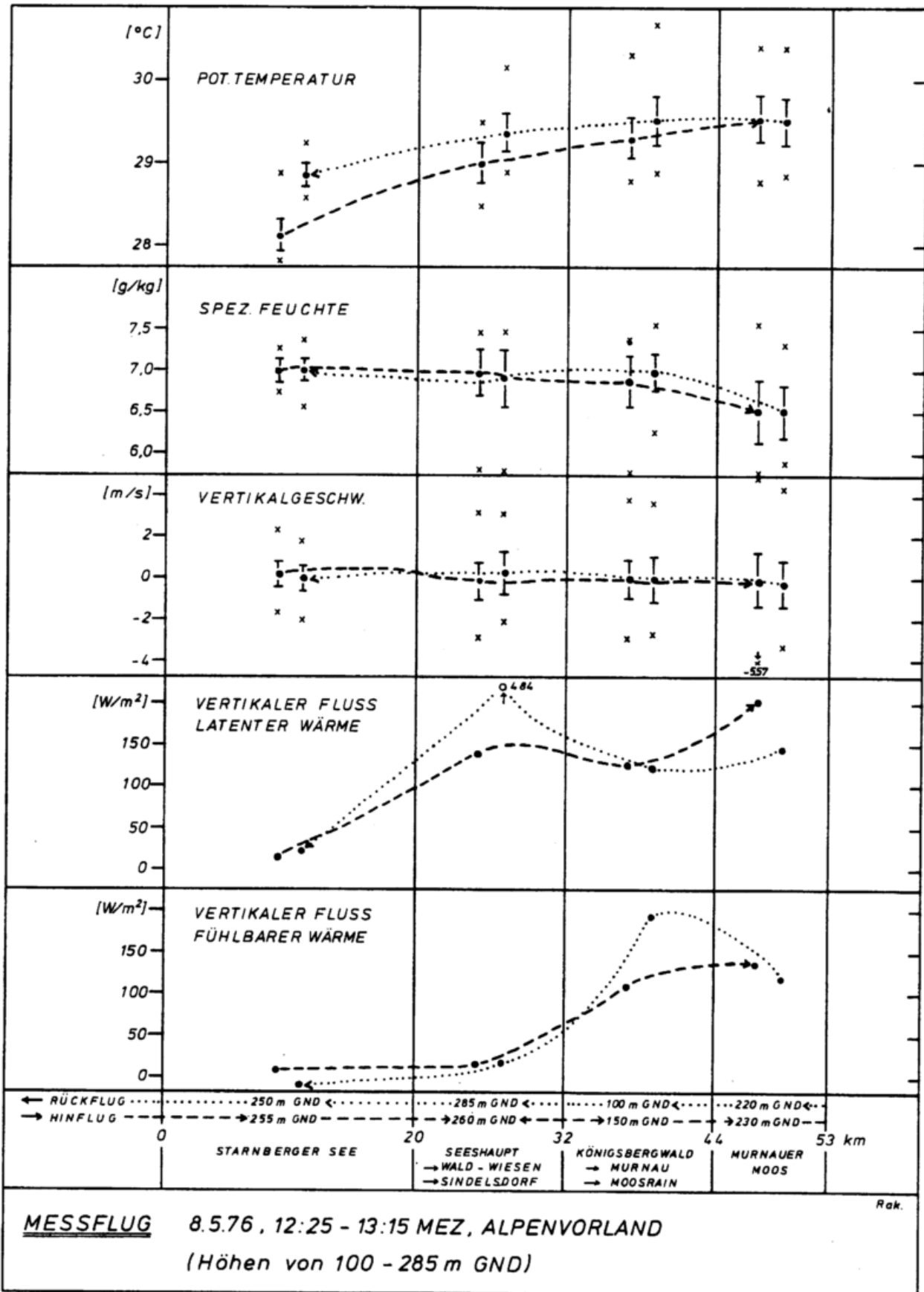


Abb.45 Darstellung statistischer Kenngrößen der Häufigkeitsverteilungen entlang der Gesamttraverse.

Starnberger Sees knapp 1 K aus. Diese zeitliche Abhängigkeit tritt bei der spezifischen Feuchte und bei der Vertikalgeschwindigkeit nicht auf. Die spezifische Feuchte zeigt über dem See naturgemäß die geringsten Schwankungen und über dem Land gleichmäßiges Verhalten. Die geringe Abnahme der Mittelwerte über dem Murnauer Moos ist nicht ohne weiteres zu erklären. Das bereits in Abb.37 erkennbare Verhalten der Vertikalgeschwindigkeit kommt hier deutlich in den statistischen Kenngrößen zum Ausdruck. Die Mittelwerte repräsentieren die ausgeglichene Massenbilanz entlang der Gesamttraverse. Die Standardabweichungen sowie die Schwankungsbreiten der Extremwerte nehmen entlang der Traverse in Richtung zum Gebirge deutlich zu. Die momentanen vertikalen Flüsse von latenter und fühlbarer Wärme sind mit dem Verhalten der Temperatur der spezifischen Feuchte und der Vertikalgeschwindigkeit verbunden und zeigen, insbesondere, was die fühlbare Wärme anbelangt, ein Verhalten, das man durchaus erwarten würde. Das starke Ausbrechen des Mittelwertes der latenten Wärme auf dem Rückflug über dem Gebiet der Traverse ③ dürfte ein zufälliges Ergebnis sein.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Verarbeitung des Meßmaterials in Form von Häufigkeitsverteilungen sicherlich Hinweise auf die Existenz und auf die räumliche Struktur der thermischen Konvektion liefert. Aussagen über die Intensität sind jedoch hieraus schwieriger zu gewinnen.

In Hinblick auf die Struktur und Intensität der thermischen Konvektion über verschiedenem Untergrund bieten sich als Untersuchungsmethoden die Berechnung der Autokorrelationsfunktionen sowie der Powerspektren an. Die folgenden Abb.46 bis 52 zeigen die Autokorrelationsfunktionen sowie die Powerspektren der verschiedenen Variablen, so wie sie unter Annahme eines stationären stochastischen Prozesses im weiteren Sinne aus den Meßwerten berechnet worden sind. Die dabei verwendeten Verfahren sind Standardverfahren aus der Theorie der Zeitreihenanalyse und sollen hier nicht gesondert wiedergegeben werden.

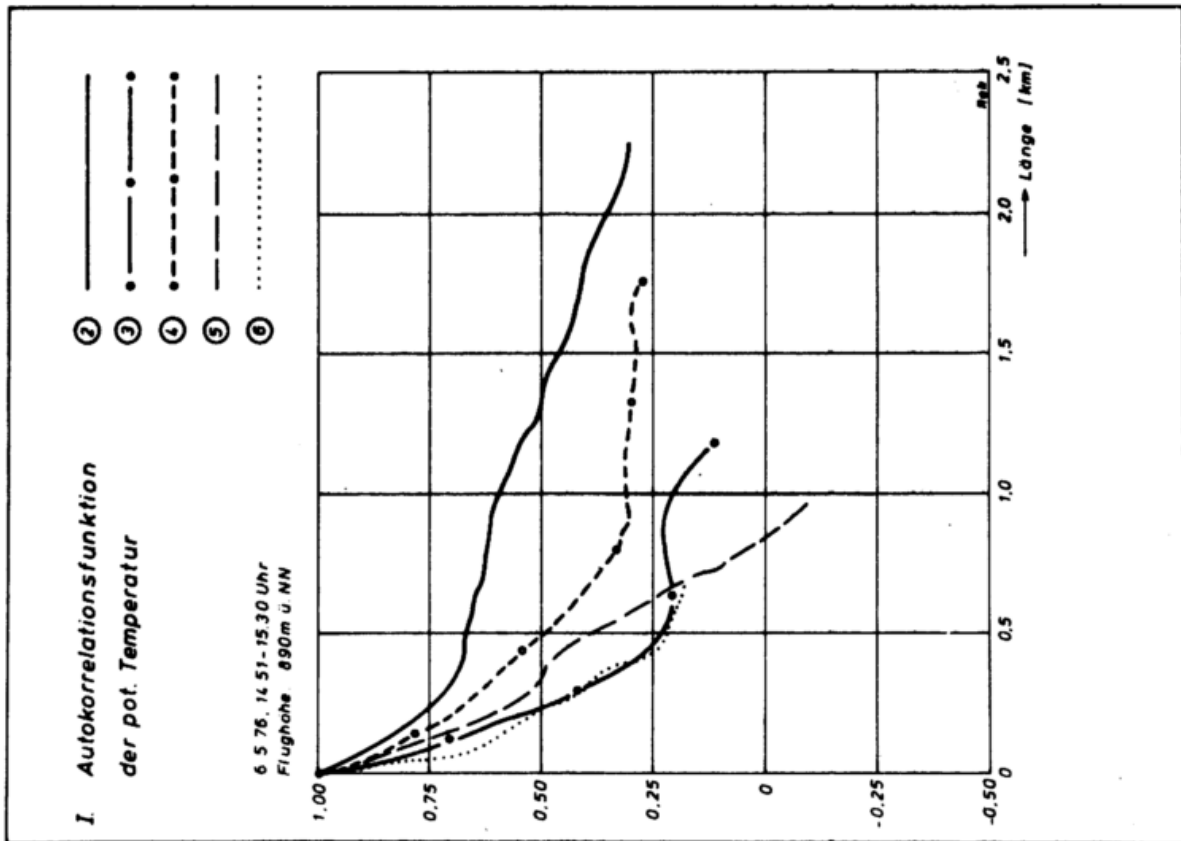
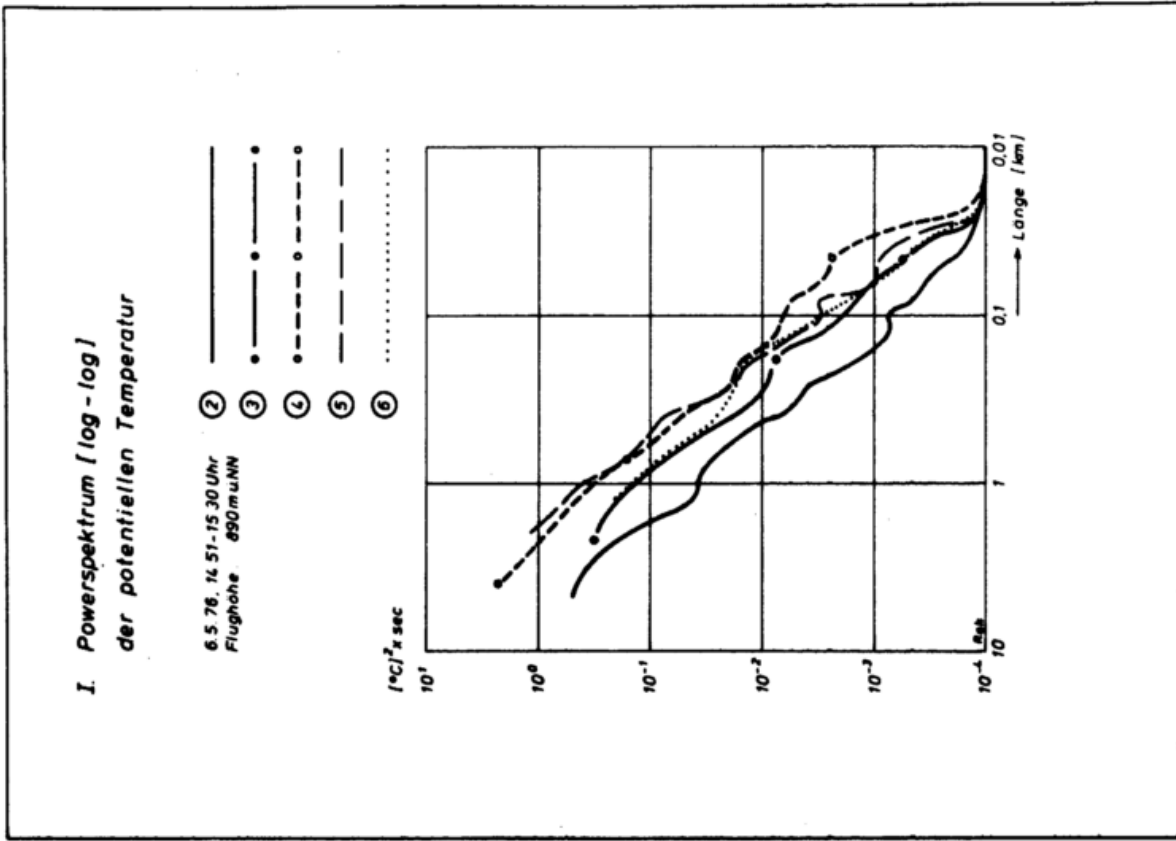


Abb.46 Siehe Text.

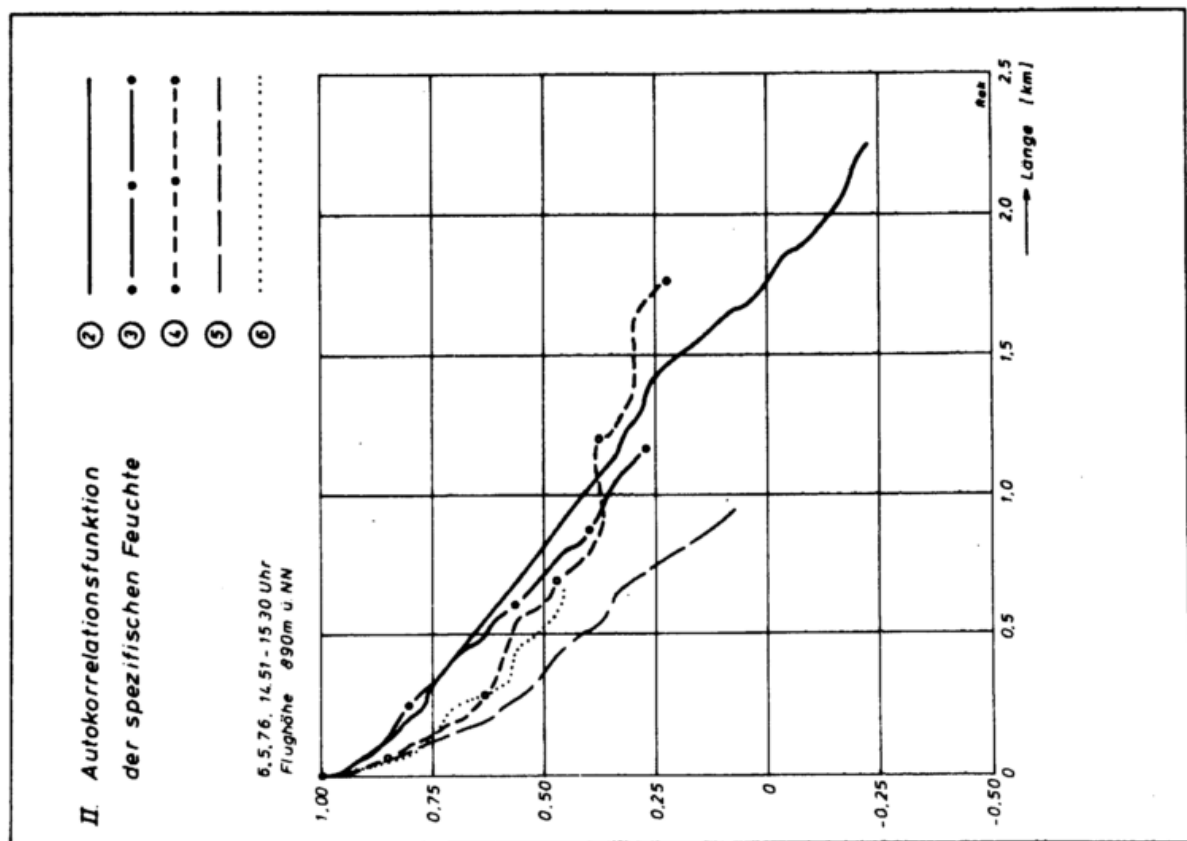
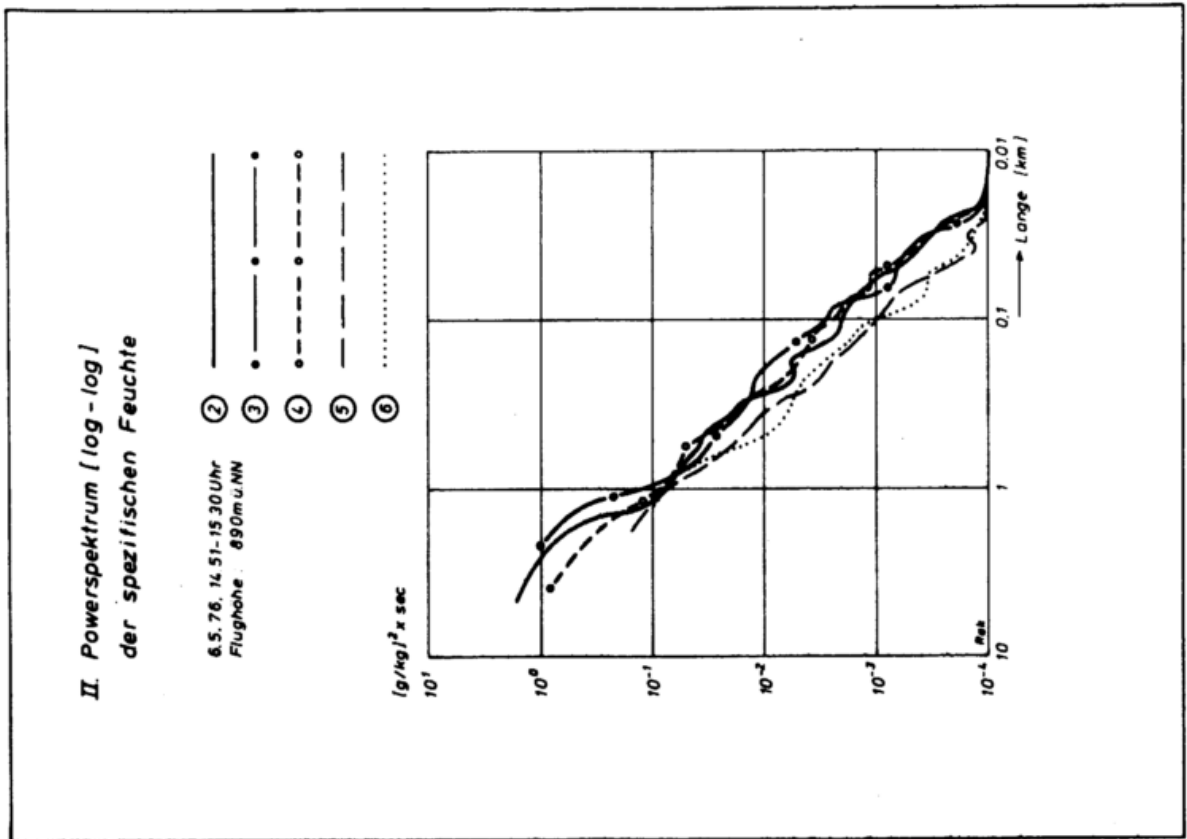


Abb.47 Siehe Text.

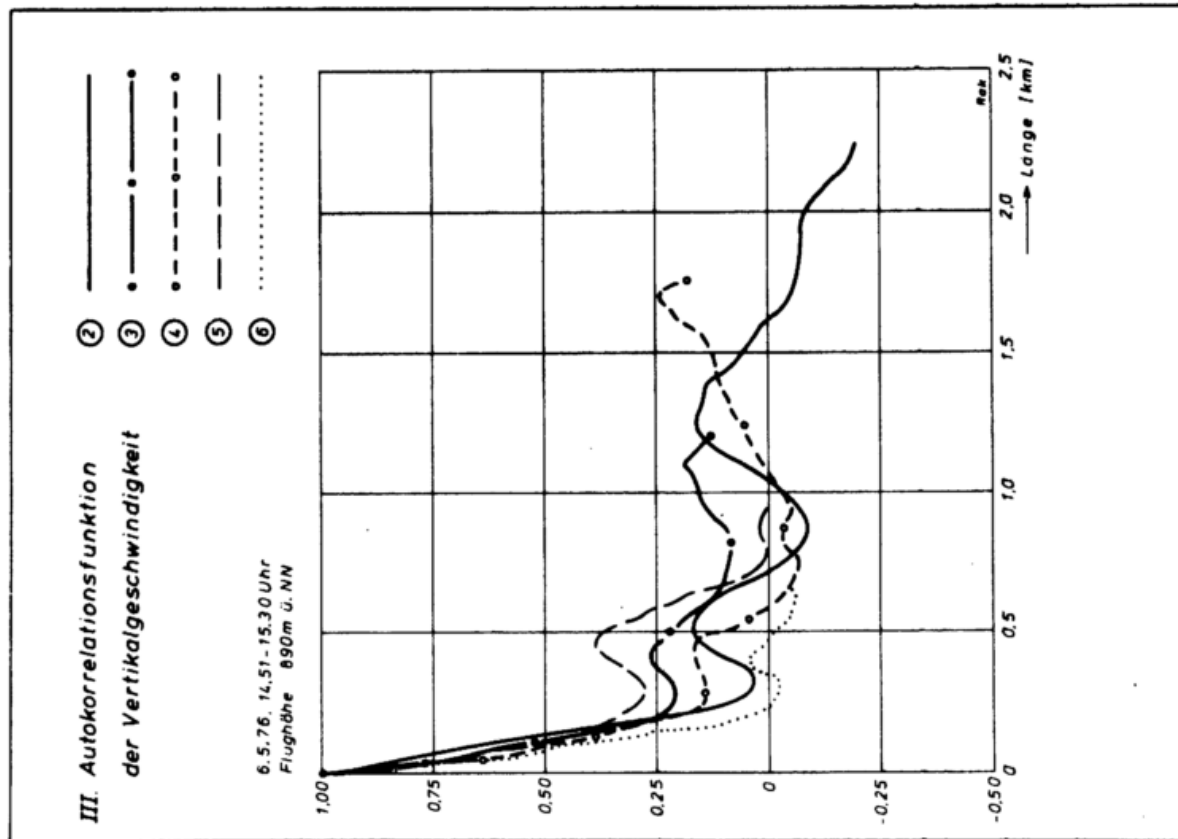
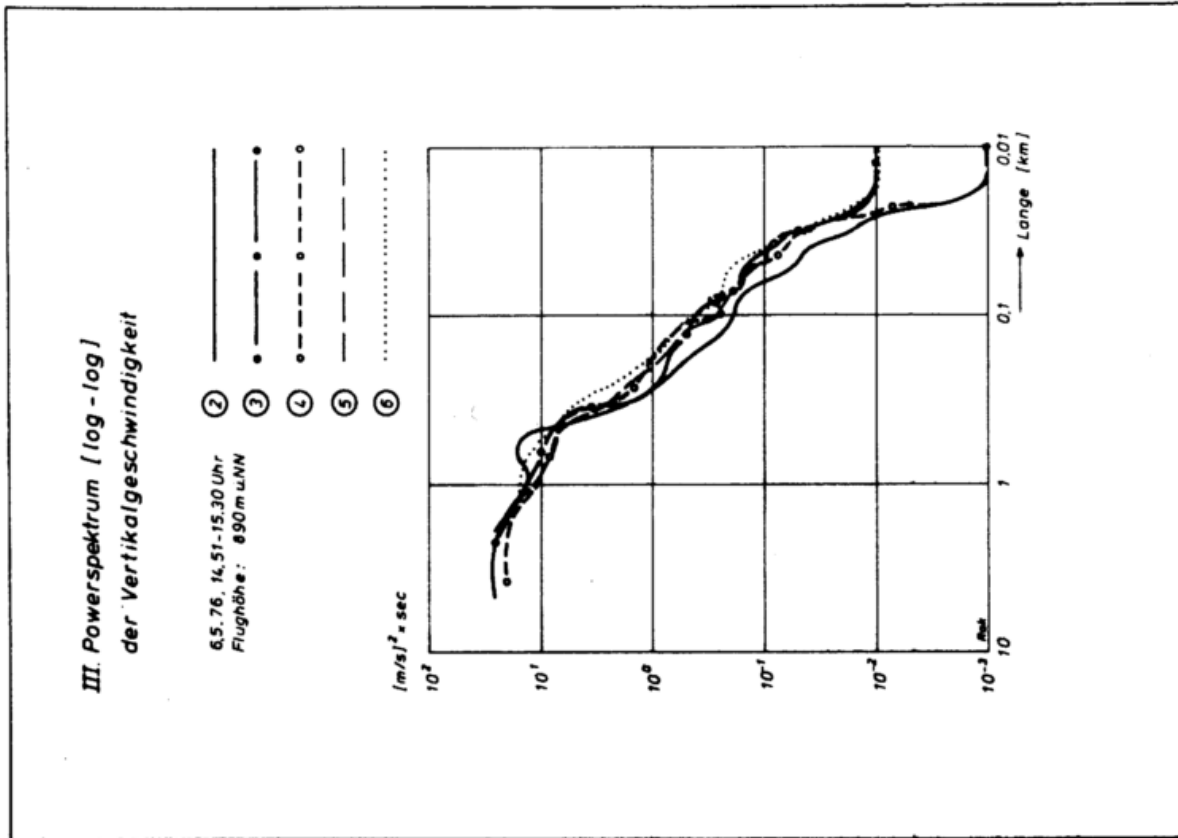


Abb.48 Siehe Text.

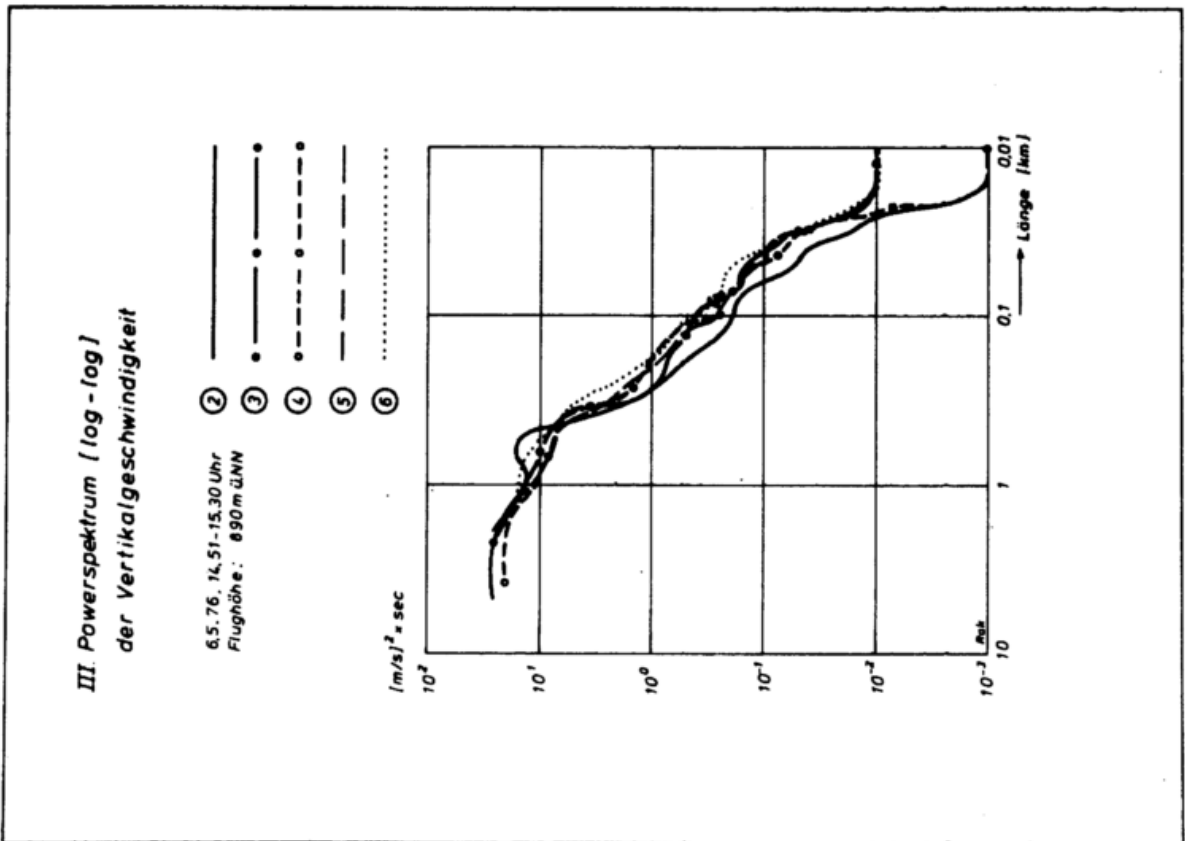
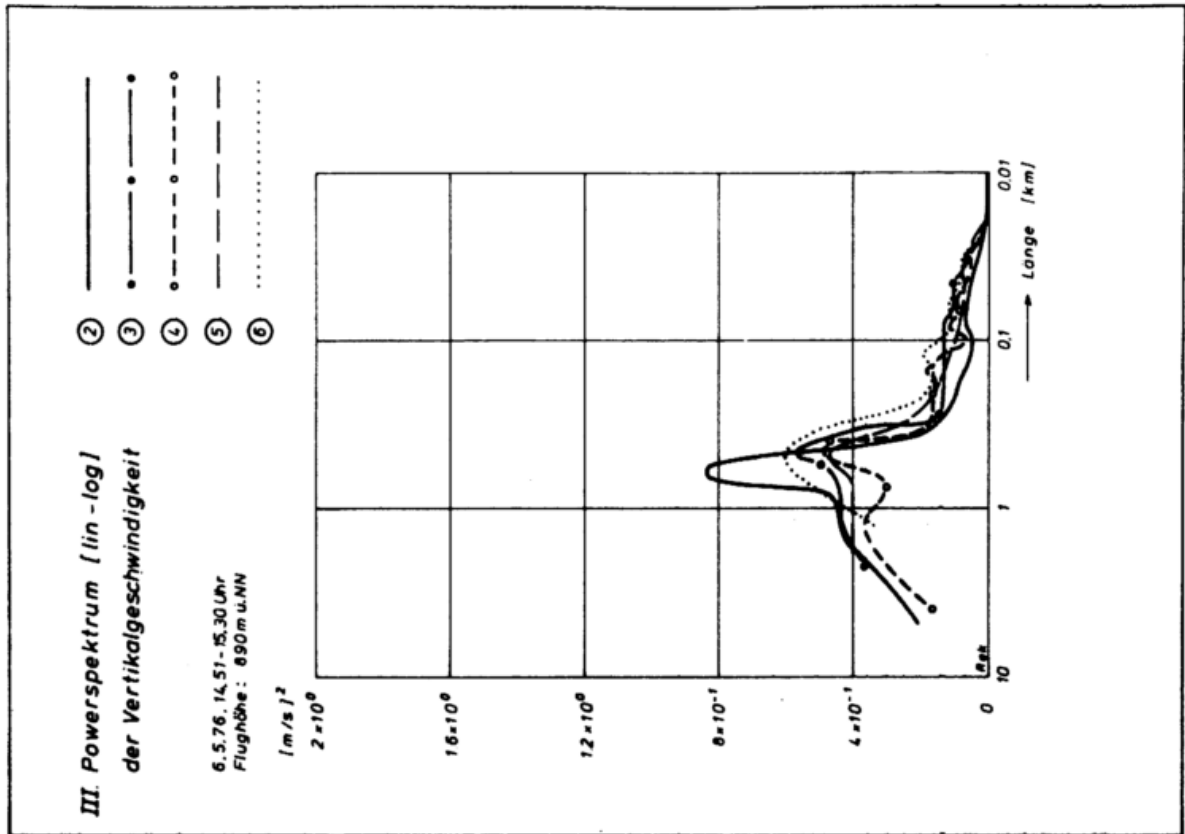


Abb.49 Siehe Text.

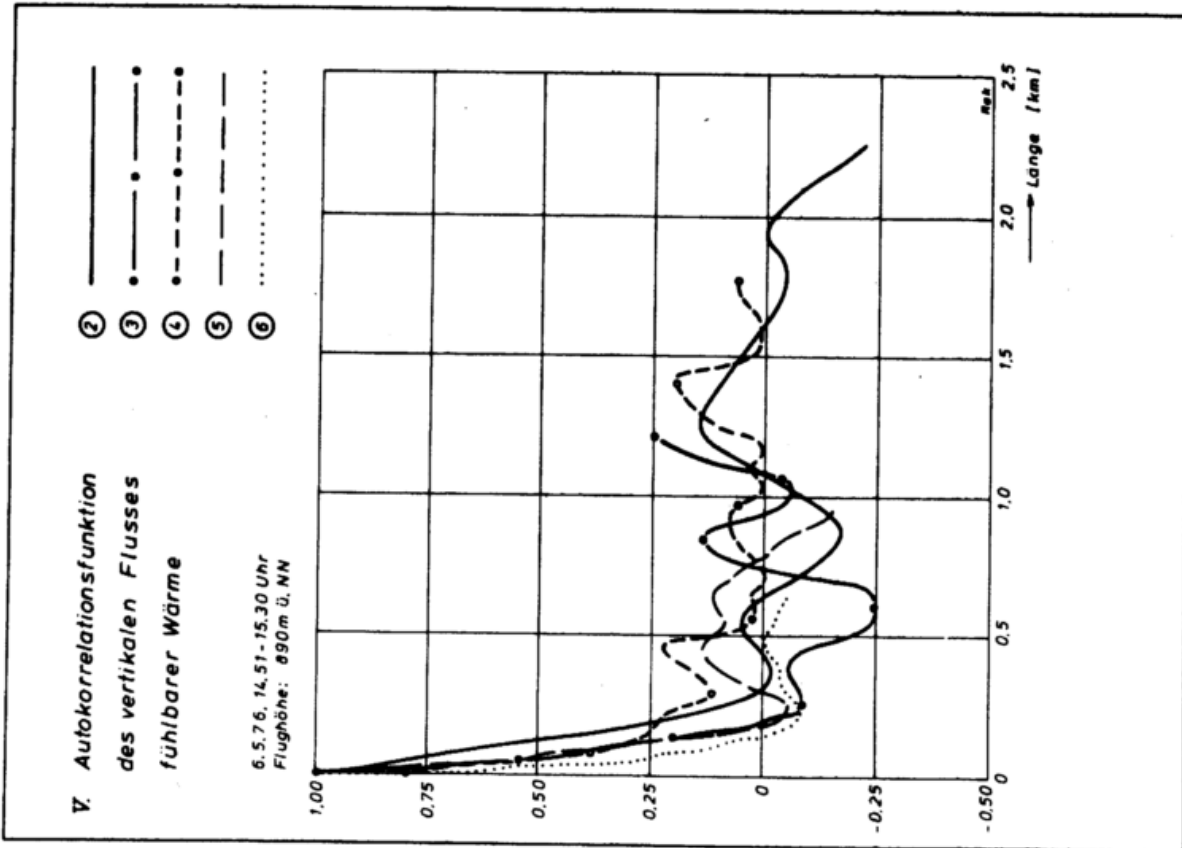
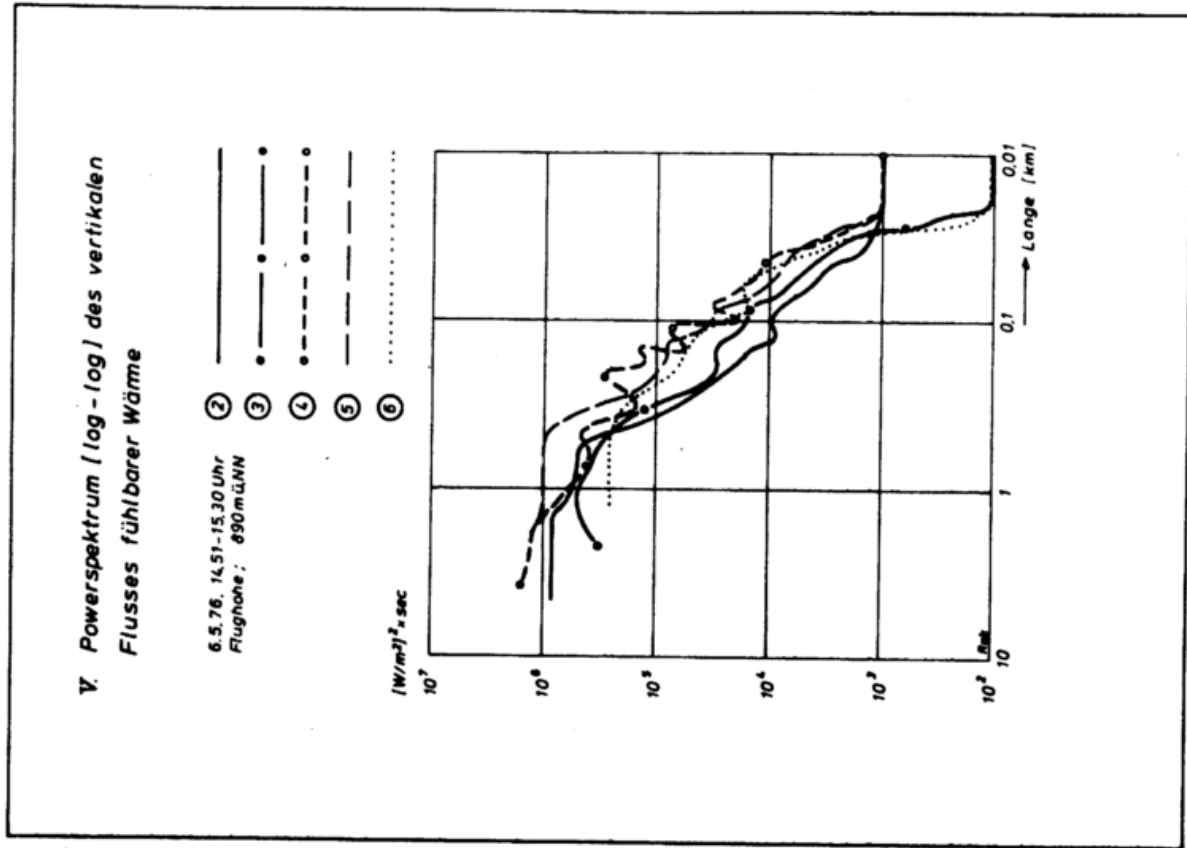


Abb.50 Siehe Text.

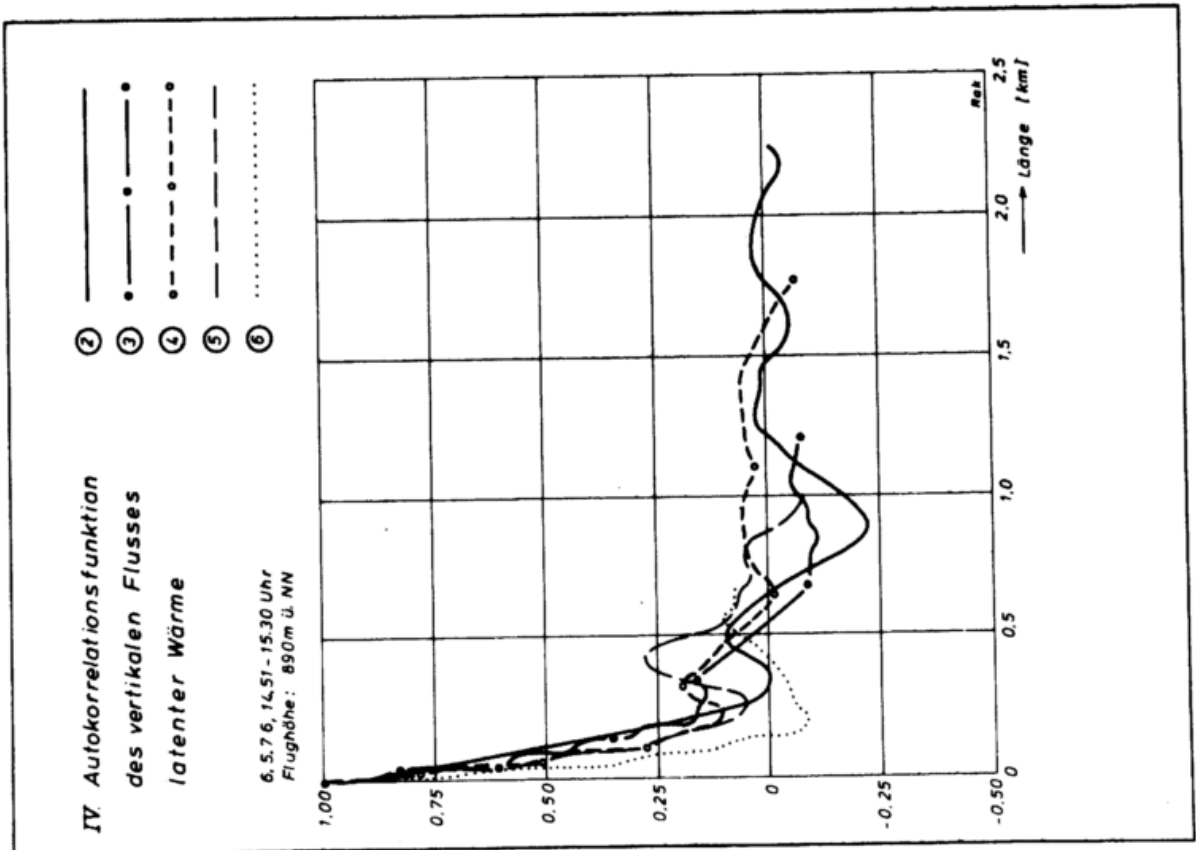
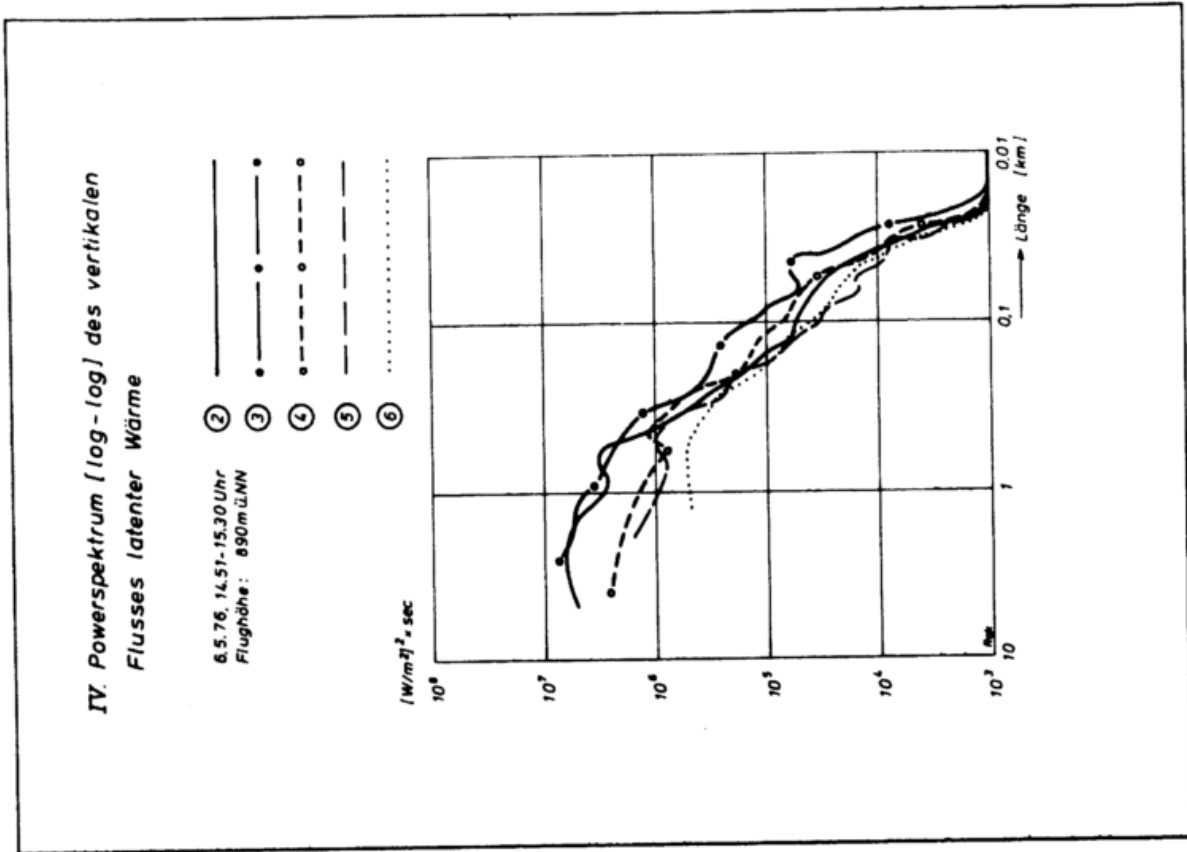


Abb.51 Siehe Text.

Betrachtet man zunächst die potentielle Temperatur entlang der Traversen ② bis ⑥ in Abb.46, dann fällt einerseits die hohe Korrelation über dem Starnberger See und andererseits die geringe Korrelation über dem thermischschwachen Traversenstück südlich des Starnberger Sees auf. Dieses unterschiedliche Verhalten wäre aufgrund der Registrierungen der Abb.37 nicht zu erwarten gewesen. Die beiden thermisch aktivsten Traversenstücke ④ und ⑤ liegen dazwischen, wobei über dem Murnauer Moos (Traverse ⑤) infolge der dort vorhandenen fast einzigen isolierten konvektiven Zelle die Korrelationsfunktion sehr stark abfällt. Dem Charakter dieser Korrelationsfunktionen entsprechend fallen auch die Powerspektren aus, die im Meßinterval keine Andeutung für ein Maximum aufweisen können. Sie sind auf der rechten Seite der Abbildung wiedergegeben und zeigen deutliche Unterschiede, wobei die thermisch aktivsten Traversen sich klar von denjenigen abheben, die entweder thermisch nicht aktiv waren, oder, wie im Falle der Traverse über dem Starnberger See, durch Vermischung keine Übertemperaturen in der Thermik aufwiesen.

Die Autokorrelationsfunktionen der spezifischen Feuchte (Abb.47) verhalten sich für alle Traversenstücke wesentlich gleichmäßiger und deuten, ebenso wie die Powerspektren auf der rechten Seite der Abbildung, darauf hin, daß die thermische Konvektion nur in untergeordneter Weise durch Abweichungen der spezifischen Feuchte der Zelle gegenüber der Umgebung charakterisiert wird. Auch hier gilt, daß die Form der Autokorrelationsfunktion kein Maximum des Powerspektrums im erfaßten Meßinterval erlaubt.

Die Autokorrelation der Vertikalgeschwindigkeit, Abb.48, zeigt ein Verhalten, wie es für stochastische Funktionen vom Charakter der Abb.37 typisch ist. Die dabei auftretenden negativen Korrelationen führen zu einer Form des Powerspektrums, das im Bereich der großen Wellenlängen ein relatives Maximum aufweisen muß. In Abb.49 ist dem Log-Log-Powerspektrum das lin-log-Powerspektrum gegenübergestellt, um die Lage der Maxima herauslesen zu können.

Die Abbildungen 50 und 51 schließlich zeigen die zusammengehörigen Autokorrelationsfunktionen und Powerspektren für die lokalen Flüsse von fühlbarer und latenter Wärme. Ihnen ist das spektrale Verhalten der Vertikalgeschwindigkeit dominierend aufgeprägt, und es zeigen sich deutliche Unterschiede für die einzelnen Traversenstücke. Charakteristisch für die Powerspektren ist die Umkehrung der Anordnung relativ zueinander, wenn man die fühlbare und die latente Wärme betrachtet.

Eine mehr als qualitative Deutung dieser statistischen Ergebnisse ist z.Zt. nicht möglich. Dazu bedürfte es noch gründlicher statistischer Untersuchungen methodischer Art, die für Meßverfahren der vorliegenden Art in der Literatur derzeit nicht zu finden sind. Der Rückgriff auf konventionelle Methoden bei der Berechnung der Autokorrelationsfunktionen und der Powerspektren kann nicht unkritisch vorgenommen werden, wenngleich es auch so scheint, als ob die damit erzielten Ergebnisse insgesamt realistisch sind. Realistisch scheint insbesondere der Unterschied der Statistik über den verschiedenen Unterlagen zu sein, so daß die aus den Meßstreifen visuell herauslesbaren Charakteristika der thermischen Konvektion über verschiedenen Unterlagen auch in den statistischen Verarbeitungen des Meßmaterials deutlich zu erkennen sind. Damit hätte man die Möglichkeit, die thermische Aktivität einer bestimmten Unterlage mit Hilfe dieser statistischen Ergebnisse zu charakterisieren und miteinander zu vergleichen.

6. BEEINFLUSSUNG DES LOKALKLIMAS EINER REGION  
(OBERRHEINGRABEN) DURCH DIE BESONDERHEITEN DER  
RAUM-ZEITLICHEN VARIABILITÄT DER THERMISCHEN KONVEKTION

6.1 Einleitung

Nachdem die Meßaktivitäten der Jahre 1974 bis 1976 quantitative Erkenntnisse über die Struktur einzelner konvektiver Zellen sowie über die raum-zeitliche Struktur von Kollektiven konvektiver Zellen gebracht hatten und darüberhinaus auch die enge Kopplung der Konvektion mit dem Untergrund quantitativ erfaßt werden konnte, wurde ein Schritt weitergegangen und versucht, lokale klimatologische Unterschiede in einer Region auf die Wirkung bevorzugter Thermikerzeugung in bestimmten Gebieten zurückzuführen. Diesem Versuch lag folgende Vorstellung zugrunde: An Strahlungstagen erfahren die Osthänge von Hügelketten oder Gebirgen in den Vormittagsstunden eine intensive Erwärmung. Dadurch wird an diesen Hängen bereits thermische Konvektion erzeugt, wenn über der davorliegenden Ebene durch die Wirkung der morgendlichen Inversion die Ausbildung von Thermik noch unterbunden ist. Wie im Kapitel 3. beschrieben wurde, führt dies zu einer Ortsabhängigkeit der Vertikalstruktur der Atmosphäre, indem diese über dem Hügel-, bzw. Gebirgsgebiet gegenüber den Verhältnissen über der Ebene bereits verändert ist. Gemäß den Ausführungen im Kapitel 3.2 muß im späteren Verlauf des Vormittags auch über der Ebene mit dem Einsatz der thermischen Konvektion gerechnet werden, so daß gegen Mittag gleichmäßig starke Thermik sowohl über dem Hügel-/Gebirgsgelände als auch über der Ebene zu finden sein müßte. Diese Verhältnisse müßten sich in der Lokalklimatologie des Gebirgsrandes bemerkbar machen.

Auf der Suche nach einem derartigen Gebiet wurde auf der Grundlage der Klimakarten des Deutschen Wetterdienstes der Ostrand des Pfälzer Waldes und der davorliegenden Streifen des Oberrheintals

als besonders charakteristisch erkannt, und es wurde vermutet, daß die besonders im Raum Neustadt an der Weinstraße zu findenden Klimaanomalien sowohl auf die Wirkung der morgendlich einsetzenden Konvektion als auch auf die Wirkung von Leewellen-Erscheinungen im Lee des Pfälzer Waldes zurückzuführen sein müßten. Gemäß den Zielsetzungen des Forschungsvorhabens konnte hier mit einer Untersuchung der statistischen Wirkung der thermischen Konvektion am festen Ort sowie mit einer Untersuchung der Wechselwirkung zwischen thermischer Konvektion und Leewellen-Systemen begonnen werden.

Besonders charakteristisch zeigt sich auch das Gebiet des Oberrheingrabens am Fuße der Vogesen, wo die soeben genannten Effekte und Wechselwirkungen noch stärker in Erscheinung treten müßten. Leider ließen sich derartige Untersuchungen jedoch noch nicht intensiv über französischem Hoheitsgebiet und in unmittelbarer Nähe der zahlreichen im Oberrheintal gelegenen Militärflugplätze durchführen. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich deshalb zunächst nur auf die Verhältnisse im Bereich des Ostabhanges des Pfälzer Waldes, sowie auf diejenigen des Oberrheingrabens.

Das gesamte Untersuchungsgebiet erstreckte sich entlang des Ostabhanges des Pfälzer Waldes von Grünstadt im Norden bis Bad Bergzabern im Süden (Gesamtlänge 60 km), vom Pfälzer Wald quer über den Oberrheingraben bis südöstlich Karlsruhe (Traversenlänge 40 km) und dann auf der Ostseite etwa entlang der Eisenbahnlinie Karlsruhe - Bruchsal - Heidelberg bis südlich Weinheim an der Bergstraße (Gesamtlänge etwa 60 km) und dann entlang der Autobahn nördlich Mannheim/Ludwigshafen in Richtung Grünstadt (Traversenlänge etwa 20 km). In diesem Gebiet wurden Querschnittstraversen in ostwestlicher, bzw. westöstlicher Richtung entlang der nördlichen Begrenzung des Untersuchungsgebiets (Traverse nördlich Mannheim/Ludwigshafen), im Mittelteil zwischen Wiesloch und dem Pfälzer Wald westlich von Neustadt sowie im südlichen

Teil zwischen dem Pfälzer Wald und dem Autobahndreieck Karlsruhe geflogen. Die nördliche Traverse mußte den Einfluß der anthropogen erzeugten Konvektion des Ballungsgebietes Mannheim/Ludwigshafen erkennen lassen, die Mitteltraverse mußte aufgrund der Topographie des Pfälzer Waldes sowie der stark wechselnden Bodenbeschaffenheit des Oberrheingrabens die natürlichen Verhältnisse in reiner Form zutage treten lassen, während die südliche Traverse mit dem Ballungsgebiet Karlsruhe am Ende der Traverse eine gewisse Mittelstellung zwischen den beiden anderen Traversen einnahm.

Da es bei diesen Untersuchungen nicht auf die Feinstruktur der thermischen Konvektion ankam, konnte, auch schon wegen der zu überwindenden großen Entfernungen, mit einer Fluggeschwindigkeit von 150 km/h geflogen werden. Dabei wurden für eine Traverse quer über das Rheintal 15 Minuten benötigt. Nach Durchführung eines feinaerologischen Aufstieges zu Beginn der Traversierung konnten innerhalb der Registrierdauer der digitalen Datenerfassungsanlage vier übereinander befindliche Traversen geflogen werden. Aus Flugsicherheitsgründen kam für diese Traversierung nur der Höhenbereich zwischen 500 und 1500 m über Grund infrage. Außerhalb der Zeiten, in denen militärischer Tiefflug durchgeführt wird (an späten Nachmittagen sowie an den Wochenenden), wurden auch Traversen bis herunter zur Sicherheitsflughöhe von 150 m über Grund geflogen. Es war bedauerlich, daß während der thermisch interessantesten Zeit des Tages, nämlich am Vormittag, eine Beschränkung auf dem angegebenen Höhenbereich nötig war. In der Regel lagen die Traversen in folgenden Höhen: 500 m, 800 m, 1100 m und 1400 m über Grund. Nach Ende der Gesamt-Traversierung wurde zur Überprüfung der zeitlichen Veränderung der Vertikalstruktur ein feinaerologischer Aufstieg in Richtung auf den Flugplatz Speyer gemacht, von dem aus alle Traversen im Mittelteil des Untersuchungsgebietes geflogen worden sind. Derartige Traversierungen wurden zwei bis drei mal pro Tag vorgenommen, wobei pro Meßflug mit einer zeitlichen Dauer von etwa zwei Stunden gerechnet werden mußte. In Einzelfällen wurden häufigere feinaerologische

Aufstiege sowohl über dem Pfälzer Wald als auch über Speyer in der Art durchgeführt, wie es im Kapitel 3.2 dargestellt worden ist.

Neben den Traversierungen in senkrecht stehenden Querschnittsebenen wurden auch Traversierungen entlang der Berandung des Untersuchungsgebietes durchgeführt. Die Berandung des Gesamtuntersuchungsgebietes beträgt etwa 200 km. Die Flugzeit für den aerologischen Aufstieg bis auf 1500 m Höhe über Grund, für den Abstieg auf Traversierungshöhe, für die Umrundung des Gesamtuntersuchungsgebietes sowie für die Rückkehr-Traversal zum Flugplatz beträgt fast genau zwei Stunden. Mit Rücksicht auf die Laufzeit der digitalen Datenerfassungsanlage konnte ein derartiges Programm nicht durchgeführt werden, sondern es mußte eine um 100 km verkürzte Traverse gewählt werden. Diese Traverse verlief von Speyer nach Neustadt, von dort entlang des Pfälzer Waldes nach Bergzabern, von Bergzabern bis östlich Karlsruhe, von Karlsruhe in nördlicher Richtung über Bruchsal hinaus und dann südlich von Wiesloch zurück zum Flugplatz Speyer.

Es wäre wünschenswert gewesen, derartige Traversen in einer Horizontalebene neu nicht nur in einer Höhe, sondern gleichzeitig in mehreren Höhen durchzuführen, wodurch eine Kombination zwischen Querschnittstraversierung in vertikal stehenden Querschnittsflächen und Traversierung in Horizontalebene entstehen würde. Derartige Aufgaben übersteigen jedoch die Möglichkeiten, die durch einen Motorsegler gegeben sind und würden sich nur durch den Einsatz von etwa vier schnellfliegenden Sportflugzeugen mit meteorologischer Instrumentierung durchführen lassen. Die Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen legen nahe, daß auf diese Weise wesentlich neue wissenschaftliche Erkenntnisse über die Struktur der Atmosphäre im Mesoscale-Bereich gewonnen werden könnten.

## 6.2 Ermittlung der zweidimensionalen Struktur atmosphärischer Variabler in vertikal stehenden Querschnittsflächen

Im Folgenden wird nur die Querschnittsfläche Neustadt - Speyer - Wiesloch betrachtet werden, da sie bezüglich der erzielten Ergebnisse am markantesten war. Die Traverse hat eine Länge von 40 km und reicht von einem Punkt südlich Walldorf in gerader Linie über Speyer bis zu einer Stelle zwischen Lambrecht im Pfälzer Wald und Neustadt/W. Das überflogene Gebiet ist, vom Untergrund her gesehen, recht inhomogen. Auf dem östlichen Teil der Traverse zwischen Speyer und Walldorf wurde über Feldern geflogen, auf dem westlichen Teil zwischen Speyer und Neustadt fast ausschließlich über Wald.

Aus der Gesamtzahl der Traversen möge diejenige des 10.9.1977 vormittags herausgegriffen werden. Abb.52 zeigt die Feinaerologie (Temperatur allein) des 10.9. zwischen 9.40 und 15.35 Uhr. Im oberen Teil der Abbildung ist, ebenso wie in Kapitel 3.2 schon beschrieben war, zu erkennen, daß die Thermik über dem Pfälzer Wald um 10.15 Uhr eine vertikale Schichtung erzeugte, die verschieden von derjenigen war, die kurz vorher um 9.40 Uhr über Speyer gefunden wurde. Der Unterschied zwischen beiden Aufstiegen ist noch gegen Mittag zu erkennen, wobei sich über dem Pfälzer Wald eine Inversion zeigt, die über Speyer kurz danach in dieser Form nicht mehr vorhanden war. Am frühen Nachmittag, Abb.52 unten, sind die Unterschiede der Feinaerologie über dem Pfälzer Wald, dem Oberrheingraben und dem Odenwald bis in eine Höhe von 1500 m fast völlig ausgeglichen und auch das Verhalten im Bereich der Inversion zeigt keine Unterschiede prinzipieller Art. In Abb.53 sind einige dieser Aufstiege nochmals eingetragen, wo sie zur Kontrolle der auf den Traversen gemessenen Temperaturen Verwendung finden.

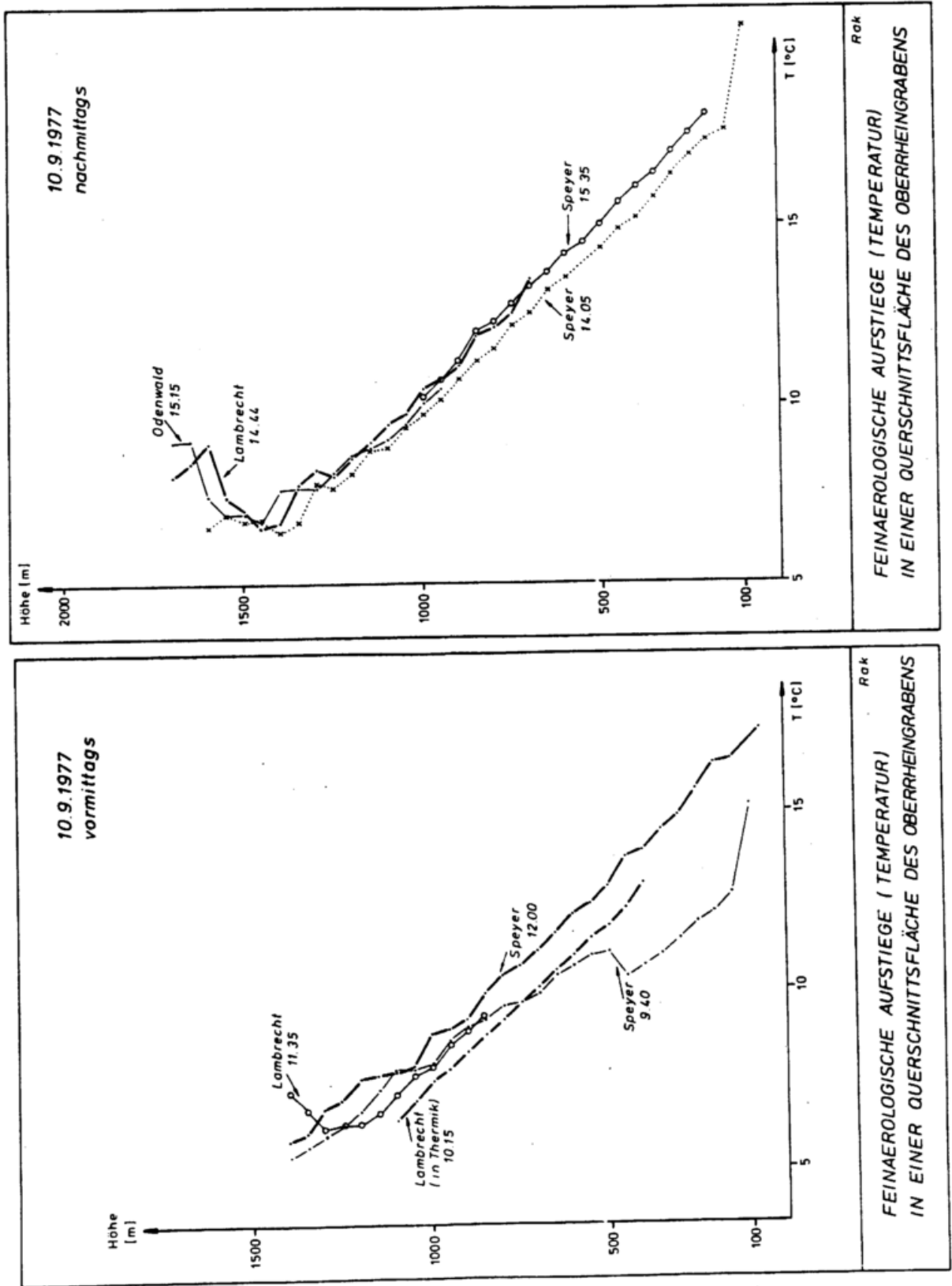


Abb.52 Zeit-Orts-Abhängigkeit der feinaerologischen Strukturen.

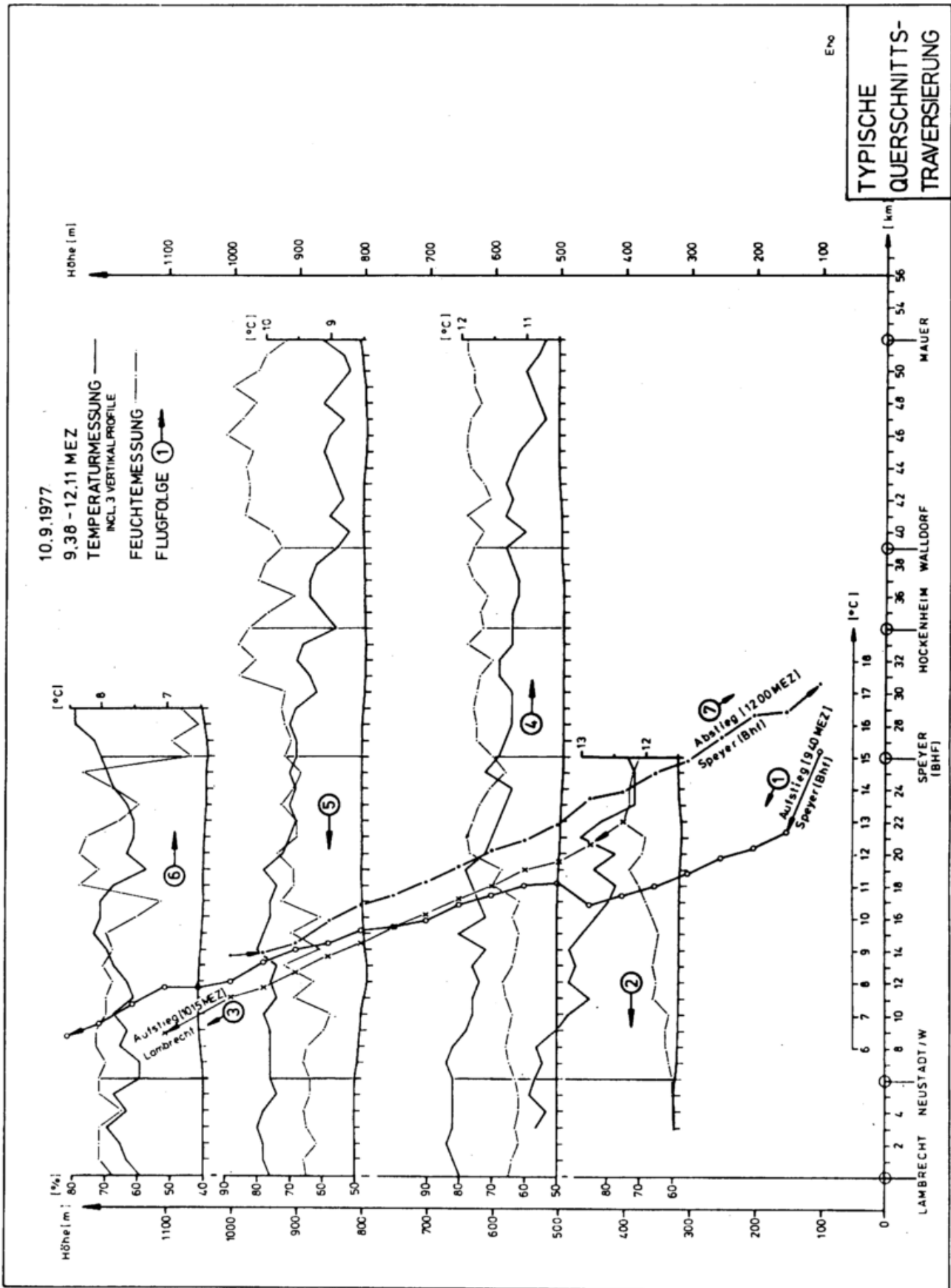


Abb.53 Beispiel für eine Querschnittstraversierung.

In Abb.53 sind Traversenstücke, bzw. ausgedehntere Traversen zu erkennen, die in den Höhen 300 m, 500m, 800 m und 1050 m über Grund geflogen worden sind. Die Abbildung soll nur einen ersten Überblick über die Effekte geben, und es soll nicht über die Schwierigkeiten gesprochen werden, die dadurch entstehen, daß man bei der Interpretation die Zeitabhängigkeit der Vertikalstruktur aus den Werten der Horizontaltraversierungen herauseliminieren muß. Die ausgezogenen Linien beziehen sich auf die aktuelle Temperatur in der jeweiligen Höhe, in der geflogen wurde. Man erkennt, daß auf allen Traversen die Flughöhe sehr genau eingehalten worden ist, so daß Höhenkorrekturen der Temperaturmessung in der vorliegenden anschaulichen Darstellung nicht vorgenommen worden sind.

Die unterste Traverse zeigt in 300 m Höhe über Grund Temperaturschwankungen von fast 1 K über dem Waldgebiet zwischen Speyer und Neustadt mit insgesamt ansteigender Temperaturtendenz. Am Ende des Waldgebietes, über den Feldern östlich von Speyer, setzte bereits Thermik ein mit erneuter Erhöhung der Temperatur bis über Neustadt hinaus. Die relative Feuchte verhält sich, wie es sein muß, gegenläufig und zeigt eine Abnahme zwischen Neustadt und Speyer von mehr als 10%. Die gegenläufige Tendenz von Temperatur und relativer Feuchte ist entlang der obersten Traverse teilweise gestört, was auf die Einwirkung der bei 1500 m liegenden Inversion zurückzuführen ist. Die Temperaturasymmetrie, so wie sie sich auf der untersten Traverse zeigte, ist in abgeschwächter Form auch in den beiden darüberliegenden Traversen zu erkennen und ist ausschließlich der Wirkung der thermischen Konvektion am Rande des Pfälzer Waldes zuzuschreiben. Oberhalb von 1000 m ist dieser Einfluß völlig abgeklungen, und es zeigt sich eine gegenläufige Tendenz, indem es in der Höhe zu der früher beschriebenen charakteristischen Abkühlung im oberen Teil der Konvektionsschicht gegenüber der Umgebung kommt. Die in Abb.53 mitgeteilten Traversen zeigen somit räumlich genau das, was früher im Kapitel 3. aus einzelnen feinaerologischen Vertikalaufstiegen geschlossen worden ist.

Interessant ist, daß sich der Einfluß des Untergrundes auf die Temperaturverteilung in der Höhe auch ohne stark ausgeprägte Thermik noch bemerkbar zu machen scheint, indem bei vielen Traversierungen übereinanderliegende Traversen ähnliche Strukturen der Registrierungen von Temperatur und Feuchte aufwiesen.

Faßt man alle Horizontaltraversierungen in Querschnittsflächen zusammen und ordnet sie jeweils nach den Tageszeiten, dann erhält man die Ergebnisse der Abb.54. Hier wurden die Abweichungen der örtlichen Temperaturmittelwerte vom Temperaturmittel der Querschnittstraverse berechnet unter Zugrundelegung sämtlicher Profilflüge des Juni und September 1977. Der Unterschied zwischen den Verhältnissen während der verschiedenen Tageszeiten kommt dabei deutlich zum Ausdruck. Im oberen Teil der Abbildung findet sich oberhalb des Pfälzer Waldes und, in noch größerem Maße, an seinen der Morgensonne zugeneigten Hängen eine thermikbedingte positive Temperaturabweichung bis etwa in eine Höhe von 1200 m NN und eine kompensierende negative Temperaturabweichung darüber. Der größte Wert der positiven Temperaturabweichung beträgt fast  $0,6^{\circ}$ , während in der Höhe ein Wert von  $-0,5^{\circ}$  für die Abkühlung erscheint. Diese morgendliche Labilisierung im westlichen Teil des Oberrheingrabens ist ein ausgeprägtes Charakteristikum der Region und ist nur auf die Wirkung der thermischen Konvektion zurückzuführen. Im östlichen Teil des Oberrheingrabens finden sich im Mittel negative Temperaturabweichungen, was unmittelbar einleuchtet. Die im Mittel positive Abweichung der Temperatur zwischen 1000 und 1500 m NN über der Talmitte kann nicht auf kompensatorische Absinkbewegungen zurückgeführt werden, sondern spiegelt lediglich den Einfluß des verzögerten Einsatzes der Konvektion wieder und die damit verbundene Modifikation der vertikalen Mächtigkeit der Grenzschicht. Am Nachmittag, Abb.34 Mitte, kehren sich die Verhältnisse abgeschwächt um, und die Temperaturabweichungen sind geringer, da kaum noch räumliche

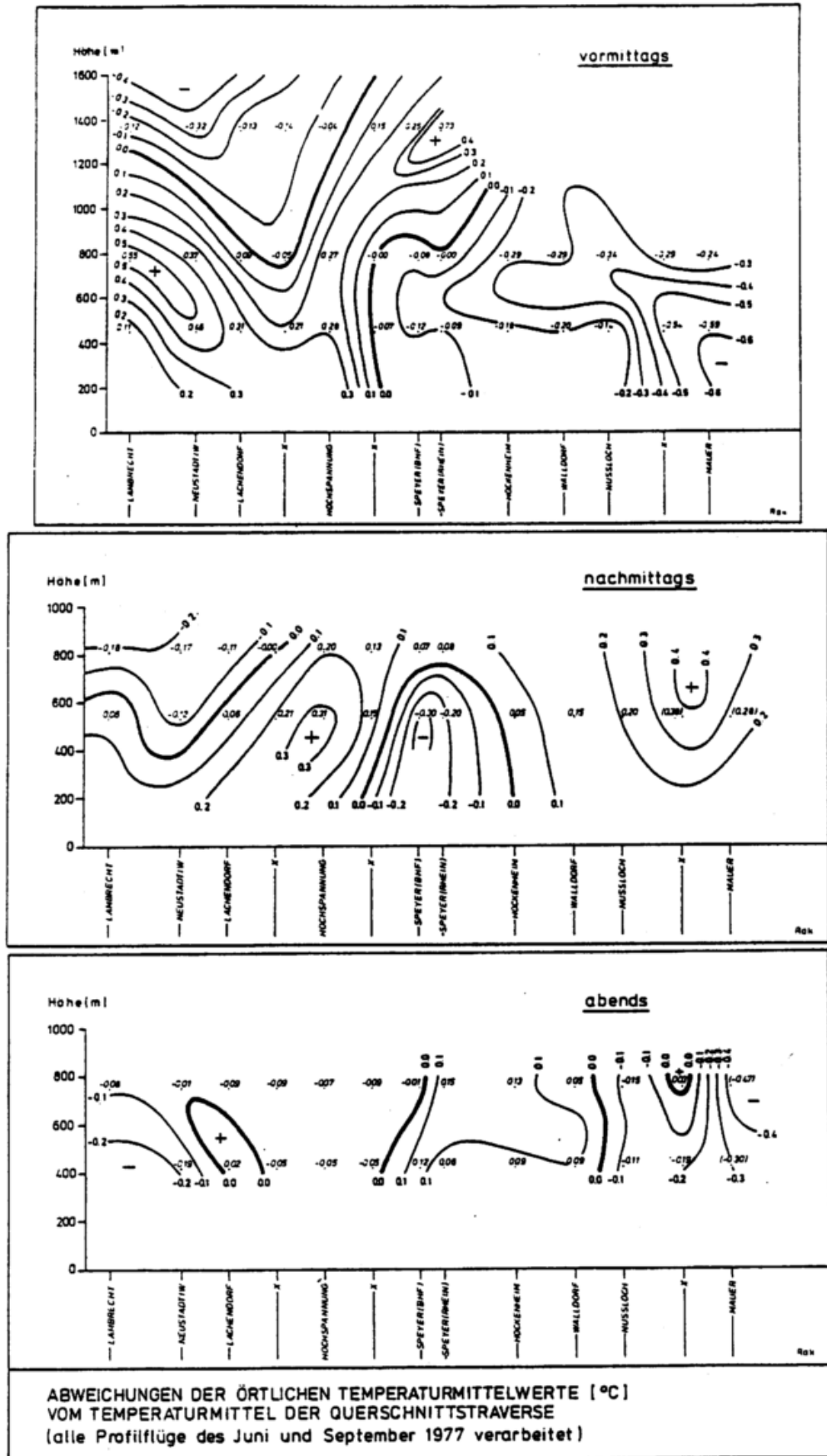


Abb.54 Thermische Asymmetrie des Oberrheingrabens.

Unterschiede in der thermischen Aktivität zwischen dem Pfälzer Wald und dem Oberrheingraben bestehen. Gegen Abend, Abb.54 unten, gleichen sich alle Unterschiede weitgehend aus, wobei jedoch wegen der geringen Zahl von Traversenflügen in den Nachmittags- und Abendstunden wenig Aussagen möglich sind.

Gemäß der früher beschriebenen Zielsetzung wurden während der Herbstkampagne erste Traversenflüge entlang der Seiten des vorher beschriebenen Gitterelements durchgeführt, wobei zwei Traversen quer zur Talachse und zwei entlang der topographisch vorgegebenen Berandungen verliefen. In der Wahl der Flughöhe bestand wegen des lebhaften militärischen Tieffluges während der Tageszeit nicht viel Auswahl. Als sicherste Flughöhe wurde die Höhe 750 m NN (650 m über Grund) gewählt. Diese Höhe überstieg die Höhe der talnächsten Hügel des Pfälzer Waldes um 50 bis 100 m. In den späten Nachmittagsstunden konnte in Höhen von 350 bis 380 m NN (rund 150 bis 180 m über Grund) geflogen werden. Mit diesen Traversenflügen waren jeweils bis zu drei fein-aerologische Aufstiege an verschiedenen Orten verbunden (z.B. Speyer, Lambrecht und Mauer).

Zur Demonstration seien zwei derartige Profilflüge vom 6. September 1977 wiedergegeben. In den Abbn.55 und 56 ist der Verlauf von Temperatur und Feuchte in konstanter (bzw. stückweise konstanter) Flughöhe entlang der Gesamttrajektorie in geglätteter Form dargestellt. Schon der erste derartige Flug (Startzeit in Speyer 9.56 Uhr) brachte unerwartete Effekte: Nach Überqueren der Waldkante 3 km östlich des Stadtzentrums von Neustadt fand sich über den Feldern und Wiesen noch in einer Höhe von 620 m über Grund eine horizontale Temperaturänderung von fast 3 K auf einer Distanz von nur 3 - 4 km. Während des Aufstieges über Lambrecht (etwa 10.45 Uhr) war die thermische Konvektion im Bereich des Pfälzer Waldes und später entlang der Osthänge außergewöhnlich stark und räumlich "dicht gepackt". Auf der Traverse Neustadt/Bad Bergzabern, wo in einer relativ zum Untergrund wechselnden

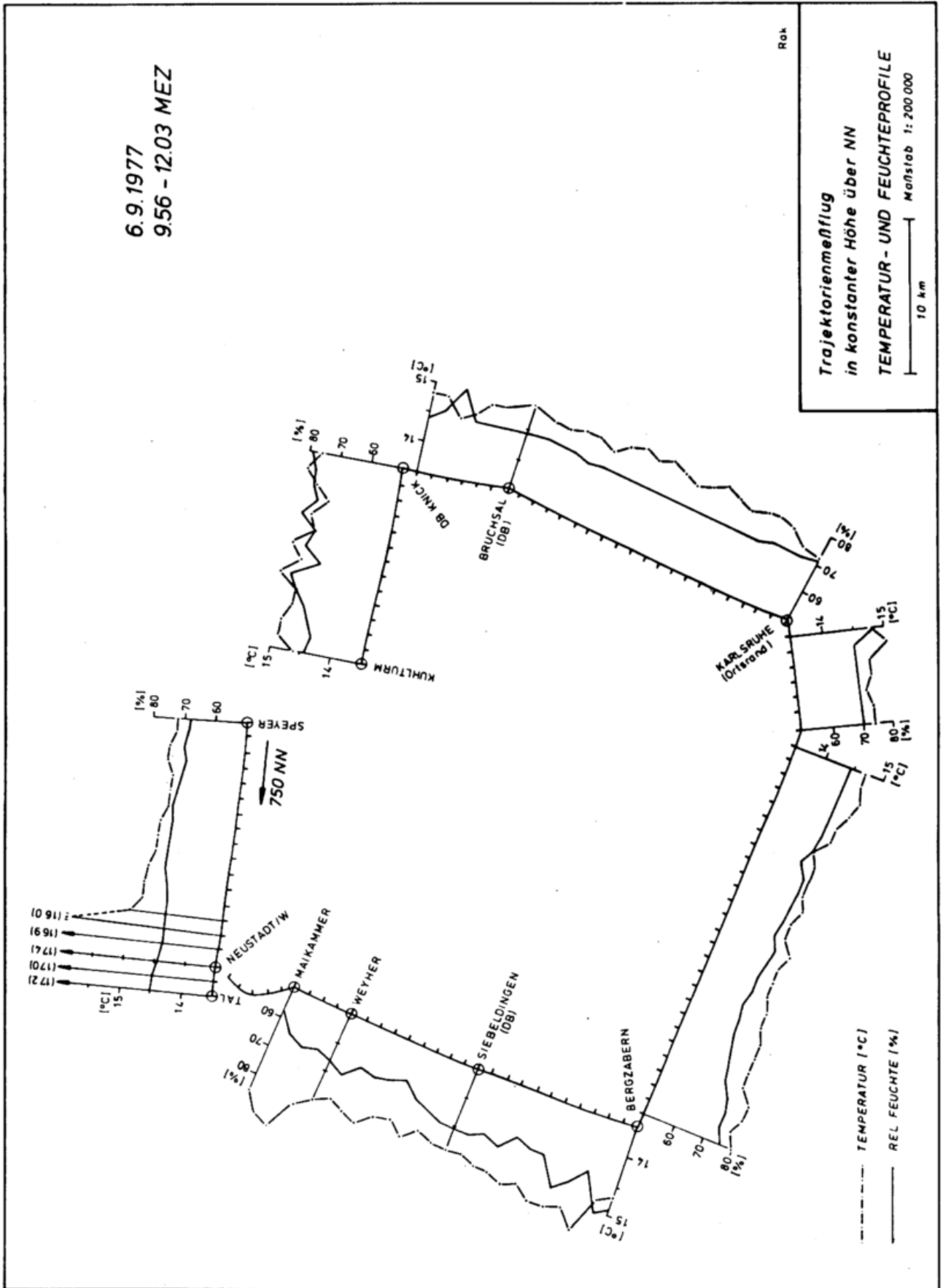


Abb.55 Horizontale Vormittagstraversierung.

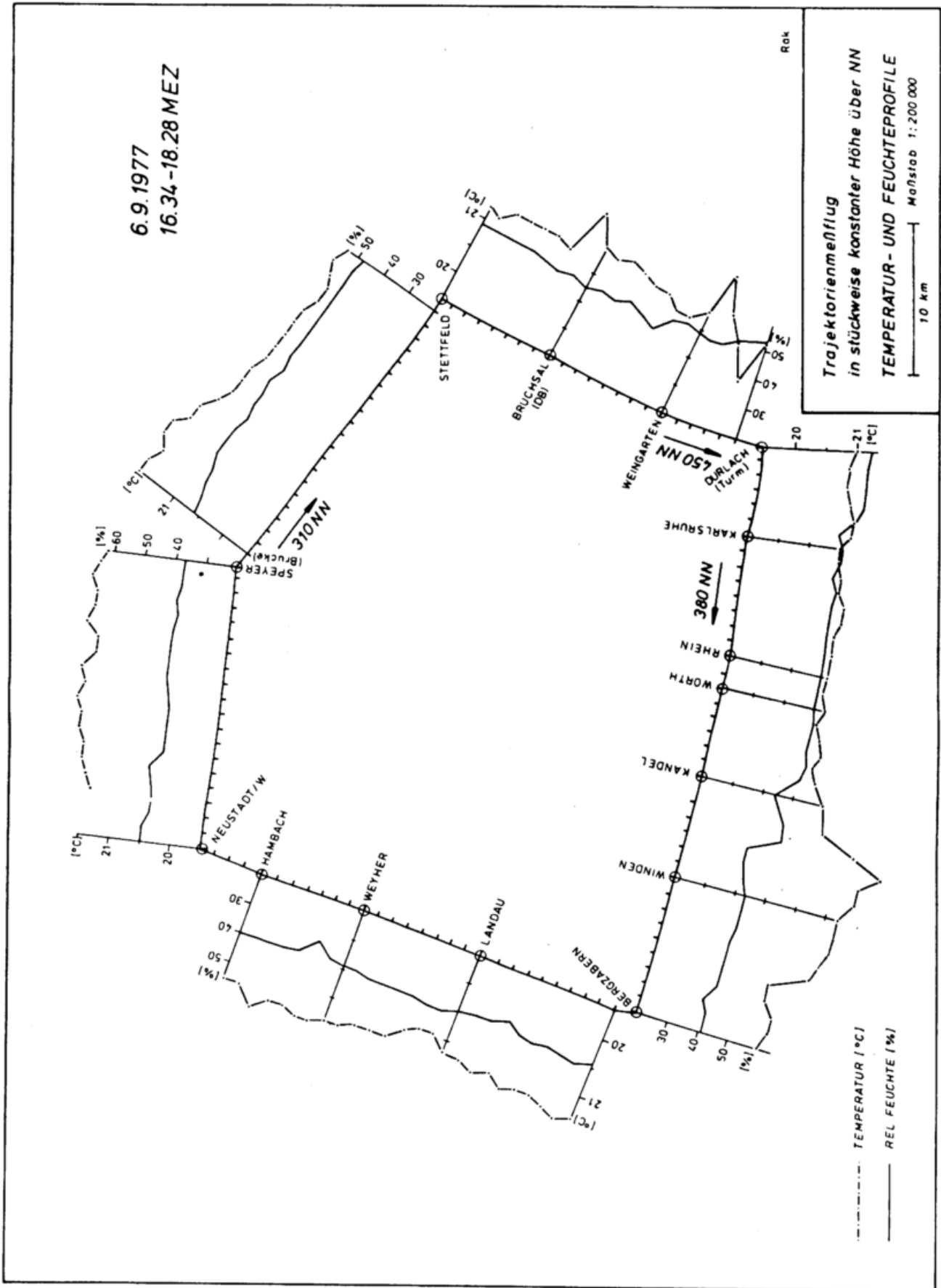


Abb.56 Horizontale Nachmittagstraversierung.

Flughöhe geflogen wurde, ließ sich fast jeder Taleinschnitt durch eine deutliche Temperaturabnahme identifizieren. Insgesamt sind entlang dieses Traversenstückes die horizontalen Variationen von Temperatur und Feuchte wesentlich größer als es die geglätteten Linien der Abb.55 wiedergeben. Die später durchflogenen Traversenstücke von Bergzabern über Karlsruhe und Bruchsal nach Speyer zeigen insgesamt geringe horizontale Variationen der thermodynamischen Variablen, wobei jedoch beachtet werden muß, daß auch hier die Thermik bereits voll eingesetzt hatte.

Am Nachmittag desselben Tages, Abb.56, ergibt sich längs der Traversenstücke im Vergleich zu den Verhältnissen des Vormittags ein sehr unterschiedliches Verhalten. Auffallend ist die starke Erwärmung auf dem Traversenstück zwischen Bad Bergzabern und Kandel, was auf die besondere Beschaffenheit des Untergrundes zurückzuführen ist. Die Traverse Neustadt - Speyer - Stettfeld läßt eine leichte Erwärmung der Talmitte gegenüber den Talrändern erkennen, die Traverse entlang des Ostabhanges des Pfälzer Waldes zeigt nun keinerlei Besonderheiten mehr, während die Traverse zwischen Stettfeld und Durlach in niedrigerer Höhe die lokalen Wärmeinseln der Städte Weingarten und Bruchsal erkennen läßt. Die Flughöhe entlang letzterer Traverse betrug bis hinter Weingarten 310 m NN, d.h. im Mittel 180 m über Grund. Aus Flugsicherheitsgründen wurde Durlach und Karlsruhe in einer Flughöhe von mehr als 300 m über Grund überflogen, und es wurde hinter Karlsruhe für den Rest der Traverse in einer Höhe von 150 bis 170 m über Grund weitergeflogen. Die in der Abbildung wiedergegebenen Temperaturwerte sind, wie stets bei derartigen Traversenflügen, auf eine gleiche Höhe reduziert. Dabei ergab sich, daß an diesem Tage sowohl am Vormittag als auch am Nachmittag über dem Stadtgebiet von Karlsruhe keine lokale Wärmeinsel gefunden wurde, was vermutlich auf die Wirkung der vorangehenden kalten Strahlungsnacht zurückgeführt werden kann.

Die Verhältnisse der Abbn.55 und 56 lassen eine unerwartet große horizontale Inhomogenität der thermodynamischen Variablen erkennen, wobei sich der Einfluß verschiedenartiger Unterlagen in niedrigeren Höhen (etwa bis 200 m über Grund) mit Schwankungen der Temperatur um einen Flächenmittelwert in der Größenordnung von  $\pm 0,5$  bis 1 K bemerkbar machen kann. Dabei ist die Wirkung der Thermik sowie diejenige von Kaltluftabflüssen höher gelegener Gebiete noch nicht berücksichtigt. Unter dem Einfluß intensiver Thermik werden derartige Unterschiede noch größer und halten sich in gleicher Größenordnung bis in größere Höhen. Auch Schwankungen der relativen Feuchte im Vergleich zum Traversenmittelwert, verbunden mit der Temperaturschwankung bzw. auf Advektion zurückzuführen, können sich auf einer kurzen Distanz von 30 - 40 km bis zu  $\pm 10\%$  und mehr ergeben. Es muß jedoch im Auge behalten werden, daß die horizontalen Variationen der Variablen in erster Linie der Wirkung der thermischen Konvektion in Kombination mit der speziellen Beschaffenheit des Untergrundes zuzuschreiben sind. Jede modellmäßige Simulation des Verhaltens der Atmosphäre in den verschiedenen Scales (großräumig bis regional) kann somit ohne eine realistische Parameterisierung der thermischen Konvektion nicht auskommen.

Für eine derartige Parameterisierung ist jedoch die Kenntnis der Größenordnung der in der Grenzschicht zu erwartenden Effekte von großer Bedeutung. Die bisher durchgeführten Meßflüge, besonders diejenigen im Oberrheingraben, haben, da sie in verschiedenen Jahreszeiten geflogen worden sind, den möglichen Variationsbereich der Variablen sehr einengen lassen. Diese Tatsache ermöglicht u.U. die Anwendung von Parameterisierungsverfahren, die sehr viel einfacher sein könnten als diejenigen, die man ohne Kenntnis der realen Verhältnisse in der Grenzschicht aufzustellen gezwungen wäre.

## 7. MESSTECHNISCHE ERFASSUNG SONSTIGER CHARAKTERISTISCHER PHÄNOMENE

### 7.1 Leewellen-Systeme

Die Untersuchung besonderer meteorologischer Effekte wie etwa von Leewellen-Systemen oder Wolkenstraßen war nicht spezieller Gegenstand des Forschungsvorhabens. Selbstverständlich beanspruchen derartige Phänomene das Interesse des messenden Meteorologen, wenn er ihnen begegnet. So wurde während des Forschungsvorhabens verschiedentlich versucht, die Struktur derartiger Phänomene meßtechnisch zu untersuchen, und zwar dann, wenn mit Wechselwirkungen zwischen Leewellen bzw. Wolkenstraßen und thermischer Konvektion zu rechnen war. Wie in der wissenschaftlichen Zielsetzung ausgeführt wurde, kommt der Scale-Wechselwirkung zwischen der organisierten kleinräumigen Konvektion und den ebenfalls organisierten größerräumigen Phänomenen eine besondere Bedeutung zu.

Hinsichtlich der Wechselwirkung zwischen thermischer Konvektion und Leewellen läßt sich überlegen, daß Leewellen-Systeme im unteren Bereich der Atmosphäre durch das Einsetzen intensiver thermischer Konvektion leicht zerstört werden können. Voraussetzung für das Entstehen von Leewellen ist, daß durch externe Schwerewellen im Bereich einer stabilen Schichtung ein System von internen Schwerewellen angeregt wird. Ist die Einstrahlung so stark, daß sich thermische Konvektion unbeeinflußt durch die von der Leewelle erzeugten Vertikalgeschwindigkeitsfelder in Bodennähe entwickeln kann, dann führt sie zu einem laufenden Abbau der stabilen Schichtung in der Höhe und entzieht damit dem Leewellen-System die Voraussetzungen seiner Existenz.

Diese Art Wechselwirkung zwischen thermischer Konvektion und Leewellen ist dem fliegenden Meteorologen sowie den Segelfliegern seit längerer Zeit bekannt.

Leewellen im Gebiet der deutschen Mittelgebirge sind durchaus keine seltene Erscheinung und es möge hier beispielsweise das Gebiet des Teutoburger Waldes sowie das des Hohen Meißner genannt werden. Aber auch aus anderen Gebieten Norddeutschlands sind Leewellen-Erscheinungen beachtlicher Art bekannt, wie z.B. aus dem Gebiet des Deister, über dem mit Segelflugzeugen in der Welle Flughöhen bis zu 6000 m erreicht worden sind. Die Untersuchungsgebiete, die Gegenstand des Forschungsvorhabens waren (die Gebiete um Oerlinghausen, um Eschwege und um Speyer), zeigten zwar häufig Leewellen-Erscheinungen, doch kaum solche, deren vertikale Erstreckung so hoch reichte, wie z.B. über dem Deister. Aus bisherigen Erfahrungen folgt, daß in den drei genannten Gebieten Leewellen erzeugt werden können, die etwa bis 3000 m über Grund reichen. Sie treten jedoch wesentlich häufiger auf, als in der Meteorologie normalerweise angenommen wird.

Als erstes Beispiel möge eine Leewelle im Lee des Teutoburger Waldes diskutiert werden. In Abb.57 ist auf der linken Seite die vertikale Temperaturverteilung für zwei hintereinanderliegende Aufstiege des 12.4.1974 angegeben und auf der rechten Seite die räumliche Anordnung der Flächen gleicher potentieller Temperatur in einem Querschnitt orthogonal zur Hangkante des Teutoburger Waldes. Das ganze Phänomen spielt sich in einer mittleren Höhe von 600 m über Grund ab und besitzt eine für Leewellen-Systeme recht kurze Wellenlänge. Die bei geeigneten Windverhältnissen in den frühen Vormittagsstunden häufiger gefundenen Systeme dieser Art werden über der Senne in der Regel sehr schnell durch die thermische Konvektion zerstört.

Unerwartet häufig fanden sich Leewellen-Phänomene im Gebiet des Oberrheingrabens, und zwar nicht nur im Lee des Pfälzer Waldes,

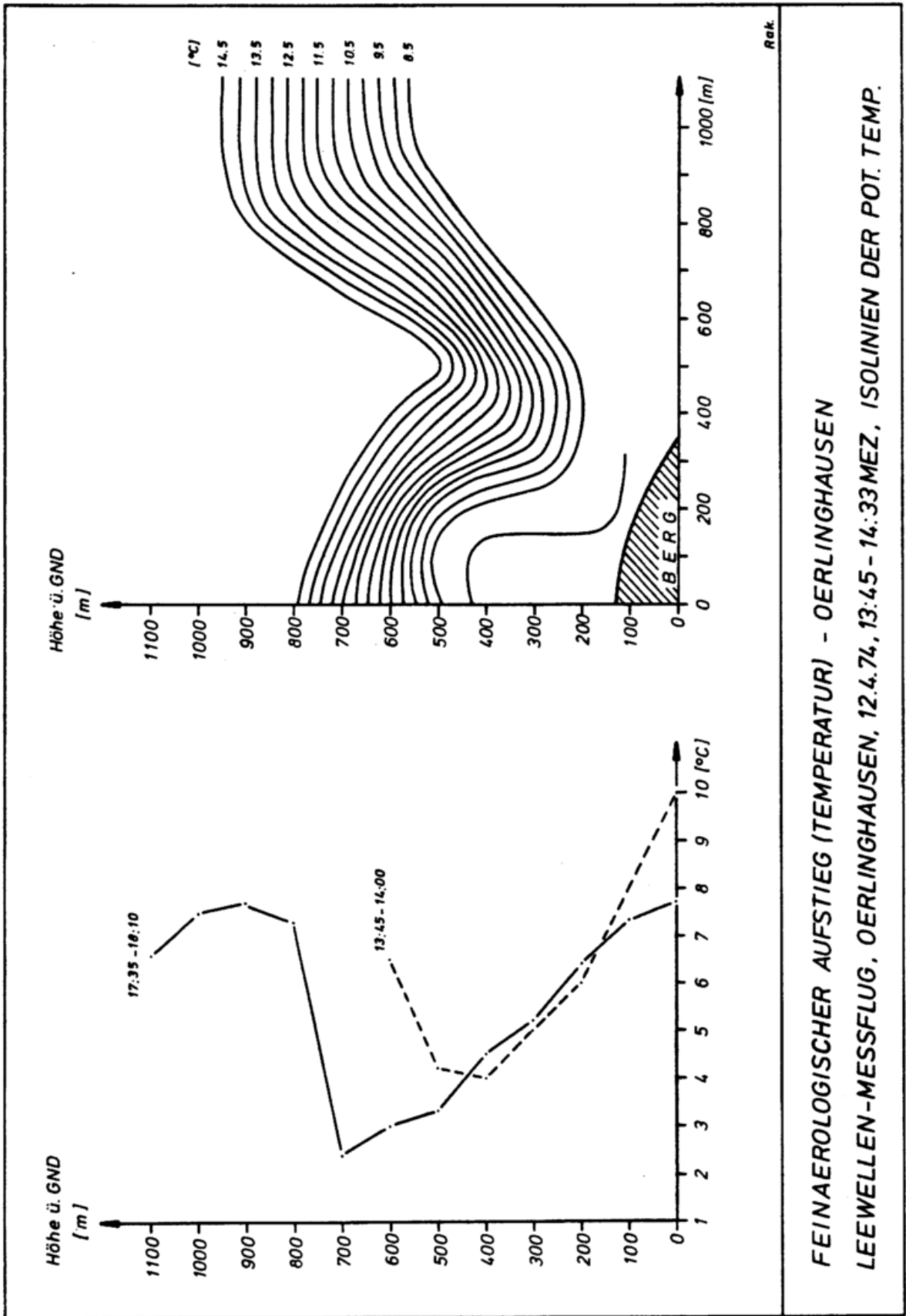


Abb.57 Deformation der Flächen gleicher potentieller Temperatur in einer Leewelle im Lee des Teutoburger Waldes.

sondern in verstärktem Maße im Lee der Vogesen. Die bisherigen Erfahrungen lassen während der Hochdruckwetterlagen, die für Meßkampagnen angestrebt wurden, einen Anteil von rund 10% der Meßzeit als von Leewellen beeinflusst erkennen. Dabei wurden die Wellen nicht immer durch lenticularis-Wolkensysteme sichtbar, sondern fanden sich ausschließlich im Feld der Vertikalgeschwindigkeiten und denjenigen der thermodynamischen Variablen. Aber auch Leewellen-Systeme klassischer Art mit Wellenlängen zwischen 5 und 6 km, laminaren Strömungsverhältnissen im aufsteigenden Ast der Welle, Lee-Aufheiterungen und alto-cumulus-lenticularis waren anzutreffen. Auch die unterhalb des ersten Wellenberges stark turbulenten Rotoreffekte fehlten dabei nicht. Die folgende Abb.58 stellt ein Beispiel vom 12.9.1977 in der Nähe von Neustadt dar. Hierbei handelte es sich um ein klassisches Leewellen-Phänomen. Im untersten Teil der Abbildung ist das Bodenrelief wiedergegeben. Der Meßflug wurde in etwa 1300 m NN 7 km von der Hangkante des Pfälzer Waldes entfernt mit abgestelltem Motor begonnen, und es wurde der Pfälzer Wald orthogonal angeflogen. Die Verringerung der Flughöhe während der ersten 140 Flugsekunden ist der Absinkbewegung auf der Vorderseite der ersten Welle zuzuschreiben. Wie dem obersten Teil der Abbildung zu entnehmen ist, setzt nach 140 Sekunden Flugzeit die durch die Welle bedingte positive Vertikalbewegung ein, die dazu führt, daß das Flugzeug Höhe gewinnt. Die aus den Daten konstruierte Stromlinie läßt erkennen, daß im Bereich des Wellenberges erhebliche Turbulenz zu finden ist, die auf die Existenz des Rotors um Flugzeit  $T = 160$  s herum hindeutet. Etwas ähnliches findet sich über dem Abhang des Pfälzer Waldes in relativ niedriger Höhe über Grund, wo sich der Einfluß der bodennahen Turbulenz bemerkbar macht. Dort wird die hohe spezifische Feuchte der bodennahen Schicht gemessen, während mit wachsender Entfernung vom Pfälzer Wald, in Abb.58 nach links hin, im Luv des Rotors trockene Luft aus der Höhe nach unten geführt wird. Die feuchte bodennahe Luft wird im Bereich des Rotors bis in Höhen über 1000 m NN heraufgeführt. Eine detailliertere Deutung

LEEWELLEN-MESSFLUG NÄHE NEUSTADT/W., 12.9.77, 10.08 - 10.16 MEZ

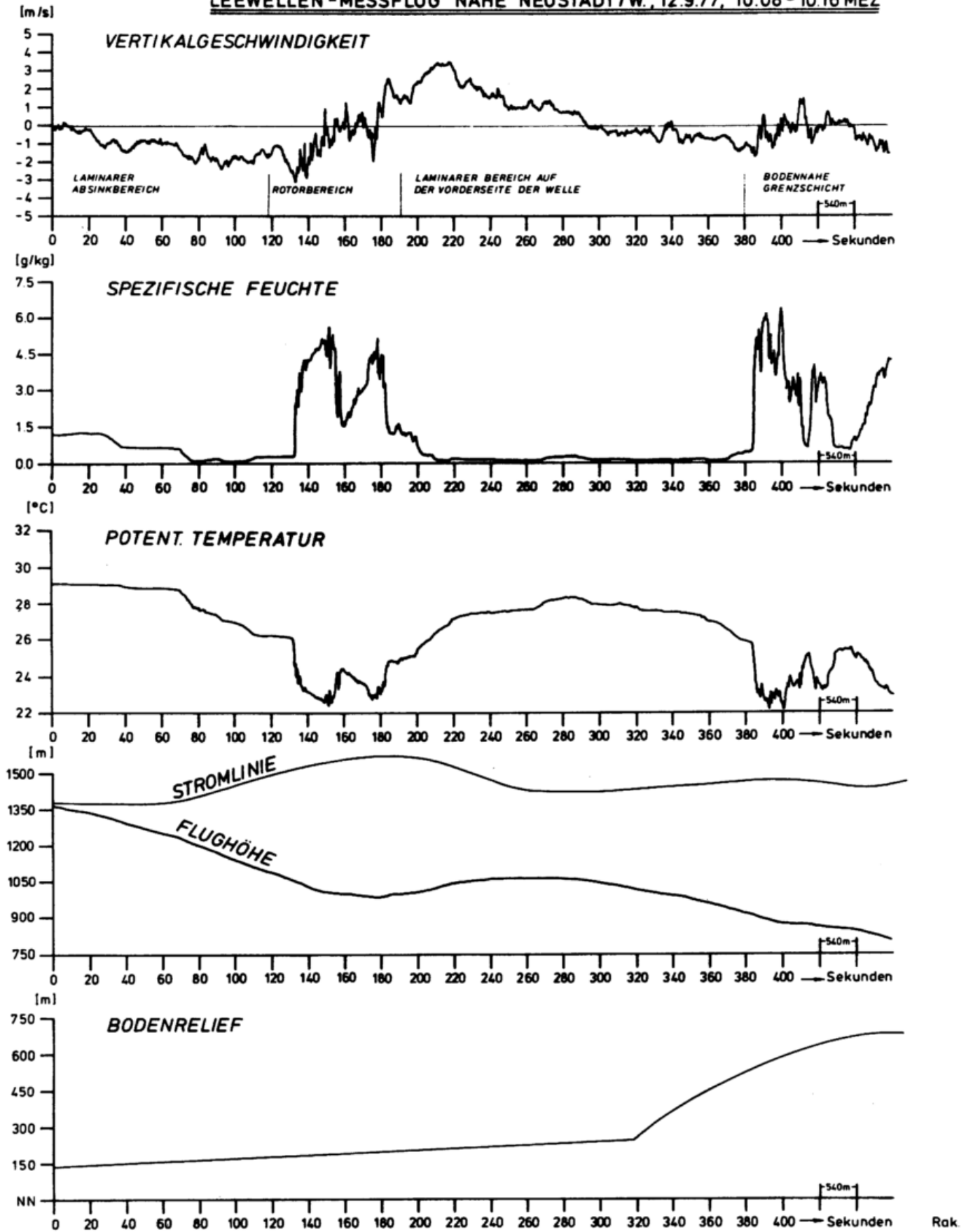


Abb.58 Meßflug orthogonal durch eine Leewelle im Lee des Pfälzer Waldes.

und Rekonstruktion dieses Falles, der einem spontanen Entschluß während eines Traversenmeßfluges entsprang, ist aufgrund nur einer einzigen Traversierung nicht leicht möglich. Trotzdem ist ersichtlich, daß mit dem vorhandenen Meßsystem eine systematische Untersuchung auch solcher Phänomene durchaus erfolgversprechend sein muß.

## 7.2 Wolkenstraßen

Es ist bekannt, daß auch Wolkenstraßen in enger Wechselbeziehung mit der thermischen Konvektion stehen. Auch hier werden die Existenzbedingungen von Wolkenstraßen häufig durch die Wirkung der thermischen Konvektion zerstört. Derartige Untersuchungen wurden während der Laufzeit des Forschungsvorhabens, wenn immer sich die Gelegenheit dazu ergab, durchgeführt. Als Beispiel möge ein Phänomen beschrieben werden, das im Frühjahr 1978, kurz nach Abschluß des Forschungsvorhabens, im Gebiet des Oberrheingrabens gefunden wurde. Das Wolkenstraßensystem existierte am 9. März 1978 fast ganztägig über dem Oberrheingraben mit west-östlicher Achsenrichtung. An diesem Tage waren die üblichen horizontalen Traversierungsflüge in vertikal stehenden Querschnittsflächen geplant, so wie sie im Kapitel 6. beschrieben worden waren. Der erste damit verbundene feinaerologische Aufstieg in den frühen Morgenstunden mußte in wolkenfreiem Raum zwischen zwei Wolkenstraßen vorgenommen werden und brachte zufällig auf der Nordseite im Luv einer Wolkenstraße starke nach oben gerichtete Vertikalgeschwindigkeiten. Diese müssen wesentlich größer als 5 m/s gewesen sein, da selbst bei abgestelltem Motor das Variometer mit einem Meßbereich von 5 m/s am Anschlag stand. Erst bei Erreichen der Wolkenobergrenze klang die Vertikalgeschwindigkeit rasch ab. Wegen der Stärke und bei einem derartigen Phänomen nicht zu erwartenden räumlichen Lage der Vertikalgeschwindigkeiten wurde mit einer Traversierung orthogonal zu den Wolkenstraßen begonnen. Hierbei wurde im Bereich der Wolkenobergrenze geflogen und dabei festgestellt, daß die Vertikalgeschwindigkeiten auf der Nordseite systematisch positiv und sehr ausgeprägt waren, während sie auf der Südseite stets negativ waren. Dabei deutete alles darauf hin, daß die Wolke selbst den Kern einer Zirkulationsströmung bildete. Filmaufnahmen, die vom Flugplatz aus gemacht wurden, bestätigten später

diese Annahme auch optisch. Gegen Mittag wurde mit einer systematischen Traversierung in verschiedenen Höhen begonnen. In den folgenden beiden Abb. 59 und 60 sind die Ergebnisse von zwei derartigen Traversen wiedergegeben. In beiden Abbildungen erkennt man den vollen Durchflug von drei hintereinander liegenden Wolkenstraßen. Die Traverse in Abb. 59 wurde von Süden aus (gegen den Wind), die Traverse in Abb. 60 von Norden aus (mit dem Wind) geflogen. Die Flughöhe in Abb. 59 schwankt dabei zwischen rund 1400 und 1600 m und befand sich zu diesem Zeitpunkt somit knapp oberhalb der Obergrenze der Wolkenstraße, bzw. teilweise in die Wolken hineinsinkend. Beachtet man, daß diese Traversierung von Süd nach Nord erfolgte, und daß die Wolke innerhalb der Wolkenstraße durch die Extremwerte der spezifischen Feuchte, bzw. der Temperatur markiert sind, dann erkennt man deutlich die Absinkbewegung an der Südseite jeder Wolke und die Aufwärtsbewegung der Luft auf den Nordseiten. Die Größenordnung der Vertikalgeschwindigkeiten ist mit maximal 3 m/s in dieser niedrigen Höhe und gegen Mittag geringer, als sie während der Untersuchungen am frühen Nachmittag war. Noch ausgeprägter finden sich die dynamischen Verhältnisse auf einer Traverse, die im Bereich deutlich oberhalb der Wolken geflogen wurde. Hier befand man sich in einem Höhenbereich, in dem Wolke und wolkenfreier Raum nicht mehr so deutlich in den Registrierungen von Feuchte und Temperatur zu erkennen sind. Man beachte bei der Betrachtung von Abb. 60, daß die Skala für die relative Feuchte gegenüber derjenigen in Abb. 59 stark gestreckt ist. Trotzdem ist auch hier das gleiche Verhalten der Vertikalgeschwindigkeiten im Verhältnis zur einzelnen Wolke gut zu erkennen. Zur Ergänzung sind auch die Registrierungen der Horizontalgeschwindigkeit des Flugzeuges (Fahrt) sowie der Höhe in beiden Abbildungen wiedergegeben. Man erkennt dabei, daß dem Charakter des Vertikalgeschwindigkeitsfeldes entsprechend das Halten einer konstanten Fahrt im unteren Bereich der Wolkenstraße (Abb. 59) wesentlich leichter war als im oberen Bereich der Wolkenstraße, wo auch wesentlich größere Höhenänderungen auf einer Traverse zu finden

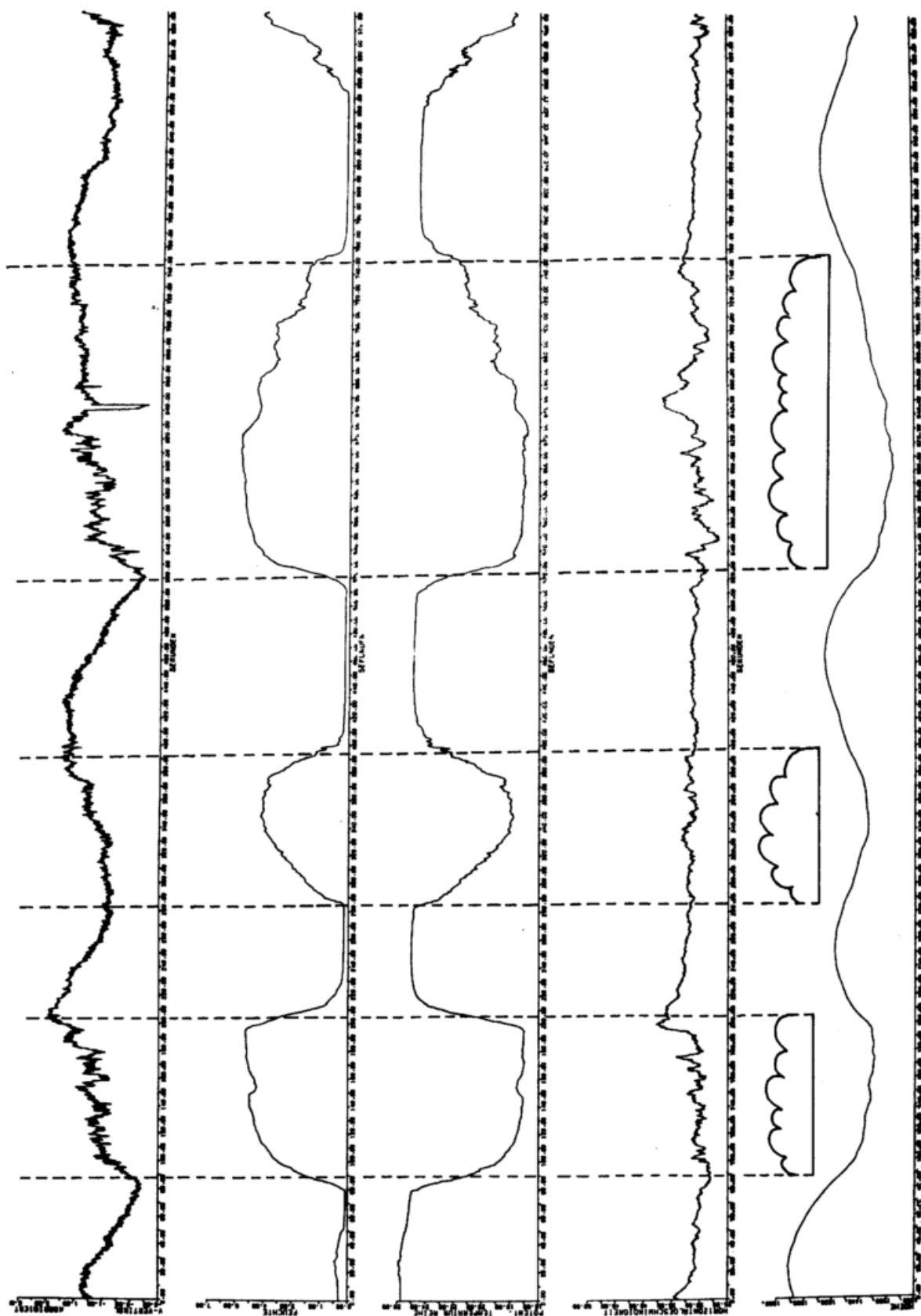


Abb. 59 Traversierung einer Wolkenstraße im Oberrheingraben von Süd nach Nord (gegen den Wind) knapp oberhalb derselben (vormittags).

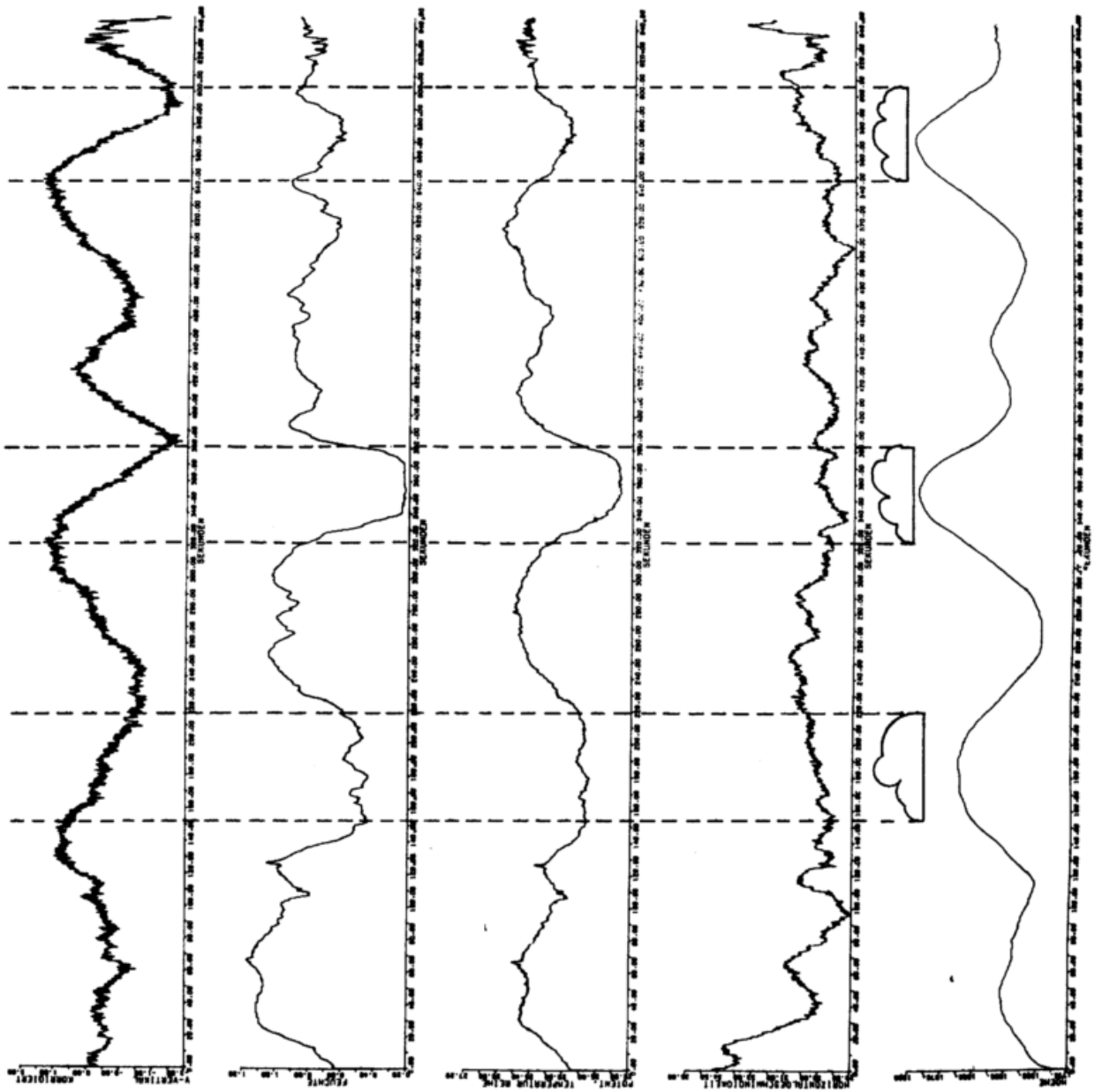


Abb.60 Traversierung derselben Wolkenstraße von Nord nach Süd (mit dem Wind) oberhalb der vorhergehenden Traverse (vormittags).

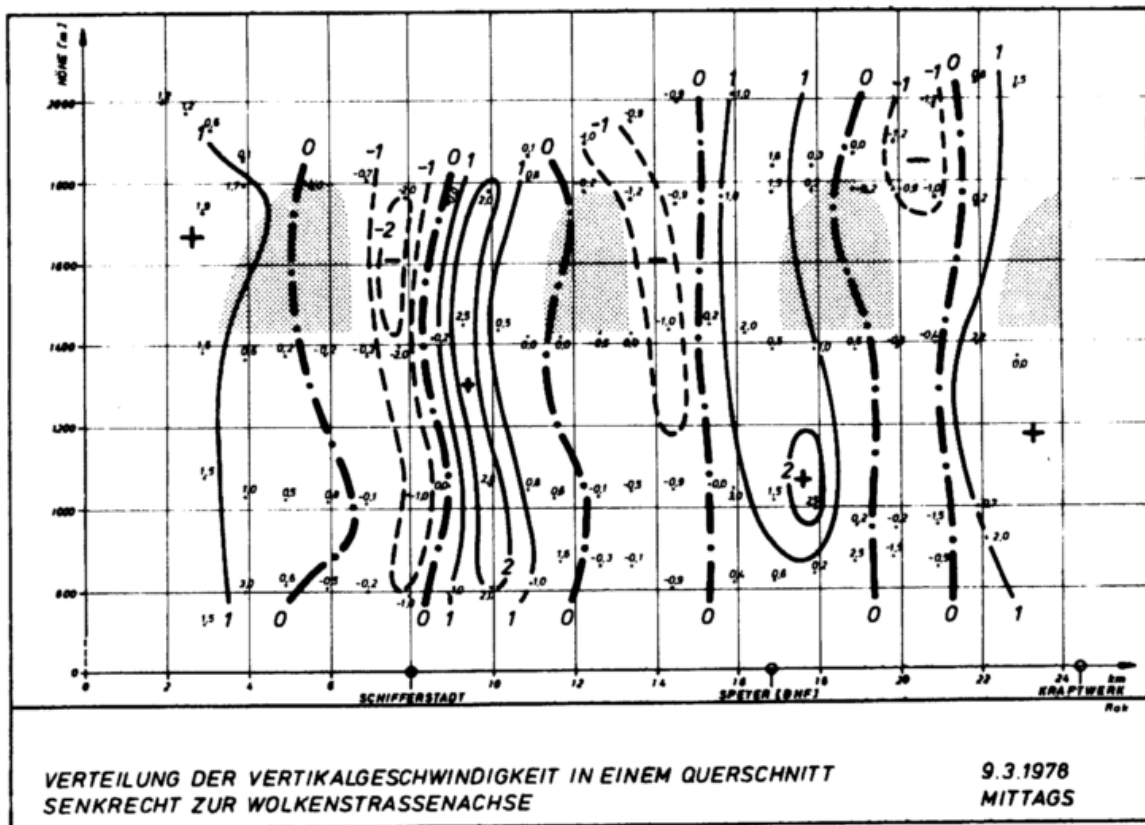
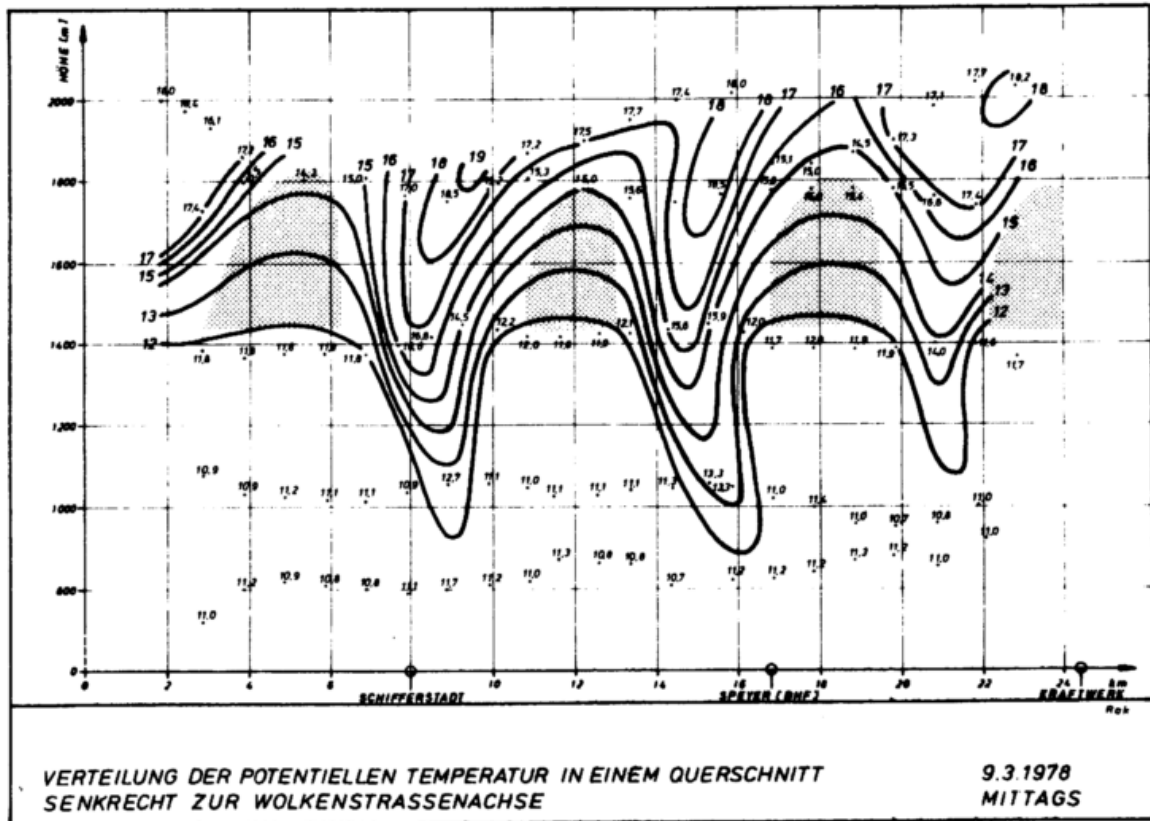


Abb.61 Eigenschaften der Wolkenstraße ermittelt bei einer detaillierten Traversierung gegen Mittag.

sind. Im Gegensatz zur normalen Traversenfliegerei in Querschnitten des Oberrheingrabens, wo auch bei Thermik versucht wird, die Höhe sehr genau einzuhalten, wurde bei diesen Traversenflügen in der Wolkenstraße die Methode der "constant attitude" angewandt, so wie sie bei der Untersuchung der thermischen Konvektion immer Verwendung fand.

Faßt man die Ergebnisse von fünf übereinanderliegenden Traversenflügen des Nachmittags zusammen, dann läßt sich die Struktur der Wolkenstraße so darstellen, wie es in Abb. 61 wiedergegeben ist. Der obere Teil von Abb. 61 stellt das Feld der potentiellen Temperatur in einem Querschnitt orthogonal zur Wolkenstraßenrichtung dar, während der untere Teil der Abbildung die Verteilung der Vertikalgeschwindigkeiten wiedergibt. Dabei erkennt man, daß diese Wolkenstraße eher mit einem Wellensystem zu vergleichen ist, bei dem sich in den Wellenbergen die Wolken der Wolkenstraßen befinden. Vom Einfluß der Thermik konnte im vorliegenden Fall ganz abgesehen werden. Die detaillierte Auswertung dieses und ähnlicher bisher vermessener Phänomene konnte während der Laufzeit des Forschungsvorhabens noch nicht vollständig durchgeführt werden; sie wird Gegenstand einer gesonderten Veröffentlichung sein.

Einer Zahl von Mitarbeitern an diesen Untersuchungen gebührt Dank für ihren engagierten Einsatz: Vor allem C. Lindemann als Meteorologe und Pilot, bzw. Co-Pilot sowie für die Organisation der Meßkampagnen und die Auswertearbeiten; weiterhin B. Dußler, E. Hollan und M. Riesener als Meteorologen; R. Ebel, W. Janata und U. Wittke als Elektroniker; Th. Bloem, P.-C. Gentz, D. Hans und G. Wagner als Mathematiker, bzw. als Mitarbeiter für die Datenverarbeitung; H. Geicke für technische Mitarbeit; E. Ra-teitschak für die Herstellung der Abbildungen und Ch. Suttkus für die Herstellung des Manuskriptes.

LITERATUR

KOSCHMIEDER, H. Kleinräumige Luftbewegungen. Physik der Atmosphäre, Bd. 3. Akad. Verl. Ges. Leipzig, 1944  
Nicht veröffentlicht. Fahnenkorrektur in der Bibliothek des Deutschen Wetterdienstes verfügbar.

SCHNEIDER-CARIUS, K. Die Grundsicht der Troposphäre. Akad. Verl. Ges. Leipzig, 1953.