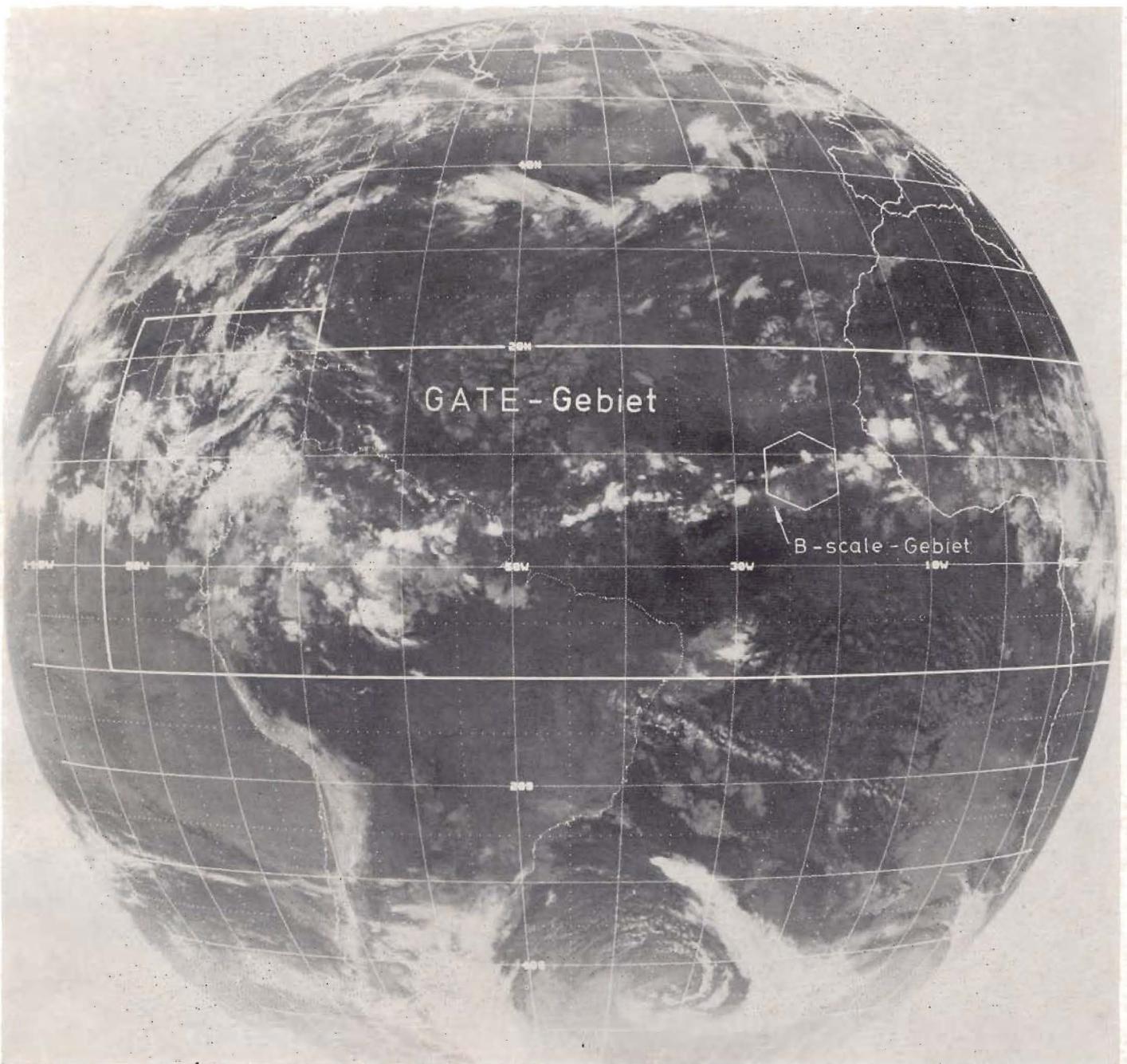


promet

4'75

meteorologische fortbildung

GATE Das tropische Experiment des
Global Atmospheric Research Programme



Herausgeber

Deutscher Wetterdienst

Hauptschriftleiter

A. Hofmann
6380 Bad Homburg
Theodor-Storm-Straße 35

Redaktionsausschuß

F. Defant (Kiel)
H.-W. Georgii (Frankfurt)
K. H. Hinkelmann (Mainz)
H. Hinzpeter (Hamburg)
H. Reiser (Offenbach)
M. Schlegel (Offenbach)
H.-P. Schmitz (Neustadt/Weinstraße)
E. Stuhlweißenburg (Fürstfeldbruck)
E. Süßenberger (Offenbach)
F. Wippermann (Darmstadt)

Titelbild:

Infrarot-Aufnahme von SMS- 1 von 7.00 Uhr GMT am Tag 212 (31. Juli) 1974. Eingezeichnet ist das GATE-Gebiet, das man sich allerdings noch bis zu 55 °E ausgedehnt denken muß. Die Dichte des Beobachtungsnetzes wies ein Maximum im B-scale-Gebiet auf.

promet erscheint vierteljährlich im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes — Zentralamt — 6050 Offenbach (Main), Frankfurter Straße 135. Bezugspreis DM 24,— pro Jahrgang, Einzelheft DM 6,50.

Für den Inhalt der Arbeiten sind die Autoren verantwortlich. Alle Rechte bleiben vorbehalten.

Druck: Schön & Wetzels GmbH, 6 Frankfurt, Offenbacher Landstraße 368

Thema des Heftes

GATE (GARP Atlantic Tropical Experiment)

(Redaktion: H. KRAUS, Göttingen)

Beiträge

Seite

1	H. KRAUS Prolog	1
2	H. KRAUS GATE als GARP-Subprogramm	2
3	H. KRAUS GATE = Schlüssel zur Parametrisierung der tropischen Konvektion	5
4	H. KRAUS Das Beobachtungsnetz	11
5	Die wissenschaftlichen Unterprogramme	14
5.1	D. D. HOUGHTON Das Synoptic-Scale-Unterprogramm	14
5.2	D. R. RODENHUIS Das Konvektions-Unterprogramm	18
5.3	H. HOEBER Das Grenzschicht-Unterprogramm	22
5.4	H. KRAUS Das Strahlungs-Unterprogramm	25
5.5	G. SIEDLER Das Ozeanographische Unterprogramm	28

GATE (GARP Atlantic Tropical Experiment)

1 H. KRAUS, Göttingen Prolog

Dieses und das folgende Heft sind nicht wie alle vorhergehenden einem Problemkreis aus der Meteorologie gewidmet, sondern einem einzigen meteorologischen Experiment.

Doch GATE ist mehr als nur irgendein meteorologisches Experiment. Es ist ein Meilenstein in der Geschichte der Meteorologie auf dem Wege zu einer globalen Simulation der Vorgänge in der Atmosphäre; es ist ein Experiment von einmaliger Größenordnung und Komplexität, wobei aber alle Anstrengungen letztlich einem einzigen Problem gewidmet sind.

Die Größe des Unternehmens wird besonders deutlich an

- der räumlichen Ausdehnung des Gebietes, in dem die Messungen durchgeführt wurden: dieses Gebiet erstreckte sich von 20 °N bis 10 °S und von 55 °E bis 95 °W und umfaßte so 11% der Erdoberfläche oder 28% des Tropengürtels (siehe Titelbild und Abb. 4.1);
- der Anzahl der Beobachtungsplattformen und -stationen, die zum Einsatz kamen: 40 Forschungsschiffe, 12 Forschungsflugzeuge, 2 geostationäre Satelliten (und eine Reihe polarumlaufender), etwa 100 Landstationen (wobei nur diejenigen gezählt sind, an denen Radiosonden- und Radiowind-Messungen durchgeführt wurden);
- der Anzahl der teilnehmenden Nationen: Es sind etwa 70, wenn man alle zählt, die auch nur eine Station unterhielten. 12 von diesen leisteten Beiträge, die über den Einsatz von Landstationen hinausgingen; und schließlich an
- den gewaltigen Anstrengungen, derer es bedurfte, um ein solches Experiment auf internationaler Ebene zu planen, zu koordinieren und durchzuführen.

GATE steht für Garp Atlantic Tropical Experiment. Innerhalb des Global Atmospheric Research Programme (GARP) gilt es der experimentellen Untersuchung der Besonderheiten der tropischen Zirkulation. Ohne diese zu kennen, ist es nicht möglich, die Hauptexperimente des GARP erfolgversprechend zu beginnen. GATE mußte so zeitig vor dem FGGE (= First GARP Global Experiment) stattfinden, daß seine Ergebnisse bei Beginn des FGGE (jetzt geplant für 1978/79) vorliegen.

Das Problem, auf das GATE fokussiert ist, soll hier ganz kurz erwähnt werden; Beitrag 3 gibt eine ausführliche Darstellung. Der Energietransport in den Tropen erfolgt im wesentlichen in Konvektionszellen, das sind atmosphärische Bewegungsformen von kleinerer Größe als die Maschen des synoptischen Beobachtungsnetzes und des Gitternetzes der numerischen Modelle der atmosphärischen Zirkulation. Infolgedessen schlüpfen diese kleinerskaligen oder subskaligen Vorgänge durch die Maschen sowohl des Beobachtungs- als auch des Modellnetzes, liefern aber einen ganz bedeutenden Anteil an der Versorgung der Atmosphäre mit Wärme und Wasserdampf. Um dieses Durchschlüpfen zu vermeiden, können wir zwei Wege einschlagen, einmal die Maschenweite der Netze verkleinern, oder die subskaligen Vorgänge durch Parameter des großskaligen synoptischen Feldes an den Gitterpunkten beschreiben. Da ersteres zu aufwendig ist (höhere Kosten des dichteren Netzes — größere Rechenzeit der Modelle) wird der zweite Weg versucht. Wir nennen dies *Parametrisierung der Konvektion*.

Die angegebene Konzentration der Forschungsmittel vieler Nationen auf dieses Problem, das eine einzige Nation, selbst die USA oder UdSSR, allein nicht hätte angehen können, unterstreicht seine Bedeutung. Das Experiment darf mit Recht als das größte Abenteuer in der Geschichte der Meteorologie bezeichnet werden. Das Wagnis ist nicht allein durch die Größe des Einsatzes bedingt, sondern auch dadurch, daß wir heute noch nicht wissen, ob die tropische Konvektion überhaupt parametrisierbar ist.

Bei einem Experiment dieser Größenordnung kann man fünf wesentliche Zeitabschnitte unterscheiden:

1. **Planung und Vorbereitung** — Dazu war innerhalb der Meteorologischen Weltorganisation (WMO) eine „International Scientific and Management Group“ gebildet worden; diese Gruppe umfaßte etwa 10 Wissenschaftler und Logistik-Fachleute, hatte ihren Sitz in Bracknell (England) als Gast des Meteorological Office und wurde von J. KUTTNER geleitet. Ihr oblag die detaillierte wissenschaftliche und organisatorische Planung und internationale Koordination des großen Unternehmens;

2. **Gewinnung des Datenmaterials** — Das Experiment im engeren Sinne dauerte 100 Tage vom 17. 6. bis 24. 9. 1974 mit seinem Schwerpunkt im östlichen tropischen Atlantik. Es wurde vom *GATE Operational Control Centre* (GOCC) in Dakar aus gesteuert;
3. **Analyse der Daten** — Jede wissenschaftliche Gruppe wertet ihre Daten aus und leitet sie an die Datenzentren weiter. In diesem Zeitabschnitt befinden wir uns nun;
4. **Synthese der Ergebnisse** — Dieser Zeitabschnitt kann erst beginnen, wenn das mannigfaltige Datenmaterial analysiert und einer eingehenden Datenprüfung (Validierung) unterzogen worden ist. Synthese heißt Zusammenfassung zu der gesuchten Beziehung zwischen kleinskaliger tropischer Konvektion und dem großskaligen synoptischen Feld oder (was dasselbe ist) Aufstellen der Parametrisierungsschemata;
5. **Test der Parametrisierungsschemata** — Dies kann (hoffentlich erfolgreich) im FGGE erfolgen.

Diese Einteilung macht deutlich, daß über den Erfolg des Experimentes heute noch keine Aussage möglich ist, wënnleich Zeitabschnitt 2 seit einem Jahr abgeschlossen ist und sehr positiv — sowohl vom Funktionieren der Meßgeräte als auch von der Zusammenarbeit der 5000 am Experiment beteiligten Wissenschaftler und Techniker aus 12 Nationen — beurteilt wird.

Diese beiden Hefte berichten im wesentlichen über die Grundgedanken von GATE und das Experiment im engeren Sinne. Schon bald wird in der Literatur eine Fülle von Arbeiten erscheinen, die die Bemühungen und Ergebnisse der Zeitabschnitte 2 und 3 deutlich werden lassen. So mögen die beiden Promet-Hefte als eine Einstiegshilfe in diese kommenden Veröffentlichungen angesehen werden.

2

H. KRAUS, Göttingen

GATE als GARP-Subprogramm

Um GATE richtig zu beurteilen, müssen wir den Rahmen betrachten, in den es eingebettet ist. Erst in diesem Rahmen — nämlich GARP — wird auch die Fokussierung des Experimentes und seine kritische Rolle bei den gegenwärtig so intensiven Anstrengungen zur globalen Simulation der atmosphärischen Prozesse deutlich. GARP selber läßt sich wohl am klarsten aus seiner „Geschichte“ verstehen, GATE aus seiner Rolle als Komponente von GARP.

Mellensteine im GARP

1. Der technologische Fortschritt der 50er Jahre bescherte der Meteorologie eine einzigartige Ausweitung ihrer Möglichkeiten. Die *Satellitentechnik* (der erste künstliche Erdsatellit, Sputnik I, wurde am 4. Oktober 1957, der erste meteorologische Satellit, Explorer VII, am 13. Oktober 1959 gestartet), schuf eine neue Beobachtungsplattform, die *Computer-Technik* leistungsfähige Elektronen-Rechner. Beide technischen Hilfsmittel bedeuten für sich noch keinen Fortschritt in der Meteorologie, solange nicht Wissenschaftler durch Ideen und theoretische Studien sich die neuen Mittel dienstbar machen. Letzteres geschah erstaunlich rasch, weil die Grundgedanken zur Nutzung der neuen Werkzeuge schon weit verbreitet waren.

Wenn auch im Anfang das Bild der Atmosphäre von oben und die durch die Wolken markierten Bewegungsformen unterschiedlichster Größenordnung und ihr Zusammenhang mit dem aktuellen Wetter größte Beachtung fanden, so ging man doch sehr bald daran, quantitative Beobachtungsmethoden für viele meteorologische Parameter vom Satelliten aus zu entwickeln. Die Technik des auf der Strahlungsübertragung beruhenden „*Remote Sensing*“ stand bei der sich entwickelnden „Satelliten-Meteorologie“ stark im Vordergrund und

führte bald zu Ergebnissen der Temperatur-, Feuchte- und auch Windverteilung in der Atmosphäre. Ferner konnten die Oberflächentemperatur und Energieströme quantitativ ermittelt werden. Der Nutzen solcher Messungen gerade über Gebieten, in denen keine oder nur spärliche meteorologische Routine-Beobachtungen stattfinden (Arktis, Antarktis, Ozeane, Südhalbkugel), zusammen mit den Möglichkeiten geostationärer Satelliten ließ bald den Gedanken an ein globales Satellitenbeobachtungssystem aufkommen, das sogar wirtschaftlich tragbar erschien.

Die Entwicklung von mathematischen und physikalischen Grundlagen zur Simulation der atmosphärischen Zirkulation war schon weit fortgeschritten, als die ersten leistungsfähigen Rechner auf den Markt kamen. Schon 1922 hatte L. F. RICHARDSON den wohl ersten ernsthaften Versuch einer numerischen Wettervorhersage unternommen (an einer 6-Stunden-Vorhersage für den europäischen Raum rechnete er viele Monate). So zeichnete sich auch bald ein rascher Fortschritt bei der Anwendung der Vorhersage-Modelle ab; es zeigte sich aber auch, daß der wohl möglichen Simulation und der damit verbundenen Vorhersageder atmosphärischen Vorgänge über eine Zeit von wenigen Tagen hinaus noch eine Reihe von großen Problemen im Wege standen. So war (und ist auch heute noch) ungelöst, wie man Prozesse berücksichtigen soll, die auf kleinerem als dem durch das Gitternetz abgesteckten Raum stattfinden. Andere Probleme sind die Berücksichtigung des Einflusses des Strahlungsumsatzes, besonders in Wolken, und der planetarischen Grenzschicht. Ein weiteres Beispiel ist, daß eine starke horizontale Wechselwirkung der Bewegungssysteme vor allem für die mittelfristigen und langfristigen Modelle entscheidend ist und deshalb nur ein Erfolg erhofft werden kann, wenn die numeri-

schen Experimente global durchgeführt werden, wozu eine enorme Rechenkapazität benötigt wird und ein globales Satellitenbeobachtungssystem z. B. die Anfangsbedingungen und den Datensatz zur Verifizierung der Rechenergebnisse liefern könnte.

Wir sehen aus diesen Überlegungen: als uns die neuen technologischen Hilfsmittel beschert wurden, trafen sie die Meteorologen wohl vorbereitet. Die Zeit war plötzlich reif für einen raschen Fortschritt im Verständnis der atmosphärischen Zirkulation und um das Problem der mittel- und langfristigen Wettersvorhersage in Angriff zu nehmen.

2. Im Oktober 1961 übersandte die *National Academy of Sciences* der USA dem Präsidenten der USA einen Bericht zur Entwicklung der atmosphärischen Wissenschaften während der nächsten Dekade. Darin wird ein internationales meteorologisches Forschungsprogramm, ein Programm für einen internationalen meteorologischen Dienst und eine „World Weather Watch“ vorgeschlagen, letzteres verstanden als ein globales meteorologisches Beobachtungsnetz, das sowohl für die Forschung als auch für die meteorologischen Dienste von Nutzen sei.

3. Diese Ideen, die aus den unter 1 dargestellten Gegebenheiten resultierten, findet man dann wieder in der Resolution 1721, die am 20. Dezember 1961 von der 16. Generalversammlung der Vereinten Nationen angenommen wurde. Die Resolution befaßt sich mit der *Internationalen Zusammenarbeit bei der friedlichen Nutzung des Weltraumes*. In Abschnitt C nimmt die UN-Vollversammlung Kenntnis von dem markanten Fortschritt meteorologischer Forschung und Technologie, der im Zusammenhang mit der Weltraumforschung steht. Überzeugt vom weltweiten Nutzen einer internationalen Zusammenarbeit in der Erforschung der atmosphärischen Vorgänge ersucht sie die *Meteorologische Weltorganisation (WMO)* in Zusammenarbeit mit dem *International Council of Scientific Unions (ICSU)*, Maßnahmen zu prüfen, die zu einem Fortschritt in der Meteorologie und in den Möglichkeiten der Wettersvorhersage führen können.

Der Ball war geworfen. Zwei Organisationen der UN, die WMO und die ICSU, waren zur Stellungnahme aufgerufen.

4. Führende Wissenschaftler aus den USA und der UdSSR bereiteten in Genf den WMO-Report vor. Er empfahl vor allem die Einrichtung der World Weather Watch (WWW), die nicht nur ein globales Beobachtungssystem verschiedener Plattformen (Landstationen, Schiffe, Flugzeuge, Satelliten, Ballons) enthalten sollte, sondern auch über die bisherigen Einrichtungen weit hinausgehende Systeme zur globalen Nachrichtenübermittlung und Datenanalyse. Der Report enthielt auch eine Reihe von Forschungsthemen. Dieser Bericht lag der 17. UN-Generalversammlung vor, die ihrerseits in Resolution 1802 am 14. 12. 1962

— die Mitgliedsstaaten zur Expansion der Forschung in den atmosphärischen Wissenschaften aufruft,

— der WMO empfiehlt, ihren Plan (WWW) weiter zu entwickeln, vor allem unter Einbeziehung der meteorologischen Satelliten, und
— ICSU nahelegt, ein ausgedehntes meteorologisches Forschungsprogramm zu entwickeln, das sich mit dem der WWW ergänzt.

Es folgten vier weitere WMO-Reports an die UN-Generalversammlung in den Jahren 1963, 1964, 1965 und 1966 über die Fortschritte in der Meteorologie und ihre Anwendung im Lichte der Entwicklung der Weltraumforschung.

5. Die Resolution 1802 ist jedoch der entscheidende Ausgangspunkt für zwei zunächst getrennte, aber eng zusammen gehörende Aktivitäten; die erste wurde durch die WMO im Programm der WWW ergriffen; die zweite in der Hand der ICSU führte zur Formulierung eines integrierten internationalen Forschungsprogrammes, dem *Global Atmospheric Research Programme (GARP)*. Das von der ICSU 1964 gegründete *Committee on Atmospheric Sciences (CAS)* wählte für dieses Forschungsprogramm den Namen GARP auf seiner zweiten Sitzung im April 1966. Gleichzeitig wurde mit großem Optimismus für das Jahr 1972 ein erstes globales Experiment (Beobachtung und Analyse der globalen Zirkulation über 12 Monate) vorgeschlagen. Damals schon plante man eine Reihe von Untersuchungen, die diesem globalen Experiment vorausgehen sollten, darunter auch ein tropisches Experiment.

6. Entscheidend war dann im Sommer 1967 die „GARP Study Conference“ in Skepparholmen bei Stockholm, auf der die Ziele von GARP klar formuliert wurden. Hier erkannte man auch, daß ein globales Experiment kaum genügen würde, daß vielmehr GARP ein sehr langfristiges Programm werden würde mit mehreren globalen Experimenten (oder globalen GARP-Subprogrammen) und anderen Subprogrammen wie das tropische Experiment und weiteren regionalen Experimenten (Abb. 2.1). Dieses so formulierte GARP wurde dann durch eine Vereinbarung zwischen WMO und ICSU im Oktober 1967 zum gemeinsamen Ziel beider Organisationen. In dem entsprechenden Vertrag wurde auch das „*Joint Organizing Committee on GARP*“ (JOC) gegründet, das aus nicht mehr als 12 Wissenschaftlern bestehen sollte und gedacht war als zentrales wissenschaftliches Gremium, das zu allen Vorschlägen über GARP und seinen Subprogrammen Stellung nehmen, Empfehlungen aussprechen und Verbesserungen vorschlagen sollte. Das JOC hat seitdem seine führende wissenschaftliche Rolle in GARP sehr ernst genommen und sich dabei ein hohes Ansehen erworben.

Die Komponenten von GARP

Abb. 2.1 zeigt, wie man sich die Beziehungen zwischen den einzelnen GARP-Experimenten vorstellen kann; GARP selber ist ein numerisches Experimentier-Programm zur Simulation der Atmosphäre. Es soll Klarheit schaffen über möglichst viele offene Fragen, die mit der globalen Simulation des atmosphärischen Geschehens zusammenhängen. Erwähnt seien hier die Probleme der *Vorhersagbarkeit (predictability)*, des notwendigen

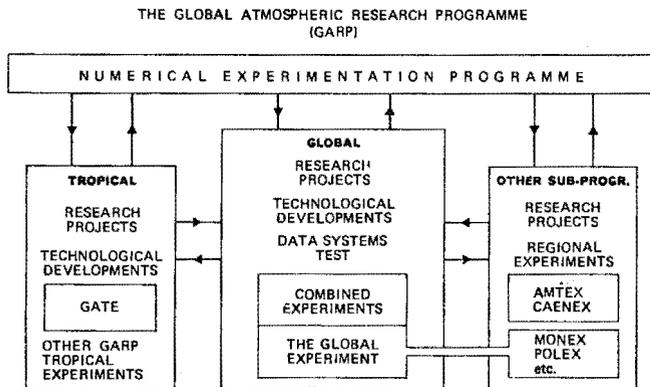


Abb. 2.1
Die wesentlichen Komponenten von GARP und ihre Verknüpfung. Aus GARP Publ. Series Nr. 11.

optimalen Beobachtungssysteme, des richtigen Einbaus physikalischer Prozesse (Strahlung, Konvektion, Grenzschichtprozesse), der Anwendung der vierdimensionalen Wetteranalyse (data assimilation) und allgemein Daten- und Rechenprobleme. Der Kern sind die globalen Subprogramme (s. o.), von denen das erste (FGGE), für das 12 Monate intensiver globaler Beobachtungen geplant sind, nach den letzten Plänen im September 1978 beginnen soll. Wie aber schon erwähnt wurde, ist es nicht sinnvoll, dieses Unternehmen zu starten, ohne daß man vorher eine Reihe von Fragen in Form von regionalen Subprogrammen gelöst hat.

Die Abbildung zeigt, daß GATE dabei eine wichtige Rolle zufällt. Sie erwähnt dann noch AMTEX = Air Mass Transformation Experiment; dies fand im Februar 1974 und im Februar/März 1975 in der Nähe der südwestlichen Inseln Japans statt und hatte zum Ziel, den Mechanismus der Umwandlung kalter Festlandluft bei ihrem Ausbruch in Gebiete des Ostchinesischen Meeres zu studieren. Mit etwas mehr als 200 Teilnehmern aus vier Nationen (Australien, Kanada, USA und Japan) war das Unternehmen bedeutend kleiner als GATE. CAENEX ist das nationale, vor allem auf Strahlungsprobleme hin orientierte Complete Atmospheric Energetics Experiment, das mit einer Serie von Expeditionen von 1970 bis 1972 in der UdSSR stattfand. MONEX, das Monsun-Experiment zur Klärung des Mechanismus der Entstehung des sommerlichen SW-Monsuns über dem Arabischen Meer, soll erst während FGGE stattfinden genauso wie POLEX, das Polare Experiment.

Zur linken Seite sollte man noch zwei Vorläufer von GATE erwähnen, BOMEX = Barbados Oceanographic

and Meteorological Experiment, das 1969 von den USA westlich von Barbados durchgeführt wurde, und das Passatexperiment ATEX = Atlantic Trade-Wind Experiment (Februar 1969), an dem außer den beiden westdeutschen Forschungsschiffen Meteor und Planet noch die Discoverer (USA) und die Hydra (Großbritannien) teilnahmen. Beide Experimente lieferten außer einer Reihe von wissenschaftlichen Ergebnissen beträchtliche Erfahrung, die der Planung von GATE zugute kam.

Die Organisation von GATE

Das Programm (GARP) hatte nach der Stockholmer Konferenz einen hohen Grad der Vollkommenheit erreicht. Es bedeutete, daß die Meteorologen der ganzen Welt sich entschlossen hatten, ihre globalen Probleme gemeinsam unter Einsatz großer Teile ihrer Forschungskapazitäten zu lösen. Als Prüfstein dafür, ob diese Zusammenarbeit wirklich realisierbar sei, galt von Anfang an das Tropische Experiment. Die GARP-Planungs-Konferenz in Brüssel (März 1970) empfahl, es im tropischen Atlantik durchzuführen, obwohl vom wissenschaftlichen Standpunkt aus das Gebiet der Marshall-Inseln im Pazifik vielleicht günstiger gewesen wäre. Es ist aber verständlich, daß die internationale Planung oft Rücksicht nehmen muß auf eine Reihe von praktischen (politischen) Erwägungen. Im Juli 1970 tagte eine „Interim Planning Group for the GARP Tropical Experiment“ in London. Sie beschloß, die Organisation des Experimentes in die Hände von zwei Gremien zu legen. Das eine, das Tropical Experiment Council (TEC), setzt sich zusammen aus Vertretern derjenigen Länder, deren Gebiet oder territoriale Gewässer Anteil an dem Teil der Erdoberfläche haben, in dem das Experiment stattfand. Das andere, das Tropical Experiment Board (TEB), wird von den Vertretern der Länder gebildet, die außer Landstationen wesentliche Beiträge zum Experiment (z. B. Satelliten, Schiffe, Flugzeuge) leisteten. Die Koordination dieser Beiträge konnte allerdings nicht von dem höchstens zweimal im Jahr tagenden TEB bewerkstelligt werden. So wurde empfohlen, ein ISMG (zuerst = Interim Scientific and Management Group, später, ab 1972, International Scientific and Management Group) zu bilden. Diese Gruppe aus Wissenschaftlern und Logistikfachleuten arbeitete die Fülle der Detailpläne für das Experiment aus. Es darf nicht vergessen werden, welche enorme Planungsarbeit darüber hinaus bei nationalen Gremien (z. B. dem U.S. GATE Project Office oder dem GATE-Komitee in der BRD) und wissenschaftlichen Instituten lag.

3

H. KRAUS, Göttingen

GATE = Schlüssel zur Parametrisierung der tropischen Konvektion

Dieses Kapitel hätten wir auch „Das zentrale Programm“ nennen können. Es behandelt das zentrale Anliegen von GATE. Da schon sehr früh (vor 1970) vermutet wurde, daß viele Wissenschaftler die einzigartige Gelegenheit eines so großen Beobachtungsnetzes aus Schiffen, Flugzeugen und Satelliten würden nutzen wollen, um andere lange anstehende Probleme in Angriff zu nehmen, ergab sich die Notwendigkeit, die Planung auf das eigentliche Ziel zu fokussieren. So begann man schon sehr bald mit der Definition eines „core experiment“ oder eines „central programme“.

Scales

Das englische Wort „Scale“ bedeutet Maßstab oder Größenordnung. Es spielt in unserem in Kategorien von Raum und Zeit eingebetteten Leben eine zentrale Rolle. Denn immer, wenn wir etwas messen, untersuchen oder betrachten, müssen wir uns vorher über den Maßstab bzw. die Größenordnung der Betrachtung einigen. Dabei treten bei einem großen (die kleinen Einheiten nur wenig zur Geltung bringenden) Maßstab naturgemäß die großskaligen Vorgänge und Erscheinungsformen mehr heraus, bei einem kleinen Maßstab bemerken wir die Details.

Das Auffallendste bei der Betrachtung der Atmosphäre ist wohl die Entwicklung ganz charakteristischer Bewegungsformen (wie Turbulenzwirbel, Tornados, Zyklonen) und daß diese einen so weiten Bereich verschiedener Größenordnungen (vom Dissipationswirbel der Mikroturbulenz bis zu den planetarischen Wellen) überspannen. Jedes dieser Bewegungssysteme — charakterisiert durch eine bestimmte Größe — spielt eine eigene, sich von den anderen Systemen unterscheidende Rolle im atmosphärischen Geschehen. Dabei beeinflussen sich die Bewegungssysteme unterschiedlicher Größe gegenseitig und ändern ihre charakteristischen physikalischen Größen im Laufe ihres Lebenszyklus. Das Bild der Atmosphäre und auch der Arbeitsweise des Meteorologen unterscheidet sich beträchtlich, je nachdem welcher Maßstab bei der Untersuchung zu Grunde gelegt wird (z. B. in der Synoptik im Vergleich zur Grenzschicht-Meteorologie). Von daher ist es nun nahezu selbstverständlich, daß das Studium des Einflusses unterschiedlicher Scales in der Meteorologie heute eine zentrale Rolle spielt (z. B. als Ordnungsprinzip oder bei der Abschätzung von Effekten mit Hilfe der Scale Analysis). Wir übernehmen hier das Wort „scale“ in den deutschen Text und werden es auch vielfach als Adjektiv verwenden.

Die unterschiedlichen Scales atmosphärischer Bewegungsformen nimmt man — markiert durch die Struktur der Bewölkung — wohl am deutlichsten auf Satellitenbildern wahr. Das *Visible and Infrared Spin-Scan Radiometer* (VISSR) von SMS-1 erlaubt sogar eine Auflösung

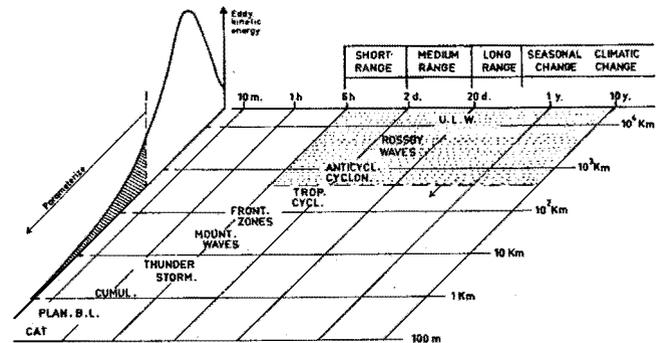


Abb. 3.1

Scale-Diagramm verschiedener atmosphärischer Bewegungsformen. Nur solche Vorgänge, die im gepunkteten Gebiet liegen, lassen sich durch ein Netz mit einem Gitterabstand von 200 km und einem Beobachtungsintervall von 3 h auflösen; die übrigen Phänomene müssen parametrisiert werden. Aus GARP Publ. Series Nr. 11.

bis herab zu 0,5 nm \approx 1 km. Auch Isobarenkarten, Topographien und Stromlinienkarten lassen unterschiedliche charakteristische Bewegungsformen deutlich hervortreten. Allerdings werden die kleineren Scales durch diese Hilfsmittel nicht sichtbar gemacht. Andere Darstellungsmethoden sind Scale-Diagramme, wie sie LETTAU 1952 eingeführt hat. In Promet 1-2/71 sind diese als Titelbild und in Abb. 5.1 gezeigt und im Zusammenhang mit der Turbulenz ausführlich besprochen worden. Spektren geben uns die Verteilung von charakteristischen Eigenschaften (z. B. der kinetischen Energie) auf die verschiedenen großen Bewegungsformen an. Abb. 3.1 zeigt ein solches Scale-Diagramm zusammen mit dem zugehörigen Spektrum der kinetischen Energie. Es ordnet typische Erscheinungen von der Clear Air Turbulence bis zu den ultralangen oder planetarischen Wellen charakteristischen Längen- und Zeit-Scales zu. Dabei resultiert die Zeit-Scale aus der charakteristischen Länge und der typischen Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erscheinungen. Übrigens kann man in dies Diagramm auch weitere Koordinatenachsen einzeichnen, und zwar für alle charakteristischen Größen, die sich aus der charakteristischen Zeit und Länge ableiten lassen (z. B. Geschwindigkeit, Diffusionskoeffizient). Das Diagramm der Abb. 3.1 zeigt nicht den Bereich der Mikroturbulenz bis herab zur Größe der Dissipationswirbel (1 mm). Denkt man sich diesen Bereich aber hinzugefügt, so sieht man, daß sich die Bewegungsformen der Atmosphäre über 10 Größenordnungen erstrecken.

Die Wechselwirkung zwischen den Bewegungsformen verschiedener Größe nennt man *Scale-Interaction*. Einfache Beispiele sind das Zusammenspiel von Rossby-Wellen mit normalen Zyklonen, von Randtiefs mit ihrer Zentralzyklone, von Cumulonimben mit ihrer zuge-

Scale	Name	Charakteristische Länge		Charakter. Zeit	Notwendiges Beobachtungsintervall
		Bereich km	Mitte km		
A	Wave-Scale	$10^3 \dots 10^4$	3000	1,7 ... 17 d	1/2 d
B	Cloud-Cluster-Scale	$10^2 \dots 10^3$	300	4 ... 40 h	2 h
C	Meso-Scale	$10^1 \dots 10^2$	30	0,4 ... 4 h	10 min
D	Cumulus-Scale	$1 \dots 10^1$	3	2,4 ... 24 min	1 min

Tab. 3.1
Die Scales tropischer Bewegungsformen

hörigen größer-skaligen Kaltfront oder von Cumulus-Wolken unterschiedlicher Größe. Bei letzteren beobachtet man oft deutlich, wie die größeren auf Kosten der kleineren wachsen, oder wie sich die kleineren Cumuli in der Umgebung größerer infolge des Absinkens sogar auflösen; die kleineren Cumuli liefern dabei vielfach ein zusätzliches Entrainment von der Seite.

Um eine Bewegungsform im Raum-Zeit-Bereich beschreiben zu können, muß das zeitliche bzw. räumliche Beobachtungsintervall kleiner als $T/2$ bzw. $L/2$ sein, wenn T bzw. L die charakteristische Zeit bzw. Länge des aufzulösenden Bewegungssystems sind. Infolgedessen lassen sich mit den Beobachtungen des normalen synoptischen Netzes (dreistündlich, Gitterabstand z. B. 200 km) nur Bewegungsformen mit $T > 6$ h und $L > 400$ km auflösen, also solche, die im punktierten Gebiet des Diagrammes Abb. 3.1 liegen. Die kleineren Scales sind nicht explizit auflösbar. Ihre Wirkung läßt sich nicht berechnen oder abschätzen, sie „rutschen durch die Maschen des Netzes“.

Parametrisierung

Will oder kann man das Beobachtungs- oder Modellnetz nicht verfeinern (Beitrag 1), sieht aber andererseits die kleiner-skaligen Prozesse als bedeutsam für die Prozesse in der Scale an, die man betrachtet, so bleibt nur der Weg der Parametrisierung. Das bedeutet, man beschreibt die kleiner-skaligen Prozesse durch Parameter, die man aus dem vorhandenen skaligen Beobachtungs- oder Modellnetz gewinnt. Ein Beispiel ist die Beschreibung der Kovarianzen in der Mikroturbulenz. So kann man den durch $-\bar{\rho} \overline{u'w'}$ (ρ = Dichte, u = horizontale Windgeschwindigkeit, w = vertikale Komponente der Windgeschwindigkeit) definierten vertikalen Impulsstrom

durch die parametrisierte Form $\bar{\rho} K_M \frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$, also durch

das mittlere Windprofil und den turbulenten Diffusionskoeffizienten K_M darstellen. Letzterer ist eine

Größe, die derselben Scale wie \bar{u} angehört. Man kann diese Beziehung z. B. mit Hilfe der Prandtl'schen Theorie der Mischungsweglänge ableiten, benötigt aber, wie bei allen Parametrisierungsansätzen, noch die Empirie.

Tropische Wettersysteme und ihre Wechselwirkung

Tropische Wettersysteme unterscheiden sich grundlegend von denen mittlerer Breiten. Die Gründe dafür sind der viel kleinere Coriolisparameter und der unterschiedliche Energiehaushalt (z. B. auch die sich mit der Breite weniger ändernde absorbierte solare Strahlung) der niedrigeren Breiten. Als Folge davon treten bedeutend kleinere Luftmassenunterschiede auf; außerdem findet der vertikale Energietransport in Wettersystemen von wesentlich kleinerer Scale statt. Das Titelbild dieses Heftes veranschaulicht die letztere Konsequenz. Die „full disc“ IR-Aufnahme zeigt großskalige Systeme in den mittleren Breiten (so ein Wellensystem bei etwa 40°N und eine deutlich ausgebildete Zyklone bei 40°S) und im klaren Gegensatz dazu eine Fülle von wesentlich kleiner-skaligen Systemen, die den Tropengürtel markieren. Man möge beachten, daß in der IR-Aufnahme die kalten (also hohen) Wolken weiß erscheinen und der Grauton umso dunkler wird, je wärmer der Emittent (z. B. die niedrigeren grau erscheinenden Wolken oder die noch wärmere schwarz erscheinende Oberfläche der Sahara) ist. Die kleinen hellen Flecken in den Tropen markieren so Stellen, an denen die Vertikalbewegung zur Bildung sehr hoch reichender Wolkensysteme geführt hat. Erst eine höher auflösende Aufnahme im sichtbaren Spektralbereich (siehe z. B. unterer Teil in Abb. 3.4) lehrt, ob es sich um noch aktive Wolkenhaufen (engl. cloud cluster) oder um von vergangener Konvektion zeugende, noch länger lebende Cirrus-Schirme handelt. Ein Schema, in das sich alle tropischen Wettersysteme eingliedern lassen, ist in Tab. 3.1 dargestellt. Es unterscheidet 4 Scales, die bis auf die C-Scale alle einer bestimmten Bewegungsform im tropischen Wettergeschehen zugeordnet werden können, die A-Scale den tropischen Wellen (z. B. Easterly Waves in der Troposphäre), die B-Scale den Cloud Clustern und die D-Scale den einzelnen teilweise sehr aktiven Konvektionszellen. Die charakteristische Länge (length-scale) ist nach Zehnerpotenzen in Spalte 3 angegeben, die Mitte des Bereiches (z. B. $10^{3,5}$ für die A-Scale) in Spalte 4. Die Angaben hier und in den folgenden Spalten sind gerundet. Die Zeit-Scale (Spalte 5) errechnet sich, wenn man „eingefrorene“ Störungen annimmt, die sich mit 7 m/s fortbewegen. Man kann nun die notwendigen Werte von *Beobachtungsintervall (sampling interval)* und *Beobachtungsdauer (record length)* festlegen, um eine angemessene spektrale Auflösung der Phänomene zu erreichen. Entsprechend dem oben Gesagten muß — um ein Phänomen noch auflösen zu können — das Beobachtungsintervall kürzer sein als die Hälfte der charakteristischen Zeit, was zu den Werten der Spalte 6 (etwa die Hälften der unteren Werte des Zeitbereiches) führt. Die Beobachtungsdauer wird umso länger, je mehr spektrale Details man auflösen möchte, und sollte mindestens so groß sein wie die oberen Werte in Spalte 5. Aus diesen Daten resultiert z. B. eine Länge der Beobachtungsphasen des

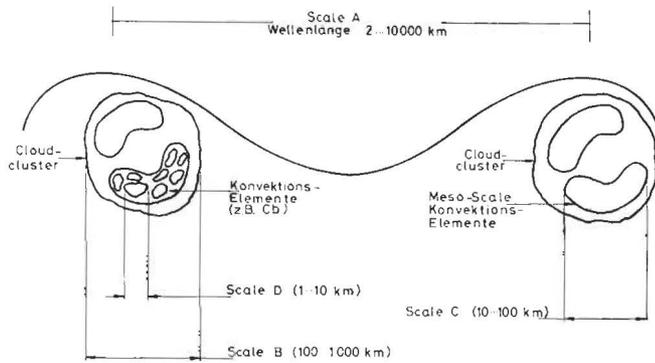


Abb. 3.2
Schema der GATE-Scales und ihrer Wechselwirkung.
Aus GARP Publ. Series Nr. 4.

Experimentes von 20d entsprechend der notwendigen Beobachtungsdauer in der A-Scale oder die dreistündlichen Radiosondenaufstiege von den Schiffen, um die B-scale-Phänomene hinreichend aufzulösen.

Abb. 3.2. zeigt ein Schema, aus dem nicht nur die Größe dieser Scales, sondern auch die Art ihrer Wechselwirkung deutlich wird. Man stellt sich die A \leftrightarrow B Scale-Interaction z. B. so vor, daß der Cluster in einer bestimmten Phase (dem Trog) der Welle vorkommt, und daß als Rückkopplung die Welle ihre Energie aus der im Cluster freiwerdenden latenten Wärme des Wasserdampfes bezieht. Die Cluster selber setzen sich aus Elementen von teilweise bedeutend kleinerer Scale zusammen herab bis zu den „hot towers“, das sind die konvektiven Elemente, in denen der hauptsächliche vertikale Transport vor sich geht. Scale-Interaction besteht prinzipiell zwischen allen Teilen des Systems.

Das Schema von Abb. 3.2 ist nicht als Hypothese zu verstehen, es läßt sich in der Tat auf den Satellitenbildern beobachten. Zwei Beispiele liefern die Abbildungen 3.3 und 5.1.2. Die Abb. 3.3 ist ein Ausschnitt aus einer Aufnahme des geostationären Satelliten ATS-3 vom 24. 8. 1970 16.00 GMT. Sie zeigt eine Welle über dem tropischen Atlantik mit einem Cloud Cluster System (ähnlich wie im Schema 3.2) im Trog bei 40°W und

außerdem einer doppelten ITCZ weiter östlich. Man erkennt auch die Fortsetzung des Wellensystems in den afrikanischen Kontinent hinein mit einer neuen Zone konvektiver Aktivität östlich von Kap Verde. Wir können nun noch in die Details eines Clusters gehen, die man außerordentlich gut auf der SMS-1 Aufnahme vom 30. 6. 1974 (Abb. 3.4) erkennt, da dieses Bild eine Auflösung von 1 km besitzt. Übrigens ist der Begriff Cloud Cluster erst entstanden, als man diese konzentrierten, in den Tropen so häufigen Wolkenhaufen auf Satellitenbildern sah. Lange Zeit war man in Zweifel, ob es sich nicht nur um gewaltige Cirrusschirme handelte oder ob diese Systeme wirklich ein bedeutendes Element der Allgemeinen Zirkulation darstellen, das ein „Cloud Cluster Experiment“ (so wird GATE oft genannt) rechtfertigt.

Die A-Scale wird auch *Synoptic-Scale* genannt. Es ist evident, daß ein synoptisches Beobachtungsnetz oder ein Modellnetz mit — sagen wir — 200 oder 300 km Gitterabstand nicht ausreicht, um die kleinereskaligen Prozesse der Cluster und erst recht nicht der Cumulus-Scale in ihrer Auswirkung auf die synoptischen Felder zu beschreiben. Damit ergibt sich die Zielsetzung des Experimentes, wie sie in Tab. 3.2 dargestellt ist. Die Pfeile der dritten Zeile zeigen den logischen Weg, die Probleme zu lösen: *Die Beschreibung der Phänomene der verschiedenen Scales ist eine Grundlage, um Klarheit in die verwickelten Prozesse der Scale-Interaction zu bringen. Beides ist dann notwendig zur Entwicklung der Parametrisierungs-Schemata.* Diese Schemata und die tropischen Datensätze sind das, was GARP von GATE erwartet. Das so fokussierte Experiment können wir kurz und treffend bezeichnen z. B. als Parametrisierungs-Experiment oder als Scale-Interaction-Experiment oder auch als Cloud-Cluster-Experiment, letzteres, wenn wir den Cloud Cluster als die wesentliche B-skalige Bewegungsform betrachten, in die die aktiven Cumulus-Wolken eingebettet sind.

Parametrisierung der Konvektion

Wir müssen uns nun klarmachen, wie man sich vorstellt, die Scale-Interaction zu beschreiben und die Parame-

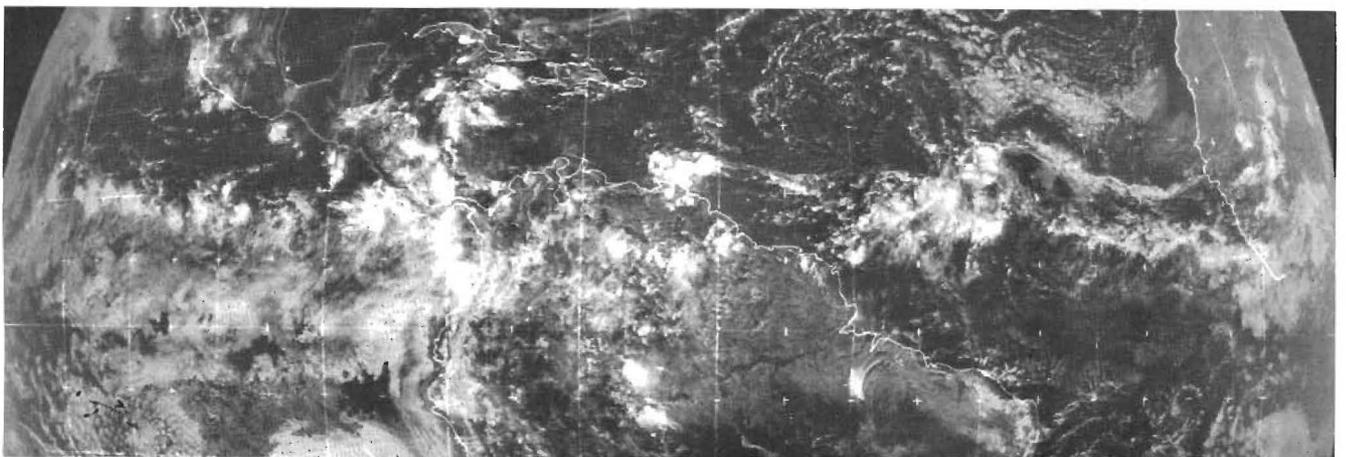


Abb. 3.3
Ausschnitt aus einer ATS-3 Aufnahme. Man erkennt den tropischen Atlantik und eine von Ost nach West ziehende Wellenstörung, die in ihrem Trog einen Cloud Cluster (bei 40° bis 45°W) enthält. Vergleiche diese Bewölkungsstruktur mit dem Schema der Abb. 3.2.

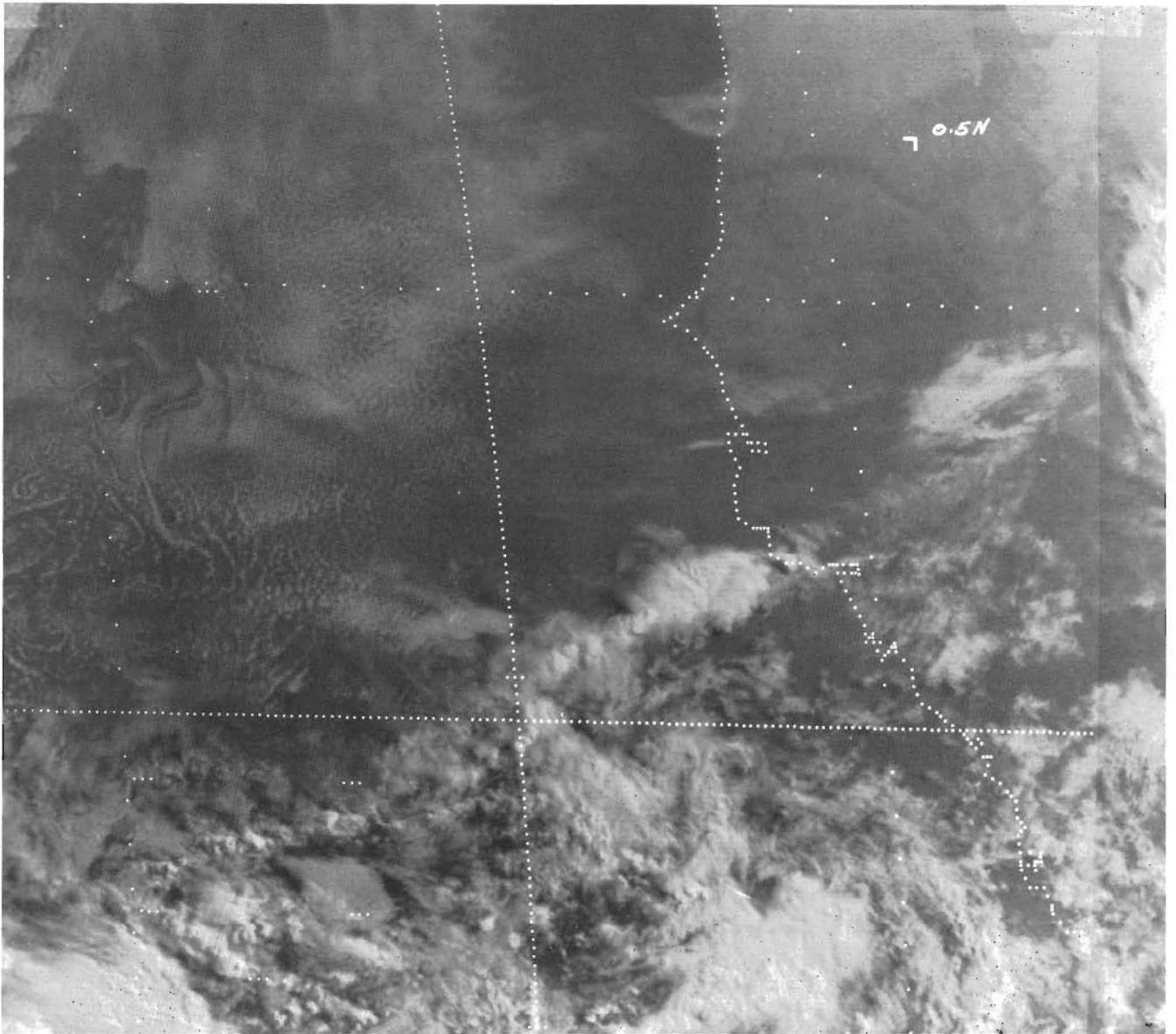


Abb. 3.4

SMS-1 Aufnahme vom Tag 181 (30. Juni) 1974 im sichtbaren Spektralbereich mit einer Auflösung von 0,5 nm. Die Punkte des Gradnetzes haben einen Abstand von 0,5 grad \approx 50 km. Man erkennt die Strukturen des Clusters im unteren Teil des Bildes. Man beachte auch die Wirbel im Lee der Kap-Verde-Inseln.

trisierungsmethoden zu finden. Dieses Problem interessiert derzeit die gesamte „GATE-community“ brennend; die grundlegenden Arbeiten entstammen aber nur wenigen Arbeitsgruppen. Als Beispiele seien erwähnt die von ARAKAWA (J. Atmos. Sci. 31, S. 674), OGURA (J. Atmos. Sci. 30, S. 1276) und YANAI (J. Atmos. Sci. 30, S. 611). Diese Arbeiten liefern nicht nur Ergebnisse für andere Experimente (u. a. auf den Marshall-Inseln), sondern vor allem ein formales Gerüst für die Entwicklung der GATE-Parametrisierung. Im folgenden wollen wir den Grundgedanken dieser Arbeiten folgen.

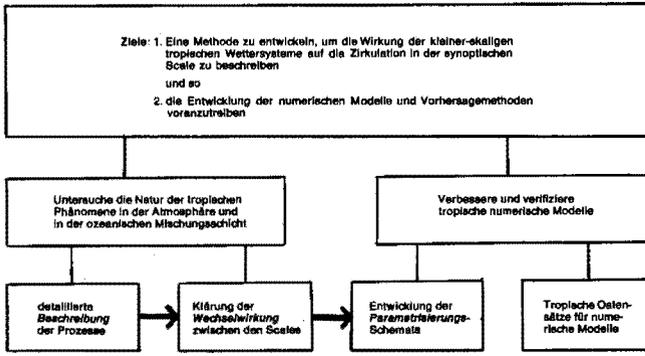
Wir betrachten ein horizontales Gebiet von z. B. $300 \times 300 \text{ km}^2$ und nehmen an, daß dieses Gebiet ein nicht näher spezifiziertes Cumulus-Ensemble (d. h. eine große Anzahl von Cumulus-Wolken mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften von Höhe, Durchmesser, Entrainment usf.; siehe das Schema der Abb. 5.2.1) ent-

hält. Wir wollen versuchen, die statistischen Eigenschaften dieses Ensembles zu erfassen. Das gewählte Gebiet soll zwei Bedingungen erfüllen:

- es soll groß genug sein, um ein für die Statistik genügend großes Ensemble aktiver (im Sinne des vertikalen Transportes) Wolken zu enthalten
- aber klein genug, so daß es nur einen kleinen Teil des großskaligen (z. B. nur ein Gitterelement des synoptischen) Systems umfaßt.

Die Vorgänge in diesem Gebiet können wir mit Hilfe der hydrodynamischen Grundgleichungen beschreiben. Wir mitteln diese Gleichungen über das vereinbarte Gebiet und erhalten dann z. B. für die Kontinuitätsgleichung, den Energiesatz und als Haushaltsgleichung für den Wasserdampf

$$\nabla \cdot \bar{\mathbf{v}}_H + \frac{\partial \bar{w}}{\partial p} = 0 \quad [3.1]$$



Tab. 3.2
Ziele und Komponenten des zentralen Programms. Nach GATE-Report Nr. 3.

$$Q_1 \equiv \frac{\partial \bar{s}}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{s} \bar{\mathbf{v}}_H + \frac{\partial \bar{s} \bar{w}}{\partial p} = Q_R + L(c-e) - \frac{\partial}{\partial p} \overline{s' w'} \quad [3.2]$$

$$Q_2 \equiv -L \left(\frac{\partial \bar{q}}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{q} \bar{\mathbf{v}}_H + \frac{\partial \bar{q} \bar{w}}{\partial p} \right) = L(c-e) + L \frac{\partial}{\partial p} \overline{q' w'} \quad [3.3]$$

Dabei ist $\bar{\mathbf{v}}_H$ der Vektor der horizontalen Windgeschwindigkeit, p der Luftdruck, t die Zeit, w die vertikale Komponente der Windgeschwindigkeit in dem hier benutzten p -System (vertikale Koordinate ist p anstatt der vielfach benutzten geometrischen Höhe z) mit $w = dp/dt$, s die trockene statische Energie = $c_p T + gz$ mit c_p = spezifische Wärme bei konstantem Druck, T = absolute Lufttemperatur, g = Schwerebeschleunigung, q die spezifische Feuchte, L die Verdampfungswärme, c die Kondensationsrate, e die Verdampfungsrate und Q_R die Erwärmung durch Strahlungsvorgänge. Diesen Gleichungen liegt zu Grunde, daß die aktuellen Größen ($w, s, q \dots$) an einer bestimmten Stelle und zu einer bestimmten Zeit beschrieben werden können durch (z. B.)

$$s = \bar{s} + s', \quad [3.4]$$

wobei hier der Mittelwert-Querstrich das Flächenmittel über das gewählte Gebiet bedeutet und der Schrägstrich die Zusatzkomponente oder die Abweichung des aktuellen Wertes vom Mittelwert. Die Schreibweise ist hinreichend bekannt aus den Studien zur atmosphärischen Turbulenz. Die hier Abweichungen verursachenden Elemente sind die vielen unterschiedlichen Cumuli unseres Ensembles.

Die linken Seiten der Gln. [3.2] und [3.3] lassen sich allein aus den Mittelwerten $\bar{\mathbf{v}}_H, \bar{s}, \bar{q}$ und \bar{w} berechnen. Diese Werte repräsentieren die größere Scale, man kann sie in vielen Fällen auch als identisch mit den Zustandsgrößen an den Gitterpunkten betrachten (s. u.). So bedeutet die linke Seite von [3.2] die im großskaligen System offenbar werdende oder die aus den Parametern des großskaligen Feldes errechenbare Erwärmung. Wir nennen sie Q_1 . Analog ist Q_2 die aus dem großskaligen System offenbar werdende Senke latenter Wärme.

Im Gegensatz dazu lassen sich die rechten Seiten beider Gleichungen keineswegs aus den Zustandsparametern und dem Horizontalwind des großskaligen Feldes berechnen. Sie beinhalten vielmehr die subskaligen Effekte. Das bedeutet, die prognostischen Größen $\partial \bar{s} / \partial t$ und $\partial \bar{q} / \partial t$ sind nicht allein durch die Advektionsterme der linken Seite, sondern auch durch das mittlere Verhalten der subskaligen Vorgänge bestimmt, d. h. durch das Flächenmittel der Strahlungserwärmung Q_R , die Kondensations- und Verdunstungseffekte und die Divergenzen ($\partial / \partial p$) der vertikalen „turbulenten“ Flüsse von s und q .

Und das ist nun das *GATE-Problem*: Die Effekte der rechten Seiten für das betrachtete Wolken-Ensemble oder einen Cloud Cluster zu parametrisieren, das heißt, sie durch leicht zugängliche, aus dem großskaligen Feld zu gewinnende Größen auszudrücken.

Einige andere wichtige Beziehungen gewinnt man, wenn man zunächst Gl. [3.3] von [3.2] abzieht:

$$Q_1 - Q_2 = \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} + \nabla \cdot \bar{h} \bar{\mathbf{v}}_H + \frac{\partial \bar{h} \bar{w}}{\partial p} = Q_R - \frac{\partial}{\partial p} \overline{h' w'} \quad [3.5]$$

mit $h = c_p T + gz + Lq$ = gesamte statische Energie. Den gesamten vertikalen „turbulenten“ Energietransport im Niveau p bezeichnen wir mit $F(p)$. Dieser errechnet sich zu

$$F(p) = - \frac{1}{g} \overline{h' w'} = \frac{1}{g} \int_{p_T}^p (Q_1 - Q_2 - Q_R) dp \quad [3.6]$$

Dabei sorgt die Einführung der Schwerebeschleunigung g dafür, daß der Fluß $F(p)$ die Dimension Energie/(Fläche \times Zeit) besitzt. Das Vorzeichen ist so gewählt, daß ein nach oben gerichteter Fluß positiv gerechnet wird. Das Integral besitzt als Grenzen das betreffende Druckniveau (p) und die Obergrenze (top) der Atmosphäre (p_T). Da $F(p)$ über die Kovarianz $\overline{h' w'}$ definiert ist und dabei die Zusatzgrößen durch die Cumulus-Konvektion bedingt sind, betrachtet man $F(p)$ auch als ein Maß für die Aktivität der Cumulus-Konvektion. Als Oberflächenwerte ($p = p_0$) der Integrale über die Q -Terme ergibt sich

$$\frac{1}{g} \int_{p_T}^{p_0} (Q_1 - Q_R) dp = L N_0 + H_0 \quad [3.7]$$

$$\frac{1}{g} \int_{p_T}^{p_0} Q_2 dp = L N_0 - E_0 \quad [3.8]$$

und somit

$$F(p_0) = H_0 + E_0 \quad [3.9]$$

Dabei sind N_0 die Niederschlagsmenge, die an der Oberfläche pro Flächen- und Zeiteinheit fällt, und H_0 und E_0 die oberflächennahen vertikalen turbulenten

Ströme fühlbarer und latenter Wärme. Damit ergibt sich die Möglichkeit, die Q -Werte mit Beobachtungen an der Oberfläche zu vergleichen.

Der Strahlungsterm Q_R spielt in der Energetik des Cumulus-Ensembles und bei der Entwicklung der konvektiven Prozesse eine wesentliche Rolle. Dies und die Parametrisierung von Q_R zu erläutern, bleibt Beitrag 5.4 überlassen. Hier wollen wir einmal das Strahlungsproblem als gelöst annehmen. Dann bleiben noch 3 Terme auf den rechten Seiten von [3.2] und [3.3] zu behandeln. Ein Weg, um sie in den Griff zu bekommen, ist die Aufstellung eines Modelles für das Cu-Ensemble. So besteht YANAI's (1974) Modell z. B. aus 10 Gleichungen, die außer [3.2] und [3.3] auch Haushaltsgleichungen für Masse, Wärme, Wasserdampf und flüssiges Wasser der Wolken enthalten, ferner Beziehungen für die Verdunstungsrate und die Niederschlagsrate. Dabei unterscheidet man zwischen den Zustandsgrößen in den Wolken (z. B. s_c , w_c) und außerhalb der Wolken, also in deren Umgebung (z. B. \tilde{s} , \tilde{w}), wobei letztere als mit den synoptischen Werten als bekannt angesehen werden. Das Modell liefert dann bei Kenntnis der synoptischen bzw. der Umgebungs-Werte 10 unbekannte Größen für das betrachtete Cumulus-Ensemble, nämlich gewichtete Mittel für h_c , s_c , q_c und den Gehalt an flüssigem Wasser, ferner den vertikalen Massenfluß in den Wolken, die Raten von Entrainment, Detrainment, Niederschlag, Verdunstung und Kondensation. Man nennt dieses Modell ein diagnostisches, da es eine Diagnose für ein bestimmtes Cu-Ensemble oder einen bestimmten Cloud-Cluster-Typ liefert. Falls man finden sollte, daß die Anzahl dieser Typen beschränkt ist und man die Diagnose aller Typen kennt, dann sind die subskaligen Terme bekannt und lassen sich in den prognostischen Modellen berücksichtigen.

Eine etwas andere Form der Gleichungen [3.2] und [3.3] läßt sich aus dem Yanai-Modell herleiten. Diese Form ist der Parametrisierung bereits einen Schritt näher:

$$Q_1 - Q_R = -M_c \frac{\partial \tilde{s}}{\partial p} - L e \quad [3.10]$$

$$Q_2 = L M_c \frac{\partial \tilde{q}}{\partial p} - L \delta (\tilde{q}^* - \tilde{q}) - L e, \quad [3.11]$$

worin M_c der vertikale Massenfluß in den Wolken, δ die Detrainmentrate, e die Verdunstungsrate und \tilde{q}^* die spezifische Sättigungsfeuchte der Umgebung bedeutet. Man sieht also, daß sich die Kovarianzen (exakt ihre Divergenz, siehe die letzten Terme der Gleichungen [3.2] und [3.3]) durch Gradienten des mittleren Feldes (erste Terme rechts in [3.10] und [3.11]) parametrisieren ließen, wie es auch bei den Flüssen in der Mikroturbulenz üblich ist. Gleichung [3.10] besagt, daß die im großskaligen System offenbar werdende Erwärmung (Q_1) außer durch Q_R durch zwei Komponenten verursacht wird:

— Erwärmung durch Absinken, beschrieben mit Hilfe von $(-M_c) =$ Massenfluß in den Absinkgebieten (das positive M_c kompensierend) und von $\partial \tilde{s} / \partial p$ (dieser Gradient ist durchwegs negativ)

— Abkühlung durch Verdunstung der Wolkentröpfchen nach dem Detrainment (als Folge des Mischungsprozesses zwischen Wolken- und Umgebungsluft).

Die im großskaligen System offenbar werdende Senke latenter Wärme ist bedingt durch

— Austrocknen durch Absinken bei positivem $\partial \tilde{q} / \partial p$ und

— die aus dem Mischungsprozeß resultierende Feuchtezufuhr über das Detrainment von Wasserdampf ($-L \delta (\tilde{q}^* - \tilde{q})$) und über die Verdunstung von Wolkentröpfchen nach dem Detrainment ($-Le$).

Die Beziehungen [3.10] und [3.11] sollen verdeutlichen, daß der vertikale Massenfluß (M_c) in den Wolken, der ja wie alle Parameter des Ensembles eine Funktion von p ist, eine zentrale Rolle bei der Betrachtung der hier stattfindenden konvektiven Prozesse spielt. In den ersten beiden Termen auf der rechten Seite scheint das Parametrisierungsproblem von den Kovarianzen auf die Bestimmung von M_c verschoben zu sein. Vielfach wird in theoretischen Ansätzen $M_c(p)$ in Beziehung gesetzt zu dem Massenfluß M_{cB} an der Wolkenbasis, womit die Prozesse in der planetarischen Grenzschicht (siehe Beitrag 5.3) ins Spiel kommen.

Wir können hier nicht alle Ansätze zur Lösung des Parametrisierungsproblems erläutern, müssen aber feststellen, daß keiner so ausgereift und getestet ist, daß es nur noch eines Einbaus der GATE-Daten bedürfte. Außer der hier geschilderten *Haushaltsmethode* (*budget method*) gibt es auch andere Verfahren, die Scale Interaction zu untersuchen, so durch

— genaue Analyse von Einzelfällen („*case studies*“) des Zusammenspiels verschieden-skaliger Phänomene wie z. B. einer Welle mit ihren Clustern und Cumulus-Elementen;

— Analyse des mittleren wechselseitigen Verhaltens; man spricht hier von „*composite studies*“; das bedeutet, man setzt das zu analysierende Datenmaterial aus einem größeren Kollektiv verschiedener Einzelphänomene zusammen;

— *statistische Korrelationsanalysen* zwischen dem Auftreten der größer- und kleiner-skaligen Erscheinungen; und schließlich

— *direkte Bestimmung der Kovarianzen*, wie sie z. B. in den Beziehungen [3.2] und [3.3] auftreten. Flugzeugmessungen mit trägheitsarmen Meßfühlern (*gust probes*) sind dazu besonders geeignet.

Die Haushaltsmethode (aufbauend auf den Beziehungen [3.2] und [3.3] und jedenfalls die Werte von Q_1 und Q_2 aus der größeren Scale benütigend) ist wohl das aufwendigste und umfassendste Verfahren, wenn man sowohl an die Meßwerte denkt, die es benötigt, als auch an die Größen, die die Modelle liefern, und die ja verifiziert werden müssen. So war dieses Verfahren auch die Richtschnur für den Aufbau des Experimentes, das so Haushaltsberechnungen (für Masse, Impuls, Wärme, Wasserdampf) für eine Vielzahl von konvektiven Zuständen für verschiedene Scales ermöglichen sollte.

Aus praktischen Gründen ist das Experiment in fünf wissenschaftliche Unterprogramme eingeteilt, die in

Beitrag 5 näher behandelt werden, deren unterschiedliche Rolle sich aber zumindest teilweise an Hand der Beziehungen [3.2] und [3.3] kurz erläutern läßt:

- Das *Synoptic-Scale-Unterprogramm* wird die großskalige Umgebung beschreiben, in die die Konvektion eingebettet ist. Das sind in [3.2] und [3.3] vor allem die Terme \bar{v}_H , \bar{s} , \bar{q} , \bar{w} in ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung;
- Das Anliegen des *Konvektions-Unterprogrammes* ist vor allen Dingen die Parametrisierung der Kovarianzen und des Phasenumwandlungstermes L ($c \rightarrow e$) als ein wesentlicher Teil der Untersuchung konvektiver Systeme verschiedener Scales;

- Wie oben angedeutet, hat das *Grenzschicht-Unterprogramm* dabei einen bedeutenden Anteil, da das Entrainment in die Konvektionszellen vor allem in der planetarischen Grenzschicht vor sich geht und in hohem Maße von deren physikalischen Zustand (z. B. Strömungsverhältnisse) abhängt;
- Das *Strahlungs-Unterprogramm* ist im wesentlichen auf den Term Q_R konzentriert;
- Das *Ozeanische Unterprogramm* läßt sich nicht in Beziehung setzen zu einzelnen Termen von [3.2] und [3.3]. Seine Notwendigkeit entspringt der engen Verkettung thermodynamischer und dynamischer atmosphärischer Prozesse mit denen im Ozean.

4 H. KRAUS, Göttingen Das Beobachtungsnetz

Die Planung und Einrichtung eines Beobachtungsnetzes, das es erlaubte, die notwendigen Daten zur Verwirklichung des in Beitrag 3 dargestellten Programmes zu gewinnen, ist eine gewaltige internationale Leistung. Das Netz bedeckte 11% der Erdoberfläche, die Beobachtungen erstreckten sich von 1800 m Tiefe im Ozean bis in die Stratosphäre, sie überdeckten ein Zeitintervall von 100 Tagen (17. Juni — 24. September 1974), sie erfaßten Strukturen bis weit unterhalb der D-Scale und sie beinhalteten neben einer Fülle von Messungen, die man als Routine-Beobachtungen (z. B. Radiosonden-Aufstiege) ansprechen kann, auch ein reiches Programm von Spezialuntersuchungen. Maschenweite des Netzes, Beobachtungsintervalle und Länge der Beobachtungsperioden orientierten sich an den Scales tropischer Bewe-

gungsformen (siehe Tab. 3.1) einerseits und an der in Beitrag 3 erläuterten Haushaltmethode andererseits. Dabei hatte man stets im Auge, daß die Haushaltmethode nicht nur die $A \leftrightarrow B$ Interaction, sondern auch die Wechselwirkung zwischen kleineren Scales enthüllen sollte.

In diesem Beitrag sind die wesentlichen Teile des Beobachtungsnetzes an Hand von Abbildungen zusammengestellt worden. Nähere Erklärungen gehen aus den Legenden hervor. Eine Reihe von Einzelheiten findet der Leser noch im Rahmen der Abhandlungen über die wissenschaftlichen Unterprogramme im Beitrag 5.

Die Beobachtungen von den verschiedenen Plattformen (Schiffe, Flugzeuge, Satelliten) waren ausführlich ge-

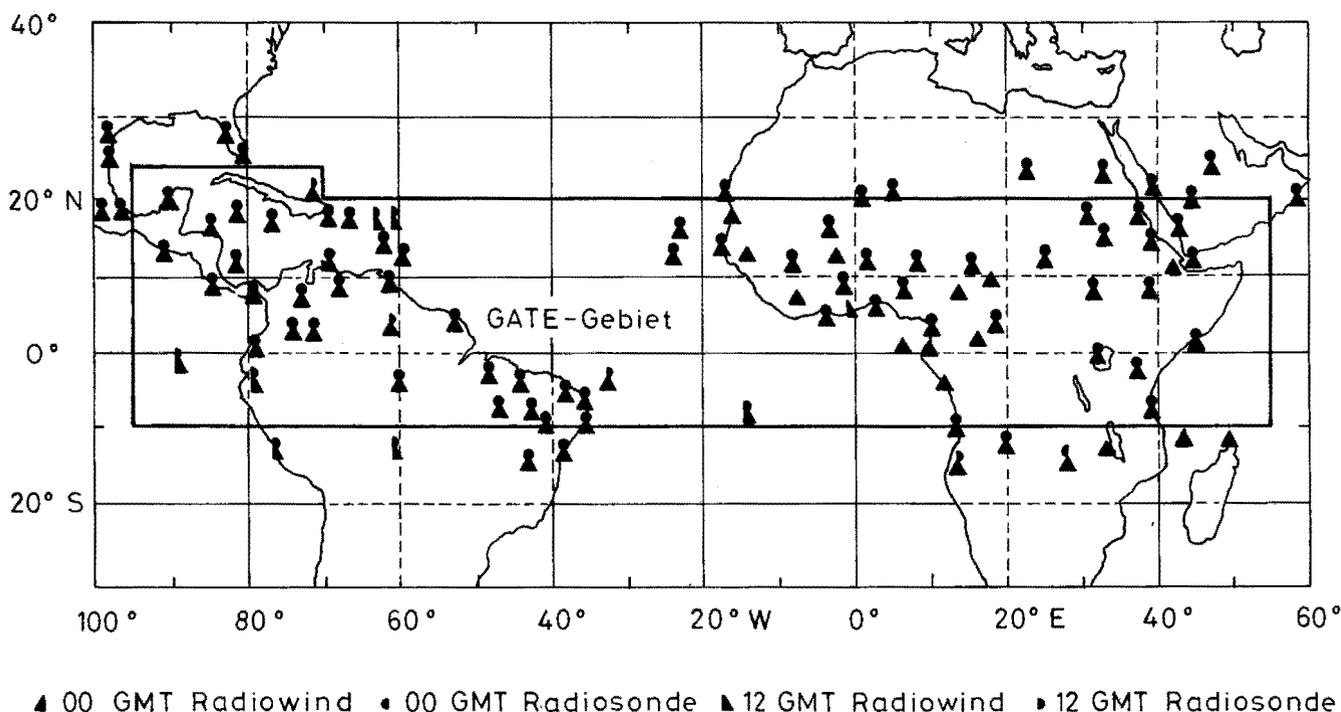


Abb. 4.1
GATE-Gebiet und aerologische Landstationen, von denen bekannt ist, daß sie während GATE gearbeitet haben. Aus GATE-Report Nr. 19.

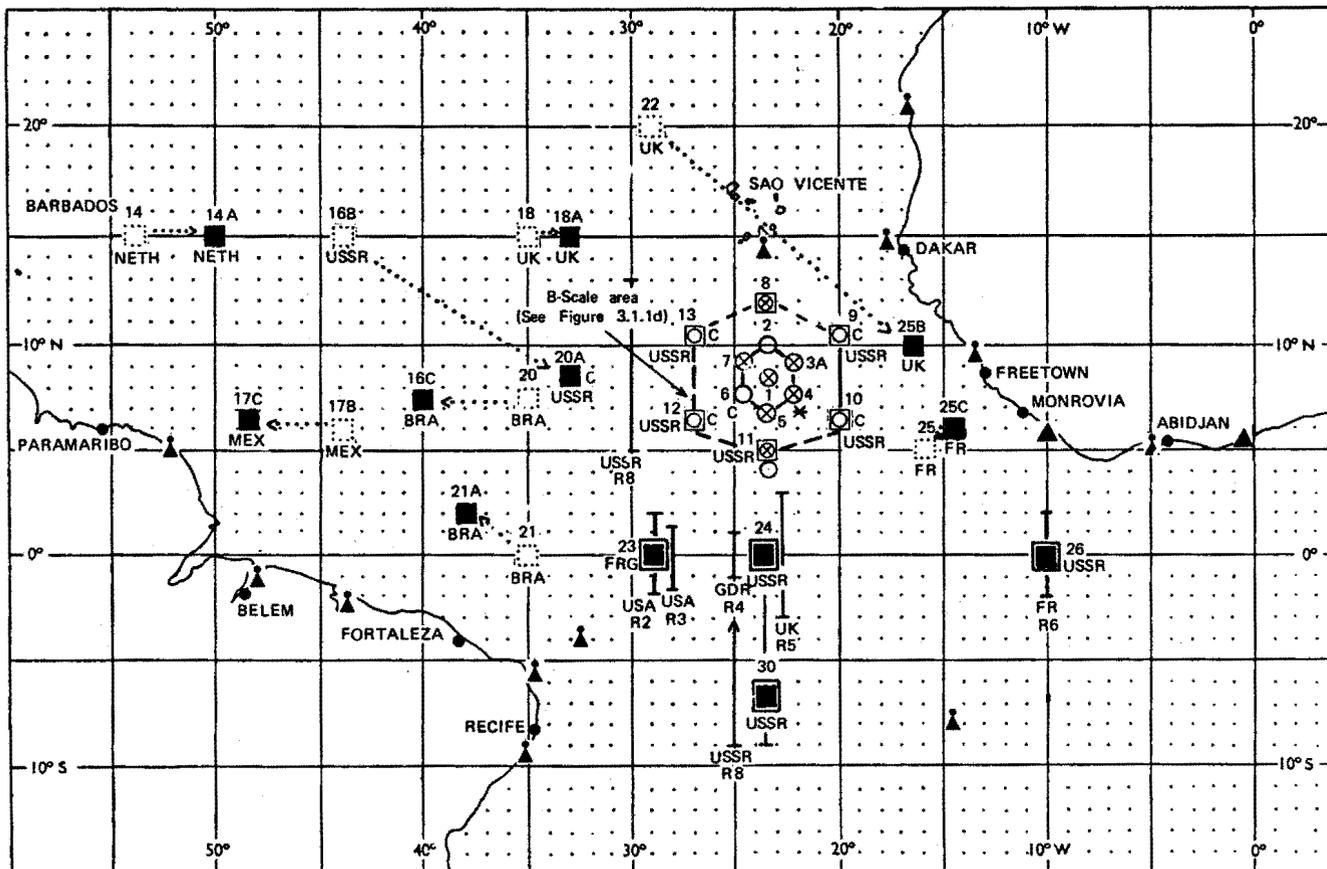


Abb. 4.2

Verteilung der Forschungsschiffe in Phase 2. Erläuterungen siehe Abb. 4.3. Man erkennt deutlich das B-scale-Gebiet, das das innere Hexagon (Positionen 1 bis 7) und die A/B-scale-Positionen 8 bis 13 enthält. Deutlich fällt auch die von N nach S orientierte Radar-Kette auf. Ebenso werden die Abweichungen der aktuellen von den geplanten Positionen deutlich. Aus GATE-Report Nr. 19.

plant worden. Die Pläne liegen als *GATE-Reports* (siehe Beitrag 9) vor. Es würde zu weit führen, hier auf die Fülle der Einzelheiten des Einsatzes dieser Plattformen einzugehen.

Nur die *Flugrouten (flight patterns)* sollen noch kurz behandelt werden. Es ist selbstverständlich, daß diese entsprechend der Zielsetzung des Flugs gewählt wurden und jedes der wissenschaftlichen Unterprogramme seine eigenen Anforderungen an die Art des Flugzeugeinsatzes stellte. Daß dabei die Flugzeug-Operationen so reibungslos durchgeführt werden konnten, liegt nicht zuletzt daran, daß auf diesem Gebiet eine sehr gründliche technisch-wissenschaftliche Planungsarbeit geleistet wurde, und daß die USA wenige Monate vor dem Experiment ein Aircraft Workshop organisierten, auf dem man versuchte, die Arbeit in Dakar möglichst gut zu simulieren.

Drei wichtige „flight patterns“ waren die „Box“, der „Butterfly“ und ein einfaches Hin und Her („to and fro“), wie sie auf Abb. 4.5 dargestellt sind. Die typische Länge der einzelnen Strecken war 100 km. Für jede Art von flight pattern gibt es eine wissenschaftliche Begründung, z. B. beim „to and fro“ (das wie die beiden anderen von mehreren Flugzeugen übereinander in verschiedenen Höhen geflogen wurde) die Gewinnung eines detaillierten Bildes vom Querschnitt eines Konvektionsban-

des. Aber dieses pattern erlaubt natürlich keine Haushaltsberechnungen des betreffenden Gebietes, wie etwa box und butterfly, wobei letzteres (auch cross genannt) durch das Zentrum eines Konvektionsgebietes führen sollte. Aus einem box pattern kann man z. B. das Flächenmittel der Divergenz der horizontalen Windgeschwindigkeit

$$D = \frac{1}{F} \int \text{div } \mathbf{v}_H dF = \frac{1}{F} \oint v_n ds \quad [4.1]$$

ermitteln, da man ja die Normalkomponente des Horizontalwindes v_n auf der das Gebiet umschließenden Kurve mit den Elementen ds durch die Messungen kennt. Der Nachteil der Box ist jedoch, daß man diesen Haushaltsterm nur für eine Scale, nämlich der der Größe der Box bestimmen kann. Beim Butterfly kann man entlang der einen Diagonalen, die mit der x-Richtung zusammenfallen möge, den linearen Trend der Windkomponente in dieser Richtung, $\frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$, bestimmen, entlang der dazu senkrechten Diagonalen $\frac{\partial \bar{v}}{\partial y}$. Daraus ergibt sich

$$D = \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} \quad [4.2]$$

flogen wurden, und daß somit umfangreiche Haushaltsberechnungen, wie sie hier nur angedeutet werden konnten, möglich sind.

Für GATE sind die Messungen von insgesamt 11 Satelliten von Bedeutung. Dabei handelt es sich um zwei geostationäre (SMS-1 bei 45 °W und ATS-3 bei 70 °W) und 9 polarumlaufende (NOAA-2, NOAA-3,

Nimbus-5, 2 der DSMP-Serie und 4 der sowjetischen Meteor-Serie). Daten von fünf Satelliten (SMS-1, ATS-3, NOAA-2, NOAA-3 und ESSA-8) standen in Dakar zur Verfügung, wobei allerdings die von SMS-1 überragende Bedeutung besaßen. ESSA-8-Daten sind nicht archiviert worden, stehen also zur Auswertung nicht zur Verfügung.

5 Die wissenschaftlichen Unterprogramme

5.1 D. D. HOUGHTON, Madison, Wisc., USA Das Synoptic-Scale-Unterprogramm*

Das Synoptic-Scale-Unterprogramm umfaßt alle Aspekte von GATE, die sich auf großskalige Erscheinungsformen in der Atmosphäre und an der Meeresoberfläche beziehen, wobei die horizontalen Dimensionen 1000 km und mehr betragen (s. Beitrag 3, Scales). Da es die wohl engste Verwandtschaft zur „traditionellen“ Meteorologie aufweist, dürfte es auch für viele von Interesse sein, die nicht direkt mit GATE befaßt sind.

In Beitrag 3 wurde die wissenschaftliche Zielsetzung von GATE näher erläutert, nämlich die Wirkung der kleiner-skaligen (konvektiven) tropischen Wettersysteme auf das synoptische Feld abzuschätzen und (so) die Entwicklung numerischer Modelle voranzutreiben. Beide Ziele befassen sich direkt mit Untersuchungen in der synoptischen Scale, woraus folgt, daß das Gelingen von GATE weitgehend von der erfolgreichen Durchführung dieses Unterprogrammes abhängen wird.

Wenn auch wissenschaftliche Erfahrung und das Vorhandensein eines weitreichenden Beobachtungs- und Datenübermittlungssystems dem Programm von Anfang an zugute kamen, so erforderte die Koordinierung mit dem existierenden World Weather Watch System und den regionalen Vorhersage- und Analysenzentralen doch noch Jahre der Planung. Für die Beobachtungsphase von GATE (Sommer 1974) ergab sich durch die Verstärkung des kontinentalen Beobachtungsnetzes über Afrika und Südamerika, dem zusätzlichen Einsatz des geostationären Satelliten und die über den gesamten tropischen Atlantik verteilten Forschungsschiffe ein einzigartiges Bild der großskaligen Vorgänge für den tropischen Gürtel auf etwa 40% des Erdumfanges.

Die synoptische Meteorologie (besser Meteorologie der synoptischen Scale) dieses Gebietes kennt die Erscheinungsformen von *Wellenbewegungen*, der *Innertropischen Konvergenzzone* (ITCZ), der *Passatwinde* und des *hochtroposphärischen östlichen Jet Stream*, wobei letzterer am deutlichsten im Nordsommer auftritt. Abb. 5.1.1 zeigt ein Schema. Die Niederschlagsverteilung zeigt starke tägliche und jahreszeitliche Variationen besonders über den Kontinenten. Es gibt auch wandernde zusammenhängende Niederschlagsgebiete, die Cluster,

die in Beitrag 3 näher beschrieben wurden; sie erscheinen am deutlichsten über den Ozeanen, und ihre Zugbahnen verlaufen nahe der mittleren ITCZ mit Abweichungen von einigen Graden nach Norden oder Süden. Abb. 5.1.2 zeigt einen Cloud Cluster, der gerade die westafrikanische Küste passiert hat und sich auf den Atlantik hinaus bewegt; sie zeigt ferner einen Wolken-Gürtel in West-Ost-Richtung, der zu einer weniger aktiven ITCZ im westlichen Atlantik gehört. Die hier erkennbare Bewölkung gibt ein Bild der Vorgänge in der synoptischen Scale und verdeutlicht die so entscheidende Verketzung mit konvektiver Aktivität in der Mesoscale.

Wissenschaftliche Zielsetzung

Will man die Rolle der ozeanischen Cloud Cluster und anderer organisierter Niederschlagszellen in der ITCZ beim Aufbau der synoptic-scale Systeme zeigen, so bedarf es ziemlich umfassender quantitativer Studien der synoptischen Felder in diesem Gebiet. Dies ist ein wesentliches Ziel dieses Unterprogrammes. Obwohl die synoptischen Erscheinungen in der tropischen Atmosphäre seit vielen Jahren untersucht werden (siehe z. B. RIEHL, *Tropical Meteorology*, McGraw-Hill, 1954), so ist unser Wissen über die Natur der Vorgänge in dieser Scale über dem Ozean sogar für die Troposphäre noch recht lückenhaft. Grundlegende Eigenschaften wie die Neigung der Trogachsen wandernder troposphärischer Störungen und die relative Bedeutung von Konvergenzen in der Grenzschicht verglichen mit solchen in höheren Schichten sind nie befriedigend verstanden worden, selbst nicht im Pazifischen Ozean, wo schon vor GATE viele Untersuchungen stattfanden (siehe die zusammenfassende Darstellung in GATE Report Nr. 6). Sicher haben die Satellitenbilder einen wesentlichen Beitrag geleistet, gewisse Eigenschaften dieser veränderlichen Prozesse sichtbar zu machen, aber dies alles genügt noch nicht.

So ist es Aufgabe des Programmes, beides, das mittlere Erscheinungsbild und die sich rasch verändernden Formen der synoptischen Scale sorgfältig zu beschreiben nicht nur für das B-scale-Gebiet im Ostatlantik, sondern über dem gesamten GATE-Gebiet, wie es Abb. 4.1 zeigt.

* Übersetzung aus dem Englischen: H. KRAUS

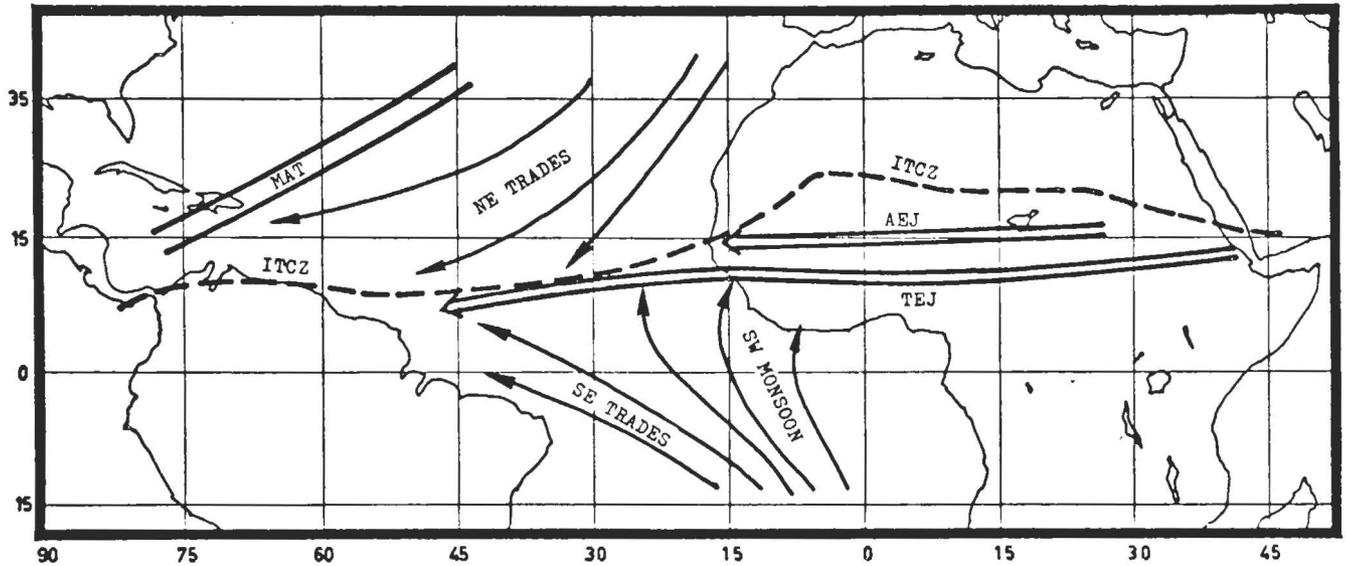


Abb. 5.1.1

Die wesentlichen synoptischen Erscheinungen des GATE-Gebietes im Nordsommer. TEJ = Tropical Easterly Jetstream (obere Troposphäre), AEJ = African Easterly Jetstream (mittlere Troposphäre), MAT = Mittelatlantischer Trog (obere Troposphäre), ITCZ = Innertropische Konvergenzzone. Aus GATE-Report Nr. 1.

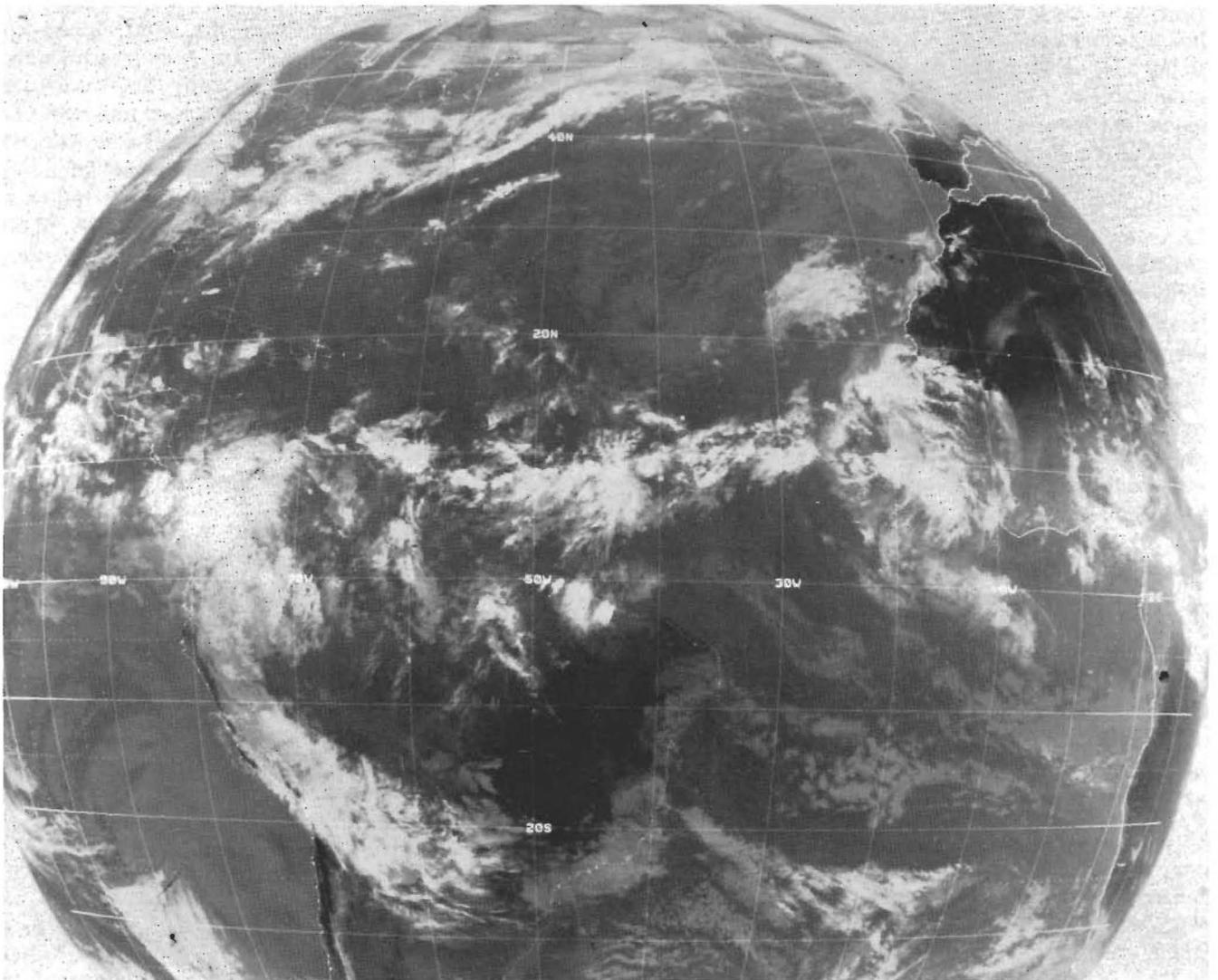


Abb. 5.1.2

SMS-1 IR-Aufnahme, 9. 8. 74, 14.00 GMT

Dies ist notwendig, weil die synoptische Scale größer als die der Cloud Cluster und anderer organisierter Niederschlagsgebiete ist und auch weil es eine beträchtliche Variation der synoptischen Erscheinungsformen mit der geographischen Länge gibt. Neben der hochreichenden Konvektion beeinflussen viele andere Faktoren den Lebenslauf der rasch veränderlichen Phänomene der synoptischen Scale, so der Gegensatz zwischen Land und Wasser, Monsun- und Gezeitenströmungen, die Temperaturverteilung an der Ozeanoberfläche, großskalige barotrope und barokline Energieumwandlungen und die Wechselwirkung mit den mittleren Breiten. Alle diese Einflüsse müssen einzeln verstanden werden, um die Rolle der kleiner-skaligen konvektiven Systeme richtig zu beschreiben.

In den Tropen gibt es eine Reihe unterschiedlicher, sich ausbreitender bzw. wandernder Bewegungsformen in der synoptischen Scale. Diejenige, die wohl am deutlichsten mit konvektiven Erscheinungen verknüpft ist, ist eine sich nach Westen bewegende troposphärische Störung, die meist *Easterly Wave* genannt wird: Sie beeinflusst die Intensität der Konvektion in der ITCZ; Cloud Cluster entwickeln sich nach den bisherigen Erfahrungen vornehmlich in ihrer westlichen oder vorderen Hälfte; die größten Amplituden in den Geschwindigkeits- und Druckfeldern treten im Gebiet des Atlantik bei oder nördlich von 15°N auf; die größten Schwankungen von Temperatur und Windgeschwindigkeit beobachtet man in der unteren Troposphäre. Während GATE überquerten 23 dieser troposphärischen Störungen den Atlantik (BURPEE, GATE Report Nr. 14, 1975). Derselbe Autor gibt eine mittlere Ost-West-Wellenlänge von 2400 km, eine mittlere nach Westen gerichtete Geschwindigkeit von 7 bis 8 ms^{-1} und so eine mittlere Periode von 3,6 Tagen an. In Abb. 5.1.2 zeigt der Wolken Gürtel der ITCZ eine wellenähnliche Struktur quer über den Atlantik, diese Erscheinung hängt eng mit der hier beschriebenen synoptic-scale-Störung zusammen.

In größeren Höhen sind noch andere sich ausbreitende Phänomene entdeckt worden, so eine sich nach Westen bewegende *Rossby-Gravitations-Welle* mit einem Maximum der Amplitude nahe der Tropopause und außerdem die größer-skaligen, sich nach Osten bewegenden *Kelvin-Wellen* in der Stratosphäre. Es gibt Anzeichen für eine Wechselwirkung dieser Phänomene der höheren Atmosphäre mit den konvektiven Systemen, woraus die Notwendigkeit resultiert, auch diese Phänomene quantitativ zu beschreiben. Mit Hilfe von Daten einiger anderer Stationen rund um den Tropengürtel, die man mit den GATE-Daten kombiniert, wird es möglich sein, die Kelvin-Wellen, die der globalen Scale zugeordnet werden müssen, zu analysieren.

Eine weitere wichtige Aufgabe des Synoptic-Scale-Unterprogrammes ist es, eine besonders genaue Beschreibung der synoptischen Scale für den östlichen Atlantik und den Westen Afrikas zu liefern. Dies ermöglicht Haushaltsstudien für die Zeiten, in denen sich ein Cloud Cluster im B-scale-Gebiet aufhielt und liefert eine gute Kenntnis der Umgebung des konvektiven Systems. Aus diesem Grunde war der mittlere Abstand der A-scale-

Schiffe in der Nähe des B-scale-Gebietes kleiner als im übrigen Atlantik, und außerdem wurden besondere Anstrengungen unternommen, um von den westafrikanischen Landstationen zwei aerologische Aufstiege am Tag zu erhalten.

Schließlich ist es Ziel des Unterprogrammes, vollständige und in sich konsistente Datensätze als Anfangswerte (initialization) und zur Verifizierung tropischer numerischer Modelle zu gewinnen. Von diesen Modellen erwartet man ein tieferes Verständnis der Scale-Interaction in bezug auf die synoptische Scale; diese Modelle sollen ferner den Test der Parametrisierungsmethoden ermöglichen. Dieses Ziel erforderte im Unterschied zu den anderen Unterprogrammen eine recht einheitliche Beobachtungsdichte innerhalb des GATE-Gebietes. Unglücklicherweise sind die im Experiment gewonnenen Daten stellenweise (im Inneren Afrikas und Südamerikas und über dem Atlantik südlich des Äquators) nicht genügend vollständig.

Das gewonnene Datenmaterial

Das gesamte Bild der synoptischen Scale hängt von der Integration der Daten aus den verschiedensten Quellen ab: Bei der Planung hatte man erwartet, daß das Netz der aerologischen Landstationen die wohl einheitlichsten und vollständigsten Daten von Windgeschwindigkeit, Temperatur, Druck und Feuchte liefern würde; nun rechnet man mit etwa 50% der Daten, die man von dem Experiment erhofft hat. Das Netz auf dem Atlantik arbeitete sehr gut, obwohl auch hier vor allem im Westen einige empfindliche Lücken durch teilweise oder völligen Ausfall einiger Schiffe auftraten. Auch die Satelliten lieferten wichtige Daten, die polarumlaufenden Temperaturprofile und Wolkenbilder. SMS-1 stand bei 45° über dem Äquator. Wie das Beispiel von Abb. 5.1.2 und Abb. 4.4 zeigen, gewann er ausgezeichnete Bewölkungsdaten von hoher Auflösung für das gesamte GATE-Gebiet mit Ausnahme der östlichen 20% (Ostafrika). Es sollte möglich sein, das Windfeld über dem Ozean sowohl an der oberen Troposphäre als auch nahe der Oberfläche aus der Bewegung der Wolken abzuleiten. Abb. 5.1.3 zeigt ein Beispiel für das Windfeld in den unteren Schichten der Atmosphäre, das MARTIN (unveröffentlichtes Manuskript 1975) aus vom Satelliten aus verfolgten Wolkenbewegungen über dem Atlantik für den 11. August 1974 analysiert hat. Die Positionen der GATE-Schiffe sind angegeben, um dem Leser einen Eindruck vom Maßstab und der Datendichte zu vermitteln. Zu diesen Satellitendaten kommen zum Nutzen des Synoptic-Scale-Unterprogrammes noch Messungen von Handelsschiffen, Verkehrsflugzeugen und den GATE-Forschungsflugzeugen hinzu. Die GATE-Flugzeuge konzentrierten ihre Messungen allerdings hauptsächlich auf das B-scale-Gebiet und seine unmittelbare Umgebung.

Auswertung der Daten und erste Ergebnisse

Das „Meteorological Office“ des Vereinigten Königreiches hat die Verantwortung für das Datenzentrum des Synoptic-Scale-Unterprogrammes und damit für die Zusammenstellung der entsprechenden Datensätze

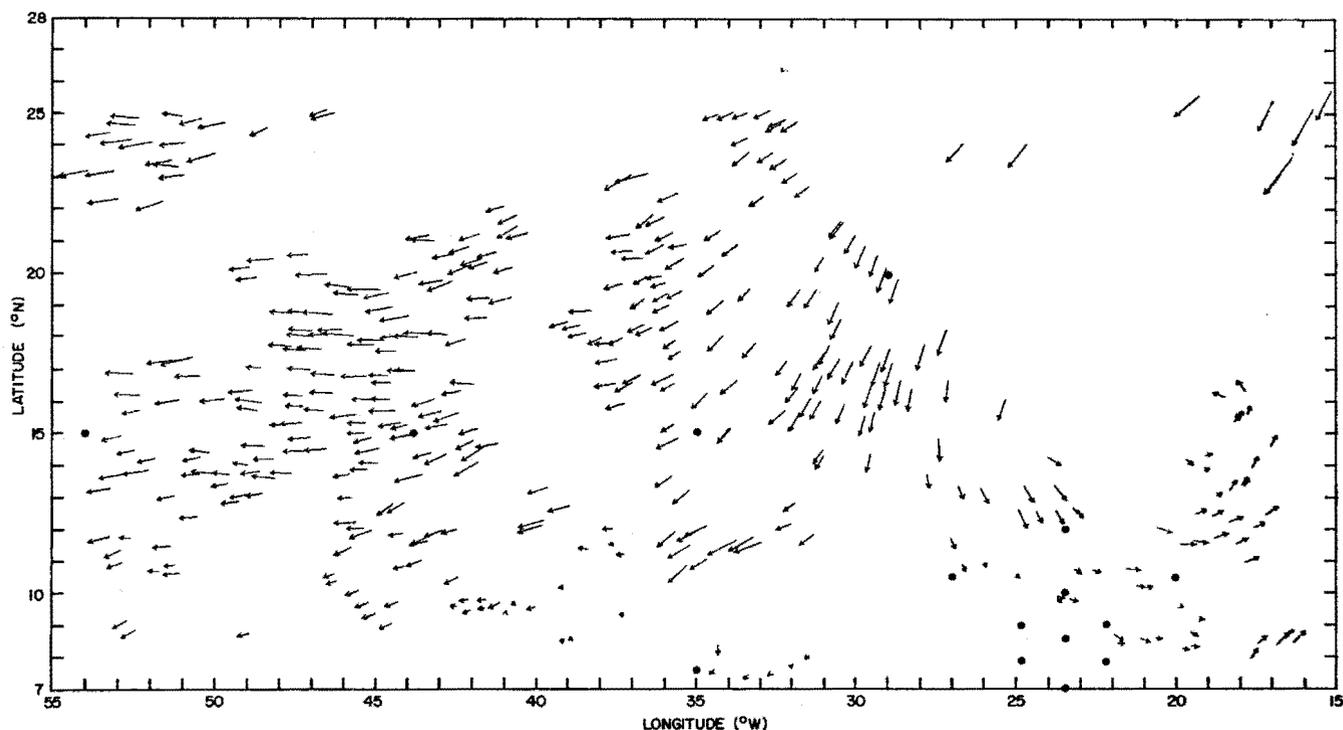


Abb. 5.1.3
Windfeld in den unteren Schichten der Troposphäre, abgeleitet aus SMS-1 Wolkenbildern für 12.00 und 12.30 am 11. 8. 74. Die Punkte kennzeichnen die Positionen der GATE-Schiffe. Nach MARTIN (1975).

übernommen. Einbezogen werden die Daten von allen Quellen, die oben genannt sind. Einige Daten erhielt das Zentrum „in near real time“ über das Wetternachrichtensystem, aber alle übrigen benötigen auf ihrem Weg über die nationalen Auswertezentren wesentlich länger. Einige Daten wurden in einem tropischen numerischen Modell des Meteorological Office schon benutzt. LYNE und andere (unveröffentlichtes Manuskript 1975) berichteten, daß diese Daten genügend Information enthielten, um die großskaligen Bewegungssysteme zu definieren; das Modell zeigte erste Erfolge bei Vorhersagen bis zu 72 Stunden. Man fand, daß das Fehlen der Daten über dem südlichen Atlantik sich nicht so gravierend auswirkte wie die intensive konvektive Aktivität über den südlichen Teilen Zentral-Afrikas. Letztere war nämlich verbunden mit stärkeren horizontalen Konvergenzen und Divergenzen, die ihrerseits unechte, sich schnell fortpflanzende Gravitationswellen im Modell erzeugten. MIYAKODA und andere (unveröffentlichtes Manuskript 1975) versuchten GATE-Daten zu benutzen, um den tropischen Datensatz für ein globales numerisches Modell zu verbessern, wobei sie Techniken der

vierdimensionalen Datenassimilation benutzten. Sie erhielten vernünftige endgültige Analysen, bemerkten jedoch auftretende Unzulänglichkeiten in den datenarmen Gebieten.

Vorläufige, rein beschreibende Studien, die die synoptic-scale-Daten von GATE benutzen, sprechen die Vermutung aus, daß es sogar noch weniger Einheitlichkeit in der Struktur der tropischen Störungen, die zusammen mit Cloud Clustern auftreten, gibt, als man erwartet hat. BURPEE (GATE Report Nr. 14) berichtet über zyklonale Strukturen im 850 mb Niveau, die mit konvektiver Aktivität verbunden waren, aber keine Beziehung aufwiesen zu den Wellen (easterly waves) in 700 mb. SIMPSON und SIMPSON (GATE Report Nr. 14) erwähnen den Fall eines konvektiv aktiven Gebietes, das nur in den oberen zwei Dritteln der Troposphäre anzutreffen war, darunter aber zyklonale Zirkulation und „Schönwetter“-Bedingungen aufwies. Die Daten zeigen jedenfalls klar, daß nun sehr viel Arbeit geleistet werden muß, um die Natur der synoptischen tropischen Systeme in ihrer Verknüpfung mit der organisierten Konvektion voll zu verstehen.

5.2

D. R. RODENHUIS, Genf

Das Konvektions-Unterprogramm*

Wissenschaftliche Zielsetzung

Das Konvektions-Unterprogramm befaßt sich unmittelbar mit den konvektiven Bewegungsformen sowohl als individuellen Konvektionszellen als auch als Ensemble konvektiver Elemente. Daher umfaßt es einen weiten Bereich von Scales von der sub-synoptischen Größe (Hunderte von km) bis zu der einzelner Wolken (~ 1 km).

Unser Interesse an den Wolken entspringt natürlich unserer Fragestellung nach der Wechselwirkung (scale interaction) zwischen den konvektiven Wolken und ihrer Umgebung: Welcher Mechanismus steuert ihre Intensität und Größe? Wie wird ihre Organisation in der Meso-Scale bewirkt? Welche verschiedenen Zustände durchlaufen sie in ihrem Lebens-Zyklus? Schließlich wollen wir nicht nur die Steuerung durch das großskalige Feld kennen lernen, sondern auch die Rückkopplung über Energie, Impuls und Feuchte mit der synoptischen Scale und mit den Störungen, die wir zu simulieren und vorherzusagen versuchen.

Das Programm ist vor allem auf konvektive Vorgänge hin orientiert, die in den Dimensionen tropischer Cloud Cluster (B-Scale) auftreten. Zwei Arten der Scale Interaction sind dabei von primärem Interesse: einmal die Wechselwirkung mit den synoptischen Störungen (siehe Beitrag 5.1), wie den Easterly Waves und der ITCZ, und dann die mit organisierten meso-scale-Strukturen (z. B. Schauerlinien), die ja einen Teil zum Gesamteinfluß des Clusters beitragen. Schließlich braucht man detaillierte Daten über individuelle Cumuli und ihre lokalen meteorologischen Bedingungen, damit man die Beobachtungen des Gesamteinflusses, die man aus der größeren Scale gewinnt, interpretieren kann.

All diese Daten werden benötigt, um quantitative Modelle der bewölkten Atmosphäre, in der die Scale Interaction eine bedeutende Rolle spielt, zu entwickeln und zu testen. In Beitrag 3 wurde klar gemacht, daß in den Modellen eine Parametrisierung der subskaligen Prozesse, deren Physik nicht explizit berücksichtigt werden kann, notwendig ist. Das eigentliche Ziel des Konvektions-Unterprogrammes ist es daher, über das bloße Verständnis der konvektiven Wolken und ihrer Dynamik hinaus zu einer erfolgreichen Parametrisierung der damit verbundenen physikalischen Prozesse zu gelangen.

Anlage des Experimentes

Bei der Planung des Beobachtungsnetzes, das der oben erläuterten Zielsetzung entsprach, war es zweckmäßig, vier Teile des Konvektions-Unterprogrammes zu unterscheiden. Diese Teil-Experimente beziehen sich auf Beobachtungen in verschiedenen Scales:

1. das B-scale Budget-Experiment;
2. die Erfassung der Bewölkungsfelder in der A-Scale;
3. Experimente in der Meso-Scale;
4. Experimente zur Wolkenphysik.

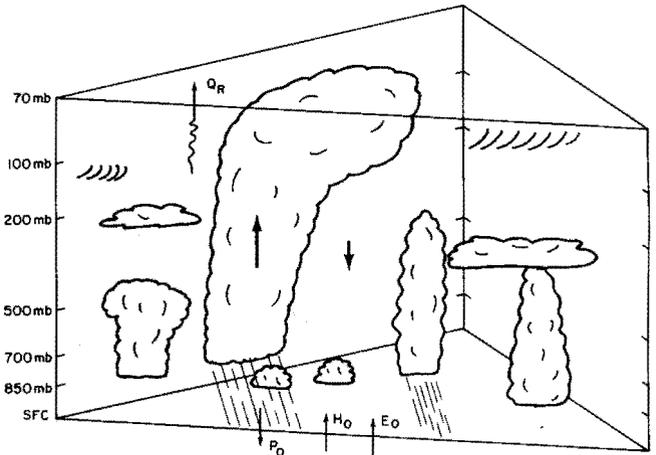


Abb. 5.2.1

Schema eines Luftvolumens, dessen Ecken durch Radiosonden-Aufstiege definiert sind. Auf ein derartiges Volumen beziehen sich quantitative Berechnungen der Budgets von Wärme, Masse, Feuchte und Impuls. Die Symbole bedeuten: Q_R = Erwärmung durch Strahlungsvorgänge, P_0 = Niederschlag an der Oberfläche, H_0 und E_0 = turbulente Ströme fühlbarer und latenter Wärme an der Oberfläche.

Das B-scale Budget-Experiment — Eine der besten Methoden, die in der Atmosphäre vor sich gehenden Änderungen quantitativ zu erfassen, ist die Bestimmung der Komponenten des Massen- und des Energiehaushaltes für ein kleines Volumen (Abb. 5.2.1). Zur Vervollständigung der Analyse mögen ferner auch die Terme der Bewegungsgleichung und des Wasserdampfaushaltes gemessen werden. Es gibt viele Beispiele für diese Art der Analyse in der Literatur (z. B. BRUMMER et al. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 100, S. 109).

In dieser Art von Analyse müssen meist einige Annahmen gemacht werden, die den Satz der Budget-Gleichungen einem bestimmten Problem anpassen. Da ferner der Haushalt ausgeglichen sein muß, ist es möglich, einen der Terme als Restglied zu berechnen, wenn alle anderen gemessen wurden. Wir nehmen die thermodynamische Energiegleichung [3.2] (s. Beitrag 3 und die dortigen Erläuterungen) als Beispiel. Das B-scale-Beobachtungsnetz (s. Abb. 4.3) wurde so aufgebaut, daß alle Terme der linken Seite von Gl. [3.2] aus den Messungen berechnet werden können, womit man Q_1 erhält. Ferner erlauben unabhängige Messungen der Erwärmungsrate durch Strahlung (Q_R) (s. Beiträge 3 und 5.4) und der Flüsse in der Grenzschicht, diese in Q_1 enthaltenen Einflüsse abzutrennen. Das Endergebnis ist ein Restglied

$$\left[L(c-e) - \frac{\partial}{\partial p} s' w' \right] \text{Cumuli} \quad [5.2.1]$$

das nur noch von Größe und Intensität der Cumuli abhängt. Dieser Term ist ein quantitatives Maß für das

* Übersetzung aus dem Englischen: H. KRAUS

Wort „Interaction“ (Wechselwirkung), das oben öfters benutzt wurde. Es ist verständlich, daß die rechte Seite von [3.2] die Rückkoppelung der konvektiven Aktivität in die größere Scale (ausgedrückt durch die $(\bar{\quad})$ -Größen) beschreibt. Wenn andererseits Q_1 für eine Anzahl von verschiedenen Situationen oder verschiedenen Werten der $(\bar{\quad})$ -Größen (z. B. verursacht durch atmosphärische Wellen oder Verlagerungen der ITCZ) berechnet ist, dann besitzen wir auch ein Maß für die Steuerung von Menge und Intensität der Cumuli durch die Variablen der synoptischen Scale. Wir sehen, daß so ein ziemlich vollständiges Verständnis der thermodynamischen Wechselwirkung zwischen den Konvektionselementen und der synoptischen Scale ermöglicht wird. Andere Gleichungen ähnlicher Form für Vorticity und Wasserdampf werden zur Vervollständigung der Analyse benutzt. Beispiele aus Ergebnissen solcher Untersuchungen, die vor GATE stattfanden, zeigt Abb. 5.2.2. Es ist offensichtlich, daß man sehr verschiedene Ergebnisse bei unterschiedlichen synoptischen Situationen erhält.

Es ist natürlich möglich, das oben erwähnte Restglied auch direkt zu messen. Wenn dieser Term vertikal integriert wird über jene Atmosphärenschichten, die die Konvektion enthalten, dann ist es klar, daß der Niederschlag (über das Restglied) in Beziehung steht zu den Flüssen an der Wolken-Basis. In GATE wurden Niederschlagsmessungen durch Wetterradargeräte und direkte Beobachtungen auf den 13 B-scale-Schiffen (s. Abb. 4.3) durchgeführt. Flugzeuge mit empfindlicher „Gust-Probe“-Instrumentierung auf stabilisierten Trägheitsplattformen konnten die Vertikalgeschwindigkeit und die vertikalen Flüsse von Impuls, Feuchte und fühlbarer Wärme messen. Das Flugzeugprogramm soll jedoch nicht hier, sondern etwas ausführlicher bei den Meso-scale-Experimenten beschrieben werden.

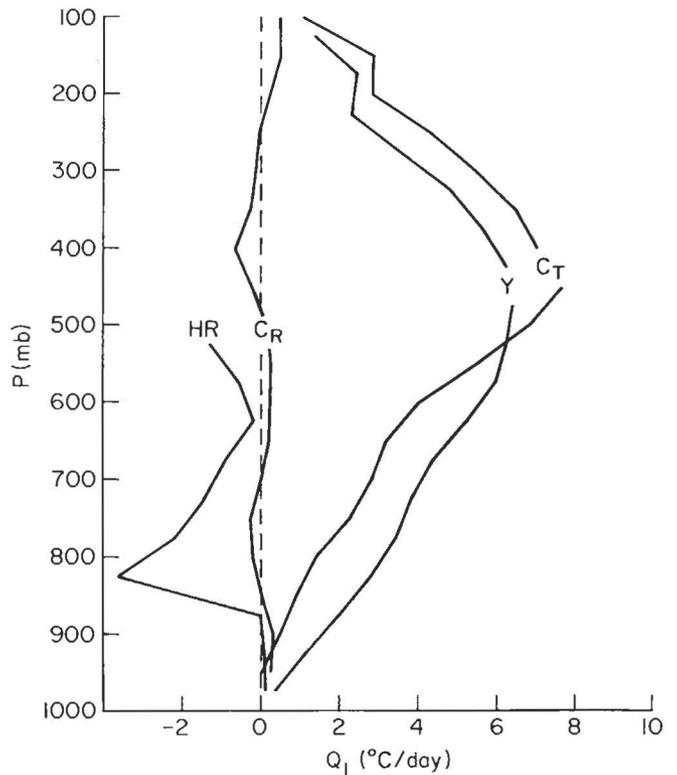


Abb. 5.2.2
 Verschiedene Ergebnisse für Q_1 :
 C_T Trog Easterly Wave im Pazifik (nach OGURA und CHO, J. Atmos. Sci. 31, S. 2058)
 C_R Rücken Easterly Wave im Pazifik (Quelle wie C_T)
 Y Composite aus Messungen im Pazifik (nach YANAI et al. J. Atmos. Sci. 30, S. 611)
 HR Composite aus fünf BOMEX-Tagen (nach HOLLAND und RASMUSSEN, Mon. Wea. Rev. 101, S. 44)

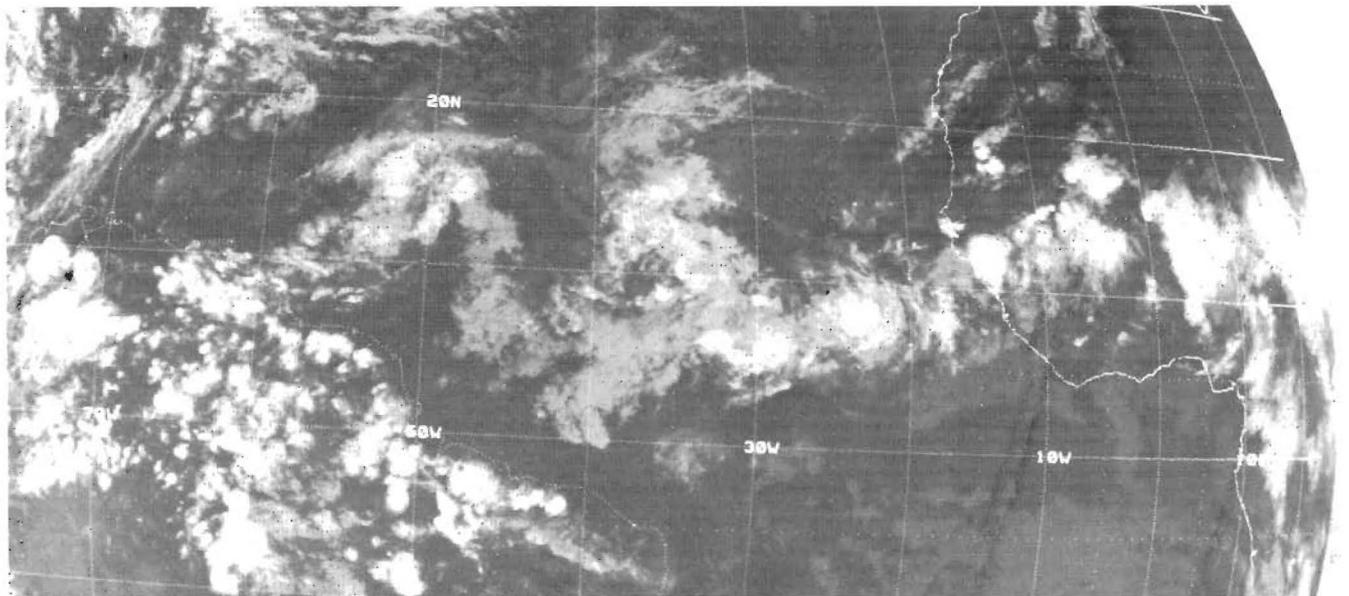


Abb. 5.2.3
 IR-Aufnahme von SMS-1 (Ausschnitt). Auffallend sind die ausgeprägten Wellenstörungen über dem tropischen Atlantik und die intensiven Cloud Cluster im östlichen Atlantik.

Die Untersuchung der Felder der konvektiven Bewölkung in der synoptischen Scale wurde oben als zweites Teil-Experiment genannt. Dies überschneidet sich natürlich mit dem Anliegen des Synoptic-Scale-Unterprogrammes. Das wohl nützlichste Hilfsmittel für eine so weitreichende (im räumlichen Sinne) Studie sind wohl die Satellitenbilder, besonders die von SMS-1. Abb. 5.2.3 zeigt ein eindrucksvolles Beispiel, auf dem man quer über den tropischen Atlantik Cloud Cluster und Wellen als Teile der Innertropischen Konvergenzzone erkennt. Mit Hilfe der Fülle der Satellitendaten (s. Beitrag 4) wird derzeit ein „Inventar“ konvektiver Systeme, ihrer Koordinaten und Lebensdauer angelegt. Die so zusammengetragenen Daten sollen dann verglichen werden mit von anderen Plattformen aus (Schiffen, Flugzeugen) beobachteten Größen, die wie z. B. Niederschlag oder Oberflächentemperatur mit der Bewölkung korreliert sind. Wenn die infraroten und sichtbaren Satellitenbilder mit Hilfe der Beobachtungen im B-scale-Gebiet „geeicht“ werden können, dann kann man die Satellitenbeobachtungen für ein weiteres Gebiet des tropischen Atlantiks heranziehen, um Niederschlagswerte und die Windgeschwindigkeit in den Schichten, in denen die Bilder Wolken zeigen, zu bestimmen.

Experimente in der Meso-Scale — Wenn man die Cloud Cluster genauer anschaut, so besitzen sie offenbar auch eine deutliche Meso-scale-Struktur (s. Abb. 3.2). Außerdem ist die intensivste Konvektion außerhalb von Clustern meist an linien- und bogenförmige Zellen in der Meso-Scale gebunden. Wir erkennen dies auf dem sichtbaren Satellitenbild (Auflösung 0,5 mm) der Abb. 5.2.4. Die sich entwickelnde Konvektion im unteren Bildteil gehört zu einem jungen Cloud Cluster, während andere Konvektionslinien sich bereits im Dissipationsstadium befinden.

Obwohl der Blick vom Satelliten uns einen einzigartigen Einblick in die Entwicklung der Konvektion bietet, so beruhen doch die Beobachtungen in der Meso-Scale vor allem auf dem Netz der Wetter-Radar-Geräte und dem koordinierten Flugzeugeinsatz.

Für das Radar-Programm ist die Überdeckung des B-scale-Gebietes durch die zum Einsatz gelangten C- und X-Band-Geräte (s. Abb. 4.3) wesentlich. Durch häufige Messungen (alle 15 Minuten) erhielt man eine gute Auflösung der konvektiven Elemente in Zeit und Raum. Zur Interpretation der aus dem Radar-Netz gewonnenen Bilder und Niederschlagsraten dienen die Zeitreihen der Oberflächendaten, die Radiosonden-Aufstiege und die Beobachtungen mit Hilfe von Fesselballons (s. Beitrag 5.3). Während der dritten Phase des Experiments wurde mit sieben zusätzlichen Schiffen in NE des B-scale-Gebietes ein C-scale (Meso-scale)-Experiment durchgeführt, um die Auflösung des Beobachtungsnetzes vor allem im Hinblick auf die planetarische Grenzschicht und die ozeanographischen Messungen zu verbessern.

Eine der für das Konvektions-Unterprogramm wichtigsten Flugzeugmissionen hatte die Untersuchung der

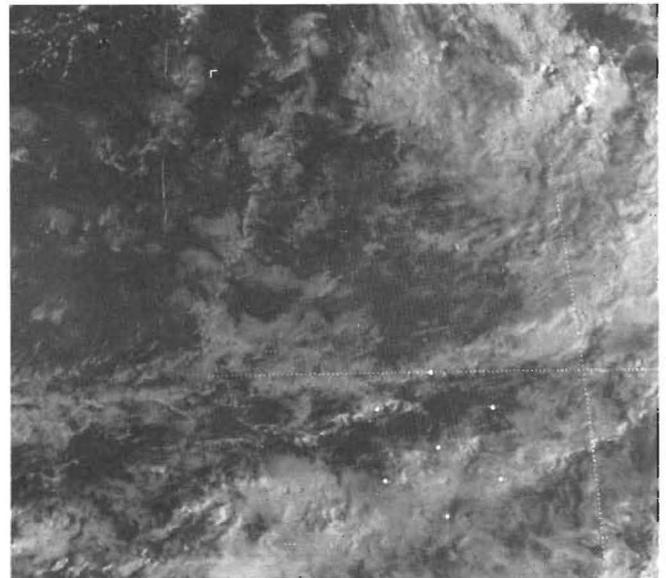


Abb. 5.2.4
SMS-1 Aufnahme im sichtbaren Bereich mit höchster Auflösung (0,5 nm). Die intensivste Konvektion tritt in Meso-scale-Linien und -Bögen auf. Die Punkte deuten die Schiffe des inneren Hexagons an.

Meso-scale-Konvektion zum Ziel. Abb. 5.2.5 zeigt ein Schema dieser Art des Flugzeugeinsatzes, Abb. 5.2.6 die Planskizze einer wirklich erfolgten Mission. Das Ausmessen der Konvektionselemente mit Flugzeugen hat zu einem riesigen Datenmaterial über die Struktur der Atmosphäre in Wolkenfeldern geführt. Wenn ein geschlossenes Volumen mehrmals in verschiedenen Höhen umflogen wurde, können auch die Budgets von wichtigen Variablen berechnet werden.

Experimente zur Wolkenphysik — Obwohl die Hauptanstrengungen des Konvektions-Unterprogrammes dahin gehen, den Gesamteffekt der Cumulus-Wolken verstehen zu lernen, so ist es prinzipiell auch möglich, den Gesamteffekt durch das Aufaddieren der Beiträge individueller Wolken zu konstruieren, wenn wir einmal annehmen, daß keine Wechselwirkung zwischen den konvektiven Elementen besteht. Wenn man diesen Weg einschlagen würde, so wäre es wichtig, intensive Messungen in individuellen Cumulonimben durchzuführen.

Obwohl diese Methode in GATE nicht angewandt wird, so benötigt man doch Messungen der turbulenten Flüsse und der Zustandsgrößen in der unmittelbaren Umgebung der Wolken. Diese Daten werden sehr dienlich sein zum Vergleich mit denen, die man aus parametrischen oder empirischen Modellen (s. Beitrag 3) gewinnt. Hinzu kommt, daß diese Beobachtungen von großem Wert sind, um Struktur und besondere Eigenschaften tropischer Cumuli kennenzulernen.

Dieses Teil-Experiment fußt ganz auf dem Einsatz gut instrumentierter Flugzeuge, wobei die „Gust-Probes“ eine besondere Bedeutung besitzen. Eine Reihe von Einsätzen galten eigens wolkenphysikalischen Untersuchungen, daneben trugen aber auch die innerhalb des Meso-scale-Experimentes erfolgten Flüge durch die Kerne der Konvektionszellen in verschiedenen Höhen zu diesem Telexperiment bei.

Ergebnisse

Selbst heute, ein Jahr nach Abschluß der Feldphase, ist es verfrüht, über wissenschaftliche Ergebnisse des Experimentes zu berichten. Die meisten Daten sind noch in der Hand nationaler Organisationen, die für die Messungen verantwortlich waren. Allmählich beginnen nun die Daten von den einzelnen Ländern zum Convection Subprogramme Data Center und den beiden World Data Centres (Moskau und Washington) zu fließen. In der Zwischenzeit haben Wissenschaftler nur vorläufige oder unvalidierte Daten als Grundlage zu ihrer Arbeit gehabt, die meist direkt von ihren Untersuchungen an Bord der Schiffe oder aus dem GOCC in Dakar stammen. Eine Sammlung von daraus abgeleiteten ersten Ergebnissen wurde in GATE Report Nr. 14 veröffentlicht. Daraus seien einige hier wiedergegeben.

Cloud Cluster — Für die Cloud Cluster wurde eine ziemlich kurze Lebensdauer von im Mittel etwa 24 Stunden festgestellt. Sie sind schwer zu definieren außer vom Satelliten aus, von wo sie auch leicht klassifiziert und in ihrer Bahn verfolgt werden können. Überraschenderweise liegt die Zeit ihres ersten Erscheinens um Mitternacht, während ein Maximum der Helligkeit (im Satellitenbild) als Folge des Ausflusses im

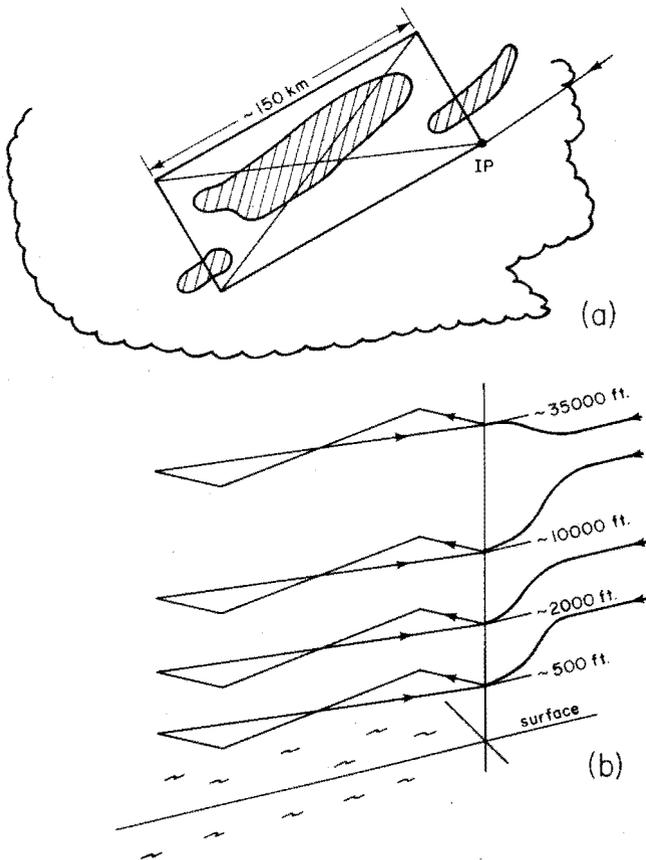


Abb. 5.2.5

Skizze von Flugstrecken zur Untersuchung von mesoscale-Konvektion in einem Cloud Cluster; ebene Projektion (a), schraffiert sind die Gebiete intensiver Konvektion; perspektivische Skizze (b) eines koordinierten Einsatzes mehrerer Flugzeuge. IP = Initial Point, Anfangspunkt des „flight pattern“.

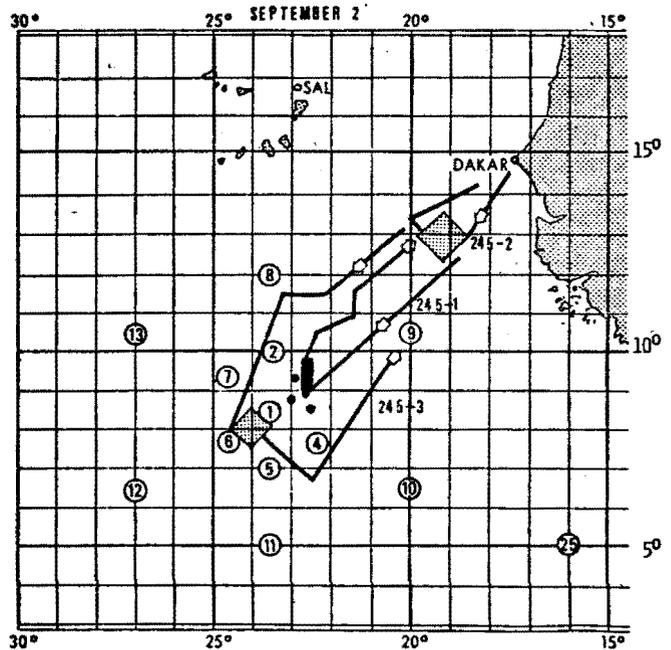


Abb. 5.2.6

Flugzeugeinsatz am Tag 245 (2. September) 1974. Mission 245-1 wurde von 6 übereinandergestaffelten Maschinen geflogen, die einen Cloud Cluster intensiv untersuchten, die beiden anderen Einsätze von je einem Flugzeug, und zwar 245-2 für das ozeanographische Unterprogramm und 245-3 zur Untersuchung des synoptischen Feldes.

Cirrus-Niveau in die späten Tages(licht)stunden fällt. Die Cluster sind keineswegs „monolithische“ Elemente; sie erscheinen eher (vor allem für den Beobachter in einem Flugzeug) recht diffus mit sehr wenigen aktiven konvektiven Elementen oder Linien. Man findet sie sowohl über dem afrikanischen Kontinent als auch über dem Ozean, und sie definieren in etwa die Gebiete des Bewölkungsmaximums, das als ITCZ bekannt ist.

Konvektion in der Innertropischen Konvergenzzone und in tropischen Wellen — Wellen, die aus dem afrikanischen Kontinent kamen (definiert durch Änderungen in der Bewölkung und der meridionalen Windgeschwindigkeit) bewegten sich auf den Atlantik hinaus. Nach einer Periode der Angleichung an den neuen Untergrund setzten sie ihre Bewegung nach Westen über das B-scale-Gebiet mit einer Periode von 3 bis 5 Tagen fort. Die Strömungsverhältnisse und die Bewölkungszunahme in der ITCZ standen in einem regelmäßigen und engen Zusammenhang mit dem Durchzug dieser Wellen. Es gibt jedoch Anzeichen, daß die Strömung in höheren Schichten und die meridionale Zirkulation der südlichen Hemisphäre auch teilhatten an der Steuerung von Lage und Intensität der ITCZ.

Meso-scale-Konvektion — Die Meso-scale-Linien und Bögen, die durch Flugzeugeinsätze untersucht wurden, zeigten sich als äußerst kurzlebig. Zwischen der Zeit, zu der sie entdeckt oder erkannt wurden, und der Zeit, zu der die Flugzeuge in ihrer Nähe zum Einsatz kamen, wuchsen sie, kamen zur Reife und dissipierten. Dies

mag einer der Gründe dafür sein, daß Flugzeuge, die durch die Konvektionszellen flogen, nicht sehr häufig starke Turbulenz vorfanden. Die Feinstruktur dieser Linien war sehr ausgeprägt mit Werten von Divergenz und Vorticity in derselben Größenordnung (10^{-3} s^{-1}). Äußerst scharfe Abwinde (down drafts) wurden sowohl im Luv als auch im Lee als auch im Innern der Wolkenmasse gemessen.

Eine andere interessante Erscheinung, die den Flugzeugbeobachtern besonders auffiel, war die sehr unterschiedliche Größe der konvektiven Elemente. Oft erschien die Konvektion mit diffusen „Wurzeln“ in der mittleren Troposphäre anstatt in der planetarischen Grenzschicht. Diese Beobachtung hat bedeutende Folgen für die parametrischen Modelle der Cumulus-Wolken.

Wolkenphysik — Zusätzlich zu den Beobachtungen der Feinstruktur der Cumuli (s. o.) wurden eine Reihe von interessanten Beobachtungen von Tropfengrößen-Spektren, Wassergehalt und Kondensations-Kernen gewonnen. Diese Beobachtungen aus einer relativ kleinen Anzahl von Wolken sind so selektiv, daß sie kaum verallgemeinert werden können, ehe nicht mehrere Forscher Gelegenheit zu einem Vergleich ihrer Ergebnisse gehabt haben. Dennoch scheint die Anzahl der Kondensationskerne allgemein sehr klein zu sein. Diese Beobachtung bedeutet, daß nur eine beschränkte Anzahl von Tropfen wachsen kann, die konsequenterweise zu größeren Dimensionen anwachsen. In welchem Maße diese Erscheinung eine allgemeine Eigenschaft tropischer maritimer Konvektion ist, kann noch nicht gesagt werden.

5.3 H. HOEBER, Hamburg Das Grenzschicht-Unterprogramm

1. Die Wechselwirkung zwischen der durchmischten Schicht und der Wolkenschicht*). Der instationäre Charakter der tropischen Cloudcluster ließ erwarten, daß ihr Durchzug nicht ohne Folgen für die thermodynamische und dynamische Struktur der Grenzschicht bleiben würde. Dies wiederum würde sich — durch veränderte vertikale Energie- und Impulsflüsse, durch Variationen in der unterliegenden Ozeanschicht oder auch durch Modifizierung des großräumigen Konvergenzfeldes — im Lebenslauf der Cluster bemerkbar machen. Ob und wann solch eine Rückkopplung positiv oder negativ wirken würde, blieb zu untersuchen.

2. Die Wechselwirkung zwischen atmosphärischen Systemen verschiedener Größenordnung. Wie im gesamten GATE-Programm, so spielte auch in der Planung zum Grenzschicht-Unterprogramm dieser Themenkreis eine wesentliche Rolle. Energieübergänge zwischen den verschiedenen Skalen beeinflussen zweifellos das Entstehen und Vergehen der Cluster sowie ihre Wirkung nach außen, d. h. auf die großräumige Zirkulation. Welche Skalen in der Grenzschicht dabei mitwirken und in welcher Richtung der Energiefluß vor sich geht, war Teil des Untersuchungsziels. Messungen zur Haushaltsberechnung auf verschiedenen Skalen und die Gewinnung ausreichend langer Zeitreihen zur spektralen Auswertung standen deshalb auf dem Programm.

3. Die Dynamik der planetarischen Grenzschicht im makroskaligen Bereich, insbesondere in äquatorialen Breiten. Das dynamische Feld in Äquatornähe ist erstens inhomogen wegen des durch den afrikanischen Kontinent aufgebauten monsonalen Druckgradienten und zweitens baroklin wegen beträchtlicher, durch kalte Auftriebswasser am Äquator entstehender, horizontaler Oberflächentemperaturgradienten. Da der Coriolis-term klein ist, gewinnen die Trägheitsterme an Bedeutung. Modelle der Dynamik der Grenzschicht, die auf der alten Ekman'schen Vorstellung aufbauen, dürf-

ten deshalb ihre Gültigkeit verlieren, und das Beobachtungsmaterial zur Aufstellung neuer Modelle war zu gewinnen.

Aus diesen wissenschaftlichen Zielsetzungen resultierte ein konkretes Meß- und Beobachtungsprogramm, das — basierend auf den von den Nationen gemeldeten Plattformen und Geräten — genaue Vorschriften über Schiffsstationierung, Flugzeugeinsatz, Meßfolge, anzustrebende Genauigkeit usw. machte. Die wesentlichsten Komponenten dieses Meßprogramms wurden in Promet 1'74 beschrieben und brauchen hier nicht wiederholt zu werden.

Soweit der Plan. Ein Jahr nach Abschluß der Feldphase läßt sich sagen, daß dieses Teilprogramm erfolgreich ausgeführt wurde. Eine Reihe von Tatsachen rechtfertigt diese Aussage:

— alle Schiffe mit speziellen Grenzschichtmeßsystemen standen zur Verfügung und besetzten ihre Stationen entsprechend dem Schiffsverteilungsplan und dem Zeitplan;

— die für dieses Teilprogramm eingeplanten Meßsysteme (insbesondere Fesselballone, Struktursonden, Pilotballone, Bojen, Bodenmeßsysteme hoher Auflösung) arbeiteten zufriedenstellend, nachdem einige Kinderkrankheiten in der ersten Phase überwunden werden konnten;

— drei Perioden für Vergleichsmessungen, an denen alle Grenzschichtschiffe teilnahmen, wurden erfolgreich absolviert, so daß eine Abschätzung der Datenqualität und der Fehlerbereiche möglich ist;

— drei Langstreckenflugzeuge und ein Kurzstreckenflugzeug, ausgerüstet mit Wind-, Temperatur- und Feuchtesensoren kleiner Zeitkonstante zur Messung der Impuls- und Energieflüsse konnten während des gesamten Zeitraums teilnehmen; 20 Gruppenflüge mit insgesamt 70 Starts wurden allein für das Grenzschicht-Unterprogramm absolviert, wobei kaum instrumentelle Ausfälle zu verzeichnen waren;

* Zur Definition des Schichtenaufbaus: siehe Promet 1'74.

— insbesondere in der dritten Phase war die Zusammenarbeit zwischen Schiffen und Flugzeugen ausgezeichnet; fast alle Missionen wurden im Schwerpunkt des Schiffs-Arrays (im C-scale Dreieck) geflogen, wobei das schwierige flugsicherungstechnische Problem des gleichzeitigen Einsatzes von Fesselballonen und Flugzeugen unterhalb 500 m Höhe gelöst werden konnte; integrierte Datensätze von Bojen, Schiffen und Flugzeugen können erarbeitet werden;

— schließlich waren auch die meteorologischen Bedingungen so vielseitig wie erhofft, so daß ungestörte und gestörte Perioden, Phasen des Entstehens und des Vergehens von Clustern, zum überwiegenden Teil unmittelbar über dem Schwerpunkt des Schiffs-Arrays, erfaßt werden konnten. Im folgenden wird versucht, einen Einblick in die wissenschaftliche Ausbeute einschließlich erster, meist vorläufiger Ergebnisse zu vermitteln.

In der wassernahen Luftschicht wurde eine Reihe von Strukturuntersuchungen der atmosphärischen Turbulenz angestellt, die neben Aussagen über das hochfrequente Ende des Spektrums auch die Bestimmung der turbulenten Flüsse von Impuls, sensibler und latenter Wärme zulassen. Zusammen mit Messungen der vertikalen Gradienten, die an einer Station auf einer Boje, an anderen Stationen auf dem Schiff (Bugausleger) gewonnen wurden, erlauben die direkten Flußmessungen die Bestimmung der Transportkoeffizienten, insbesondere auch unter gestörten, d. h. Cluster-Bedingungen. Erste Auswertungen zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen den GATE-Messungen aus der innertropischen Konvergenzzone und früheren Ergebnissen aus dem ungestörten Passat, jedoch steht eine detaillierte Untersuchung des Einflusses tropischer Konvektion auf die Fluß-Gradientbeziehung noch aus.

Felder der Energie- und Impulsflüsse an der Grenzfläche Ozean — Atmosphäre lassen sich berechnen, die entweder als Randwerte für Haushaltsrechnungen der gesamten Atmosphäre oder als Eingabegrößen für Rechenmodelle der tropischen Zirkulation benötigt werden. Schon eine grobe Untersuchung zeigte, daß z. B. die Verdunstung und damit die lokale Zufuhr latenter Wärme um den Faktor 2 bis 3 beim Durchzug eines Clusters erhöht wurde. Derartige Maxima traten regelmäßig mit der Cluster-Frequenz von 4 bis 5 Tagen im Gebiet der ITCZ auf und machen sich teilweise bis weit in den Passat hinein bemerkbar.

Welche Rolle bei Variationen der Energieflüsse die oberste Schicht (Deckschicht) des Ozeans spielt, wird sich an Hand eines umfangreichen ozeanographischen Datenmaterials klären lassen. Die Wasseroberflächentemperatur wurde großskalig — z. T. mit Hilfe von Satelliten, deren Ergebnisse durch direkte Messungen verifiziert wurden, — und kleinskalig — mit Hilfe von Strahlungsthermometern in Flugzeugen — erfaßt. Auch hier wurde eine beträchtliche Variabilität und z. B. eine negative Korrelation mit der konvektiven Aktivität der Atmosphäre im Periodenbereich von vier Tagen festgestellt (PETROSSIANTS et al., GATE Report Nr. 14), während großskalig die Lage der ITCZ recht gut mit dem etwa bei 5—10 °N zonal sich erstreckenden Tempe-

raturmaximum übereinstimmte. Im C-scale Bereich werden Energiehaushaltsberechnungen der durchmischten Schicht zur Klärung dieser Variationen und ihrer Bedeutung für den Lebenslauf der Cluster beitragen.

Ein riesiges Material von Messungen der Bodenwerte (Windvektor, Temperatur, Feuchte, Druck) liegt vor, das — teilweise mit Abfragefolgen von 0,5 Hz — mit Geräten an Bojen oder Bugauslegern von B-scale Schiffen gewonnen wurde. Hierdurch werden umfassende Aussagen über die mesoskalige Struktur der wassernahen Luftschicht möglich. Die Qualität, insbesondere die Vergleichbarkeit dieser Daten, wurde dadurch geprüft, daß die beteiligten Schiffe insgesamt dreimal zu Vergleichsmessungen zusammenkamen. Die in den Plänen angestrebte Genauigkeit scheint nach ersten Untersuchungen gewährleistet zu sein; selbst beim Luftdruck — auf Schiffen bekanntermaßen eine der am schwierigsten zu messenden Größen — sollte sich bei sorgfältiger Analyse die für viele Probleme ausreichende relative Genauigkeit von $\pm 0,1$ mb erreichen lassen.

Der Schwerpunkt des Unterprogramms „Planetarische Grenzschicht“ lag jedoch in den höheren Schichten der Grenzschicht, d. h. in der durchmischten Schicht und der Wolkenschicht bis hinauf — bei ungestörten Bedingungen — zur Passatinversion. Hier sorgten Schiffe mit Fesselsonden (Station 1, 2, 3, 4, 5, 6, 28, 29) und frei fliegenden Struktursonden (Station 1, 27, 28 in Phase III) sowie die speziellen Grenzschichtflugzeuge für entsprechende Daten. Weiterhin wurden Systeme zur Erfassung des detaillierten Windprofils sowie ein Schallradar (Abb. 5.3.1) eingesetzt.

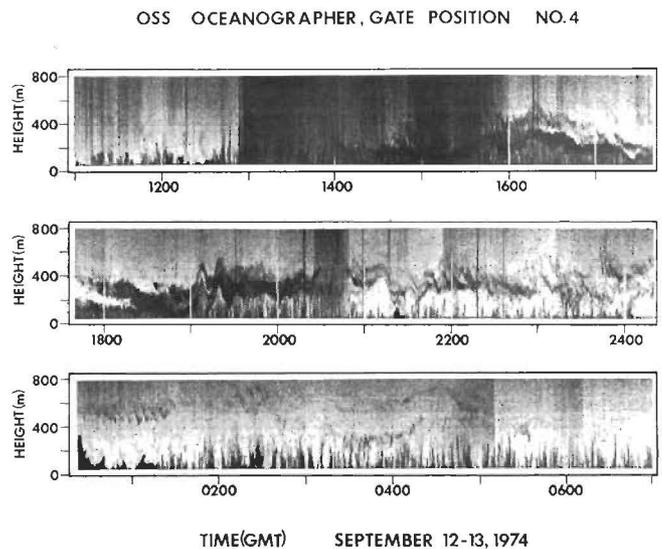


Abb. 5.3.1

Registrierung des vom Wave Propagation Laboratory der NOAA/ERL entwickelten Schallradars. Um 12.50 Uhr einsetzender und bis 16.00 Uhr andauernder Schauerregen erscheint in der Registrierung schwarz. Danach wird eine komplex strukturierte Schichtung mit doppelter Inversion und wellenartigen Störungen sichtbar, die erst am nächsten Morgen gegen 5.00 Uhr verschwindet. Das Bild stellte freundlicherweise Peter A. MANDICS zur Verfügung, von dem auch die Messungen an Bord des „Ocenographer“ durchgeführt wurden.

Die Ausbeute an Daten auf diesem Gebiet ist beträchtlich und übertrifft die Erwartungen. Zwar zeigten sich besonders bei den Fesselsonden in der ersten Phase schwerwiegende Mängel, die insbesondere die Datenerfassung unter gestörten Verhältnissen, z. B. beim Durchzug von Schauern und Böenfronten, behinderten. Doch konnten die Sonden späterhin regenfest gemacht werden, so daß teilweise mit Grenzschichtprofilen oder Zeitreihen in konstanten Höhen auch die Modifikationen der Grenzschicht bei intensiver Konvektion vermessen werden konnten. Detaillierte Auswertung wird Aufschluß darüber geben, wie der Schichtenaufbau und die Kopplung der Schichten untereinander wirken, und wie etwa Inversionen unter dem Einfluß der Konvektion abgebaut und neu gebildet werden.

Abb. 5.3.2 zeigt als Beispiel Zeitreihen der Windgeschwindigkeit, gemessen in 355 m, 640 m und 940 m Höhe auf der DALLAS (Station 28) am 15. 9. 74 während einer Schönwetterperiode. Bemerkenswert ist dabei nicht nur die Größe der Variationen, deren Amplitude dem Wert des mittleren Betrages entspricht, sondern auch die gute Korrelation zwischen den einzelnen Schichten. Dieses Bild ändert sich vollständig beim Auftreten von Konvektion, wo sich die mit größeren Cumulonimben verbundenen vertikalen Zirkulationssysteme bemerkbar machen und beispielsweise Windscherungen von 180 Grad innerhalb der untersten 300—400 m beobachtet wurden, die von den aus der Schauerwolke herauswehenden kalten Abwinden verursacht werden. Da die Lage größerer Konvektionszellen durch Radar und Satellitenfotos dokumentiert ist, lassen sich diese Grenzschichtmodifikationen als Funktion der Konvektion ausgezeichnet untersuchen.

Als Beispiel für einen gestörten Fall geben Abb. 5.3.3 und 5.3.4 Registrierungen wieder von Vertikal- und Horizontalwind, gemessen mit Fesselsonden am 3. 9. 74 wiederum an Bord der Dallas. Hier wurde bei I und O die Ein- bzw. Austrittszeit der obersten Sonde in eine Schauerwolke durch einen Wolkensensor (Photozelle) bestimmt. Obwohl charakteristische Auf- und Abwindschläuche in allen vier Höhen wiedererkennbar sind, läßt sich beim Horizontalwind keine besondere vertikale Korrelation zwischen Wolkenschicht und durchmischter Schicht feststellen. Während in 350 m die Windgeschwindigkeit sich um den Faktor 2 erhöht (siehe Abb. 5.3.4), bleiben die Verhältnisse in den übrigen Höhen vor und nach Durchzug der Wolke im wesentlichen gleich, so daß also ein beträchtliches Quantum an Impuls in die Schicht von 350 m seitlich hineintransportiert worden sein muß. Derartige Verhältnisse sind aber durchaus nicht einheitlich bei allen Störungen zu beobachten. Vielmehr scheint jede Wolke ein Eigenleben zu führen, von dem das Gemeinsame an Hand des umfangreichen Materials erst noch isoliert werden muß.

Die turbulenten vertikalen Flüsse wurden z. T. mit Fesselsonden, aber überwiegend mit Flugzeugen zwischen der Meeresoberfläche und etwa 1500 m in einer Reihe von kombinierten Flügen erfaßt. Abb. 5.3.5 zeigt die

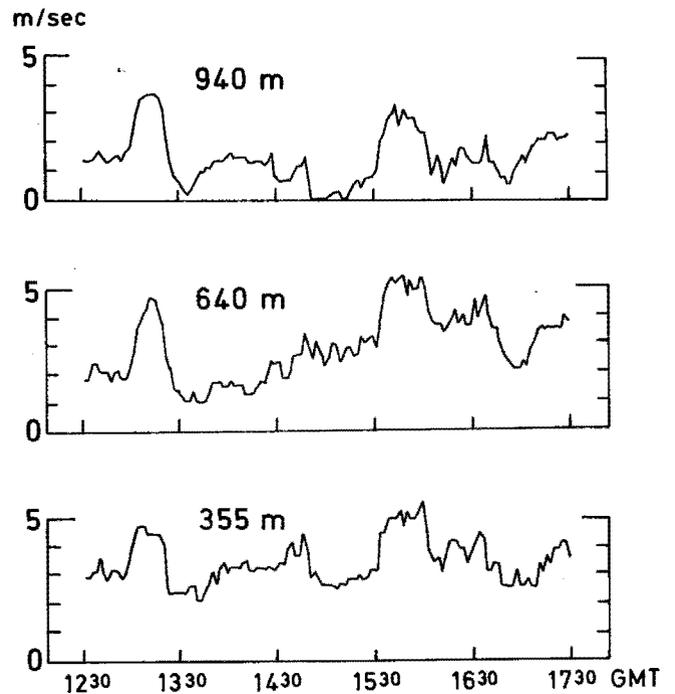


Abb. 5.3.2
Zeitreihe der horizontalen Windgeschwindigkeit in drei verschiedenen Höhen, gemessen von Fesselsonden auf „Dallas“ am 15. 9. 1974 bei ungestörter Wetterlage. Nach LE MONE, PENNELL und GARSTANG, GATE Information, Bulletin Nr. 7.

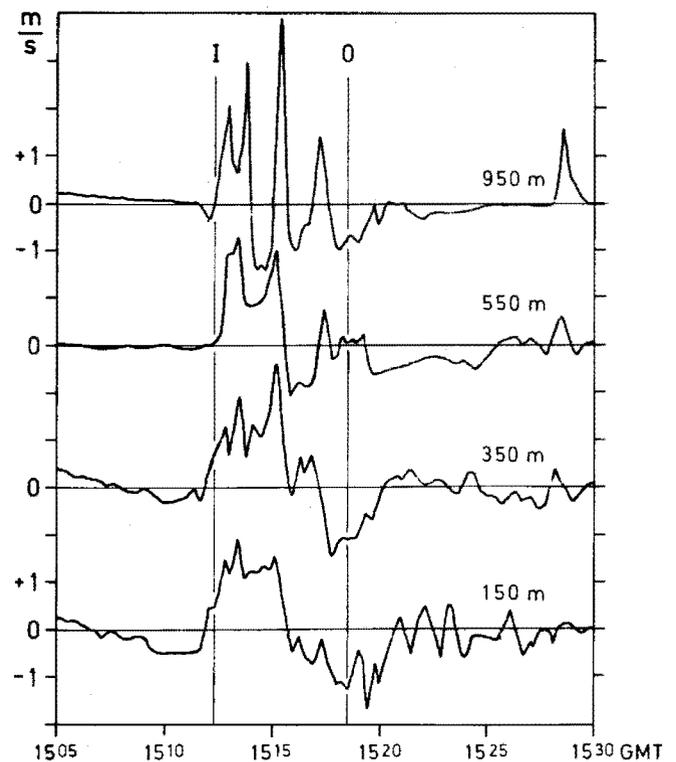


Abb. 5.3.3.
Zeitreihe der vertikalen Windkomponente in vier verschiedenen Höhen, gemessen von Fesselsonden auf „Dallas“ am 3. 9. 1974. Mit I bzw. O ist der Beginn bzw. das Ende des Durchzugs einer größeren Konvektionszelle markiert. Nach G. D. EMMITT, NSF Report, 1975.

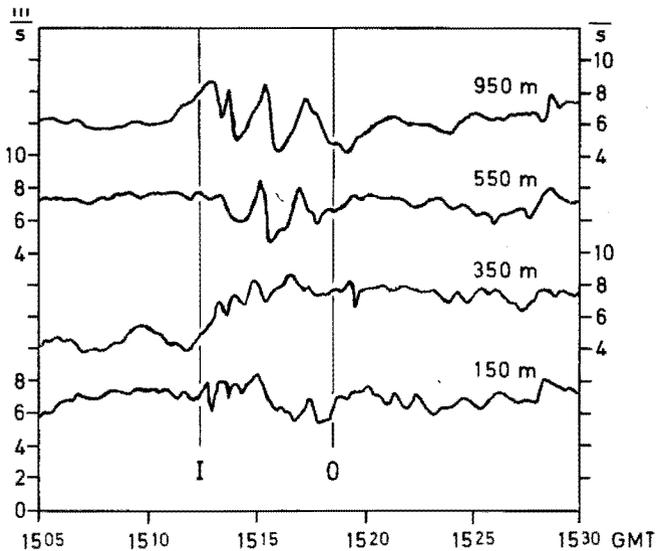


Abb. 5.3.4
Wie Abb. 5.3.3, jedoch für die Horizontalkomponente der Windgeschwindigkeit.

aus vier Flügen der Electra L-188 von NCAR gemittelten Flüsse von latenter und sensibler Wärme sowie von Impuls unter Schönwetterbedingungen (nach GROSSMAN). Charakteristisch ist das große Verhältnis von latentem zum sensiblen Wärmestrom sowie die vertikale Konvergenz des latenten Wärmestromes. Beim Impulsstrom fällt die Zunahme der Longitudinalkomponente oberhalb der Wolkenuntergrenze auf. Entsprechende Profile wurden auch unter Konvektionsbedingungen erfolgen und werden wesentlich zur Beschreibung und späteren Modellierung der tropischen Konvektion beitragen.

Die Flugzeuge leisteten ferner gute Dienste bei der intensiven Vermessung des Windfeldes in der planetarischen Grenzschicht. Die mit Trägheitsnavigation ausgerüsteten Maschinen erreichten eine Genauigkeit der Windmessung von besser als 1 m/sec, wie bei Vergleichsflügen festgestellt wurde. Im B-scale Bereich konnten auf diese Weise gezielte Konvergenzmessungen in markanten Konvektionssystemen gewonnen werden, die sich mit den von den Schiffen vorgenomme-

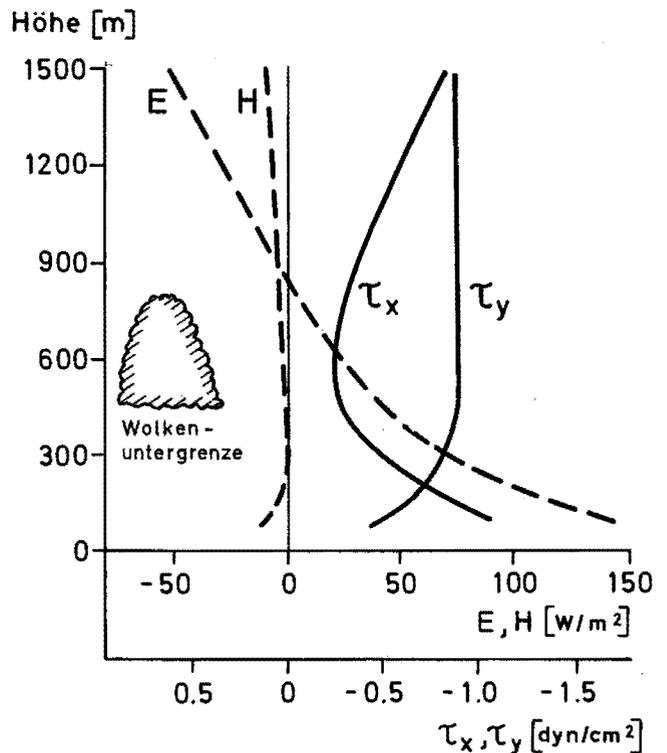


Abb. 5.3.5
Vertikalprofile des Impulsflusses (τ_x, τ_y), des latenten (E) und des sensiblen (H) Wärmeflusses in der Grenzschicht bei ungestörten Verhältnissen. Mittlere Profile aus vier Sondierungen der L-188 Electra vom NCAR. Nach GROSSMAN, GATE Report Nr. 14.

nen Sondierungen ergänzen. Zum anderen wurde auf meridionalen Flügen zwischen etwa 10°N und dem Äquator — auf denen also die ITCZ durchquert wurde — das Einzugsgebiet der Konvergenzzone bis weit in den Süden erfaßt. Leider fehlte auf diesen Flügen die räumlich-zeitliche Ergänzung durch fixe Schiffsstationen, so daß für diesen Teilaspekt, die großräumige Untersuchung der äquatorialen planetarischen Grenzschicht, kein ausreichender Datensatz zur Verfügung stehen wird.

5.4 H. KRAUS, Göttingen Das Strahlungs-Unterprogramm

Wissenschaftliche Zielsetzung

Die Bedeutung der Strahlungsvorgänge bei der Wechselwirkung zwischen den kleiner-skaligen tropischen Wettersystemen und den großskaligen, synoptischen Feldern läßt sich von verschiedenen Gesichtspunkten her erläutern.

Die allgemeinste Betrachtungsweise geht davon aus, daß die Strahlung die primäre Energiequelle für die verschiedenen Formen atmosphärischer Strömungssysteme ist, daß es eine erhebliche Wechselwirkung zwischen den dynamischen Systemen und den Strahlungsprozessen (z. B. über die unterschiedlichen Emissions- und Absorptionsvorgänge in unterschiedlichen Wolkenstrukturen) gibt, und daß dies sehr wohl auch

für die Tropen und das Wechselspiel innerhalb der tropischen Zirkulation (mit ihren verschiedenen Scales) gelten muß. So ist ja heutzutage ein großer Teil der Strahlungsforschung auf Fragen der Beziehungen zwischen Strahlungsvorgängen und atmosphärischer Dynamik konzentriert. Dabei hat man herausgefunden, daß bei der Betrachtung synoptischer Systeme über eine längere Zeit (z. B. bei der numerischen Wettervorhersage) diese Wechselwirkung von um so größerer Bedeutung ist, je größer die Zeit-Scale ist, mit der man arbeitet. Dies darf aber nicht in dem Sinne mißverstanden werden, daß die Strahlung generell bei kleinskaligen Prozessen vernachlässigt werden könne. Im Gegenteil weiß man, daß z. B. Strahlungsdivergenzen inner-

halb der atmosphärischen Grenzschicht recht bedeutend sein können und daß (um ein weiteres Beispiel zu nennen) einzelne Cumulus-Wolken durch Strahlungs-Abkühlung an der Oberseite und eine damit verbundene Labilisierung stark in ihrer Entstehung gefördert werden können.

Eine gezieltere Betrachtung benutzt die Erläuterungen zur Parametrisierung der Einzelprozesse in einem Cumulus-Ensemble in Beitrag 3. Gl. [3.2] enthält das Flächenmittel der durch Strahlungsprozesse bewirkten Erwärmungsrate Q_R . Dieser Term ist einer der zu parametrisierenden subskaligen Terme. Um dessen Bedeutung im Zusammenspiel der Glieder der Haushaltsgleichungen [3.2] und [3.3] beurteilen zu können, müssen wir Q_R mit anderen Termen vergleichen. Dazu dienen die Abbildungen 5.4.1 und 5.4.2 und die Beziehung

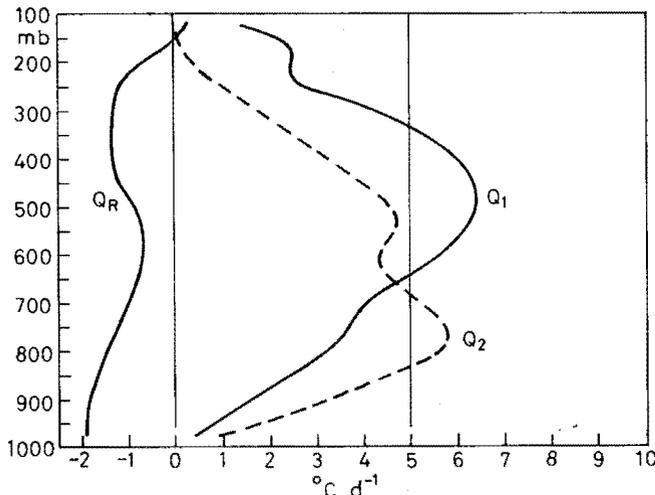


Abb. 5.4.1

Mittlere Erwärmungsraten in Abhängigkeit von der Höhe aus Haushaltsuntersuchungen im Gebiet der Marshall-Inseln. Q_1 ist die im großskaligen System offenbar werdende Erwärmung, Q_2 die im großskaligen System offenbar werdende Senke latenter Wärme, Q_R die durch Strahlungsprozesse bewirkte Erwärmungsrate. Näheres siehe Text und Beitrag 3. Aus YANAI et al., J. Atmos. Sci. 30, S. 611, 1973.

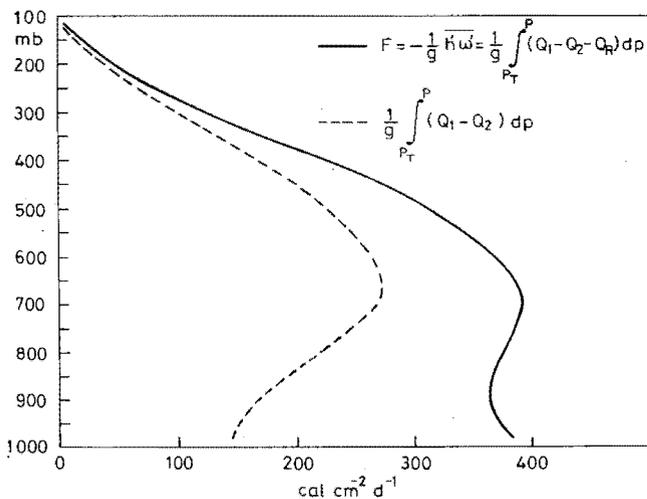


Abb. 5.4.2

Gesamter durch Konvektion bewirkter vertikaler Energie-transport, berechnet aus Untersuchungen im Gebiet der Marshall-Inseln mit und ohne Berücksichtigung von Q_R . Ausgezogene Kurve nach YANAI et al., 1973.

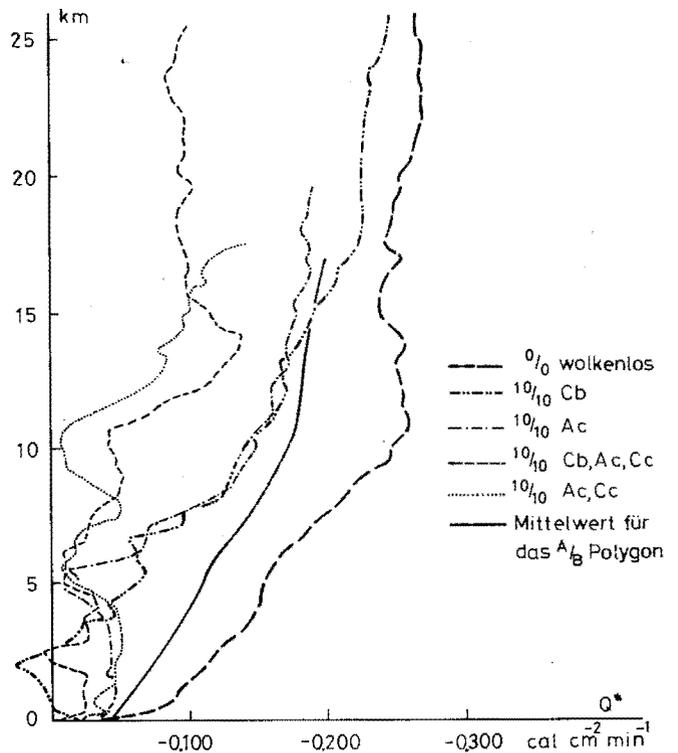


Abb. 5.4.3

Profile der langwelligen Strahlungsbilanz $Q^*(z)$ bei unterschiedlicher Bewölkung gewonnen aus den Radiometersonden-Aufstiegen der UdSSR-Schiffe. Die ausgezogene Kurve stellt eine Art mittleres Profil dar; sie ist errechnet als Mittelwert aus allen Aufstiegen der „A/B-Schiffe“ (Positionen 8 bis 13 auf Abb. 4.3). Nach Gl. [5.4.3] ergibt sich die Erwärmungsrate aus der Steigung der Profile. Nach ZAITSEVA, GATE-Report Nr. 14.

$$F(p) = -\frac{1}{g} \overline{h'w'} = \frac{1}{g} \int_{pT}^p [(Q_1 - Q_2) - Q_R] dp \quad [5.4.1]$$

Der Fluß $F(p)$ ist (s. Beitrag 3) ein Maß für die Aktivität der Cumulus-Konvektion im betrachteten Ensemble oder in einem Cloud Cluster und damit eine bedeutende Größe. Alle bisher bekannten Studien zeigen (siehe das Beispiel der Abb. 5.4.1), daß Q_R von derselben Größenordnung ist wie $(Q_1 - Q_2)$ und so im Cu-Ensemble eine wichtige Rolle spielt. Dasselbe geht in etwas anderer Weise aus Abb. 5.4.2 hervor, in der $F(p)$ einmal mit und in der anderen Kurve ohne Berücksichtigung des Strahlungseinflusses dargestellt ist. Hinzu kommt, daß $Q_R(p)$ eine stark variable Größe ist, die sehr empfindlich vor allem auf Änderungen im Bewölkungsfeld reagiert. Abb. 5.4.3 möge das verdeutlichen. So läßt sich das in Beitrag 3 erläuterte Parametrisierungsproblem nur lösen, wenn die Q_R -Profile für die GATE-Haushaltsstudien gewonnen werden. Dies ist die wichtigste Aufgabe des Strahlungs-Unterprogramms.

Eine zweite Aufgabe bezieht sich auf die Gewinnung der Strahlungsbilanz und ihrer Komponenten an der Ozean-Oberfläche. Bezeichnet man mit Q^* die Strahlungsbilanz, mit $K \downarrow$, $K \uparrow$, $L \downarrow$, und $L \uparrow$ die kurzwelligen ($0.3 - 3 \mu\text{m}$) und langwelligen ($3 - 80 \mu\text{m}$) Strahlungsstromdichten aus dem oberen bzw. unteren Halb-

raum (in irgendeiner Höhe) und vereinbart man, den Index o zu benutzen, wenn die betreffenden Größen an der Oberfläche gemeint sind, dann läßt sich die Strahlungsbilanz an der Ozean-Oberfläche durch

$$Q_o^* = K \downarrow_o - K \uparrow_o + L \downarrow_o - L \uparrow_o \quad [5.4.2]$$

beschreiben. Diese Größen sind von Bedeutung für das Grenzschicht-Unterprogramm (bei der Bestimmung der Energiebilanz der Oberfläche) und das Ozeanographische Unterprogramm (als Komponenten der Energiezufuhr in die ozeanische Mischungsschicht); sie liefern ferner die unteren Randwerte für die Q_R -Profile, da ja gilt

$$Q_R = c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_{\text{Str}} = -g \frac{\partial Q^*}{\partial p} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial Q^*}{\partial z} \quad [5.4.3]$$

Dabei ist ρ die Luftdichte; der Index Str bedeutet, daß die allein durch Strahlungsvorgänge bewirkte Temperaturänderung gemeint ist. Die übrigen Symbole sind wie in Beitrag 3 benutzt.

Die Ergebnisse werden in einer den GATE-Scales (s. Tab. 3.1) entsprechenden Auflösung benötigt. Da die Haushaltsstudien der subskaligen Terme vornehmlich für B-skalige und C-skalige Gebiete durchgeführt werden, muß also ein für diese Gebiete geltendes $Q_R(p)$ in Abhängigkeit von den jeweils herrschenden Bedingungen (charakterisiert durch Wolkenstruktur, Aerosol, Temperatur und Feuchte) gewonnen werden. Das führt zu typischen Werten der Auflösung in Raum und Zeit von $\Delta x = \Delta y = 300$ bzw. 30 km (Mitte von B- bzw. C-Scale) und $\Delta t = 12$ bzw. 3 h.

Ähnlich geht es bei der vertikalen Auflösung: Die Größenordnung des Betrages der Erwärmungsrate $(\partial T/\partial t)_{\text{Str}}$ liegt bei 1 bis 2 °C/Tag (siehe z. B. Abb. 5.4.1). Nach Gl. [5.4.3] entspricht 2 °C/Tag einem $\Delta Q^*/\Delta p = 23,7$ $\text{Wm}^{-2}/100$ mb. Will man jetzt diesen Wert mit 10% iger Genauigkeit also auf $0,2$ °C/Tag auflösen, so erfordert die für GATE vereinbarte vertikale Auflösung $\Delta p = 200$ mb eine Meßgenauigkeit von $\Delta Q^* = 4,74$ $\text{Wm}^{-2} = 6.8$ $\text{mcal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$, was sehr hohe Anforderungen an die Radiometer stellt. Die Messung selber erfolgt mit Hilfe von Flugzeugen und Radiometer-Sonden. Die Randwerte ergeben sich aus Satelliten- und Schiffsdaten. Aber erst ein recht komplexes Analysenverfahren liefert dann die für das betreffende Gebiet charakteristischen Q_R -Profile (näheres s. u.).

Bei den Schiffsbeobachtungen zur Bestimmung der Strahlungsstromdichten (s. Gl. 5.4.2) an der Oberfläche ist die räumliche Auflösung durch den Schiffsabstand (Abbildungen 4.2 und 4.3) gegeben. Bei der Analyse der Messungen kann allerdings durch Interpolationsverfahren, die vor allem die hochauflösenden SMS-1 Bilder der Bewölkungsstruktur benutzen, eine wesentlich höhere Auflösung der horizontalen Felder der Oberflächen-Strahlungsstromdichten erreicht werden. Die kontinuierliche Registrierung erlaubt die Auflösung bis herab zu kleinen Δt (z. B. Mittelwerte über 10 min oder sogar kürzer; diese werden als Randwerte bei Flugzeugeinsätzen oder Radiometersonden-Aufstiegen benötigt). Auch hier sollte die Genauigkeit von 5 Wm^{-2} erreichbar sein.

Parametrisierung des Strahlungstermes Q_R

Prinzipiell ließen sich die subskaligen Größen in den Gleichungen [3.2] und [3.3] direkt messen, wenn die Meßintervalle in Raum und Zeit genügend klein gewählt würden. Nimmt man an, daß die das Q_R -Profil stark beeinflussende Wolkenstruktur mit horizontalen Meßintervallen von 1 km erfassbar ist, und daß Zeitabstände von 10 min genügen, um die Entwicklung zu verfolgen, dann würde man zur direkten Bildung eines Q_R -Profils als Mittelwert über ein 300×300 km^2 großes Gebiet und eine Zeit von 6 h für 5 Druckstufen (Höhen), die je 200 mb voneinander entfernt sind,

$$\frac{300 \text{ km}}{1 \text{ km}} \times \frac{300 \text{ km}}{1 \text{ km}} \times \frac{6 \text{ h}}{10 \text{ min}} \times 5 = 1,62 \cdot 10^7 \text{ Meßwerte}$$

benötigen. Im Vergleich dazu liefert ein Flugzeug mit einer Reichweite von 4000 km aber nur $4 \cdot 10^3$ Meßwerte pro Einsatz, wenn man das oben zu Grunde gelegte $\Delta x = 1$ km benutzt. Dies Beispiel zeigt, daß eine direkte Messung von Q_R auf dieselben Schwierigkeiten stößt wie bei den Kovarianzen (z. B. $s'w'$ in Gl. [3.2]). Das Problem der notwendigen Parametrisierung von Q_R stellt sich nun besonders in GATE. Bei horizontal homogen geschichteter Atmosphäre (z. B. wolkenlos oder homogene Schichtwolken) entspricht das Flächenmittel dem an irgendeiner Stelle gemessenen Profil. In GATE geht es aber um Untersuchungen unter stark gestörten Bedingungen, bei sehr unterschiedlichen Arten von Konvektion und mit extrem inhomogener und zeitlich variabler Struktur der Wolken.

Es gibt eine Reihe von Vorschlägen für die Parametrisierung, aber noch kein ausgereiftes Verfahren. Das ist eine Situation, die nicht nur hier, sondern auch bei der Parametrisierung der Grenzschichtprozesse und allgemein beim Cumulus-Ensemble besteht; es existieren Ideen, erste Ansätze, vielversprechende erste Erfolge (teilweise für relativ ungestörte Verhältnisse), aber es gibt noch keinen klaren Weg, um mit den gestörten Situationen der tropischen Konvektionen fertig zu werden.

Verlauf des Experimentes

Als Beobachtungsplattformen, von denen aus Strahlungsmessungen durchgeführt wurden, dienten Satelliten, Flugzeuge, freifliegende Ballons und Schiffe. Von anderen Messungen sind vor allem die Radarbeobachtungen zur Wolkenstruktur und die Radiosondenergebnisse (Temperatur und Feuchte) als Eingangsgrößen in Strahlungsübertragungs-Rechnungen von entscheidender Bedeutung.

Die 11 Satelliten (s. Beitrag 4), von denen Meßergebnisse zur Auswertung von GATE zu erwarten sind, werden — allerdings mit unterschiedlicher horizontaler Auflösung — eine Fülle von Informationen für das Strahlungsunterprogramm liefern, so Bilder im sichtbaren und infraroten Spektralbereich, vertikale Temperatur- und Feuchteprofile, Oberflächentemperaturen des Ozeans und der Wolken und $K \uparrow$ und $L \uparrow$ an der Obergrenze der Atmosphäre. Eine Reihe von Abbildungen in diesem Heft zeigen Satelliten-Aufnahmen, die während

des Experimentes gewonnen wurden. Die hochauflösenden Bilder (so z. B. Abb. 3.4 und 7.1.3) werden als Grundlage zur Bestimmung der Wolkenstruktur bei den Parametrisierungs-Bemühungen dienen.

Insgesamt 10 der 12 Forschungsflugzeuge waren umfangreich mit Strahlungsmeßfühlern ausgerüstet. Es würde zu weit gehen, hier eine ausführliche Beschreibung zu versuchen. So sei der Leser auf GATE-Report Nr. 16 (Report on the Field Phase) verwiesen. Gemessen wurden vor allem die Komponenten der Halbraumstrahlung $K \downarrow$, $K \uparrow$, $L \downarrow$ und $L \uparrow$ in der jeweiligen Flughöhe, die Oberflächentemperatur und die Strahldichte (Energie pro Flächen-, Zeit- und Raumwinkeleinheit; radiance) in Abhängigkeit von Einfallswinkel und Spektralbereich. Die Abbildungen 8.12 und 8.13 im nächsten Heft zeigen, wie die Geräte an den Flugzeugen montiert waren.

Der Einsatzplan für die Flugzeuge sah verschiedene Typen von Missionen für das Strahlungs-Unterprogramm vor, so im wesentlichen Flüge mit mehreren Flugzeugen, die gleichzeitig in verschiedenen Höhen

flogen (multi-aircraft radiation mission), Flüge einzelner Maschinen, stufenweise Profile ausmessend, und Vergleichsmessungen mit Satelliten, Schiffen und Radiometersonden. Insgesamt wurden 75 Missionen für das Strahlungs-Unterprogramm geflogen, so z. B. auch eine Reihe von Profilen in dem Ausbruch von Sahara-Staub, der in Abb. 7.1.3 im nächsten Heft dargestellt ist.

Radiometersonden wurden von 10 sowjetischen Schiffen und der „METEOR“ aus eingesetzt. Der Schwerpunkt dieses Teils des Programms lag bei der Erfassung der Profile der langwelligen Halbraumstrahlung $L \downarrow$ und $L \uparrow$, nur von „METEOR“ wurden auch kurzwellige Sonden (einmal täglich) gestartet. Von den Schiffen der UdSSR liegen 566 Sondierungen vor. Beispiele aus einer ersten Auswertung zeigt Abb. 5.4.3. Das mittlere Profil für das A/B-Polygon sollte dabei nur sehr vorsichtig interpretiert werden, weil von jedem Schiff aus nur ein Aufstieg pro Tag durchgeführt wurde, und weil der Abstand der Schiffe beträchtlich ist. A/B-Scale-Mittelwerte der Strahlungsbilanz-Profile, die in Budgetrechnungen verwendbar sind, werden erst aus den oben beschriebenen Parametrisierungsbemühungen folgen.

5.5 G. SIEDLER, Kiel Das Ozeanographische Unterprogramm

Zwei Fragen stehen im Mittelpunkt des ozeanographischen Unterprogramms:

1. Welche Randbedingungen für die atmosphärische Zirkulation findet man an der Meeresoberfläche, d. h. wie ist insbesondere die Oberflächentemperatur verteilt, und wie groß sind die Wärmeflüsse durch diese Berandung?

2. Welche physikalischen Prozesse treten als Folge atmosphärischer Anregung im Ozean auf, und welche dieser Vorgänge sind entscheidend für Änderungen im Dichte- und Bewegungsfeld und damit auch für die Festlegung des Impuls-, Wärme- und Wassertransports an der Meeresoberfläche?

Die mittleren Schichtungs- und Strömungsverhältnisse im GATE-Gebiet sind gekennzeichnet durch starke windgetriebene Oberflächenströmungen, nämlich den westwärts verlaufenden Nord- und Südäquatorialstrom und den nach Osten gerichteten Äquatorialen Gegenstrom. Die Lage und Stärke dieses Stromsystems ist abhängig vom Passatwindfeld und insbesondere von der Lage der ITCZ. Unmittelbar am Äquator findet man in 50–100 m Tiefe den ostwärts gerichteten, stark gebündelten Äquatorialen Unterstrom. Als Folge der winderzeugten Konvergenz- und Divergenzonen im tropischen Atlantik und des Anstaus an der Westseite dieses Ozeans ergibt sich eine mittlere Dichteverteilung mit besonders dünner durchmischter Deckschicht auf der Ostseite und in den Gebieten mit Divergenz an der Meeresoberfläche. Im Zentrum des B-Gebiets reicht diese Deckschicht nur bis etwa 30 m Tiefe. An ihrer Untergrenze findet man einen scharfen Dichtesprung und dann eine allmähliche Zunahme bis etwa 1000 m. In größeren Tiefen ändert sich die Dichte dann

nur noch geringfügig. Die obere Sprungschicht ist im größten Teil des GATE-Gebietes gekennzeichnet durch eine schnelle Temperaturabnahme und ein Salzgehaltmaximum (Abb. 5.5.1).

Die Struktur der Deckschicht und der oberen Sprungschicht ist starken Schwankungen unterworfen, deren Ursachen in der Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre zu suchen sind. Das ozeanographische Forschungsprogramm bei GATE bot die Gelegenheit, nicht nur eine Beschreibung der Meeresoberfläche für die Zeit des Experiments zu geben, sondern den Versuch zu unternehmen, die Bedeutung verschiedener physikalischer Prozesse für die Deckschicht- und Sprungschichtentwicklung zu klären und damit gleichzeitig — als einen für die langfristigen Zielsetzungen von GARP benötigten Beitrag — Grundlagen für eine vernünftige Parametrisierung in gekoppelten Modellen von Ozean und Atmosphäre zu schaffen.

„C-Scale Experiment“

Zielsetzung — Ein Vergleich bekannter Modelle der Deck- und Sprungschicht ergibt, daß in unterschiedlichem Maße die folgenden Erscheinungen als wichtig angesehen werden: Oberflächenwellen, statische und Scherungsinstabilität in der Deckschicht, Scherungsinstabilität an der Obergrenze der Sprungschicht, quasi-geostrophische Wirbel und Fronten und interne Trägheits- und Schwerewellen. Es ist bemerkenswert, daß eine Reihe von Modellen zu sehr vernünftigen Aussagen über die Deckschicht- und Sprungschichtentwicklung führen, obwohl sie von verschiedenen Annahmen über den Impuls- und Wärmeaustausch ausgehen. Das ist natürlich nicht ein Hinweis auf eine gleiche Güte der Modelle, sondern darauf, daß sie wohl alle nicht ausreichend genau die wichtigen Prozesse berücksichti-

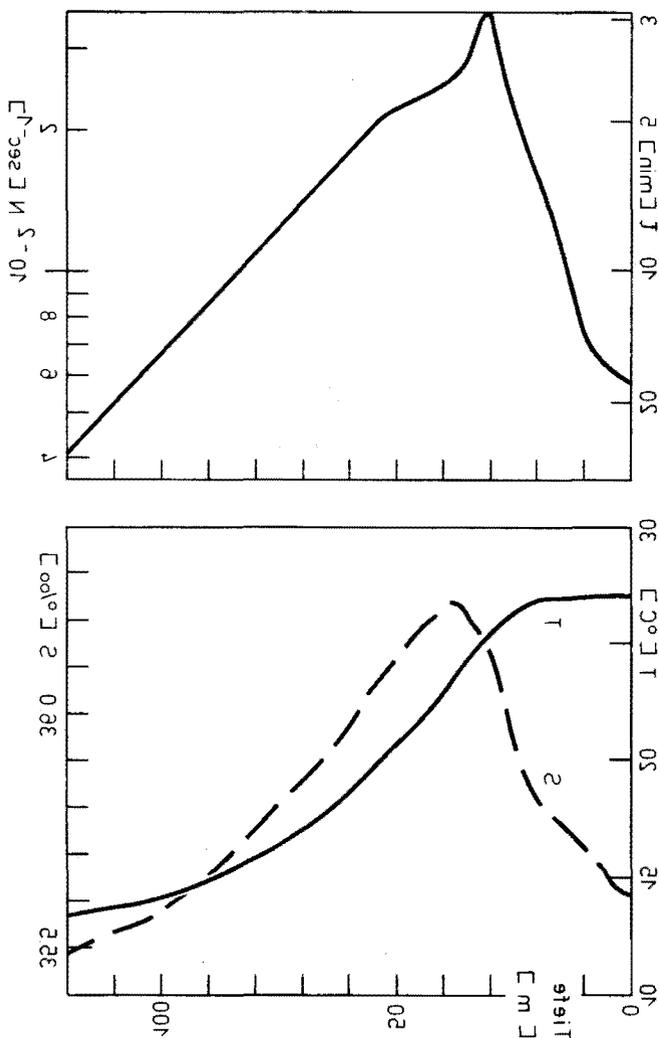


Abb. 5.5.1
Mittlere Vertikalprofile der Temperatur T, des Salzgehalts S und der Väisälä-Frequenz N für das Zentrum des B-Gebiets.

gen. Hauptziel des C-Skalen-Experiments war es deshalb, die relative Bedeutung der als wichtig vermuteten Übertragungsprozesse durch gleichzeitige Messungen möglichst zahlreicher relevanter Parameter während der dritten Meßphase zu ermitteln.

Meßplattformen für dieses Programm im Zentrum des B-Gebietes waren die sechs stationären Schiffe, dabei aus der Bundesrepublik Deutschland die „Meteor“ und die „Planet“, und Flugzeuge, die durch zwei ozeanographische, frei bewegliche Schiffe und durch verankerte Meßsysteme ergänzt wurden (Abb. 6.1.1). Es erwies sich als zweckmäßig, das C-Skalen-Experiment in vier Teilprogramme mit unterschiedlichen methodischen Schwerpunkten aufzugliedern.

a. *Oberflächenwellen* — Das Oberflächenwellenfeld sollte in Skalen von 40 bis 300 km (C- und B-Skala) erfaßt werden, um numerische Verfahren der Seegangsvorhersage aus Windfelddaten zu testen und Eingangsdaten für die Impulsübertragung von der Atmosphäre an den Ozean zu gewinnen. Methodisch lag das Schwergewicht bei Bojen- und Flugzeugmessungen. Eingesetzt wurden verankerte Seegangsmessbojen mit Datenfernübertragung, vom Schiff aus mit Kabel betriebene See-

gangsmessbojen, Meßeinrichtungen an Bord von Schiffen und Laser-Altimeter an Bord von Flugzeugen.

Das Wellenfeld war charakterisiert durch stets vorhandene, variable Dünung und eine sehr kleinräumige und kurzzeitig veränderliche Windsee. Für zwei Zeiträume sollen Vorhersagemodelle besonders gründlich geprüft werden (4.—8. 9., 12.—14. 9. 74), weil hier der Wind von geringen Werten kräftig anstieg und dann wieder abfiel. Eine erste Übersicht über die gewonnenen Daten läßt einen guten Datensatz erwarten. Ein Beispiel der Wellenspektren zeigt Abb. 5.5.2. Das enge Netz von Seegangsmessstationen sollte es auch ermöglichen, die Veränderung in wandernden Dünungssystemen, z. B. durch Refraktion in variablen Oberflächenströmungen, zu untersuchen.

b. *Deckschichtentwicklung* — Auf- und Abbau sowie Strukturänderungen der Deckschicht sollten erfaßt, die Korrelation mit Wind, Wärmefluß und Verdunstung an der Oberfläche festgestellt und mit Deckschichtmodellen verglichen werden. Das methodische Schwergewicht lag bei Temperatur- und Salzgehaltmessungen von stationären und fahrenden Schiffen. Eingesetzt wurden profilierende Geräte für die Meßgrößen Temperatur, elektrische Leitfähigkeit, Druck und Strömung sowie freifallende Mikrostruktursonden. Außerdem stehen Messungen mit verankerten Meßsystemen zur Verfügung.

Eine vorläufige Durchsicht der Daten zeigt deutlich, wie wichtig die Berücksichtigung der horizontalen Advektion in diesem Gebiet für ein Studium der vertikalen Flüsse ist. Abb. 5.5.3 zeigt als Beispiel das Auftreten eines Bereichs geringen oberflächensalzgehalts bei Beobachtungen auf „Planet“, ohne daß zu dieser Zeit hier Regen fiel. Abb. 5.5.4 gibt ein Beispiel für offensichtlich überwiegend durch vertikalen Wärmefluß verursachten Tagesgang in der Temperaturschichtung bei der „Meteor“. Der Datensatz wird sicherlich geeignet sein, die angestrebten Vergleiche mit Deckschichtmodellen durchzuführen.

c. *Interne Wellen* — Interne Wellen spielen eine wichtige Rolle bei der Impulsübertragung im Ozean und stellen gleichzeitig eine Störung der Schichtungsdaten dar, die zur Ermittlung der Wärme- und Salzbilanz der

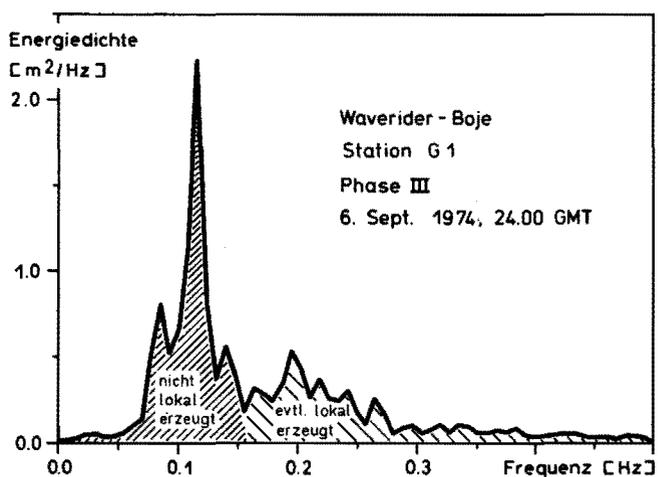


Abb. 5.5.2
Beispiel eines Seegangsspektrums.

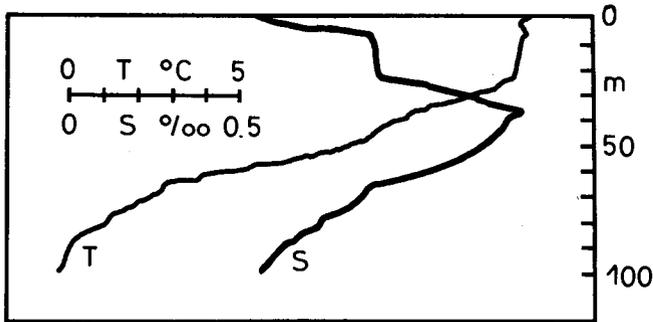


Abb. 5.5.3
Vertikalprofile der Temperatur T und des Salzgehalts S, gemessen am 10. September 1974, 18.00 Uhr, von Bord der „Planet“.

Deckschicht benötigt werden. Während die charakteristischen Eigenschaften des internen Schwerewellenfeldes im tiefen Atlantik aus Messungen der letzten Jahre bemerkenswert gut bekannt waren, fehlten diese Informationen für den oberflächennahen Bereich. Das erste Ziel des Meßprogramms für interne Wellen in der Sprungschicht der C-Skala mußte deshalb sein, die spektralen Parameter des Wellenfeldes zu ermitteln. Der zweite Schritt besteht dann in der Prüfung, ob eine Korrelation zwischen Wind und internen Wellen auftritt, und im Vergleich mit Modellen für die Anregung interner Wellen.

Bei diesem Meßprogramm lag das methodische Schwergewicht bei Bojen und verankerten Meßsystemen. Durch ein aufwendiges Zweibein-Verankerungssystem (Abb. 5.5.5 [a]) war es möglich, sehr kleine Horizontalskalen von wenigen Metern bis 500 m zu erfassen. Die Kombination mit normalen Verankerungen ließ dann einen Vergleich von Strömungs- und Temperaturdaten bis zu etwa 50 km Abständen zu. Die Messungen mit verankerten Geräten wurden wesentlich ergänzt durch Temperatur- und Salzgehaltsbestimmungen von stationären Schiffen und mit Schleppgeräten von fahrenden Schiffen, ferner durch akustische Echolotungen von Schiffen und Radarbeobachtungen von Flugzeugen, die einzelne Gruppen von internen Wellen erkennen lassen.

Abb. 5.5.6 zeigt als Beispiel ein Energiedichtespektrum einer Stromkomponente aus 56 m Tiefe. Man findet einen Abfall der Energie zu höheren Frequenzen ω im Bereich interner Schwerewellen, der im Gegensatz zu Tiefwasserdaten flacher als mit ω^{-2} verläuft. Maxima treten bei der lokalen Trägheitsperiode von etwa 80 h und der halbtägigen Gezeit auf. Geht man zu noch höheren Frequenzen, als sie in Abb. 5.5.6 gezeigt werden, so findet man ein leichtes Maximum nahe der Väisälä-frequenz (vgl. Abb. 5.5.1) und einen steilen Abfall zu höheren Frequenzen. Vergleicht man die Kohärenz dieser Daten über zunehmende horizontale Distanzen, so ergibt sich als Folge der Überlagerungen phasenunkorrelierter Eigenschwingungen eine Abnahme der Kohärenz, die Rückschlüsse auf das horizontale Wellenspektrum erlaubt. Erste Analysen zur atmosphärischen Anregung zeigen, daß die Modulation der Varianz im hochfrequenten Teil des internen Schwerewellenbandes korreliert ist mit Änderungen der Varianz des Windfeldes. Es ist deshalb zu erwarten, daß Modelle

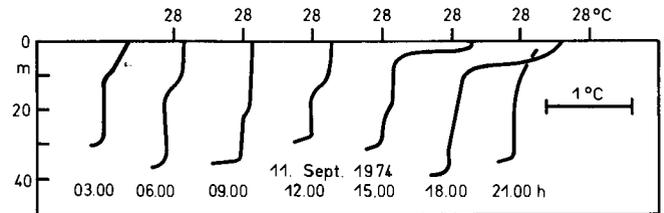


Abb. 5.5.4
Ausgewählte Vertikalprofile der Temperatur mit Tagesgang der Deckschicht, gemessen von Bord der „Meteor“.

zur Anregung interner Wellen mit diesem Datensatz erfolgreich getestet werden können.

d. *Quasi-geostrophische Wirbel und Fronten* — In Horizontalskalen von weniger als 1 km bis etwa 100 km sollte die räumliche Struktur des Temperatur- und Salzgehaltsfeldes erfaßt und insbesondere festgestellt werden, ob die Vertikalzirkulation in Fronten eine wesentliche Rolle für den Impuls-, Wärme- und Stoffaustausch spielt. Das Schwergewicht der Methodik lag bei profilierenden Schleppgeräten. Hinzu kamen Profil- und Mikrostrukturmessungen von stationären Schiffen, Strömungsbeobachtungen von verankerten Meßsystemen und Messungen der Strahlungstemperatur der Meeresoberfläche von Flugzeugen. Für die Schleppgerätemessungen wurde eine quasi-LAGRANGEsche Beobachtungsform gewählt, wobei ein oder zwei Schiffe eine Anordnung von Meßkursen benutzten, deren Position mit der mittleren Oberflächenströmung mitwanderte (Abb. 5.5.7).

Vorläufige Auswertungen lassen erkennen, daß deutlich erkennbare Fronten, wie sie etwa früher in der Sprungschicht im Mittelmeer gefunden worden waren, im C-Gebiet bei GATE nicht auftraten. Das Ziel der kommenden Datenanalyse wird es sein, die Ursachen der beobachteten Strukturen der Deck- und Sprungschicht zu identifizieren und festzustellen, ob turbulente Bewegungen eine beherrschende Rolle spielen.

„B-Area Experiment“

Die Veränderungen in der Deck- und Sprungschicht in Zeitskalen von einigen Wochen und in Horizontalskalen einzelner „Cloud Cluster“-Ereignisse standen im Mittelpunkt dieser Untersuchungen. Zwei Problemkreise waren von besonderem Interesse, einmal die Wärme- und Salzbilanz der Deckschicht und zum anderen die dynamische Anpassung der tiefen Sprungschicht. Diese beiden Fragenkomplexe sind miteinander verknüpft: Die Bilanzanalyse hängt kritisch davon ab, ob eine ausreichend gute Abschätzung der mittleren Horizontaldivergenz in der Deckschicht möglich ist, also damit von einer Bestimmung des Feldes der Vertikalbewegungen an der Oberkante der Sprungschicht.

Zur Bestimmung der Wärme- und Salzbilanz der Deckschicht wurden vor allem zwei Arten der Messung benutzt: Regelmäßig wiederholte Messungen der Temperatur und des Salzgehaltes von stationären Forschungsschiffen während aller drei Meßphasen und etwa gleichzeitig ausgeführte engabständige Temperaturprofilbeobachtungen mit freifallenden Sonden von Schiffen auf dem Weg zwischen Meßgebiet und Hafen.

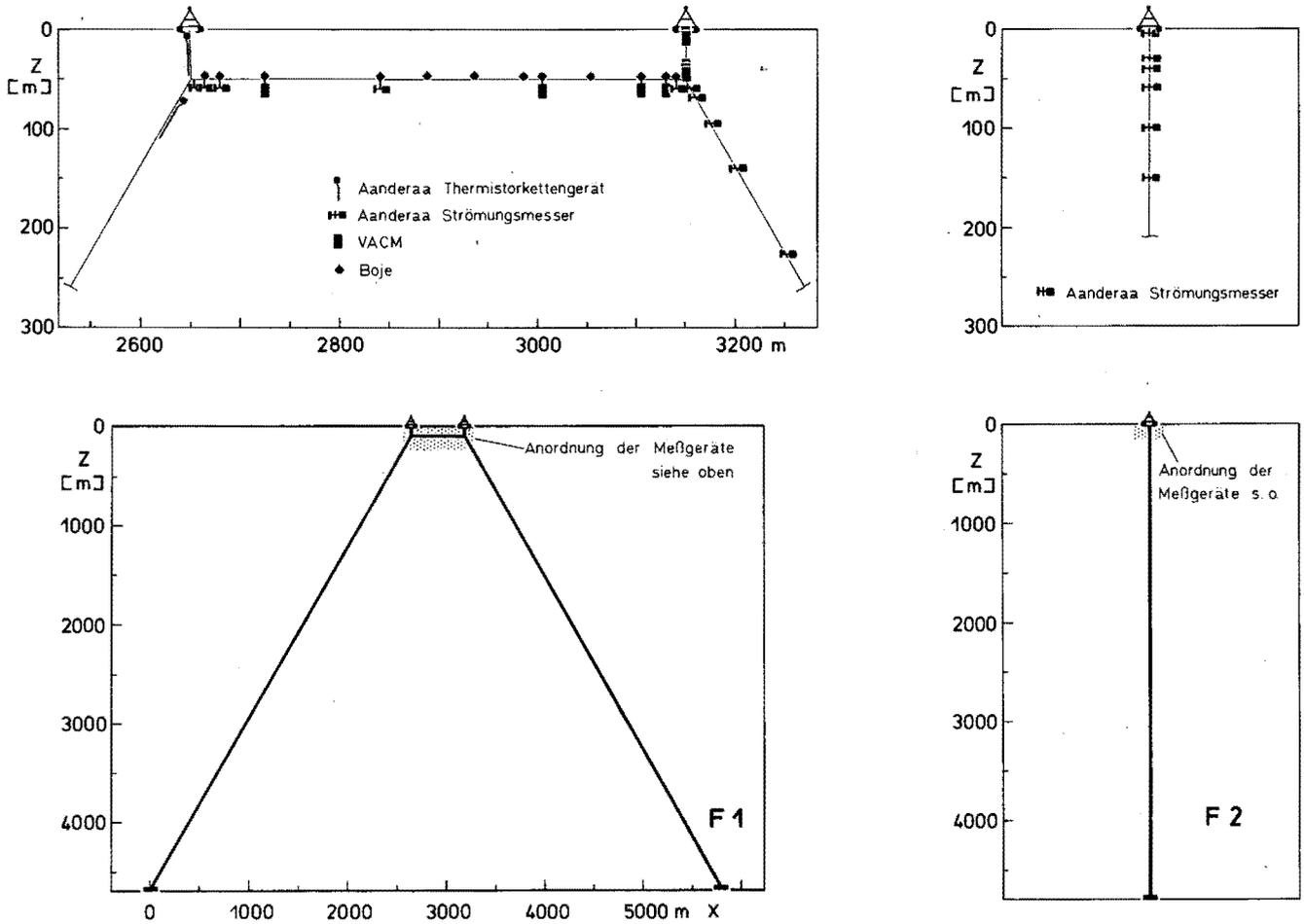


Abb. 5.5.5 Schematische Darstellung der verankerten Meßsysteme F1 und F2 mit Strömungs- und Temperaturmeßgeräten der Typen Aanderaa und VACM und mit Thermistorketten.

Außerdem konnten Strömungs- und Temperaturdaten verankerter Geräte benutzt werden. Eine vorläufige Analyse zu diesem Experiment ist zur Zeit noch nicht möglich, da ein vollständiger internationaler Datensatz dafür benötigt wird. Es ist deshalb zur Zeit noch offen, ob die Datendichte ausreichend ist, um trotz der Störung

durch hochfrequente Änderungen gute Wärme- und Salzbilanzwerte ermitteln zu können.

Zur Untersuchung der dynamischen Anpassung der tiefen Sprungschicht liefern die regelmäßig wiederholten Temperatur- und Salzgehaltmessungen von stationären Schiffen im B- und A/B-Gebiet die wichtigste Datenbasis. Ergänzt wird sie durch die Strömungswerte verankerter Geräte. Auch in diesem Falle wird erst die spätere Auswertung eines möglichst vollständigen internationalen Datensatzes eine Aussage über einen Erfolg dieses Experiments erlauben.

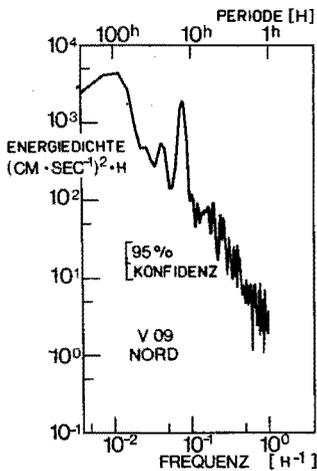


Abb. 5.5.6 Beispiel des Autospektrums der Nordkomponente der Strömung im horizontalen Teil der Verankerung F1 (vgl. Abb. 5.5.5).

„Equatorial and A-Scale-Experiment“

Zielsetzung — Es war die Absicht, in diesem Experiment die Veränderungen der großräumigen tropischen Zirkulation des Atlantischen Ozeans in Horizontalskalen von etwa 100 km bis 2000 km quantitativ zu erfassen. Bisher bekannte Ergebnisse hatten gezeigt, daß insbesondere die Strömungen am Äquator von lokalen wie auch von großräumigen Windschwankungen abhängen, daß aber die Daten nicht ausreichen, um zu klären, welche physikalischen Prozesse dabei besonders wichtig sind. Das Schwergewicht lag deshalb bei der Untersuchung der äquatorialen Strömungen, und hier besonders beim ostwärts gerichteten Unterstrom zwischen 1,5°N bzw. S. Die Einzelprogramme werden im folgenden in drei Experimentgruppen zusammengefaßt.

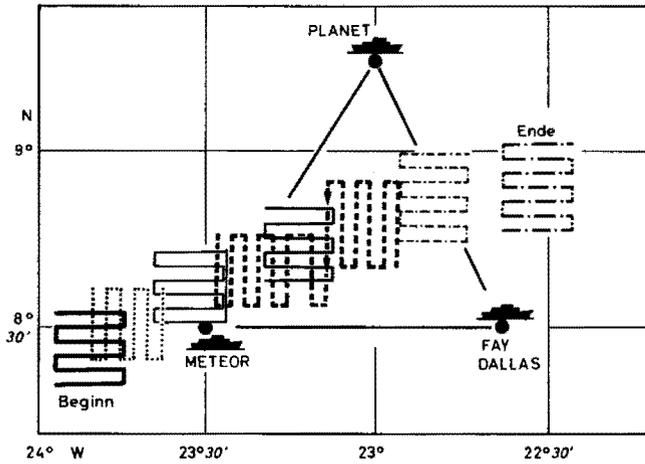


Abb. 5.5.7

Anordnung von Meßkursen der „Discovery“ für profilierende Schleppgeräte im C-Gebiet während der 3. Meßphase, die dem nach Ost-Nordöst setzenden Strom folgen.

a. *Quantitative Beschreibung der tropischen Zirkulation* — Hier ging es um eine Erfassung des Strömungssystems während aller drei Meßphasen mit dem Ziel, Massen- und Salztransport vor allem in zonaler Richtung zu bestimmen und zu klären, in welchem Maße eine Rückzirkulation im A-Gebiet erfolgt. Eine Untersuchung der Strömungsänderungen und der Lage der Oberflächen-Divergenzonen sollte Aussagen über die Reaktion des Strömungsfeldes auf Variationen des Windfeldes und besonders der Lage der ITCZ liefern und möglicherweise Aufschlüsse über die Rückkopplung ozeanischer Änderungen, etwa im äquatorialen Auftrieb und polwärtigen Transport kalten Wassers, auf die atmosphärische Zirkulation erlauben.

Drei unterschiedliche Datensätze wurden erhalten: 1. Temperatur- und Salzgehaltmessungen auf langen meridionalen Schnitten vor, zwischen und nach den Meßphasen bei 30, 28, 25, 23,5 und 25 °W, ferner zahlreiche kürzere meridionale Schnitte zwischen 25 und 10 °W zu verschiedenen Zeiten. 2. Wiederholte Temperatur- und Salzgehaltmessungen der stationären Schiffe während aller drei Meßphasen. 3. Strömungsmessungen mit verankerten Systemen während aller drei Meßphasen, mit besonders vielen Verankerungen auf dem Meridian 23,5 °W.

Für eine Analyse ist ein weitgehend vollständiger internationaler Datensatz erforderlich; Ergebnisse können deshalb jetzt noch nicht vorgelegt werden.

b. *Der äquatoriale Unterstrom* — Frühere Messungen im Atlantik und Pazifik haben gezeigt, daß der Kern des äquatorialen Unterstroms in bezug auf Lage, Form und Intensität der Strömung erheblichen Schwankungen unterworfen ist. Sein Zentrum fand man nördlich oder südlich des Äquators, Variationen des Transports bis zu einem Faktor zwei waren bekannt. Eine recht begrenzte Zahl von Messungen führte zu der Auffassung, daß der Unterstrom von lokalen Windschwankungen in der Weise beeinflußt wird, daß seine Intensität mit abnehmender Westkomponente des Passats zunimmt und sogar zu einem Strom nach Ost an der Oberfläche führen kann, und daß seine Lage sich bei einer Verstärkung der meridionalen Komponente des

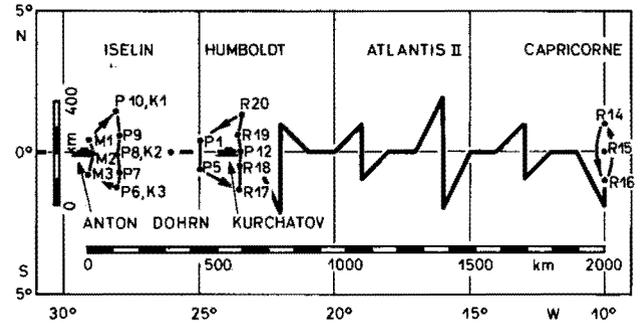


Abb. 5.5.8

Verteilung der Schiffe, der Verankerungssysteme (K1—K3, M1—M3, R14—R20) und der Profilstrommesser-Navigationsbojen (P) sowie wiederholte Kurse der „Iselin“, „Humboldt“ und „Capricorne“ (Pfeile) und der Schleppgerätekurse der „Atlantis II“ (dick ausgezogene Linie) während der 2. Meßphase.

Passats gegen den Wind verschiebt. Theoretische Arbeiten hatten außerdem gezeigt, daß bei einer Reaktion äquatorialer Strömungen auf Windfeldschwankungen zwei Wellen eine Rolle spielen könnten, nämlich westwärts wandernde Rossby-Wellen und ostwärts fortschreitende Kelvin-Wellen.

Ziel des Experiments zum äquatorialen Unterstrom war es deshalb, einen möglichst vollständigen Satz von Strömungs- und Schichtungsdaten im zentralen Atlantik zu erhalten, um räumliche und zeitliche Fluktuationen des Unterstroms zu erfassen und Beziehungen zu großräumigeren Änderungen des tropischen Stromsystems und des Windfeldes festzustellen. Äquatoriale Wellen galt dabei besondere Aufmerksamkeit. Ein Teil des Experiments am westlichen Rand des tropischen Atlantik sollte die Transporte im Brasilianischen Küstenstrom erfassen, um die Quelle des Unterstroms zu identifizieren und die Auswirkung westwärts wandernder äquatorialer Wellen auf die westlichen Randströme zu untersuchen.

Das Meßprogramm enthielt Strommessungen mit profilierenden Geräten von gestoppten Schiffen, deren Drift mit Hilfe verankerter Navigationsbojen bestimmt wurde, Strommessungen mit verankerten Instrumenten, Temperatur- und Salzgehaltmessungen von stationären Schiffen und mit Schleppgeräten vom fahrenden Schiff (der Unterstrom ist im Atlantik durch ein Salzgehaltmaximum erkennbar). Ein besonders konzentriertes Meßprogramm wurde in der zweiten Meßphase durchgeführt. Abb. 5.5.8 zeigt das Stationsnetz für den zentralen äquatorialen Bereich.

c. *Energietransfer und Dissipation im tropischen Stromsystem* — Ziel dieser Untersuchungen war es, festzustellen, ob charakteristische Unterschiede in den kleinskaligen Prozessen zwischen äquatorialen und äquatornahen Gebieten auftreten, und welche turbulenten Austauschvorgänge die tiefe durchmischte Schicht unter dem äquatorialen Unterstrom erzeugen. Das Meßprogramm enthielt neben üblichen Temperatur- und Salzgehaltmessungen vom gestoppten oder fahrenden Schiff vor allem Mikrostrukturaufnahmen mit freifliegenden Sonden. Die Ergebnisse dieser Arbeiten werden voraussichtlich 1976 verfügbar sein.

Ankündigung

Im Frühjahr 1976 soll erscheinen:
CLIMATIC CHANGE

An Interdisciplinary, International
Journal Devoted to the Description,
Causes and Implications of Climatic
Change.

Herausgeber: Stephen H. Schneider,
Boulder, Co, USA.

Subskriptionen an D. Reidel, Publish-
ing Company, P.O. Box 17,
Dordrecht (Holland).

Manuskripte an:

Stephen H. Schneider, National Center
for Atmospheric Research, P.O. Box
3000, Boulder, Co. 80303, USA

Anschriften der Autoren

Dr. H. Hoebler

Meteorologisches Institut der Universität Hamburg
2 Hamburg 13, Bundesstraße 55

Prof. Dr. D. D. Houghton

The University of Wisconsin, Department of Meteorology
1225 West Dayton Street, Madison, Wisconsin 53706

Prof. Dr. H. Kraus

Lehrstuhl für Bioklimatologie der Universität Göttingen
34 Göttingen-Weende, Büsgenweg 1

Prof. Dr. D. R. Rodenhuis

GARP Activities Office, World Meteorological Organization
CH-1211 Genf 20, Case Postale No. 5

Prof. Dr. G. Siedler

Institut für Meereskunde an der Universität Kiel
23 Kiel, Düsterbrookweg 20

Bisher wurden folgende Themen in **promet** behandelt:

Jg. 1, H. 1/2'71	Mikro- und Makroturbulenz
Jg. 2, H. 1'72	Numerische Vorhersage
2'72	Satellitenmeteorologie I
3'72	Satellitenmeteorologie II
4'72	Wolkenphysik
Jg. 3, H. 1'73	Das Barotrope Modell
2'73	Geschichte der meteorologischen Strahlungsforschung
3'73	Meßtechnik und Automation
4'73	Technoklimatologie
Jg. 4, H. 1'74	Die Grenzschicht der Atmosphäre
2'74	Medizinmeteorologie
3'74	Instrumente und Methoden
4'74	Vorhersageprüfung
Jg. 5, H. 1'75	Agrarmeteorologie heute
2'75	Die chemische Zusammensetzung der unteren Atmosphäre. I. Die Gase
3'75	Die chemische Zusammensetzung der unteren Atmosphäre II. Die Aerosole

Manuskriptsendungen werden erbeten an

Hauptschriftleitung „promet“
Herrn Dipl.-Ing. A. Hofmann
6380 Bad Homburg
Theodor-Storm-Str. 35
oder
Deutscher Wetterdienst
— Zentralamt —
6050 Offenbach (Main)
Frankfurter Straße 135