



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH GmbH

**Projekt Hochtemperaturreaktor mit Heliumturbine
Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung
Würenlingen/Schweiz**

Messungen an Kühlturm-fahnen

Teil I

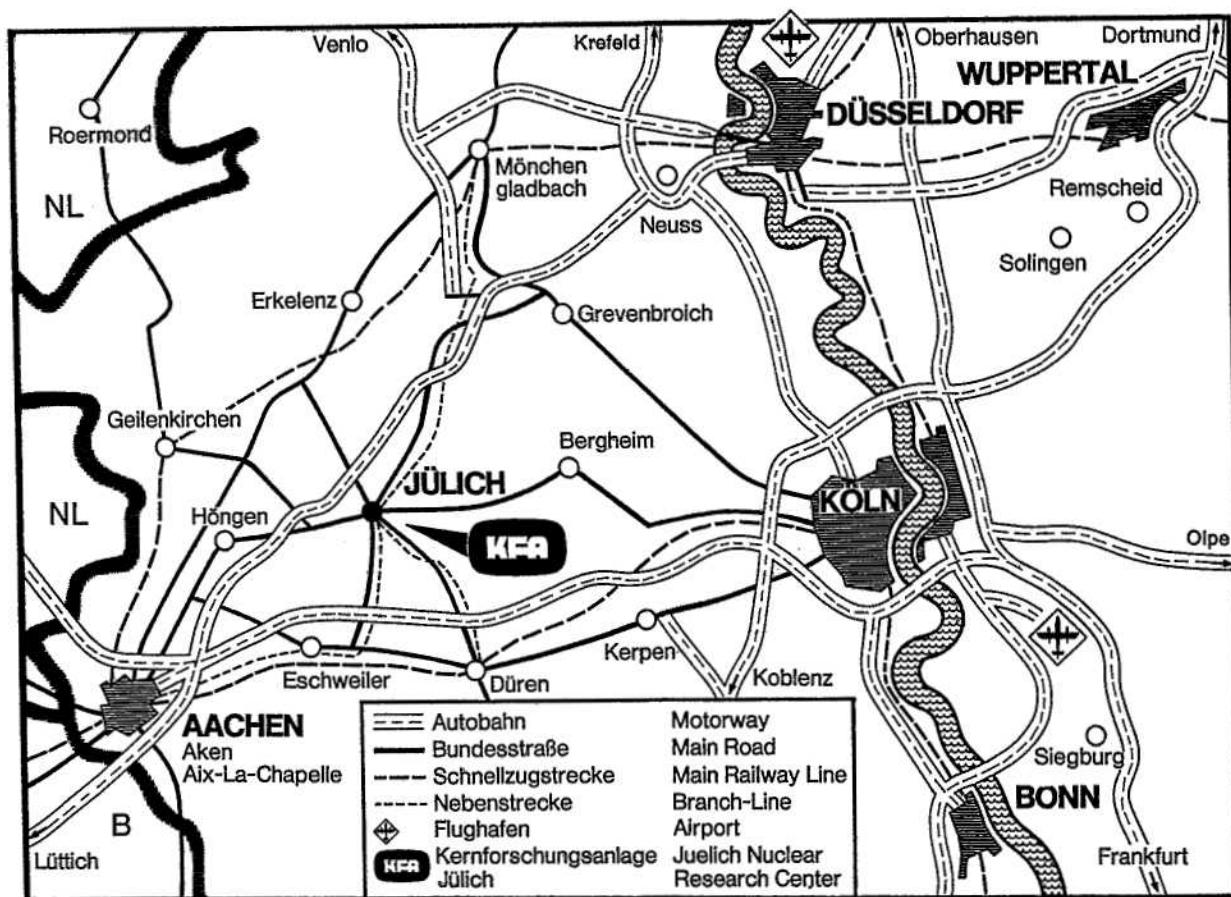
Mathematische Simulation und Bedeutung von Messungen

von

F. Gassmann, D. Haschke und W. Solfrian

**JÜL - 1250 (Teil I)
EIR - Bericht Nr. 295
April 1976**

Als Manuskript gedruckt



Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 1250

Projekt Hochtemperaturreaktor mit Heliumturbine

Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung Würenlingen Schweiz

EIR-Bericht Nr. 295

Im Tausch zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,
Jülich, Bundesrepublik Deutschland

Messungen an Kühlturmfahnen

Teil I

Mathematische Simulation und Bedeutung von Messungen

von

F. Gassmann^{*}, D. Haschke^{*} und W. Solfrian^{**}

^{*} Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung, Würenlingen/Schweiz

^{**} BONNENBERG + DRESCHER GmbH, Jülich

MEASUREMENTS AT COOLING TOWER PLUMES

PART I

Mathematical Simulation and
Importance of Measurements

by

F. Gassmann
D. Haschke
W. Solfrian

ABSTRACT

Referring to the present status of knowledge model conceptions, assumptions and approaches are summarized, which can lead to mathematical models for the simulation of dry or wet cooling tower plumes. By developing a one-dimensional plume model (FOG) the most important problems are considered in detail. It is shown that for the calibration of the necessary parameters as well as for the development of models full scale measurements are of decisive importance. After a discussion of different possibilities of measurement the organisation of a campaign of measurement is described.

MESSUNGEN AN KÜHLTURMFÄHNEN

TEIL 1

Mathematische Simulation und
Bedeutung von Messungen

von

F. Gassmann
D. Haschke
W. Solfrian

KURZFASSUNG

Aus dem heutigen Wissensstand werden Modellvorstellungen, Annahmen und Näherungen herauskristallisiert, die zu mathematischen Modellen zur Simulation von Trocken- oder Naßkühlturmschwaden führen können. Anhand der Entwicklung eines eindimensionalen Schwadenmodells (FOG) wird auf die wichtigsten Probleme eingegangen. Es wird gezeigt, daß Full-Scale-Messungen für die Kalibrierung der unvermeidlichen Parameter sowie für die Weiterentwicklung der Modelle von ausschlaggebender Bedeutung sind. Nach einer Diskussion der verschiedenen meßtechnischen Möglichkeiten wird auf die Organisation einer Meßkampagne eingegangen.

VORWORT

Beim Reaktorkonzept auf der Basis des Hochtemperaturreaktors mit Heliumturbine erfolgt die Wärmeabfuhr aus dem Kreisprozess auf hohem Temperaturniveau. Damit eignet sich dieses Konzept zum Einsatz von Trockenkühltürmen. Die aus den Kühltürmen austretende Luft kann auf höherem Temperaturniveau sein als bei Naßkühltürmen.

In das Arbeitsprogramm des deutsch-schweizerischen HHT-Projektes (Hochtemperaturreaktor mit Heliumturbine) wurden deshalb recht frühzeitig auch Untersuchungen über die Auswirkungen von Trockenkühltürmen auf das Mikroklima aufgenommen. Die Entwicklung der Simulationsmodelle und der Rechenprogramme zur Ermittlung der Ausbreitung der Kühlturmfahnen und damit zur Erfassung der Veränderungen der klimatischen Verhältnisse übernahm innerhalb des Projektes das Eidgenössische Institut für Reaktorforschung (EIR) in Würenlingen/Schweiz (Dipl. Ing. D. Haschke, Dipl. Phys. F. Gassmann).

Die Qualität der Vorhersagen dieser Rechenprogramme ist abhängig von der Verifikation und Kalibrierung durch gemessene Daten. Da derartige Meßwerte im erforderlichen Umfang nicht verfügbar waren, wurden umfangreiche Meßkampagnen zur Beschaffung dieser Daten initiiert. Eingehende Studien über das anzuwendende Meßverfahren ergaben, daß in erster Linie nur die Messungen aus Flugzeugen in Kombination mit ergänzenden Methoden (Dropsonden etc.) zum gewünschten Erfolg führen. Die Durchführung dieser Messungen wurde deshalb dem Institut der Physik der Atmosphäre der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR) in Oberpfaffenhofen übertragen, das mit den dafür erforderlichen Meßgeräten und Flugzeugen ausgerüstet wurde. Die Messungen wurden unter der Leitung von Prof. Dr. H. Fortak durchgeführt. Der Deutsche Wetterdienst in Offenbach (Dipl. Ing. W. Caspar) lieferte die Wettersondierungen. Neben den Messungen mit Flugzeugen wurde zur Erfassung der räumlichen Ausbreitung der Kühlturmfahnen, insbesondere von Trockenkühltürmen, auch das Lidarverfahren eingesetzt. Diese Messungen wurden durch das Observatorium des Deutschen Wetterdienstes in Aachen (Dipl. Ing. H. Borchardt) ausgeführt. Die Leitung hatte das EIR.

Die Organisation der Meßkampagnen übernahm im wesentlichen die Firma BONNENBERG & DRESCHER GmbH, Jülich (Dipl. Ing. W. Solfrian). Die Gesamtkoordination lag bei der HHT-Projektleitung der KFA Jülich GmbH (Dr. Ing. H.V. Schlenker). Die Finanzierung der Flugzeug-Meßkampagnen erfolgte durch die KFA Jülich und die der Lidar-Messungen weitgehend durch das EIR.

Da Trockenkühltürme großer Leistung nicht existieren, wurden die dreidimensionalen Vermessungen mit Flugzeugen an Naßkühltürmen vorgenommen, und zwar an den Kraftwerken Neurath (900 MWe) und Meppen (600MWe) des Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerkes (RWE). Die Meßkampagne wurde in zwei Phasen untergliedert. Die erste Phase (März bis Juni 1974) diente hauptsächlich der Erprobung des Feldeinsatzes der Flugzeug-Meßsysteme an den Kühltürmen in Neurath. Die positiven Ergebnisse der ersten Phase des Meßprogramms sowohl hinsichtlich der Zuverlässigkeit der Meßsysteme als auch der reibungslosen Koordination aller an der Meßkampagne Beteiligten dienten als Entscheidungskriterium für die zweite Phase (November 1974 bis April 1975).

Die Dokumentation der Ergebnisse der Meßkampagne erfolgte in vier Teilen:

- Teil 1: Mathematische Simulation und Bedeutung von Messungen.
- Teil 2: Lidarmessungen an Kühlturmfahren.
- Teil 3: Dreidimensionale Vermessung von Kühlturmfahren.
- Teil 4: Ausgewählte Daten der dreidimensionalen Vermessung von Kühlturmfahren.

Teil 1 beschreibt die wichtigsten Ausbreitungsmodelle und die Wechselwirkung zwischen Meßdaten und Modellrechnung; außerdem werden die Auswahl der Meßmethoden sowie der Umfang und die Abwicklung der verschiedenen Meßkampagnen skizziert. Die Lidar-meßverfahren und die dazugehörigen Messungen werden in Teil 2 vorgestellt. Der dritte Teil enthält die Beschreibung sowohl der theoretischen Grundlagen, die als Basis der dreidimensionalen Vermessungen mit Flugzeugen diente, als auch der Meßmethoden und -systeme. Der Ablauf der beiden experimentellen Phasen wird geschildert. Ferner enthält Teil 3 die bei den Messungen gewonnenen Erkenntnisse und die daraus zu ziehenden Schlußfolge-

rungen und Empfehlungen. Teil 4 der Dokumentation wendet sich mehr an den Spezialisten. Dieser Datenband enthält eine Auswahl der während der Flugzeug-Kampagnen angefallenen Meßergebnisse in Form von Originaldaten oder bereits als aufgearbeitete Daten. Mit Hilfe dieses Materials können bereits Verifizierung und Kalibrierung der Simulationsprogramme vorgenommen werden. In Teil 4 sind ferner alle Meßflüge und Teile der dabei gewonnenen Messungen festgehalten. Eine Dokumentation aller Daten in Berichtsform war wegen des Umfangs des gesammelten Datenmaterials nicht möglich. Für Interessenten ist dieses Datenmaterial aber zusammen mit einer entsprechenden Computer-Software in Form von Magnetbändern erhältlich.

Damit glauben wir eine Basis geschaffen zu haben, die einen ersten Schritt in Richtung auf eine fundierte Erfassung der lokalen Auswirkungen von Kühlturmfahren auf das Mikroklima erlaubt. Anhand der Antworten und Erkenntnisse derer, die diese Meßdaten in ihren Simulationsmodellen benutzen, werden weitere Schritte zu entscheiden sein.

Jülich, März 1976

HHT-Projektleitung

Inhaltsverzeichnis

Seite

Zusammenfassung	1
1. <u>Simulation von Kühlturmschwaden</u>	
1.1. <u>Problemstellung</u>	
1.1.1. Einführung	1
1.1.2. Aufgabe und Zielsetzung des Forschungs- vorhabens "Beeinflussung des Mikroklimas durch Kühltürme"	4
1.1.3. Wärmequellen	7
1.2. <u>Mathematische Modelle</u>	
1.2.1. Heutiger Stand des Wissens	10
1.2.2. Hydrodynamische Modelle	14
1.2.3. Paket- und Diffusionsmodelle	17
1.3. <u>Das EIR-Schwadenmodell FOG</u>	
1.3.1. Modelltypus	22
1.3.2. Aufstiegsteil	23
1.3.3. Diffusionsteil	51
1.3.4. Entwicklungspotential	56
1.4. <u>Beispiele für FOG-Rechnungen</u>	
1.4.1. Bestimmung der Mischungsparameter aus Schornsteinformeln	58
1.4.2. Vermischung von Fahnen benachbarter Kühltürme	61
1.4.3. Vergleich zwischen trockenem und nassem Kühlturm für die Sondierung vom 20.11.74	69
1.4.4. Durchstossen von Inversionen für einige Trockenkühltürme	73

	Seite
2. Experimentelle Ueberprüfung von <u>Simulationsmodellen</u>	
2.1. Notwendigkeit für eine experimentelle <u>Ueberprüfung</u>	75
2.2. Grundsätzliche Möglichkeiten der dreidi- <u>mensionalen Vermessung von Kühlturmflächen</u>	78
2.2.1. Messungen in der ungestörten Atmosphäre	79
2.2.2. Messungen im atmosphärischen Störbereich des Kühlturmes	80
2.2.3. Bestimmung der Austrittsdaten des Kühlturmes	85
2.2.4. Messung der Bodenbelastung	86
2.3. Entwicklung der Strategie für ein <u>Messprogramm</u>	87
 Anhang : Symbole	 98
Literaturverzeichnis	101

Abbildungsverzeichnis

Seite

Abb. 1	Vergleich verschiedener Energieumsätze	3
2	Entrainment und Detrainment	33
3	Modell für Entrainment und Detrainment	37
4	Unterteilung des Schwadens	41
4a	Parametrisierung des Entrainment	42
5	Uebersicht über die Mikrophysik der Wassertröpfchen	46
6	Sondierung von Neurath am 20.11.74 10h MEZ	62
7	Messdrohnen-Flüge in Neurath vom 20.11.74, 09 ³⁰ - 10 ⁰⁰ MEZ	63
8	Berechnung des Schwadens eines einzelnen Kühlturmes des Kraftwerkes Neurath vom 20.11.74, 10h MEZ a) Aufstiegsrechnung b) Feuchteerhöhungen	65
9	Instantane Vermischung der drei Kühlturmschwaden	68
10	Aufstieg eines 1900 MW Trockenkühlturmschwadens mit einer Austrittsgeschwindigkeit von 2.5 m/sec	72
11	Strategie für die Auswahl der Messsysteme	91

TabellenverzeichnisSeite

Tab. 1	Ueberblick über wichtige Grössen bei Naturzug-Kühltürmen einer 1000 MW _{el} -Anlage	8
2	Uebersicht über Schwadenmodelle	13
3	Mischungsparameter aus Schornsteinformeln	60
4	Sondierung von Neurath am 20.11.74, 10h MEZ	62
5	Daten des Kraftwerkes Neurath	66
6	Aufstiegshöhen der Schwaden von 420 MW Trockenkühltürmen mit konstanter Austrittsgeschwindigkeit aber verschiedenen Austrittsradien	70
7	Aufstiegshöhen der Schwaden von 420 MW Trockenkühltürmen mit konstantem Radius aber verschiedenen Austrittsgeschwindigkeiten	71
8	Aufstiegshöhen der Schwaden von 1900 MW Trockenkühltürmen mit konstantem Radius aber verschiedenen Austrittsgeschwindigkeiten	72
9	Aufstiegshöhen der Schwaden eines 420MW Trockenkühlturmes bei verschieden starken Inversionen	74
10	Messprogramm "Umweltauswirkungen von Kühltürmen"	95

Zusammenfassung

Aus dem heutigen Wissensstand werden Modellvorstellungen, Annahmen und Näherungen herauskristallisiert, die zu mathematischen Modellen zur Simulation von Trocken- oder Nasskühlturmschwaden führen können. Anhand der Entwicklung eines eindimensionalen Schwadenmodelles (FOG) wird auf die wichtigsten Probleme eingegangen. Es wird gezeigt, dass Full-Scale-Messungen für die Kalibrierung der unvermeidlichen Parameter sowie für die Weiterentwicklung der Modelle von ausschlaggebender Bedeutung sind. Nach einer Diskussion der verschiedenen messtechnischen Möglichkeiten wird auf die Organisation einer Messkampagne eingegangen.

1. Simulation von Kühlturmschwaden

1.1. Problemstellung

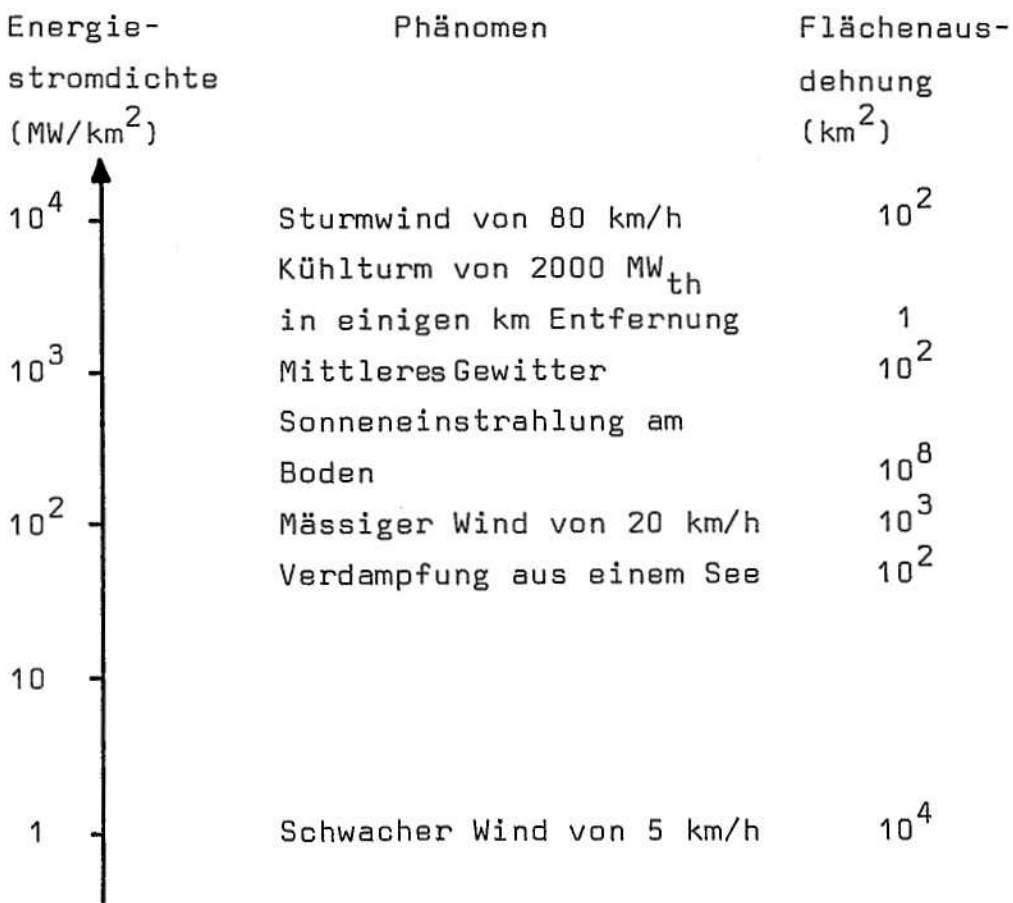
1.1.1. Einführung

Die gesamte durch den Menschen in Umlauf gebrachte Energiemenge tritt früher oder später irgendwo auf unserem Planeten als zusätzliche Wärme auf, die sich auf einem derart niedrigen Temperaturniveau befindet, dass sie zu nichts mehr brauchbar als Abwärme bezeichnet wird. Die Abwärme ist daher ebenso alt wie die Energieerzeugung, das Abwärmeproblem hingegen wurde erst viel später erkannt, als die technischen Errungenschaften die Umsetzung von riesigen Energiemengen auf kleinem Raum erlaubten. Besonders krass tritt dies bei Wärmekraftwerken zutage, die die Wärmeenergie naturgemäss nur zu einem

Bruchteil in die gewünschte elektrische Energie umzusetzen vermögen und deshalb riesige Mengen von meistens unerwünschter Abwärme produzieren. Der Wegtransport dieses unvermeidlichen Nebenproduktes gibt nun einerseits zu technologischen und wirtschaftlichen Fragen und Problemen Anlass, andererseits aber auch zu solchen des Umweltschutzes, sobald damit das natürliche Gleichgewicht der betroffenen Umgebung merklich gestört werden könnte. Ein Vergleich zwischen Energiestromdichten, die beispielsweise mit dem Schwaden eines 2000 MW-Kühlsystems gekoppelt sind und solchen, die verschiedene für die atmosphärische Dynamik wichtige Phänomene begleiten zeigt, dass ein solcher Schwaden ganz beachtliche Werte aufweist. Die in Abb. 1 gegebenen Grössenordnungen sind so zu verstehen, dass die Summe von kinetischer Energie, potentieller Energie, fühlbarer und latenter Wärme eines Kühlturmschwadens eines Kraftwerkes von etwa 1000 MW_{el} in 5 bis 10km Entfernung dieselben Energiestromdichten darstellt, die man auch in mittleren Gewittern oder stürmischen Winden findet. Diese lokal gesehen enormen Leistungen von Kühlturmschwaden fallen aber bei Mitberücksichtigung der Flächenausdehnung zu recht unbedeutenden Beträgen ab. Dieser Umstand legt die Vermutung nahe, dass der Betrieb von grossen Kühltürmen relevante Änderungen des Mikroklimas zur Folge haben könnte, obwohl die Energiebeiträge in einem grösseren Rahmen betrachtet unbedeutend erscheinen. Analoge Vergleiche für andere Arten von Kühlsystemen führen zu ähnlichen Resultaten. Es soll hier allerdings betont werden, dass die erwähnten Störungen des natürlichen Gleichgewichtes nicht notwendigerweise nur negative Folgen haben müssen und dass Lösungsmöglichkeiten des Abwärmeproblems denkbar sind, bei denen die positiven Auswirkungen auf die natürliche Umgebung überwiegen könnten. Man denke beispielsweise

an die Möglichkeit, dass leistungsfähige Naturzugkühltürme einen gewissen Luftaustausch in schlecht belüfteten Regionen ermöglichen könnten oder dass sonst gefährliche Gewitter in einem noch ungefährlichen Stadium frühzeitig ausgelöst werden könnten, wobei der Kühlturm mit einem Lawinenschützen zu vergleichen wäre.

Abb. 1 Vergleich verschiedener Energieumsätze



Weitere verlockende Möglichkeiten bietet die Beheizung von Ackerboden, was eine beträchtliche Steigerung des Ertrages zur Folge haben könnte, die Beheizung von kalten Seen zur Beschleunigung des Fischwachstums und vieles andere mehr. Alle diese Lösungsmöglichkeiten haben etwas gemeinsam: Es liegt ein Eingriff in ein sehr komplexes System vor, dessen Gleichgewicht sich in geologischen Zeiträumen eingestellt hat und dessen Empfind-

lichkeit und dynamisches Verhalten auf Störungen weitgehend unbekannt ist. Um nun aus der Sicht des Umweltschutzes ein bestimmtes Kühlsystem einem anderen vorziehen zu können, muss versucht werden, die Gesamtheit der Auswirkungen jedes Systems quantitativ zu erfassen oder, was dasselbe bedeutet, seine Wechselwirkungen mit der Umgebung zu verstehen.

1.1.2. Aufgabe und Zielsetzung des Forschungsvorhabens "Beeinflussung des Mikroklimas durch Kühltürme"

Von den drei grundsätzlichen Möglichkeiten der Abgabe der Abwärme an Festkörper (Boden), an Flüssigkeiten (Gewässer) oder an Gase (Atmosphäre) soll innerhalb des vorliegenden Forschungsvorhabens "Beeinflussung des Mikroklimas durch Kühltürme" lediglich die atmosphärische Kühlung vom Standpunkt des Umweltschutzes her behandelt werden. Da sich die Schwaden verschiedener Kühlturmtypen, insbesondere nasser oder trockener Kühltürme, physikalisch nicht prinzipiell unterscheiden, gelten die Ausführungen der vorliegenden Arbeit für alle zur Zeit in der Diskussion stehenden Varianten.

Die möglichen, durch die Abgabe grosser Mengen latenter und fühlbarer Wärme an die Atmosphäre bedingten Auswir-

kungen werden sich auf einen Bereich um das Kühlsystem herum beschränken, der im geographischen Massstab als klein erscheint, weshalb man von mikroklimatischen Auswirkungen spricht. Diese lassen sich etwa folgendermassen in Gruppen unterteilen:

Primäre Auswirkungen:

- Vertikaltransport von Luft und maximale Aufstiegshöhe der Schwaden
- Veränderung des Feuchtigkeits- und Temperaturfeldes, insbesondere am Boden
- Bildung von Nebel und sichtbaren Schwaden
- Bildung von Niederschlag aus dem Schwaden

Sekundäre Auswirkungen:

- Beschattung des Bodens durch Nebel, Schwaden und Wolken
- Triggereffekte wie Auslösung von Regen und Gewittern, Aufbrechen von Inversionen, Bildung von Wolkendecken
- Durch den Vertikaltransport von Luft bedingte Ventilation, Säuberung der bodennahen Luftschicht und Anreicherung des Aerosolgehaltes in der Höhe
- Umlenkung von schwachen Winden oder deren Blockierung
- Bildung von Glatteis auf Strassen durch Niederschlag und Nebel

Die getroffene Unterteilung in primäre und sekundäre Auswirkungen ist dabei zum Teil willkürlich und soll lediglich eine vernünftige Reihenfolge zur Lösung des gesamten Problemkomplexes andeuten: Eine genaue Kenntnis der unter primäre Auswirkungen aufgeführten Punkte kann einerseits ohne Kenntnis der sekundären Auswirkungen erworben

werden und andererseits ist eine exakte quantitative Kenntnis der ersteren unbedingt notwendig für die Behandlung der sekundären Effekte.

Das erste Ziel des Forschungsvorhabens und zugleich das Thema der vorliegenden vierteiligen Berichtreihe soll deshalb die Prognose der oben erwähnten primären Auswirkungen für Kühlturmleistungen von ca. 2000 MW darstellen. Dabei muss ein besonderes Augenmerk gelegt werden auf Wetterlagen, während denen einzelne Effekte besonders ausgeprägt zu erwarten sind. Solche Extrembedingungen sind anzunehmen bei:

- starken Höhen- und Bodeninversionen
- grosser Kälte mit hohen Luftfeuchten
- starken Winden
- besonders instabilen Schichtungen
- stark höhenabhängigen Luftfeuchten

Die Genauigkeit der Vorhersagen der Primäreffekte sollte innerhalb eines weit gesteckten Anwendungsbereiches möglichst gross sein, um sie als Grundlagen für weitere Arbeiten verwenden zu können wie:

- Berechnung der Sekundäreffekte
- Durchführung von Standortanalysen für Kraftwerke
- Standortspezifische Optimierung der Kühlturm-Austrittsdaten und Geometrie
- Extrapolation auf Kraftwerksparks mit Abwärmeleistungen von 20'000 MW.

Die dafür nötige Genauigkeit der Berechnung der Primäreffekte dürfte etwa vergleichbar sein mit der Genauigkeit von aufwendigen aber trotzdem durchführbaren Full-Scale-Messungen.

1.1.3. Wärmequellen

Für die vorliegende Problematik kann ein Kühlsystem charakterisiert werden durch die Geometrie der Luftaustrittsöffnungen und den thermodynamischen und kinematischen Zustand der ausströmenden Luft. Repräsentative Werte für die zur Zeit wichtigsten Kühlsysteme für Leistungen um 2000 MW, die nassen und trockenen Naturzugkühltürme, sind in der Tabelle 1 zusammengestellt. Beachtenswert ist die Tatsache, dass ein Trockenkühlturm zufolge des etwa dreifachen Luftdurchsatzes bei bestimmten meteorologischen Verhältnissen (bei Temperaturen über 20°C und relativen Feuchten über 80%) mehr Wasserdampf in die Höhe transportieren kann als ein entsprechender Nasskühlturm, der etwa 70% der Energie in Form von verdampftem Wasser abgibt. Dies stellt die weitverbreiteten Behauptungen sehr in Frage, nach denen Trockenkühltürme keine sichtbaren Schwaden und Wolken erzeugen könnten. Die theoretischen Grundlagen für die Berechnung von trockenen oder nassen Kühlsystemen sind weitgehend bekannt (1) und lassen sich folgendermassen zusammenfassen:

- Energiesatz
- Kontinuitätsgleichung
- Kamingleichung (Auftrieb = Druckverluste)
- Wärmeübertragung
 - Wärmeübergangszahlen bei Trockenkühlung
 - Merkel-Theorie (2)(3) bei Nasskühlung

Sowohl bei den Druckverlusten wie auch bei der Wärmeübertragung kommen empirisch zu bestimmende Konstanten vor, deren vorteilhafte Beeinflussung durch günstige Konstruktionen ein Hauptanliegen der Kühlturm-Hersteller darstellt.

Tab. 1 Ueberblick über wichtige Grössen bei Naturzug-Kühltürmen einer 1000 MW_{el}-Anlage

	Nasskühlturm	Trockenkühlturm
Thermische Leistung	1900 MW	1900 MW
Abgabe der Energie in Form von latenter Wärme	70 %	-
Höhe	150 m	135 m
Basisdurchmesser	120 m	190 m
Austrittsdurchmesser	75 m	135 m
Wasserdurchsatz	32 t/sec	5,3 t/sec
Verdampfte Wassermenge	0,5 t/sec	-
Kühlzonenbreite ($T_{\text{warm}} - T_{\text{kalt}}$)	14°C	86°C
Luftdurchsatz	27 t/sec = 0,08 km ³ /h	80 t/sec = 0,24 km ³ /h
Austrittstemperatur	29°C	34°C
rel. Feuchte am Austritt	100 %	18 %
Fluss von Wasserdampf + Wasser durch Austrittsquerschnitt	0,7 t/sec	0,5 t/sec
Mittlere Aufstiegshöhen der Schwade	700 m	1000 m

Die Werte der obigen Tabelle gelten approximativ für Naturzug-Kühltürme unter folgenden meteorologischen Bedingungen:

Bodentemperatur : 10°C
 rel. Feuchte : 80 %
 Windgeschwindigkeit : 3 m/sec

Ein auf den obigen Grundlagen aufgebauter Computer-Code CTWNC (Cooling Tower Wet Natural draft Counter flow) des EIR wurde verwendet für Vergleichsrechnungen mit Messungen an einem 420 MW Naturzug-Nasskühlturm des Braunkohlekraftwerkes Neurath der RWE (4). Die Uebereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Werten bewegte sich dabei im Rahmen der Messgenauigkeit für alle Messrunden (4), die sich durch kleine Windgeschwindigkeiten und gute Energiebilanzen auszeichnen. Währenddem Abweichungen bei Messrunden mit schlechten Energiebilanzen auf grössere Messungenauigkeiten zurückgeführt werden können und die Genauigkeit der Berechnungen unangetastet lassen, müssen die aerodynamischen Einflüsse von Winden auf das Kühlsystem noch genauer untersucht und in den mathematischen Modellen berücksichtigt werden. Experimentelle und theoretische Studien in diesem Bereich werden zur Zeit am EIR durchgeführt (5).

Es sei an dieser Stelle betont, dass bis heute die Kühltürme lediglich von einem technisch-wirtschaftlichen Standpunkt aus optimiert werden. Optimierungskriterien bezüglich mikroklimatischen Auswirkungen sind hingegen noch vollständig unbekannt und können deshalb nicht mitberücksichtigt werden. Diese fehlenden Kriterien zu liefern stellt ein Teilziel des vorliegenden Forschungsvorhabens dar, wie bereits unter 1.1.2. erwähnt wurde.

1.2. Mathematische Modelle

1.2.1. Heutiger Stand des Wissens

Bei der Aufgabe, einen Kühlturmschwaden zu simulieren, handelt es sich um ein Problem mit unendlich vielen Freiheitsgraden, also um ein kontinuummechanisches Problem, das durch die notwendige Verkopplung mit thermodynamischen Effekten und mikrophysikalischen Prozessen (Phasenübergänge, Tröpfchenphysik) noch komplexer gestaltet wird. Eine einwandfreie Lösung des Problems ausgehend von den physikalischen Grundprinzipien scheitert einerseits an den noch lückenhaften Kenntnissen im Bereiche der Mikrophysik und andererseits an der Unmöglichkeit, das sich ergebende mathematische System vielfach gekoppelter partieller Differentialgleichungen mit Berücksichtigung mehrerer Rand- und Anfangsbedingungen exakt aufzulösen. Der einzig mögliche Ausweg besteht darin, das Problem mit Hilfe von Modellvorstellungen und Näherungen so weit zu vereinfachen, bis ein lösbares mathematisches Problem entsteht. Bei diesem Prozess lässt sich aber die Einführung unsicherer empirischer Werte (Parameter) nicht vermeiden, woraus sich die Notwendigkeit der experimentellen Ueberprüfung und Kalibrierung jedes möglichen Modelles ableitet. Die gänzlich verschiedenen Formen der heute angebotenen Modelle resultieren nun aus den unterschiedlichen Modellvorstellungen und Näherungen, die ihnen zugrunde gelegt wurden. Je nach dem beabsichtigten Aufwand werden einfacher oder komplizierter zu behandelnde Modellvorstellungen herangezogen, woraus dann Modelle entstehen, die sehr verschiedene Grade von Komplexität aufweisen können. Hinsichtlich einer spezifischen Fragestellung kann dann das eine oder andere Modell das geeignetere sein, aber nie wird das komplexere Modell schlechthin als das bessere und genauere Modell angesprochen werden können.

Die heute existierenden Rechenprogramme für Kühlturmschwaden greifen im wesentlichen auf folgende Vorarbeiten zurück:

a) Die Theorie der Schadstoffausbreitung in der Atmosphäre beruht auf den grundlegenden Arbeiten von Sutton (6) zur atmosphärischen Diffusion sowie denjenigen von Pasquill (7) über die Abhängigkeit der Schadstoffausbreitung von atmosphärischen Bedingungen, die er in 6 Diffusionskategorien einteilte.

b) Zur Abschätzung der maximalen Aufstiegshöhe von Rauchfahnen (effektive Schornsteinhöhe) eignen sich die in (8) zusammengefassten halbempirischen Formeln. Sie sind jedoch nur mit Vorbehalt auf Kühlturmfahnen extrapolierbar, da sich diese wesentlich von Rauchfahnen hinsichtlich ihrer Struktur und damit ihres Aufstiegsverhaltens unterscheiden könnten.

c) Die Versuche der theoretischen Meteorologie, die Dynamik von Kumuluswolken numerisch zu simulieren gehen zurück auf die Arbeiten von Weinstein (9/10), die den Ausgangspunkt für eine ganze Anzahl von Paketmodellen bildeten (vgl. Kap. 1.2.3.). Das ursprüngliche Motiv für die Entwicklung des Weinstein-Kumulusmodells war die Aufgabe, den für künstliche Niederschlagsbildung optimalen Impfzeitpunkt für einen Kumulus zu bestimmen.

d) Auf breiter theoretischer Basis und mit beachtlichem numerischem Aufwand wurde das "Deep Convection Problem" von Takeda (11) und Orville (12) angegangen. Diese Forscher versuchten, numerische Lösungen der zeitabhängigen Navier-Stokes Gleichungen in zwei Dimensionen zu finden, wobei mit verschiedenen Annahmen versucht wurde, den tur-

bulenten Energie- und Impulstransport sowie die Mikrophysik der Wassertröpfchen möglichst detailliert zu erfassen.

Tabelle 2 zeigt eine schematische Uebersicht über die heute bekannten Schwadenmodelle, die in drei Klassen eingeteilt werden können: Die erste umfasst die teils halbempirischen Formeln der Schornsteintheorie, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll, die zweite die Paket- und Diffusionsmodelle und die dritte die hydrodynamischen Modelle. Die letzteren beiden Modellklassen werden in den folgenden Kapiteln 1.2.2. und 1.2.3. näher behandelt werden. Die in der Tabelle angegebenen Modelleigenschaften und Literaturstellen wollen keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, sondern sollen lediglich als grobe Wegweiser dienen.

Tabelle 2 Uebersicht über Schwadenmodelle

Modellklasse Charakteristikum	Beschreibung der Schwaden-Turbulenz	Mikrophysik der Wassertröpfchen	Beschreibung der atmosphärischen tur- bulenten Diffusion	Rechenprogramme bezw. wesentliche Lite- raturstellen
<u>Schornsteintheorie</u> Explizite analy- tische Näherungslö- sungen der Paket- theorie	keine explizite, ist in den (halb-empi- rischen) Aufstiegs- formeln implizit enthalten.	keine	Gaussförmige Diffu- sion einer Punkt- quelle, empirische Diffusionsparameter als Funktion der Entfernung	Briggs: Plume Rise (8) Pasquill: Atmos- pheric Diffusion (7)
<u>Paket- und Diffu- sionsmodelle</u> Eindimensionale Be- handlung der Bewe- gungsgleichung	mit algebraischen Glei- chungen, die experimen- telle zu bestimmende Pa- rameter enthalten	Tröpfchenbildung und Wachstum durch empirische Parameter, kein Tröpfchen- spektrum	Wie Schornsteintheo- rie oder ev. Lösung der Diffusionsglei- chung für Linienquel- le und Zurückführen der Diffusionskons- tanten auf Sandierung	Sutton (6) Pasquill (7) Weinstein (9/10) Abraham (17) Doms (18) Stephen-Moroz (19) SAUNA (14) TOWER (15) FOG (Kap. 1.3.)
<u>Hydrodynamische Modelle</u> Lösung der Navier- Stokes-Gleichun- gen in 2 oder 3 Dimensionen	mit partiellen Diffe- rentialgleichungen (sog. "mathematische Modelle der Turbu- lenz"), die experi- mentell zu bestim- mende Diffusions- konstanten enthalten	Tröpfchenbildung und Wachstum durch empirische Parame- ter, ev. Tröpfchen- spektrum	Wie Beschreibung der Schwaden-Tur- bulenz; ev. Zurück- führung der Diffu- sionskonstanten auf Sandierung	Takeda (11) Orville (12) Spalding (21) PLUMEFF (16) WALKUERE (20)

1.2.2. Hydrodynamische Modelle

Der naheliegendste Weg für eine Lösung des vorliegenden kontinuummechanischen Problems scheint wohl der, den Raum in eine endliche Anzahl Elemente, die dann in ihren Eigenschaften als homogen angenommen werden, zu unterteilen und alle dynamischen und thermodynamischen Gleichungen für diese Elemente zu formulieren. Das sich ergebende Gleichungssystem von gekoppelten, partiellen Differentialgleichungen lässt sich dann mit Hilfe weiterer Annahmen und Näherungen durch ein iteratives Verfahren auf dem Computer lösen. Die wichtigste Einschränkung besteht meistens darin, dass versucht wird, das Problem auf zwei räumliche Dimensionen zu reduzieren. Dies kann entweder dadurch erreicht werden, dass die horizontale Koordinate quer zur Windrichtung einfach weggelassen wird, dass nur zylindersymmetrische Lösungen betrachtet werden (kein Wind) oder dass die turbulente Diffusion in Windrichtung vernachlässigt wird und eine zweidimensionale zeitabhängige Rechnung innerhalb einer mit Windgeschwindigkeit fortschreitenden, senkrecht zur Windrichtung stehenden Ebene ausgeführt wird. Durch jede der erwähnten Massnahmen lässt sich das Problem ganz entscheidend vereinfachen, weil zweidimensionale (und nur zweidimensionale!) Probleme durch Einführung einer Wirbelfunktion auf eine Poisson'sche Differentialgleichung zurückgeführt werden können, die numerisch relativ leicht zu behandeln ist. Als Beispiel für ein Modell der ersten Art kann PLUMEFF des EIR (16) herangezogen werden, das sowohl in x-z als auch in Zylinder-Geometrie rechnen kann und zeitabhängige Resultate liefert. Modelle der zweiten Art sind zum Beispiel diejenigen von Nester (20) und Spalding (21), die quasi-

dreidimensionale, stationäre Resultate liefern. Die beiden Arten von Modellen sind übrigens nicht prinzipiell verschieden, sondern lassen sich sogar mit relativ kleinem Aufwand ineinander überführen. Auf weitere Vereinfachungen wie zum Beispiel die Annahme eines inkompressiblen Mediums zur Unterdrückung von Schall-Instabilitäten, die Vernachlässigung horizontaler Druckgradienten etc. soll hier nicht näher eingegangen werden.

Während einerseits die Reduktion um eine Dimension lediglich eine Vereinfachung des mathematischen Problems und damit eine Verkürzung der Rechenzeit auf ein tolerierbares Mass bezwecken soll und damit eine mit schnelleren Maschinen eliminierbare Näherung darstellt, so bedeutet die Annahme einer endlichen Anzahl homogener Pakete eine prinzipielle Schwierigkeit, die sich nie umgehen lassen wird. Die grundlegende Problematik besteht darin, dass das ganze zu beschreibende System in mehr oder weniger willkürlicher Art und Weise in zwei Teile zerlegt wird: Der eine Teil besteht aus Strukturen, die grösser als die gewählten Raumelemente sind und deren Veränderungen daher durch physikalische Grundgesetze kausal beschrieben werden. Der andere, nicht weniger bedeutungsvolle Teil, die Strukturen innerhalb eines Raumelementes, werden durch statistische Modelle erfasst, in denen empirische, von der Maschenweite abhängende Parameter eine wichtige Rolle spielen, ähnlich wie die Entrainment- und Diffusionsparameter in den Paket- und Diffusionsmodellen (Kap. 1.2.3.). Auf diese Weise vermag der abrupte Uebergang von der kausalen zur statistischen Beschreibung, oder anders gesagt, von der Bewegung zur Wärme, den sonst sehr klaren und mathematisch schönen Aufbau der hydrodynamischen Modelle in äusserst starkem

Masse zu verdüstern. Die erwähnten bei hydrodynamischen Modellen anzutreffenden Probleme lassen sich, durch einige weiteren Punkte ergänzt, etwa folgendermassen zusammenfassen:

- Beschreibung der Turbulenz innerhalb der Raumelemente
- Uebertragbarkeit der Berechnungen von zwei auf drei Dimensionen
- Formulierung von Randbedingungen
- Numerische Probleme wie Instabilitäten, numerische Diffusion etc.
- Wirkungsquerschnitte für tröpfchenphysikalische Prozesse
- Lange Rechenzeiten

Die Liste von zum grössten Teil offenen und gravierenden Problemen legt nahe, dass in den hydrodynamischen Modellen noch ein enorm grosses Forschungspotential steckt und dass die Modelle für eine praktische Anwendung noch nicht reif genug zu sein scheinen.

1.2.3. Paket- und Diffusionsmodelle

Die wesentlichste Modellvorstellung, die den Paket- und Diffusionsmodellen gemeinsam ist, besteht in der Unterteilung des gesamten Schwadens, ob sichtbar oder unsichtbar, in einen Ast aufsteigender Luftpakete und einen Diffusionsteil. Der Aufstiegssteil ist dabei gekennzeichnet durch das Vorhandensein einer mittleren Vertikalgeschwindigkeit, die grösser ist als die Turbulenz-Intensität der freien Atmosphäre, im Diffusionsteil ist dieser Sachverhalt umgekehrt.

Die zusätzlichen Modellvorstellungen für den Aufstiegssteil gehen zurück auf Ideen von Weinstein (9/10), der versucht hat, das "Deep Convection Problem" der Meteorologie (Kumulus-Wolken) mit Hilfe einer Paket-Theorie zu lösen. Uebertragen auf die Schwadenausbreitung kommen wir zu folgendem Modell: Ein homogenes Luftpaket verlässt den Kühlturm mit einer mittleren Vertikalgeschwindigkeit. Seiner kleinen Trägheit zufolge nimmt es sofort die Horizontalgeschwindigkeit des Windes an. Während des Aufstieges um einen Vertikalschritt Δz wird einerseits wegen der Eigenturbulenz des Paketes, andererseits wegen der Turbulenz der freien Atmosphäre Umgebungsluft zugemischt (Entrainment), die homogen im Paket verteilt dessen Grösse und thermodynamischen Zustand ändert. Dies wirkt sich in einer Veränderung des Auftriebes und damit einer Veränderung der Vertikalbewegung aus. Gleichzeitig mit diesem ganzen Vorgang wird ein Teil des Pakets an die Umgebung abgegeben (Detrainment). Wird das Paket durch die Zustandsänderung übersättigt, entstehen winzige Nebeltröpfchen (sog. Cloud-Water), die ab einer gewissen Dichte anwachsen (Autoconversion) und durch Zusammenstösse koa-

gulieren (Collection) können und schliesslich als Regentropfen das Paket verlassen. Dadurch fallen sie unterhalb des Schwadens in ungesättigte Luft hinein und verdampfen nach durchfallen einer bestimmten Strecke.

Die kurz skizzierten Modellvorstellungen für den Aufstiegs-
teil dürfen schon bereits als Standard bezeichnet werden, bilden sie doch die Grundlagen der wichtigsten bis anhin bekannten Schwaden- oder Wolkenmodelle der Paket-Klasse. Als Beispiele können Arbeiten folgender Autoren dienen:

- | | |
|-------------------------------------|------|
| - A.I. Weinstein & L.G. Davis, 1968 | (9) |
| - A.I. Weinstein, 1969 | (10) |
| - G.A. Briggs, 1969 | (8) |
| - G. Abraham, 1970 | (17) |
| - C.L. Hosler, 1971 | (22) |
| - G. Ooms, 1972 | (18) |
| - W. Stephen & W.J. Moroz, 1972 | (19) |
| - P. Bøgh et al., 1972 | (14) |

Obschon alle zitierten Autoren dieselben Grundlagen verwenden, unterscheiden sich ihre Modelle trotzdem in ihrer mathematischen Gestalt ganz beträchtlich voneinander. Dies ist zum Teil auf die verwendeten Näherungen, hauptsächlich aber nur auf verschiedene Formalismen zurückzuführen.

Die im Diffusionsteil benutzten Modellvorstellungen, falls ein solcher überhaupt berücksichtigt wird, entspringen fast ausschliesslich Ideen, die Pasquill (7) zusammengestellt hat: Im Zentrum der aufsteigenden Pakete liegende kontinuierliche Punktquellen (oder auch nur eine einzige am Ende des Aufstieges platzierte Punktquelle) geben Wasserdampf ab, deren vertikale und eventuell auch horizontale Verteilungen in der umgebenden Luft als gaussför-

mig angenommen werden. Um die Existenz des Erdbodens zu berücksichtigen, werden die unterhalb desselben zu liegen kommenden Teile der Gaussverteilung nach oben reflektiert. Dieses Modell findet seine theoretische Untermauerung dadurch, dass es die exakte Lösung eines speziellen Diffusionsproblems darstellt. Nimmt man nämlich an, dass die Windgeschwindigkeit und die beiden Koeffizienten für die turbulente Diffusion quer zur Windrichtung konstant sind, die Diffusion in Windrichtung sowie die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Quellen vernachlässigbar sind und der Boden eine undurchlässige Grenzfläche bedeutet, dann resultieren aus der Diffusionsgleichung genau die oben beschriebenen Gaussverteilungen. Um nun trotzdem die Auswirkungen der mit der Höhe variablen Windgeschwindigkeiten und Diffusionskoeffizienten sowie der Turbulenzspektren zu berücksichtigen, werden die durch die Diffusionsgleichung vorgeschriebenen Zusammenhänge zwischen den Breiten der Gausskurven und den Entfernungen von den Quellen ersetzt durch empirische Funktionen, die für jede Diffusionskategorie verschieden sind. Das wohl am meisten benutzte Schema, das 6 Diffusionskategorien mit rein synoptischen Beobachtungen verknüpft, ist dasjenige von Pasquill (7), das durch Klug (23) weiter objektiviert und verfeinert wurde. Weitere zum Teil stark abweichende Parametersysteme werden durch Singer & Smith (24), Mc Elroy (25) und Turner (26) vorgeschlagen.

Die wichtigsten Unsicherheiten in allen Paket- und Diffusionsmodellen, die wegen ihrer extremen Bevorzugung der Vertikalen auch als eindimensionale Modelle angesprochen werden können, liegen in der Wahl der Entrainment-, Detrainment- und Diffusionsparameter, die zur Zeit noch auf sehr wackeligen Füßen steht. Erstere beschreiben die Wechselwirkungen zwischen den aufsteigen-

den Paketen und der Umgebung und sind abgeleitet aus Experimenten in Wassertanks und Windkanälen oder aus Beobachtungen an Rauchgasen, also aus Messungen, die nur schwer auf Kühlturmschwaden übertragbar sind. Letztere beruhen im wesentlichen auf Messungen an Rauchfahnen, die in einer sehr bodennahen Luftschicht (0 bis 100m Höhe) ausgeführt wurden. Kürzlich erschiene ähnliche Messungen mit radioaktiven Tracern auf dem Gelände der KFA Jülich (13) zeigen interessanterweise deutliche Abweichungen von den Pasquill-Parametern, die wahrscheinlich auf die grössere Bodenrauigkeit des KFA-Geländes zurückgeführt werden müssen. Dieser Umstand scheint zu zeigen, dass die bekannten Diffusionsparameter ganz wesentlich von der unmittelbaren Nähe des Erdbodens beeinflusst sein könnten, was deren Verwendung in von Kühlturmfahnen erreichten Höhen als fraglich erscheinen lässt. Trotz den oben erwähnten recht einschneidenden Vorbehalten, die den Modellen der vorliegenden Klasse entgegenzuhalten sind, haben sie vom anwendungsorientierten Standpunkt aus gesehen gewichtige Gründe, die für ihre Verwendung zur Simulation von Kühlturmfahnen sprechen:

- Die Schwierigkeiten bei der Modellierung der Turbulenz in den hydrodynamischen Modellen geben zu ebenso grossen quantitativen Unsicherheiten Anlass.
- Die Modelle führen auf gewöhnliche gekoppelte Differentialgleichungen nach einer einzigen Raumkoordinaten (Vertikale) und zeichnen sich deshalb durch eine problemlose Numerik aus, d.h. ihre Integration gibt zu keinen Stabilitäts- und Konvergenzschwierigkeiten Anlass.
- Die Reaktionen der Modelle auf Änderungen irgendwel-

cher Parameter sind sehr einfach zu überblicken:
die Parameter haben einen in diesem Sinne expliziten
Charakter.

- Die Entrainment-Parameter scheinen ein weites Spektrum von Phänomenen recht gut zu beschreiben und besitzen so eine gewisse Universalität.
- Der relativ kleine Computer-Aufwand für eine einzelne Schwadenberechnung erlaubt den Einsatz der Modelle für Probleme statistischer Natur.

Wie bei allen Modellen, die empirische Elemente enthalten, so bestimmen auch bei der vorliegenden Klasse von Schwadenmodellen einzig und allein Experimente deren Genauigkeit und Anwendungsbereich.

1.3. Das EIR-Schwadenmodell FOG

1.3.1. Modelltypus

Das im EIR in Anlehnung an die vorhandene Literatur entwickelte Schwadenmodell FOG gehört in die Klasse der Paket- und Diffusionsmodelle, deren allgemeine Eigenschaften unter 1.2.3. beschrieben wurden. Währenddem sich die Formulierung des Aufstiegsteils auf weitgehende Vorarbeiten verschiedener Autoren stützen konnte, so bewirkt eine verfeinerte Beschreibung des Diffusionsvorganges sofort einen Vorstoss in Neuland, der nur in engem Zusammenhang mit Experimenten erfolgen kann. Da die Auswertung der durchgeführten Experimente noch nicht abgeschlossen ist, soll nur der Aufstiegsteil detailliert beschrieben werden, weil alle Anzeichen dafür sprechen, dass dieser durch die experimentellen Resultate nur geringfügig modifiziert werden wird. Die weniger sichergestellten Annahmen, die im Diffusionsteil getroffen oder wenigstens in Betracht gezogen werden, rechtfertigen aber zur Zeit noch keine genauere Beschreibung, die leicht den Anschein erwecken könnte, definitiv zu sein. Es sollen deshalb vielmehr die Ideen skizziert werden, die bei der weiteren Entwicklung des Diffusionsteiles eine Rolle spielen werden.

1.3.2. Aufstiegsteil

Die unter 1.2.3. grob umrissenen Modellvorstellungen der Pakettheorie werden wie folgt präzisiert: der Schwaden wird unterteilt in Pakete, die längs der Schwadenmittellinie lückenlos aneinandergereiht sind und sich entlang dieser Linie nach oben bewegen. Jedes dieser Pakete besteht aus einem homogenen Gemisch von

- trockener Luft
- Wasserdampf
- entweder Wasser oder Eis

Alle drei Komponenten haben dieselbe Temperatur und ihr Gesamtdruck ist gleich dem Atmosphärendruck auf der entsprechenden Höhe. Unterschreitet die Temperatur das Gefrierniveau, das in der Atmosphäre unterhalb von 0°C liegt, geht der gesamte Wassergehalt in Eis über. Die Horizontalgeschwindigkeit jedes Paketes ist gleich der Windgeschwindigkeit und die Vertikalgeschwindigkeit soll immer grösser sein als die (mit einem Parameter multiplizierte) Turbulenz-Intensität der freien Atmosphäre auf der entsprechenden Höhe. Sobald dieses Kriterium nicht mehr erfüllt ist, wird die Vertikalgeschwindigkeit als vernachlässigbar angenommen. Die weitere Ausbreitung geschieht dann durch reine Diffusion, die unter 1.3.3. behandelt wird. Die Pakete werden durch Beimischung von Umgebungsluft (Entrainment) vergrößert und durch Abgabe von Paketluft an die Umgebung (Detrainment) verkleinert.

a) Thermodynamik

Es soll der Aufstieg eines gesättigten Paketes mit gasdichten "Wänden" um einen infinitesimalen Höhenschritt dz betrachtet werden. Der erste Hauptsatz lau-

tet dafür in den im Anhang erklärten Symbolen:

$$dU = \delta Q - p dV \quad (1)$$

Die Zerlegung von U in $U^a + U^v + U^{w,i}$ und die Einführung der entsprechenden Enthalpien ergibt aus (1) unter Verwendung der üblichen Näherungen (Partialdruckgesetz, trockene Luft und Wasserdampf als ideale Gase):

$$dH^a + dH^v + dH^w + dH^i - V dp = \delta Q \quad (2)$$

wobei

$$dH^j(p^j, T_p, m^j) = m^j c_p^j dT_p + h^j(p^j, T_p) dm^j, \quad j = a, v, w, i$$

Da die Paketwände gasdicht sind und die trockene Luft keinen chemischen Veränderungen unterliegt, gilt:

$$dm^a = 0$$

Für Wasser oder Eis und Dampf gilt ohne Gefriervorgang:

$$dm^w = -dm^v, \quad dm^i = 0 \quad \text{oder} \quad dm^i = -dm^v, \quad dm^w = 0 \quad (3)$$

$$h^v - h^w = L_e$$

$$h^v - h^i = L_s$$

Fällt hingegen beim betrachteten Höhenschritt die Pakettemperatur unter das Gefrierniveau T_f , wird einerseits das vorhandene Wasser gefroren und andererseits zur Dampfdruckkurve über Eis übergegangen. Da der Dampfdruck über Eis geringer ist als derjenige über Wasser bei derselben

Temperatur wird dabei noch zusätzlich Dampf zu Eis kondensiert. Dies ergibt die folgenden Zusatzterme:

$$dm^w = - m^w \cdot \delta^*(T_p - T_f) dz$$

$$dm^i = (m^w + \Delta m^i) \cdot \delta^*(T_p - T_f) dz$$

$$dm^v = - \Delta m^i \cdot \delta^*(T_p - T_f) dz$$

Dabei bedeutet δ^* die Dirac-Funktion und es wird angenommen, dass die Temperatur des Paketes monoton fallend ist, so dass nur eine einmalige Ueberschreitung des Gefrierpunktes möglich ist. Diese Bedingung ist bei den zu behandelnden Problemen immer erfüllt.

Mit den Definitionen

$$m^v \equiv m^a X_s$$

$$m^{w,i} \equiv m^a Q^{cl}$$

$$V \equiv v^a m^a$$

$$Q \equiv q^a m^a$$

$$C \equiv C_p^w = C_p^i$$

$L_{e,s} = L_e$ oder L_s je nachdem, ob Wasser oder Eis vorliegt

erhält man nun aus (2):

$$\begin{aligned} dT_p \left(1 + X_s \frac{C_p^v}{C_p^a} + Q^{cl} \frac{C}{C_p^a} \right) + dX_s \frac{L_{e,s}}{C_p^a} - \frac{v^a}{C_p^a} dp - \delta^*(T_p - T_f) \left\{ (X_s^w - X_s^i) \frac{L_s}{C_p^a} \right. \\ \left. + Q^{cl} \frac{L_s - L_e}{C_p^a} \right\} dz = \frac{\delta q^a}{C_p^a} \end{aligned} \quad (4)$$

Das Differential des Mischungsverhältnisses lässt sich dabei mit der Formel von Clausius Clapeyron, der hydrostatischen Grundgleichung und der idealen Gasgleichung umformen zu:

$$dX_s = \epsilon \frac{X_s}{R^a} \frac{L_{e,s}}{T_p^2} dT_p + \frac{X_s g}{R^a T_{ve}} dz \quad (5)$$

Bei der Herleitung wurde $p/(p - p_s^v) = 1$ gesetzt und die virtuelle Temperatur

$$T_v \equiv T(1 + (\frac{1}{\epsilon} - 1)X_s) = T(1 + 0,61 X_s)$$

eingeführt.

Unsere Aufmerksamkeit soll nun noch dem Wärmeaustausch-Term δq^a zugewendet werden: Durch Entrainment kommt während dem Schritt dz eine Trockenluftmasse dm_e^a mit den Paketwänden in Berührung. Die Folge davon ist, dass ein Wärmeaustausch stattfindet so, dass nach dem Schritt dz die Luftmasse dm^a dieselbe Temperatur wie das Paket hat und ebenfalls gesättigt ist. Das dazu nötige Wasser soll aus dem Paket stammen.

Für die Erwärmung der zugeströmten Trockenluftmasse gilt:

$$\delta Q_1 = - dm_{en}^a C_p^a (T_p - T_e) \quad (6a)$$

Für die Erwärmung der in der zugeströmten Luft befindlichen Dampfmasse gilt:

$$\delta Q_2 = - dm_{en}^a X_e C_p^v (T_p - T_e) \quad (6b)$$

Für die Sättigung der Luft ergibt sich:

$$\delta Q_3 = - dm_{en}^a (X_s(T_p) - X_e) L_{e,s} \quad (6c)$$

Durch Zusammenfassung der Wärmeaustauschterme 6a - c und mit Verwendung des Differentials des Mischungsverhältnisses (5) kann der erste Hauptsatz (4) umformuliert werden zu:

$$dT_p = dz \frac{\Gamma \left\{ (1+X_s) \frac{T_{vp}}{T_{ve}} + X_s \Lambda_1 \right\} - \mu_{en} (E + \Lambda_3) + \delta^* (T_p - T_f) \Lambda_4}{1 + X_s \left(\frac{C_p^v}{C_p^a} + \Lambda_2 \right) + Q^{cl} \frac{C}{C_p^a}} \quad (7a)$$

wobei:

$$\Gamma = - \frac{g}{C_p^a} \quad \text{Trockenadiabatischer Temperaturgradient}$$

$$\mu_{en} = \frac{dm_{en}^a}{m^a} \frac{1}{dz} \quad \text{Entrainment-Parameter}$$

$$\Gamma (1 + X_s) \frac{T_{vp}}{T_{ve}} \quad \text{Arbeitsterm (1. Hauptsatz)}$$

$$\Gamma X_s \Lambda_1 = \Gamma X_s \frac{L_{e,s}}{R^a T_{ve}} \quad \text{Beschreibt die Verdampfung (oder Kondensation) zufolge Veränderung von } X_s \text{ mit } z$$

$$X_s \Lambda_2 = X_s \frac{\epsilon L_{e,s}^2}{C_p^a R^a T_p^2}$$

Beschreibt die Verdampfung (oder Kondensation) zufolge Veränderung von X_s mit T_p

$$\mu_{en} E = \mu_{en} (T_p - T_e) \left(1 + X_e \frac{C_p^v}{C_p^a}\right)$$

Beschreibt die Abkühlung des Paketes durch Beimischung kälterer Umgebungsluft

$$\mu_{en} \Lambda_3 = \mu_{en} (X_s - X_e) \frac{L_{e,s}}{C_p^a}$$

Beschreibt die Abkühlung des Paketes durch Verdampfung von Wasser zur Sättigung der beigemischten Umgebungsluft

$$\Lambda_4 = Q^{cl} \frac{L_s - L_e}{C_p^a} + (X_s^w - X_s^i) \frac{L_s}{C_p^a}$$

Erwärmung des Paketes durch den Gefriervorgang

$$1 + X_s \frac{C_p^v}{C_p^a}$$

Beschreibt die Enthalpieänderung des Wasserdampfes bei einer Temperaturänderung

$$Q^{cl} \frac{C}{C_p^a}$$

Beschreibt die Enthalpieänderung des Wassers (Eises) bei einer Temperaturänderung

$$X_s$$

Sättigungs-Mischungsverhältnis bei Pakettemperatur T_p über Wasser oder Eis je nach dem, ob $T_p > T_f$ oder $T_p < T_f$

$L_{e,s}$

Verdampfungs- oder Sublimationswärme je nach dem, ob $T_p > T_f$ oder $T_p < T_f$

Für ein ungesättigtes Luftpaket vereinfacht sich Formel (7a) wesentlich: Da kein vorgeschriebener Wasserdampfdruck mehr eingehalten werden muss, verschwinden die Terme, die Verdampfungs- oder Kondensationsvorgänge beschreiben, was durch null setzen von $L_{e,s}$ oder Λ_j in Formel (7a) erreicht werden kann. Weiter tritt X an die Stelle von X_s und $Q^{cl} = 0$, so dass sich (7a) für ungesättigte Pakete vereinfacht in:

$$dT_p = dz \frac{\frac{\Gamma (1+X) T_{vp}}{T_{ve}} - \mu_{en} E}{1 + X \frac{c_p^v}{c_p^a}} \quad (7b)$$

b) Bewegungsgleichung

Der erwähnten Annahme zufolge, dass das betrachtete Paket dauernd die Horizontalgeschwindigkeit der umgebenden Luft annimmt, wird die Bewegungsgleichung nur bezüglich der Vertikalen formuliert. Die dabei zu berücksichtigenden Kräfte sind:

- Der nach Archimedes bestimmte Auftrieb:

$$F_A = mg \frac{\rho_e L}{\rho_p L} = mg \frac{T_{vp}}{T_{ve}}$$

- Das Gewicht des Paketes:

$$F_G = - mg$$

- Die Kraft der sehr langsam fallenden Cloud-Water Tröpfchen auf das Paket:

$$F_{cl} = -m^a Q^{cl} g \approx -mg Q^{cl}$$

- Die Kraft F_B für die Beschleunigung der beigemischten Luft lässt sich aus der Impulserhaltung bestimmen:

$$m \cdot w = (m + dm)(w + dw) \approx mw + wdm + mdw$$

Hieraus folgt:

$$F_B = m \frac{dw}{dt} = -w \frac{dm}{dt} = -w^2 \mu_{en} m$$

- Ein Term für die Beschreibung der Reibung in einer turbulenten Strömung hätte eine zu F_B analoge Form, wäre aber wesentlich kleiner als F_B und wird deshalb vernachlässigt.

Das Newton'sche Bewegungsgesetz lautet nun:

$$m \frac{dw}{dt} = F_A + F_G + F_{cl} + F_B$$

und mit den Ausdrücken für die Kräfte erhalten wir schliesslich:

$$\frac{dw}{dt} = g \left(\frac{T_{vp} - T_{ve}}{T_{ve}} - Q^{cl} \right) - \mu_{en} w^2 \quad (8)$$

c) Kontinuitätsgleichungen

Es müssen Bilanzgleichungen berücksichtigt werden für Wassersubstanz (d.h. Eis/Wasser, Dampf) und für trockene Luft.

Zuerst sollen die Veränderungen des Wassergehaltes beim gesättigten Paket und des Mischungsverhältnisses beim ungesättigten Paket berechnet werden.

Beim gesättigten Paket soll aller Wasserdampf aus dem Cloud-Water stammen, was durch:

$$dQ_1^{cl} = - dX_s + \delta^*(T_p - T_f) dz (X_s^w - X_s^i)$$

ausgedrückt werden kann. Weiter soll die beigemischte Umgebungsluft durch das Cloud-Water des Paketes gesättigt werden gemäss:

$$dQ_2^{cl} = -(X_s - X_e) \mu_{en} dz$$

Nach jedem Höhenschritt wird die beigemischte Luft mit dem Paket homogen vermischt. Die daraus resultierende Abnahme von Q^{cl} lässt sich mit Hilfe der Wasserbilanz folgendermassen bestimmen:

$$Q^{cl} \cdot m^a = (m^a + dm^a) (Q^{cl} + dQ_3^{cl})$$

Daraus folgt bei Vernachlässigung des Termes zweiter Ordnung:

$$dQ_3^{cl} = - Q^{cl} \mu_{en} dz$$

Aus den Beziehungen für dQ_j^{cl} folgt durch Summation:

$$dQ^{cl} = - dX_s - \mu_{en} dz (X_s - X_e + Q^{cl}) + \delta^*(T_p - T_f) dz (X_s^w - X_s^i) \quad (9)$$

(X_s wie in Formel 7a)

Für die Berechnung der Feuchteänderung im ungesättigten Paket lässt sich folgende Dampfbilanz aufstellen:

$$m^a X_p + dm^a X_e = (m^a + dm^a) (X_p + dX_p)$$

woraus folgt:

$$\boxed{X_p + dX_p = \frac{X_p + \mu_{en} dz X_e}{1 + \mu_{en} dz}} \quad (10)$$

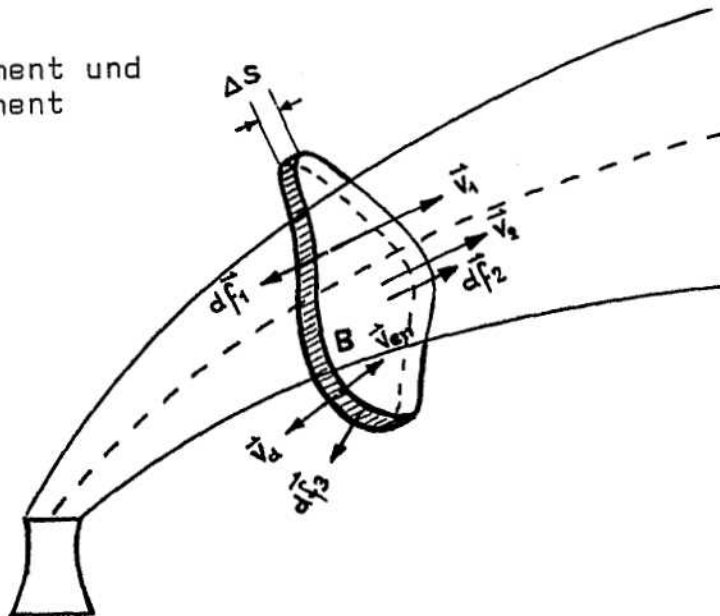
Die Kontinuitätsgleichung für trockene Luft lautet in der Integralschreibweise:

$$0 = \frac{d}{dt} \iiint_B \rho^a dV + \iint_{\partial B} \rho^a \vec{v} \cdot \vec{df} \quad (11)$$

wobei das Gebiet B mit Oberfläche ∂B beliebig gewählt werden kann. Ich betrachte nun eine senkrecht zur Schwadenachse stehende, dünne, allgemeine Zylinderscheibe, die den Schwaden umfassen soll, als Gebiet B (Abb.2).

Abb. 2

Entrainment und Detrainment



Da nur stationäre Lösungen zugelassen werden verschwindet

$\frac{d}{dt} \iiint_B \rho^a dV$. Das Oberflächenintegral kann in 3 Teile

aufgespalten werden:

$$\iint_{\partial B} \rho^a \vec{v} d\vec{f} = \iint_{\partial B_1} \rho_1^a \vec{v}_1 d\vec{f}_1 + \iint_{\partial B_2} \rho_2^a \vec{v}_2 d\vec{f}_2 + \iint_{\partial B_3} \rho_3^a (\vec{v}_{en} + \vec{v}_d) d\vec{f}_3$$

Mit Verwendung von $\vec{v}_1 \parallel d\vec{f}_1$, $\vec{v}_2 \parallel d\vec{f}_2$, $\vec{v}_d \parallel d\vec{f}_3$, $\vec{v}_{en} \perp d\vec{f}_3$

und der Definition des Volumenflusses

$$\phi_i^a \equiv \frac{1}{\Pi \rho_o^a} \iint_{\partial B_i} \rho_i^a v_i df_i ; i = 1, 2 ; \rho_o^a = \text{beliebige Konstante}$$

$$\Delta \phi^a \equiv \phi_2^a - \phi_1^a$$

vereinfacht sich (11) zu

$$\Delta \phi^a \Pi \rho_o^a = \iint_{\partial B_3} \rho_3^a v_{en} df_3 - \iint_{\partial B_3} \rho_3^a v_d df_3 \quad (12)$$

v_{en} wird dabei Entrainment-Geschwindigkeit

v_d Detrainment-Geschwindigkeit genannt.

Die Bestimmung von v_{en} und v_d ist Thema des Abschnittes 1.3.2.d. Es sollen hier nur noch die Zusammenhänge zwischen v_{en} , v_d und μ_{en} , μ_d , μ hergestellt werden: Ein Luftpaket der Dicke Δs braucht die Zeit $\frac{\Delta s}{v}$ um die Fläche ∂B_1 zu durchqueren (Abb. 2). Während dieser Zeit strömt Umgebungsluft mit v_{en} durch ∂B_3 ins Paket hinein und Schwadenluft mit v_d durch ∂B_3 aus dem Paket heraus.

Die beigemischte Luftmasse für einen Höhenschritt $\Delta z = \Delta s \frac{w}{v}$ wird nun

$$\Delta m_{en}^a = \frac{\Delta s}{v} \iint_{\partial B_3} \rho^a v_{en} df_3$$

Die gesamte Paketluftmasse, die während derselben Zeit ∂B_1 durchquert hat ist

$$m^a = \frac{\Delta s}{v} \iint_{\partial B_1} \rho_1^a v_1 df_1 = \frac{\Delta s}{v} \Pi \rho_0^a \phi_1^a$$

Die analogen Ueberlegungen gelten für das Detrainment. Die gesuchten Beziehungen können nun unter Zuhilfenahme der Kontinuitätsgleichung (12) folgendermassen formuliert werden:

$$\mu_{en} \equiv \frac{dm_{en}^a}{m^a} \frac{1}{dz} = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\iint_{\partial B_3} \rho^a v_{en} df_3}{\Pi \rho_o^a \phi_1^a \Delta z} \quad (13a)$$

$$\mu_d \equiv \frac{dm_d^a}{m^a} \frac{1}{dz} = - \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{\iint_{\partial B_3} \rho^a v_d df_3}{\Pi \rho_o^a \phi_1^a \Delta z} \quad (13b)$$

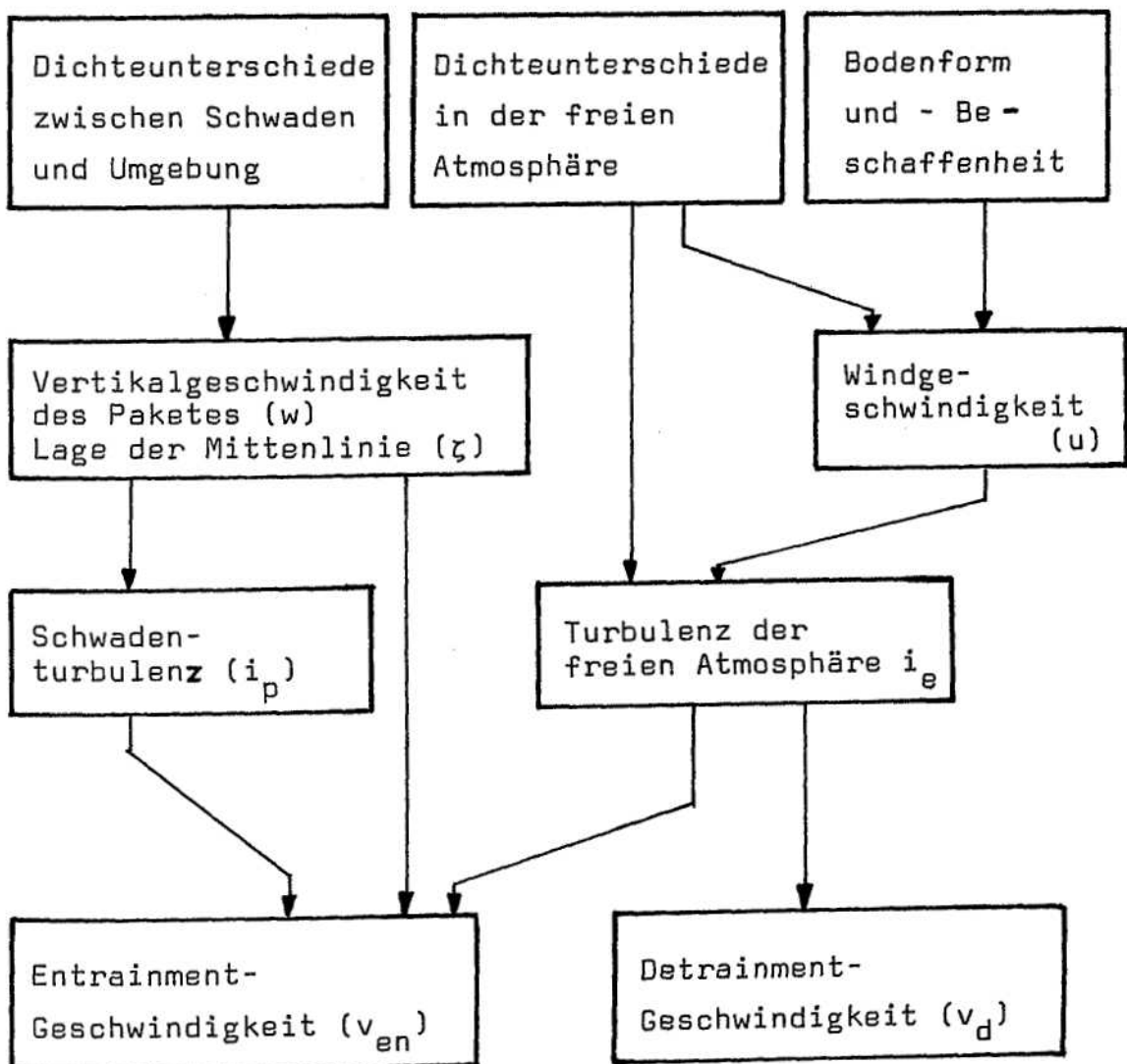
$$\mu \equiv \frac{dm^a}{m^a} \frac{1}{dz} = \mu_{en} + \mu_d = \frac{d\phi^a}{\phi^a} \frac{1}{dz} \quad (13c)$$

μ_{en} bedeutet die prozentuale Zumischung $\frac{dm_{en}^a}{m^a}$ von trockener Luft während einem Höhenschritt dz . Diese Luftmasse ist bei der thermodynamischen Behandlung die Ursache für die Abkühlung und Veränderung des Wassergehaltes des Paketes (Formel 7, 9, 10) und in der Bewegungsgleichung für die Bremswirkung (Formel 8). μ_d hingegen beschreibt die prozentuale Abgabe von Schwadenluft (d.h. von Luft mit dem thermodynamischen Zustand des Paketes) pro Höhenschritt und hat keine Wirkung auf das Paket, ausser dass es verkleinert wird. μ_d tritt daher in den thermodynamischen Gleichungen sowie in der Bewegungsgleichung nicht auf. $\mu = \mu_{en} + \mu_d$ beschreibt die Bilanz von Entrainment und Detrainment und gibt demnach die prozentuale Massenänderung des Paketes pro Höhenschritt an.

d) Entrainment-Detrainment

Im Abschnitt 1.3.2.c) wurden die Entrainment- und Detrainment-Geschwindigkeiten als gegeben betrachtet. Ziel des vorliegenden Abschnittes ist es nun, die beiden unbekannten Geschwindigkeiten auf bekannte Grössen zurückzuführen. Dazu teilen wir den zu beschreibenden Vorgang der turbulenten Durchmischung in Ursache und Wirkung auf wie in Abb. 3 gezeigt.

Abb. 3 Modell für Entrainment und Detrainment



Die Entrainment- und Detrainment-Geschwindigkeiten müssen demnach durch die kinematischen Grössen von Schwaden und Umgebung folgendermassen ausgedrückt werden können:

$$v_{en} = f_{en}''(w, i_p(w), \zeta, i_e) = f_{en}'(w, \zeta, i_e) \quad (14a)$$

$$v_d = f_d(i_e) \quad (14b)$$

v_{en} resp. v_d bedeuten hier zeitlich und räumlich gemittelte Werte über die Schwadenoberfläche (∂B_3 in Abb. 2).

Der turbulente Zustand der freien Atmosphäre wird in (14a, b) lediglich durch ein einziges statistisches Moment $i_e = \sqrt{u'^2}$ (Turbulenz-Intensität in Windrichtung) charakterisiert. Es wird hierbei angenommen, dass einerseits die beiden analogen Momente quer zur Windrichtung und in der Vertikalen als Funktionen von nur i_e dargestellt werden könnten und andererseits die höheren Momente in geringerem Masse für v_{en} resp. v_d wichtig sind als i_e . Die mittlere Windgeschwindigkeit u hat keinen direkten Einfluss auf v_{en} resp. v_d , da die Horizontalgeschwindigkeit der Schwadenpakete gleich der Windgeschwindigkeit ist und diese so eliminiert wird. u wirkt sich aber indirekt auf v_{en} aus, da u zusammen mit w die Lage ζ der Mittenlinie des Schwadens bestimmt durch

$$\operatorname{tg} \zeta = \frac{u}{w} \quad (15)$$

Der Winkel ζ ist deshalb wichtig für die Bestimmung der Entrainment-Geschwindigkeit v_{en} , weil die Strömungsbilder um einen sehr steil aufsteigenden Schwaden ganz verschieden sind von denjenigen um einen fast horizontal liegenden Schwaden.

Weiter fällt auf, dass in (14b) lediglich i_e als Argument für v_d auftritt. Damit soll die Annahme ausgedrückt werden, dass in einer völlig laminaren Umgebungsströmung keine Entmischung stattfinden würde.

Die atmosphärische Turbulenz kann, wenn auch nicht isotrop, so doch wenigstens als punktsymmetrisch angenommen werden. Dies hat zur Folge, dass die funktionale Abhängigkeit der Entrainment-Geschwindigkeit v_{en} von i_e dieselbe ist wie diejenige der Detrainment-Geschwindigkeit v_d von i_e , da v_{en} und v_d ebenfalls in punktsymmetrischer Beziehung zueinander stehen. In Formeln ausgedrückt würde dies bedeuten:

$$v_{en} = f_{en}(w, \zeta) + f_d(i_e) \quad (16)$$

$$v_d = f_d(i_e) \quad (16a)$$

Bei den gesuchten Funktionen f_{en} und f_d handelt es sich um die Beschreibung komplizierter, statistischer Vorgänge. Man wird deshalb versuchen, die Funktionen in den interessanten Bereichen zu linearisieren und ihre Steigungen als Parameter einzuführen. Bei f_{en} liegen zwei interessante Bereiche vor, die beide experimentell untersucht wurden, nämlich:

$$\begin{array}{lll} \text{vertical stage} & : & \zeta \text{ um } 0^\circ \quad (w \text{ um } 5\text{m/sec}) \\ \text{bent over stage} & : & \zeta \text{ um } 90^\circ \quad (w \text{ um } 0\text{m/sec}) \end{array}$$

Mit der plausiblen Annahme

$$f_{en}(0, \zeta) = 0 ; \quad 0^\circ \leq \zeta \leq 90^\circ \quad (17)$$

lassen sich die beiden Grenzfälle für f_{en} folgendermassen formulieren:

$$f_{en}(w, 0^0) = \alpha w \quad (18a)$$

$$f_{en}(w, 90^0) = \gamma w \quad (18b)$$

Für das Zwischenstadium (bending over stage) muss nun ein sinnvoller Kompromiss zwischen (18a) und (18b) gefunden werden. Es bietet sich dazu die Vektorsumme der beiden senkrecht aufeinanderstehenden Extremfälle an:

$$f_{en}(w, \zeta) = \alpha w \cos \zeta + \gamma w \sin \zeta \quad (19)$$

Bei f_d liegt nur ein einziger interessanter Bereich vor, nämlich i_e zwischen 0 und ca. 1m/sec.

Mit der zu (17) analogen Annahme

$$f_d(0) = 0$$

erhalten wir für f_d :

$$f_d(i_e) = \delta \cdot i_e \quad (20)$$

Zusammengefasst lauten damit die Gleichungen für die Beschreibung von Entrainment und Detrainment

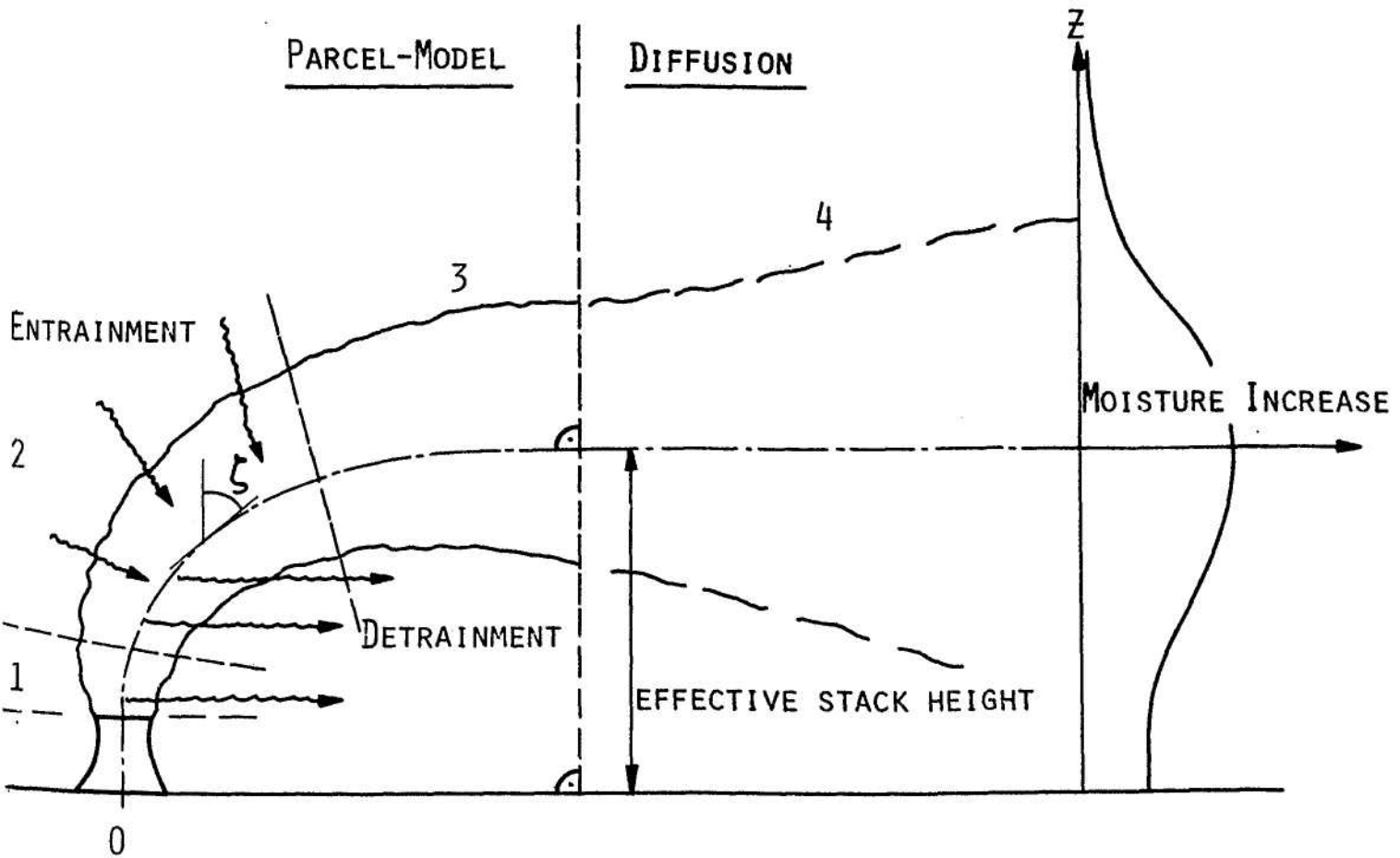
$$v_{en} = \alpha w \cos \zeta + \gamma w \sin \zeta + \delta \cdot i_e \quad (21a)$$

$$v_d = \delta \cdot i_e \quad (21b)$$

$$\operatorname{tg} \zeta = \frac{u}{w} \quad (21c)$$

Abb. 4 zeigt die verschiedenen Schwadenbereiche sowie die in den einzelnen Bereichen wichtigen Parameter und in Abb.4a ist die Entrainment-Formel (21a) graphisch dargestellt.

Abb. 4 Unterteilung des Schwadens

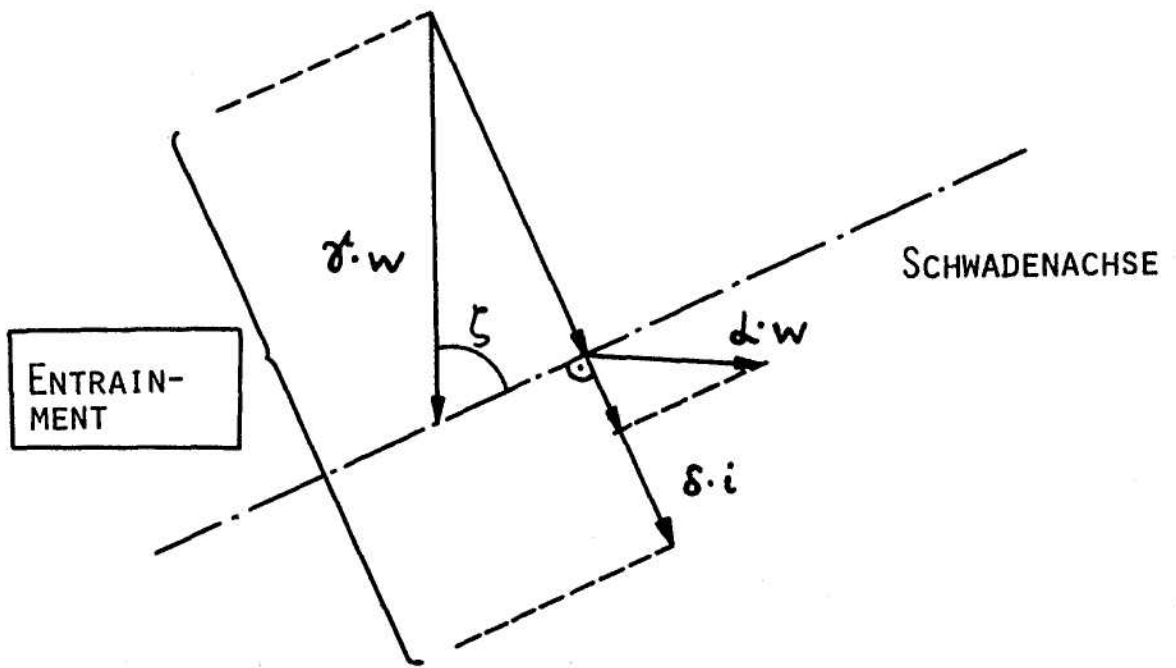


Bereich

Parameter für

Nr	Name	Entrainment	Detrainment
1	vertical stage	α, δ	δ
2	bending over stage	α, γ, δ	δ
3	bent over stage	γ, δ	δ
4	pseudocloud stage	Diffusionsparameter	

Abb.4a Parametrisierung des Entrainment



Legende:

- | | |
|--------------------------|---|
| α, γ, δ | = Parameter |
| w | = Vertikalgeschwindigkeit der Schwadenpakete |
| i | = Turbulenz-Intensität der ungestörten Atmosphäre |
| ζ | = Neigungswinkel der Schwadenachse |

Die Parameter α , γ , δ sind erst dann numerisch bestimmt, wenn eine Schwadenoberfläche ∂O definiert wird, über die v_{en} resp. v_d gemittelte Geschwindigkeiten sein sollen. Die Definition einer solchen Oberfläche ∂O ist willkürlich und ist lediglich als Teil der Definition von v_{en} resp. v_d zu verstehen gemäss:

$$\iint_{\partial B_3} \rho^a v_{en}' df_3' \equiv \partial O \cdot \rho_e^a v_{en} \quad (22a)$$

$$\iint_{\partial B_3} \rho^a v_d' df_3' \equiv \partial O \cdot \rho_e^a v_d \quad (22b)$$

Ebenfalls per definitionem sollen die mittleren Luftdichten gleich ρ_e^a gewählt werden. ∂B_3 bedeutet die ebenfalls frei gewählte Schwadenoberfläche, wie sie in Abb. 2 dargestellt ist.

Die Schwadenoberfläche ∂O wird nun definiert als Mantelfläche eines Kreiszylinders, durch dessen Querschnittsfläche gerade die gesamte Schwadenluft mit der Geschwindigkeit $v = \sqrt{u^2 + w^2}$ fliesst. Der Radius dieses Zylinders wird charakteristischer Radius (r_c) genannt:

$$r_c \equiv \sqrt{\frac{\phi^a}{v} \frac{\rho_o^a}{\rho_p^a}} \quad (23)$$

Die Schwadenoberfläche für einen Höhenschritt wird damit:

$$\partial O = 2\pi r_c \Delta s = 2\pi r_c \frac{v}{w} \Delta z$$

und mit (22a, b) können nun die Gleichungen (13a - c) umgeformt werden in:

$$\mu_{en} \equiv \frac{d\phi_{en}^a}{\phi^a} \frac{1}{dz} \quad (24a)$$

$$d\phi_{en}^a = 2 \frac{\rho_e^a}{\rho_o^a} \frac{v}{w} r_c v_{en} dz$$

$$\mu_d \equiv \frac{d\phi_d^a}{\phi^a} \frac{1}{dz} \quad (24b)$$

$$d\phi_d^a = - 2 \frac{\rho_e^a}{\rho_o^a} \frac{v}{w} r_c v_d dz = - d\phi_{en}^a \frac{v_d}{v_{en}}$$

$$\mu \equiv \frac{d\phi^a}{\phi^a} \frac{1}{dz} \quad (24c)$$

$$d\phi^a = d\phi_{en}^a + d\phi_d^a$$

e) Mikrophysik der Wassertröpfchen

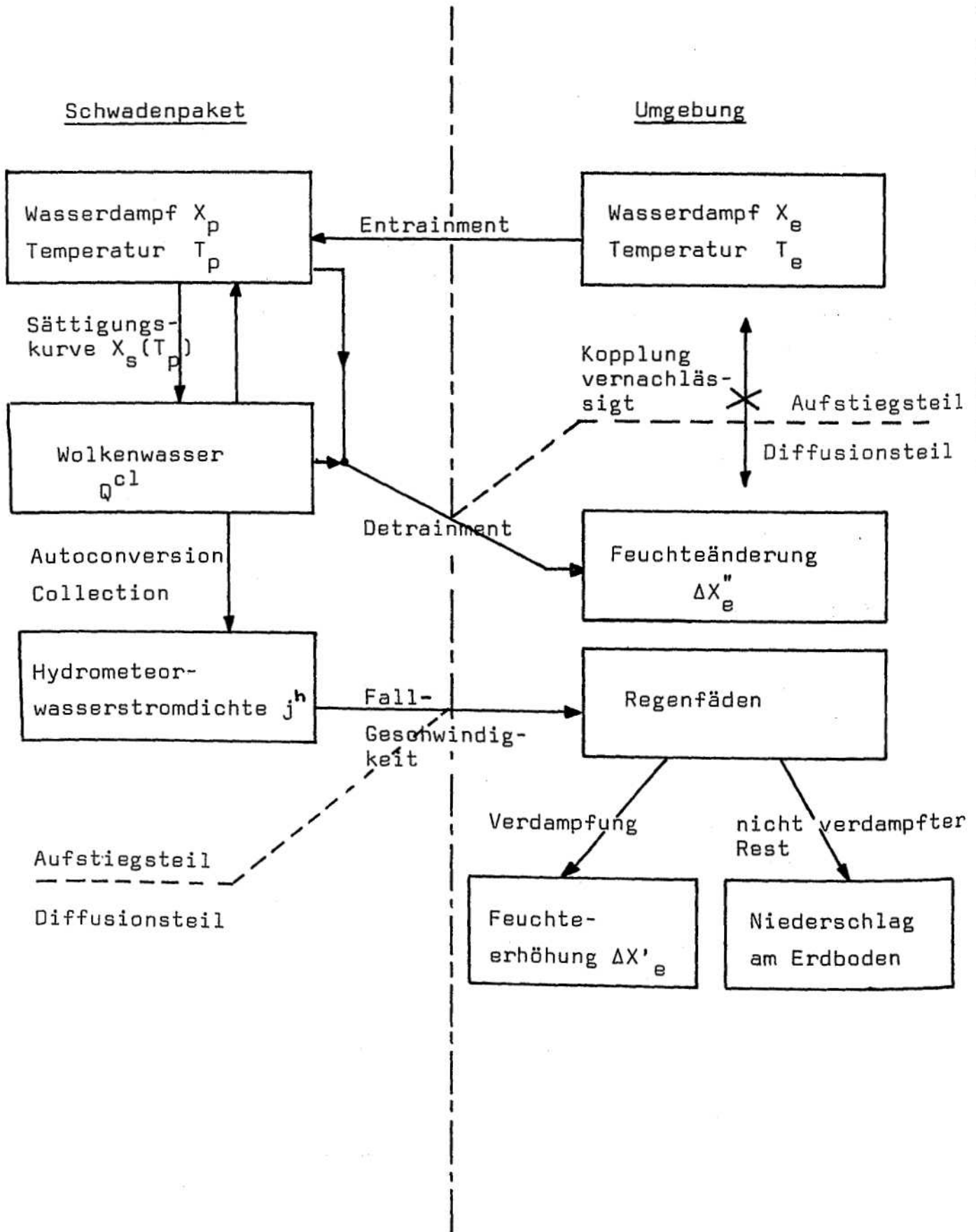
Die Abb. 5 gibt eine Uebersicht über die einzelnen Schritte des verwendeten Wassertröpfchenmodelles. Es ist daraus ersichtlich, dass die Umgebung lediglich den Wasserdampfgehalt und die Temperatur des Paketes direkt beeinflusst. Das Gleichgewicht zwischen Wasserdampf und Wasser (Sättigungskurve) steuert dann den Wolkenwassergehalt in beiden Richtungen (Verdampfung und Kondensation). Der Uebergang von Wolkenwasser zu Hydrometeorwasser hingegen ist nicht umkehrbar: Alles entstandene Hydrometeorwasser fällt deshalb als Regen aus dem Paket heraus in ungesättigte Luft hinein und beginnt dort zum Teil zu verdampfen und zum Teil erreicht es als Niederschlag den Erdboden. Das verdampfte Regenwasser bewirkt zusammen mit der an die Umgebung abgegebenen Schwadenluft (Detrainment) die Feuchteänderung unterhalb des aufsteigenden Schwadens, die im Diffusionsteil im Detail berechnet wird.

Im Folgenden soll nun die Bildung der Regentropfen (Hydrometeors) näher untersucht werden. Die Parametrisierungen gehen im wesentlichen zurück auf E. Kessler (27).

Autoconversion:

Sobald der Wasserdampf im Schwadenpaket die Sättigungsgrenze überschreitet, bildet sich ein aus winzigen Wasserpartikeln bestehender Nebel (Cloud Water oder Wolkenwasser). Die Radien r der Partikeln sind in der Größenordnung von $5\text{ }\mu\text{m}$ (28), was Fallgeschwindigkeiten von nur ca. 3mm/sec zur Folge hat. Während einer durchschnittlichen Aufstiegszeit eines Pakets von ca. 5 Min. fallen also die betrachteten Nebelpartikel um ca. 1m , was gegenüber den Paketdimensionen von ca. 200 bis 400m vernachlässigt werden kann. Die Annahme von suspendierten Teilchen in 1.3.2.b. ist damit nachträglich gerechtfertigt.

Abb. 5 Uebersicht über die Mikrophysik der Wassertröpfchen



Sobald nun die Konzentration des Wolkenwassers einen gewissen Schwellwert ρ_t^w erreicht, setzt eine merkliche Produktion von Tröpfchen mit nicht mehr vernachlässigbarer Fallgeschwindigkeit ein (Nieseln). Dieser Vorgang heisst Autoconversion und wurde durch Kessler (27) folgendermassen parametrisiert:

$$\begin{aligned} dQ_{\text{Autoc}}^{\text{cl}} &= \begin{cases} 0 & \text{für } Q^{\text{cl}} \leq Q_t^{\text{cl}} \\ -k_1(Q^{\text{cl}} - C_t^{\text{cl}})dt & \text{für } Q^{\text{cl}} > Q_t^{\text{cl}} \end{cases} \\ Q_t^{\text{cl}} &= \frac{\rho_t^w}{\rho^a} \\ dt &= \frac{dz}{w} \end{aligned} \quad (25)$$

Collection:

Ein durch Autoconversion entstandenes Tröpfchen mit Radius r stösst mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit E (Collection Efficiency) mit den Wolkenwasserpartikeln zusammen, die sich in dem durch die Fallstrecke dl und den Querschnitt πr^2 gebildeten Zylinder befinden und verbindet sich mit ihnen. Dieser Wachstumsvorgang der fallenden Tröpfchen wird Collection genannt und kann folgendermassen formuliert werden:

$$dm^d = \underbrace{\pi r^2 dl}_{\text{Zylinder-}} \cdot \underbrace{Q^{\text{cl}} \rho^a}_{\rho^{\text{cl}}} \cdot \underbrace{E}_{\text{Efficiency}} \quad (26)$$

volumen

Die ebenfalls möglichen, aber viel weniger häufigen Zusammenstösse zwischen fallenden Tröpfchen werden dabei vernachlässigt.

Die Integration von (26) ergibt eine lineare Abhängigkeit des Radius r von der Fallstrecke l :

$$r = r_{\text{Autoc}} + \frac{1}{4} E Q^{cl} \frac{\rho^a}{\rho^w} l \quad (27)$$

r_{Autoc} sei dabei der mittlere Radius der durch Autoconversion erzeugten Tröpfchen. Die Collection bewirkt nun eine Massenvergrösserung der Tröpfchen auf Kosten des Wolkenwassers.

Das Massenverhältnis f wird in Abhängigkeit von der Fallstrecke l :

$$f(l) \equiv \frac{m_d^d}{m_{\text{Autoc}}^d} = \left(\frac{r}{r_{\text{Autoc}}} \right)^3 = \left(1 + \frac{1}{4} E Q^{cl} \frac{\rho^a}{\rho^w} \frac{l}{r_{\text{Autoc}}} \right)^3 \quad (28)$$

Nimmt man an, dass in einer vertikalen Säule der Grundfläche dF und der Höhe L homogen verteilt durch Autoconversion Tröpfchen m_{Autoc}^d entstehen, so wird das mittlere Massenverhältnis :

$$\bar{f} = \frac{1}{L} \int_0^L f(l) dl = \frac{\rho^w}{\rho^a} \frac{r_{\text{Autoc}}}{L} \frac{1}{E Q^{cl}} \left\{ \left(1 + \frac{1}{4} E Q^{cl} \frac{\rho^a}{\rho^w} \frac{L}{r_{\text{Autoc}}} \right)^4 - 1 \right\} \quad (29)$$

Aus (29) und (25) wird nun die Hydrometeorstromdichte (Hydrometeors = durch Collection entstandene Regentropfen) berechnet:

$$\begin{aligned}
 j^h &\equiv \frac{dm_{Autoc}}{dt dF} \cdot \bar{F} = k_1 (Q^{cl} - Q_t^{cl}) \rho^a L \bar{F} \\
 &= k_1 \frac{k_2}{2} \left(1 - \frac{Q_t^{cl}}{Q^{cl}}\right) \left\{ \left(1 + \frac{1}{2} Q^{cl} \frac{\rho^a L}{k_2}\right)^4 - 1 \right\} \\
 k_2 &\equiv 2 \frac{\rho^w r_{Autoc}}{E}
 \end{aligned} \tag{30}$$

Parameter k_1 , Q_t^{cl} , k_2 , L :

Mittlere Werte von k_1 und Q_t^{cl} werden von Kessler (27, Seite 31) für Wolken angegeben mit:

$$k_1 = 10^{-3} \text{ sec}^{-1}$$

$$\rho^a Q_t^{cl} = 0,5 \text{ gm}^{-3}$$

Für E schlägt Kessler den Wert 1 vor. Für den mittleren Radius der Tröpfchen nach der Autoconversion kann ein mittlerer Radius für Nieseln angenommen werden. Nach (29, S. 588) sind die Radien für Nieseln zwischen 25μ und 250μ und ein vernünftiger Mittelwert dürfte demnach bei 100μ liegen. Ein Radius von 100μ ist auch in Bezug auf die Fallgeschwindigkeit sinnvoll, die nicht mehr vernachlässigbar und deshalb etwa 1m/sec sein soll.

Damit wird

$$k_2 = 0,2 \text{ kgm}^{-2}$$

Für die Abschätzung der wirksamen Säulenhöhe L kann folgendermassen überlegt werden: Die Schnittfläche des Schwadens mit einer Vertikalebene wird umgewandelt in ein Rechteck der Breite $2 r_c$ (charakteristischer Durchmesser des Paketes) und die Höhe dieses Rechteckes wird als L angenommen:

$$L = \frac{\pi}{2} r_c \frac{v}{u}$$

Auf diese Weise wird ein Stück Boden der Breite $2 r_c$ unterhalb des Schwadens gleichmässig beregnet. Bei Verwendung der obigen Formel ist allerdings zu beachten, dass L für kleine Werte von u divergiert, was zu unsinnig grossen Tropfen führen würde. L muss deshalb in sinnvoller Weise nach oben beschränkt werden.

Aus den Zahlenwerten der Konstanten (runde Zahlen) und den obigen Ueberlegungen ist ersichtlich, dass es sich bei der Berechnung des Niederschlages mehr um eine Abschätzung als um eine gut fundierte Berechnung handeln kann. Diese Tatsache reflektiert die nur sehr approximativen Kenntnisse, über die die Atmosphärenphysiker bis heute verfügen. Da es sich aber bei der Niederschlagsbildung aus Kühlturmfahnen nur um einen kleinen Effekt handeln kann (ausser dem Driftwasser in unmittelbarer Nähe von Nasskühltürmen ist noch nie ein echter Niederschlag unter einer Kühlturmfahne beobachtet worden), scheint die approximative Behandlung trotzdem genügend genau zu sein.

1.3.3. Diffusionsteil

Im vorigen Abschnitt wurden die Ueberlegungen zur Behandlung des Aufstiegssteils so weit entwickelt, bis für numerische Berechnungen brauchbare Beziehungen erreicht wurden. Diese derart vollständige Verfolgung des eingeschlagenen Weges war aber zum grössten Teil der Führung zu verdanken, die durch zahlreiche Experimente und theoretische Arbeiten zustande kam. Im Gegensatz dazu bieten sich für die Lösung des Diffusionsteiles keine ebenso zahlreichen und vertrauenswürdigen Führungshilfen an. Es sollen deshalb vor der vollständigen Auswertung der an nassen und trockenen Kühlturmschwaden durchgeführten Experimente lediglich im Sinne von Wegweisern Ideen skizziert werden, die uns bei der Anpassung der Modelle an die Experimente leiten werden. Fragen nach der Brauchbarkeit von Modellvorstellungen und Näherungen werden dabei absichtlich noch offen gelassen, um die Grenze zwischen Wissenschaft und reiner Spekulation nicht zu überschreiten.

Eine erste Näherung, die sich nach der für den Aufstiegssteil verwendeten Theorie geradezu aufdrängt und in vielen Arbeiten über Diffusionsprobleme anzutreffen ist, besteht in der Vernachlässigung der Diffusion in der Windrichtung. Die Rechtfertigung dieser starken Vereinfachung des Problemes liegt begründet in den äusserst kleinen Gradienten der Konzentration des auszubreitenden Stoffes (hier Wasserdampf) in der Windrichtung, was jeden Durchmischungsmechanismus in der Schwadenrichtung als weitgehendst ineffektlos werden lässt. Die beschriebene Näherung widerspiegelt sich bei den hydrodynamischen Modellen (20, 21) in der Verkoppelung der Koordinaten x in Windrichtung mit der Zeit t und

der als konstant angenommenen Windgeschwindigkeit
u gemäss

$$x = u \cdot t$$

was auf stationäre Lösungen führt (vgl. 1.2.2.). Für die vorliegende Modellart kann die Näherung ohne zusätzliche Verwendung eines konstanten Windprofiles für stationäre Lösungen folgendermassen formuliert werden:

$$\psi(x + \Delta x; y, z) = A \psi(x; y, z) \quad (31)$$

$\psi(x; y, z)$ = zeitliches Mittel der Konzentrationsverteilung des zu diffundierenden Stoffes in der Vertikalebene $x = \text{konstant}$

A = Diffusionsoperator für einen Schritt Δx in Windrichtung

Ueber den Operator A, der den Diffusionsmechanismus (Turbulenz) beschreiben soll, können nun folgende Aussagen gemacht werden:

- Der Definitionsbereich von A umfasst alle reellen Funktionen ψ , für die $\int_0^{\infty} dz \int_{-\infty}^{+\infty} dy \psi(x; y, z)$ existiert und endlich ist.
- Durch die Annahme, dass der zu diffundierende Stoff den Diffusionsmechanismus und somit A nicht beeinflusst, wird A linear und unabhängig von x, y und ψ .
- Da es sich bei ψ um reelle Grössen handelt, ist A reell.
- Die Kontinuitätsgleichung fordert, dass

$$\int_0^{\infty} dz \int_{-\infty}^{+\infty} dy \psi(x; y, z) = \int_0^{\infty} dz \int_{-\infty}^{+\infty} dy A\psi(x; y, z)$$

- Die Eindeutigkeit der Lösung fordert für die Abhängigkeit des Operators A von Δx : $A^n(\Delta x) = A(n\Delta x)$
- Das Resultat jeder Diffusion ist nach genügend langer Zeit eine konstante Konzentrationsverteilung innerhalb der Gebietsgrenzen:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} A^n(\Delta x) \psi = \lim_{\Delta x \rightarrow \infty} A(\Delta x) \psi = A(\Delta x) c = c$$

- A ist ausser von Δx abhängig vom Windprofil $u(z)$ und den Momenten $M_{mn}(z) \equiv v^m w^n(z)$ der Turbulenzstatistik.

Eine weitere naheliegende Vereinfachung des nun zweidimensionalen Diffusionsproblems kann in Anlehnung an die Lösungen der Diffusionsgleichung für eine Punktquelle in einem unendlichen, homogenen Medium getroffen werden, indem verlangt wird, dass sich ψ überall als Produkt von zwei sich unabhängig voneinander entwickelnden Funktionen ψ_y und ψ_z darstellen lässt:

$$\psi(x; y, z) = \psi_y(x; y) \cdot \psi_z(x; z) \quad (32a)$$

$$\psi_y(x + \Delta x; y) = A_y \psi_y(x; y) \quad (32b)$$

$$\psi_z(x + \Delta x; z) = A_z \psi_z(x; z) \quad (32c)$$

Für A_y und A_z gelten sinngemäss die für A angegebenen Eigenschaften.

Ein brauchbarer Ansatz für A_y und A_z , der alle geforderten Eigenschaften erfüllen kann, wird ebenfalls von der Diffusionsgleichung geliefert (da die Behandlung

von A_y analog erfolgt, wird im Weiteren nur A_z betrachtet):

$$A_z \psi_z(x; z) = \int_0^H dz' \psi_z(x; z') g_z(z, z') \quad (33)$$

Aus den oben beschriebenen Eigenschaften von A ergeben sich nun bestimmte Eigenschaften für den Kern g_z des Integraloperators A_z :

- g_z ist reell und normiert bezüglich z und z' d.h.:

$$\int_0^H dz g(z, z') = \int_0^H dz' g(z, z') = 1$$

- Die Funktion $g_z(z, z')$ wird bestimmt durch Δx , u und M_{mn}

oder in Formeln: $g_z(\Delta x, u, M_{mn}; z, z')$

- Die Abhängigkeit von Δx ist durch die Eindeutigkeitsforderung bestimmt.

Durch weitere physikalische Ueberlegungen lassen sich die zulässigen Funktionen g_z weiter einschränken. Da nämlich $g_z(z, z')$ das Gewicht bedeutet, mit dem die Stelle z' der alten Funktion $\psi_z(x)$ die neue Funktion $\psi_z(x + \Delta x)$ an der Stelle z beeinflusst, muss g_z aus Symmetriegründen speziell von $(z - z')^2$ abhängen. Weiter muss aus physikalischen Gründen $g_z((z - z')^2)$ ein einziges Maximum bei $z = z'$ besitzen und für grosse $(z - z')^2$ verschwinden, ein Zusammenhang, der an eine Gauss-Kurve erinnern dürfte. Durch den Abfall der Funktion g_z für $z \neq z'$ sind u und M_{mn} nur in einer Umgebung von z wichtig und für langsame Aenderungen der Funktionen u und M_{mn} mit z kann näherungsweise geschrieben werden:

$$g_z = g_z(\Delta x, u(z), M_{mn}(z); (z - z')^2) \quad (34)$$

Es wurde nun gezeigt, wie man ausgehend von sehr allgemeinen Ueberlegungen mit Hilfe einiger recht plausibler Annahmen und Näherungen zu einem Formalismus gelangen kann, der sich mit Lösungen der gewöhnlichen Diffusionsgleichung $\dot{\psi}_z = D_z \Delta \psi_z$ vergleichen lässt und somit anzeigen kann, in welcher Art und Weise letztere sinnvoll erweitert werden könnten. Die Lösungen der obigen eindimensionalen Diffusionsgleichung mit konstantem Diffusionskoeffizienten D_z lassen sich nämlich für konstante Windgeschwindigkeit u analog zu (33) und (34) formulieren, wobei für den Kern g_z folgende Beziehungen gelten:

$$g_z \sim \exp \left(- \frac{(z - z')^2}{2 \sigma_z^2} \right) \quad (35)$$

$$\sigma_z^2 = 2 \frac{\Delta x}{u} D_z$$

Ein Vergleich mit (34) ergibt, dass (35) ein Beispiel für eine Formulierung des Kernes g_z bietet, der alle früher geforderten Bedingungen erfüllt, sobald u variabel und D_z abhängig von M_{mn} gemacht wird:

$$\begin{aligned} u &= u(z) \\ D_z &= D_z(M_{mn}(z)) \end{aligned} \quad (36)$$

Damit soll nahegelegt werden, dass die eindimensionale Diffusionsgleichung für Ausbreitungsrechnungen in der Atmosphäre genügend weit führen könnte, sobald D_z variabel gestaltet würde. Insbesondere bestünde dadurch die Möglichkeit der Durchführung von Ausbreitungsrechnungen ohne Zuhilfenahme von Ausbreitungskategorien und Ausbrei-

tungsfunktionen, die die bereits unter 1.2.3. erwähnten Unzulänglichkeiten enthalten. Dieses Vorgehen wäre aber angewiesen auf gut fundierte Zusammenhänge zwischen D_z und Grössen einer atmosphärischen Sondierung. Interessante Arbeiten in dieser Richtung werden zur Zeit in der KFA Jülich ausgeführt, wo experimentell versucht wird, Zusammenhänge zwischen Ausbreitungsparametern und dem Temperaturgradienten herzustellen (30). Eine zweite wichtige Grösse wäre im Gradienten der Windgeschwindigkeit zu erwarten, der die turbulenten Eigenschaften und damit D_z ebenfalls entscheidend beeinflussen könnte.

1.3.4. Entwicklungspotential

Das Entwicklungspotential der Paket- und Diffusionsmodelle ist noch keineswegs ausgeschöpft, obschon es wesentlich geringer ist als etwa bei den hydrodynamischen Modellen.

Im recht gut fundierten Aufstiegsteil ist vor allem ein Mangel an genauen Mischungsparametern festzustellen. Weiter fehlen Querverbindungen zu den in den hydrodynamischen Modellen verwendeten Parametern, die zum Verständnis der Mischungsparameter und deren möglichen Abhängigkeiten von anderen Grössen wertvolle Beiträge leisten könnten. Ein nicht befriedigend gelöstes Problem stellt auch die Vermischung von Fahnen benachbarter Kühltürme dar, wofür ein Beispiel in 1.4.2. behandelt wird. Die sehr grob behandelte Mikrophysik der Wassertröpfchen spielt bei Schwaden, deren sichtbarer Teil nicht allzu mächtig wird, eine nur sehr untergeordnete Rolle, könnte aber wichtig und damit verfeinerungswürdig werden in speziellen Fällen, die sich durch sichtbare Schwaden mit grossen Vertikaldurchmessern auszeichnen. Die Hauptsorge im Diffusionsteil gilt der Parametrisie-

rung der Diffusionsmechanismen für die horizontale und die vertikale Ausbreitung. Gleichzeitig muss ein Verfahren gefunden werden, das diese Zusammenhänge in für praktische Belange brauchbarer Form berücksichtigen kann. Schliesslich müsste dann gezeigt werden können, dass für atmosphärische Bedingungen, die für eine bestimmte Pasquill'sche Ausbreitungsklasse besonders typisch sind, für punktförmige Bodenquellen auch näherungsweise die Pasquill'schen Ausbreitungsfunktionen (7) berechnet würden.

Das Entwicklungspotential kann nach unserem Dafürhalten dann als ausgeschöpft betrachtet werden, wenn alle verwendeten Parameter entweder konstant sind oder aus einer atmosphärischen Sondierung bestehend aus Angaben über Höhe, Temperatur, Feuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Windrichtung abgeleitet werden können. Die Toleranz der Parameter sollte dabei so klein gemacht werden können, dass die in den Rechenresultaten daraus entstehenden Unsicherheiten die Grössenordnung der Messfehler bei aufwendigen Full-Scale Experimenten nicht überschreiten. Mit derartigen Modellen stünde dann die Möglichkeit offen, auf Grund der zahlreichen Sondierungen, die für verschiedene Standorte vorhanden sind, repräsentative Studien über die Auswirkungen von atmosphärischen Kühlsystemen durchzuführen.

1.4 Beispiele für FOG-Rechnungen

1.4.1. Bestimmung der Mischungsparameter aus Schornsteinformeln

G.A. Briggs (8) hat in einer kritischen Uebersicht die vorhandenen empirischen Formeln über die Ausbreitung von Rauchgasen aus Kaminen zusammengestellt. Er kommt zum Schluss, dass für stabile atmosphärische Schichtung zwei gute Näherungsformeln für die maximale Aufstiegshöhe (effektive Schornsteinhöhe) existieren, nämlich:

$$h = H + 5,0 \cdot (F^2/s^3)^{1/8} \quad \text{für Windstille} \quad (37)$$

$$h = H + 2,9 \cdot (F/us)^{1/3} \quad \text{Für Situationen mit Wind} \quad (38)$$

h	= effektive Schornsteinhöhe	(m)
H	= Höhe des Kamins	(m)
F	= Auftriebsflussparameter (proportional zum Wärmefluss)	(m ⁴ sec ⁻³)
s	= Stabilitätsparameter der Atmosphäre	(sec ⁻²)
u	= Windgeschwindigkeit	(m sec ⁻¹)

Eine Extrapolation der Formeln (37) und (38) auf Kühltürme ist mit einer grossen Unsicherheit verbunden, da die Formeln nur an Schornsteinen experimentell überprüft wurden. Einen gewissen Wahrheitsgehalt dürften aber die beiden Formeln trotzdem auch für Kühltürme aufweisen. Diese Tatsache kann für eine provisorische Kalibrierung der zwei Entrainment Parameter α und γ sowie des Turbulenztermes $\delta \cdot i$ des Aufstiegsteiles herangezogen werden.

Für stabile, windstille Atmosphären und verschiedene Werte von F und s wurde die Aufstiegshöhe eines Trockenkühlturmschwadens mit Formel (37) verglichen und diejenige Kombination der Parameter α und $\delta \cdot i$ (γ ist für senkrechten Aufstieg irrelevant) gesucht, für welche die Qua-

drate der Abweichungen minimal sind. Analog wurde für stabile aber windige Situationen mit Formel (38) vorgegangen, wobei hier alle drei Parameter variiert wurden. Die Übereinstimmung zwischen Modell und Formeln (37) oder (38) ist für die in Tabelle 3 zusammengestellten optimalen Grössen besser als etwa 10% (meistens besser als 5%), und die optimalen Sätze stimmen untereinander sehr schön überein. Für stabile atmosphärische Schichtung sagt also das Modell mit den in Tabelle 3 gegebenen Mittelwerten bezüglich Aufstiegshöhe annähernd dasselbe aus wie (37) und (38) und ist somit auf die beiden Briggs-Formeln kalibriert. Der Umstand, dass der optimale Turbulenzterm in allen Fällen verschwindet, sollte nicht erstaunen, da es sich ja ausschliesslich um stabile Situationen handeln soll, die erfahrungsgemäss durch sehr kleine Turbulenz-Intensitäten ausgezeichnet sind. Die ebenfalls in Tabelle 3 aufgeführten Literaturwerte beziehen sich auf Versuche in Flüssigkeitstanks, auf Windkanalexperimente und Beobachtungen an Kühlturmschwaden, Kaminen und Wolken: Wie zu erhoffen war, liegen die optimalen Grössen im Innern der durch die Literaturwerte gebildeten Intervalle.

Tab. 3 Mischungsparameter aus Schornsteinformeln

Formel	Variierte Grössen	Variationsgrenzen	optimale Grösse		
			α	γ	δi
(37)	Austrittsgeschwindigkeit	2 ÷ 8 m/sec	0,090	-	0,0
(37)	Austrittsradius	5 ÷ 45 m	0,089	-	0,0
(37)	Temperaturgradient	-0,7 ÷ 0°C/100m	0,089	-	0,0
(38)	Windgeschwindigkeit	1 ÷ 5 m/sec	0,083	0,319	0,0
(38)	Windgeschwindigkeit Temperaturgradient Austrittsradius Austrittsgeschwindigkeit	1 ÷ 5 m/sec -0,6 ÷ -0,2°C/100m 25 ÷ 50 m 3 ÷ 6 m/sec	0,079	0,320	0,0
(38)	Austrittstemperaturüberhöhung	5 ÷ 38°C	0,092	0,325	0,0
Mittelwerte Standard-Abweichungen			0,087 6%	0,321 1%	0,0 0
Literaturwerte			0,07÷ 0,12	0,3÷ 0,5	-

1.4.2. Vermischung von Fahnen benachbarter Kühltürme

Für alle Rechnungen der Abschnitte 1.4.2. und 1.4.3. wurde dieselbe Sondierung verwendet, um möglichst viele Quervergleiche zu gestatten. Sie ist in der Tab. 4 wiedergegeben und des besseren Ueberblickes wegen in Abb.6 noch einmal graphisch dargestellt. Die Daten für Temperatur und Feuchte stammen bis auf Höhen von 615 m über Boden aus Flügen eines ferngesteuerten Modellflugzeuges (Messdrohne, vergl. Teil 3 der Berichtereihe), die zwar nicht für Sondierungszwecke, sondern zur Ausmessung eines Vertikalschnittes durch den Kühlturm-Schwaden zwischen 09³⁰ und 10⁰⁰ MEZ durchgeführt wurden. Die Umgebungswerte liessen sich aber dennoch aus den Daten ableiten, die in grösseren seitlichen Entfernungen von der Schwadenachse registriert wurden. Die Temperatur und Feuchtwerte oberhalb 615 m wurden nicht gemessen und sind lediglich eine Fortsetzung der Sondierung mit der Annahme eines Temperaturgradienten von $-0,8^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ und einer konstanten Feuchte. Die Werte für den Wind stammen ausschliesslich aus der Radarverfolgung eines Pilotballons, der um 10³⁰ MEZ in der Nähe des Kraftwerkes gestartet wurde.

Die Sondierung zeichnet sich aus durch eine deutliche bodennahe Temperaturinversion zwischen ca. 150 m und 300 m, die Gradienten bis zu $+3,6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ erreicht. Das Vorhandensein einer Höheninversion auf ca. 1800 m, die durch die auffallende Windscherung auf dieser Höhe vermutet werden könnte, bleibe dahingestellt, da keine diesbezüglichen Messungen vorliegen. Die auftretenden Feuchten sind durchwegs von mittlerer Grösse und die Winde mässig bis eher schwach und wenig variabel mit der Höhe.

Die oben erwähnten Messdrohnen-Flüge in einer 1000 m von den Kühltürmen entfernten Vertikalebene ergaben das in Abb. 7 wiedergegebene Bild. Es zeigt die in verschiedenen

Tab. 4 Sondierung von Neurath am 20.11.74, 10h MEZ

Höhe	Temperatur	rel. Feuchte	Windge- schwindig- keit	Wind- richtung
(m)	(°C)	(%)	(m/sec)	(°)
0	5.2	78	4.1	173
50	5.0	74	3.9	175
145	4.1	75	4.3	186
195	4.9	71	5.0	192
225	6.0	66	5.5	198
275	6.7	63	6.0	201
315	6.5	59	6.3	208
355	6.3	55	5.9	211
430	6.1	54	5.7	213
615	4.6	54	4.5	222
950	(1.9	(55)	3.3	216
1300	(-0.9)	(56)	3.3	208
1700	(-4.1)	(55)	3.3	232
1812	(-5.0)	(54)	5.7	243
2000	(-6.6)	(54)	6.2	239

Abb.6 Sondierung von Neurath am 20.11.74, 10h MEZ

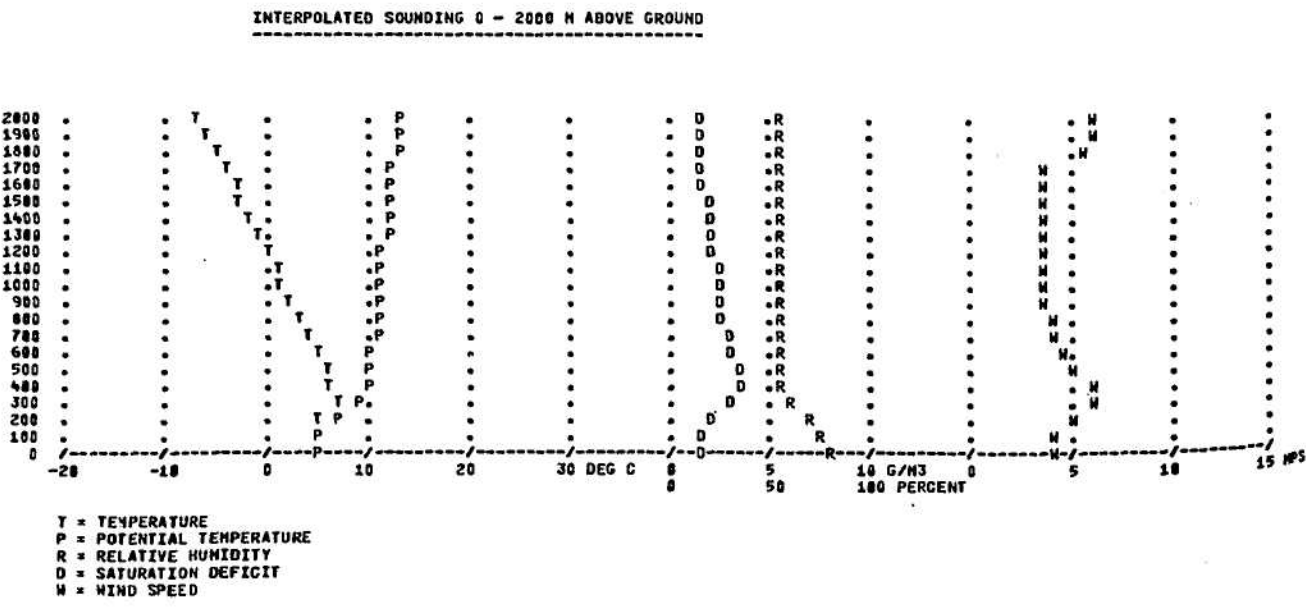
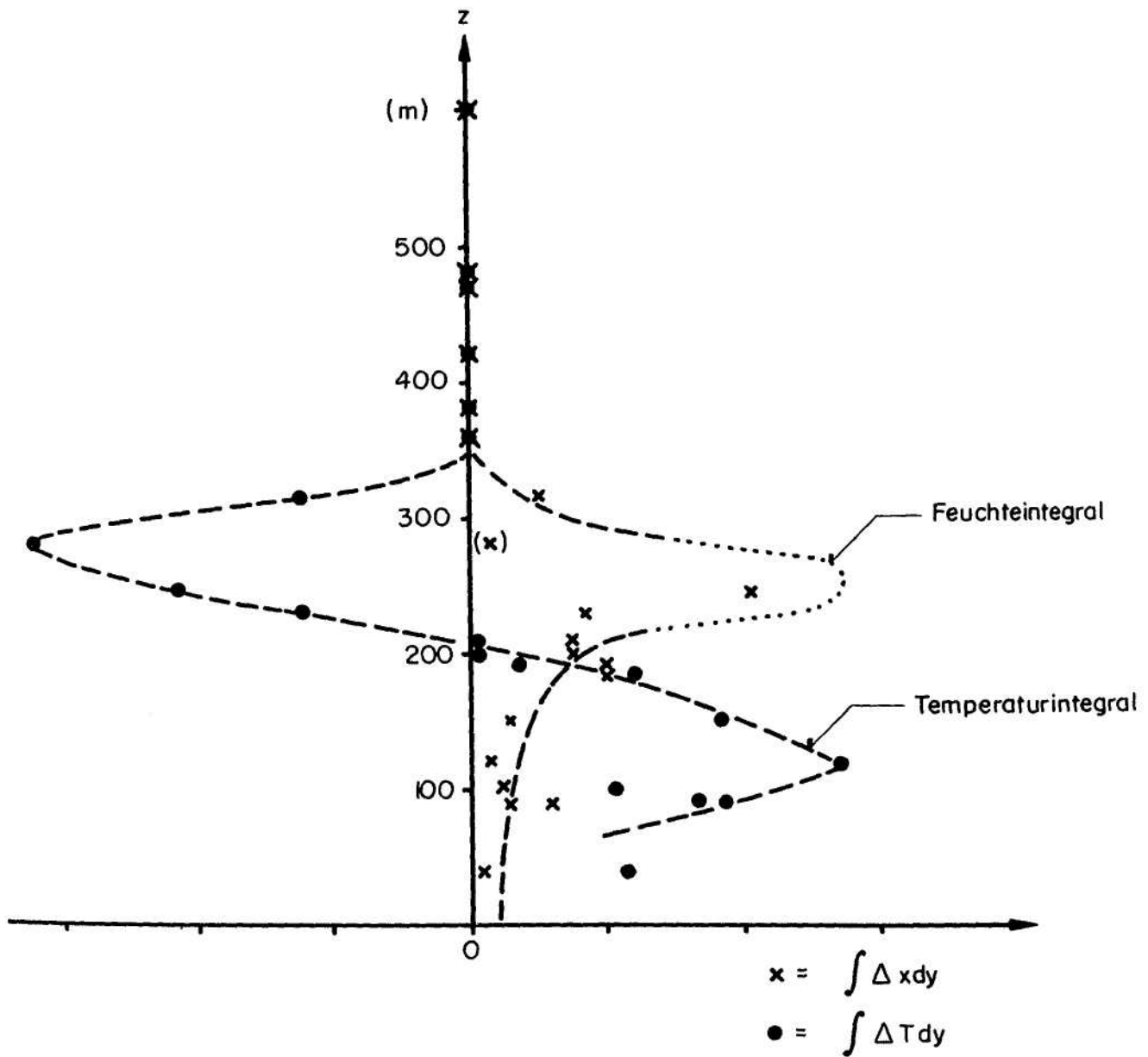


Abb. 7 Messdrohnen-Flüge in Neurath vom
20.11.74, 09³⁰ - 10⁰⁰ MEZ



Entfernung der Vertikalebene vom Zentrum der drei Kühltürme:
1000 m

Δx = Abweichungen der Mischungsverhältnisse von den
Sondierungswerten

ΔT = Abweichungen der Temperaturen von den
Sondierungswerten

dy = Wegelement quer zur Windrichtung

Höhen gemessenen Feuchte- und Temperaturerhöhungen integriert über je eine Horizontaltraverse in beliebigen Einheiten. Die Fläche unter der Temperaturkurve ist somit etwa proportional zum Auftriebsvermögen und diejenige unter der Feuchtigkeitskurve zur von den Kühltürmen und Kaminen herrührenden Wasserdampfmenge. Die Feuchtigkeitskurve zeigt eine Aufstiegshöhe der Schwadenpakete von etwa 250 m und der Verlauf des Temperaturintegrals ist charakteristisch für einen gut vertikal durchmischten "thermal", der in einer Inversion steckt.

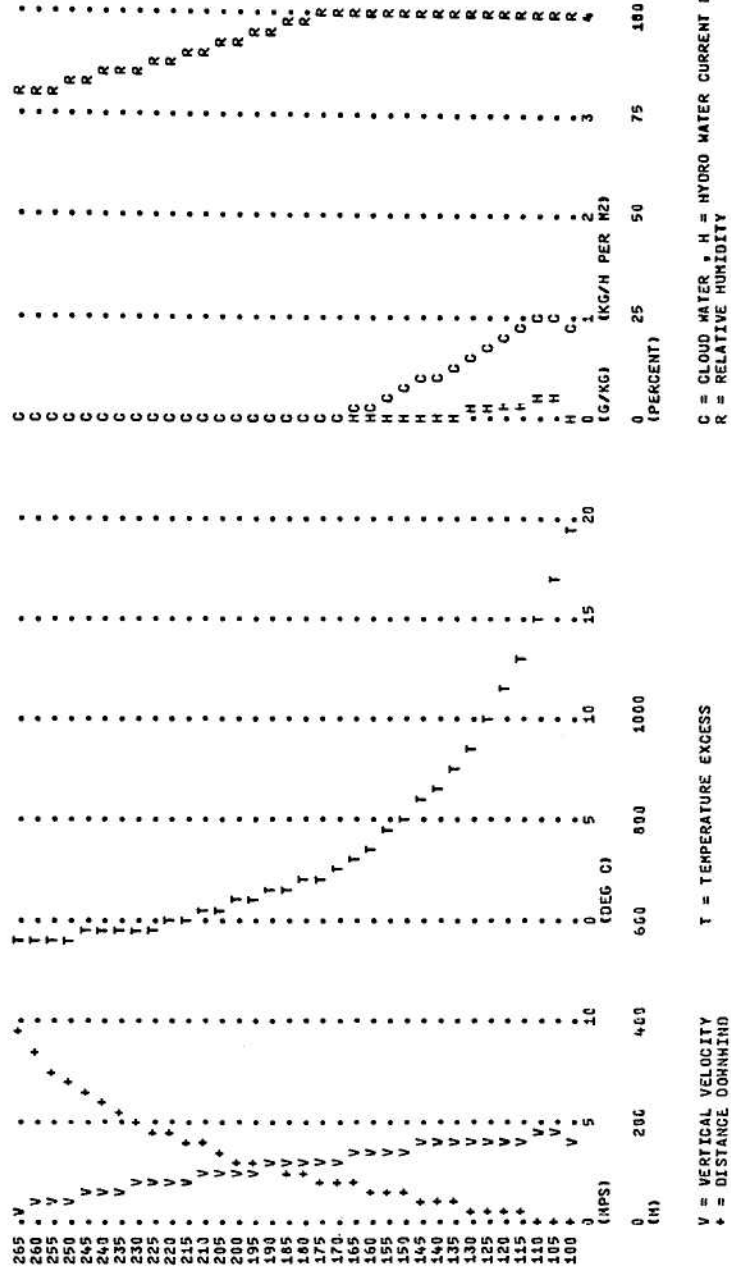
Eine Berechnung des Schwadens für einen der 3 in Betrieb gestandenen Kühltürme des Kraftwerkes Neurath mit dem Modell FOG ist in Abb. 8 wiedergegeben, wobei die in Tab. 5 zusammengestellten Daten für den Kühlturm Verwendung fanden. Letztere wurden mit Hilfe des im Kapitel 1.1.3. beschriebenen Nasskühlturm-Simulationsprogrammes für die speziellen Bodenwerte der Luft nach Tab. 4 berechnet. Die Wahl der Mischungsparameter erfolgte gestützt auf die Ergebnisse des vorigen Kapitels 1.4.1. sowie auf Vorschläge anderer Autoren wie Ooms (18), Stephen/Moroz (19), Richards (31) etc. und ergab :

$$\begin{aligned}\alpha &= 0,09 \\ \gamma &= 0,35 \\ \delta i &= 0,05\end{aligned}$$

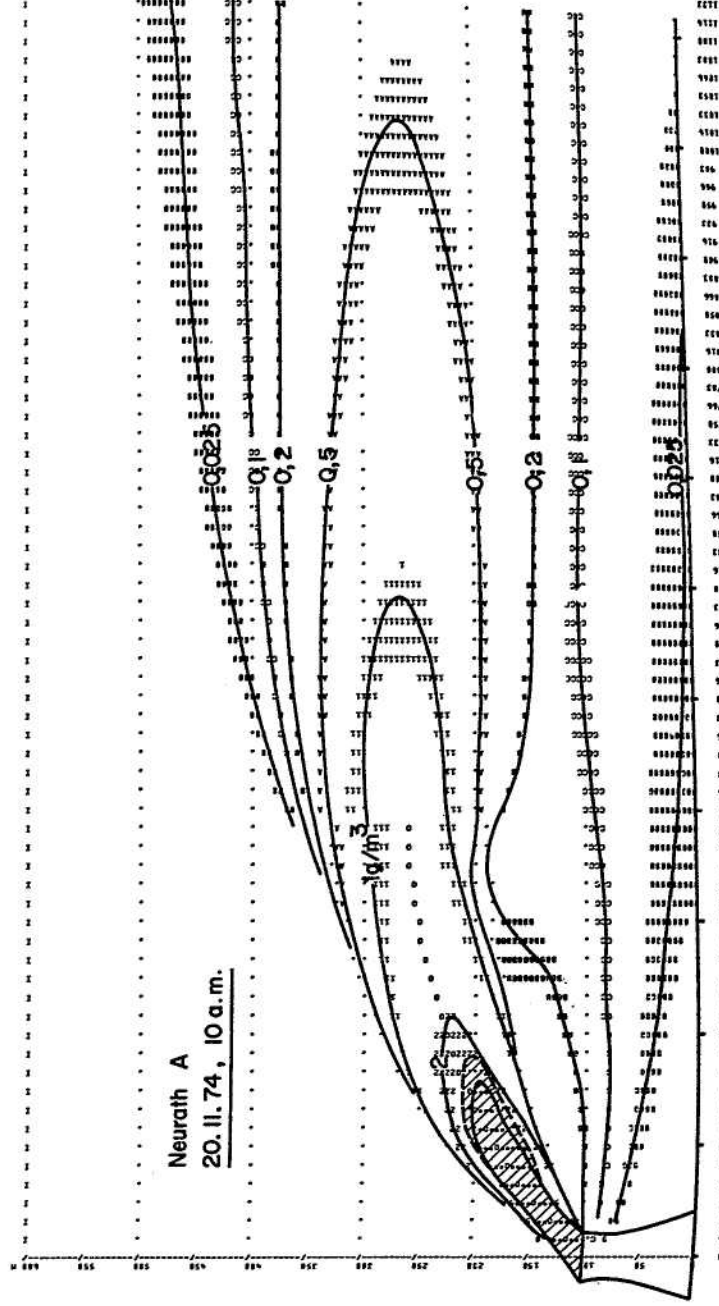
Im Diffusionsteil wurde eine zur Windgeschwindigkeit proportionale Diffusionskonstante für die Vertikale gewählt, während die Diffusion in horizontaler Richtung lediglich durch die Vorgabe eines Sektors beschrieben wurde, innerhalb dessen der ganze Schwaden quer zur Windrichtung als gleichmässig verteilt angenommen wurde.

Abb. 8 Berechnung des Schwadens eines einzelnen
Kühlturmes des Kraftwerkes Neurath vom
20.11.74, 10h MEZ

a) Aufstiegsrechnung



b) Feuchteerhöhungen



Tab. 5 Daten des Kraftwerkes Neurath

Beschreibung des Kraftwerkes:

Durch die RWE betriebenes Braunkohle-Grundlastkraftwerk bestehend aus drei gleichen 300 MW_{el} Blöcken. Jeder Block besitzt einen eigenen Naturzug-Nasskühlturm sowie einen Kamin. Die Kühltürme bilden die Ecken eines gleichseitigen Dreieckes mit einer Seitenlänge von drei Tassenradien.

Daten eines Kühlturmes:

- Geometrie:		
- Höhe	103	m
- Tassendurchmesser	75	m
- Austrittsdurchmesser	44.6	m
Kühlwasser:		
- Wasserdurchsatz	9030	kg/sec
- Kühlzonenbreite	11.1	°C
- thermische Leistung	420	MW
davon latent	275	MW
- Austrittsdaten für den 20.11.74, 10 h MEZ		
- Lufttemperatur	24.1	°C
- Luftdurchsatz	6600	m ³ /sec
- Vertikalgeschwindigkeit	4.13	m/sec
- verdampfte Wassermenge	110	kg/sec
- Drift	5	kg
- Drift + Nachkondensation	0.89	g/kg
- relative Feuchte	100	%

Daten eines Kamines:

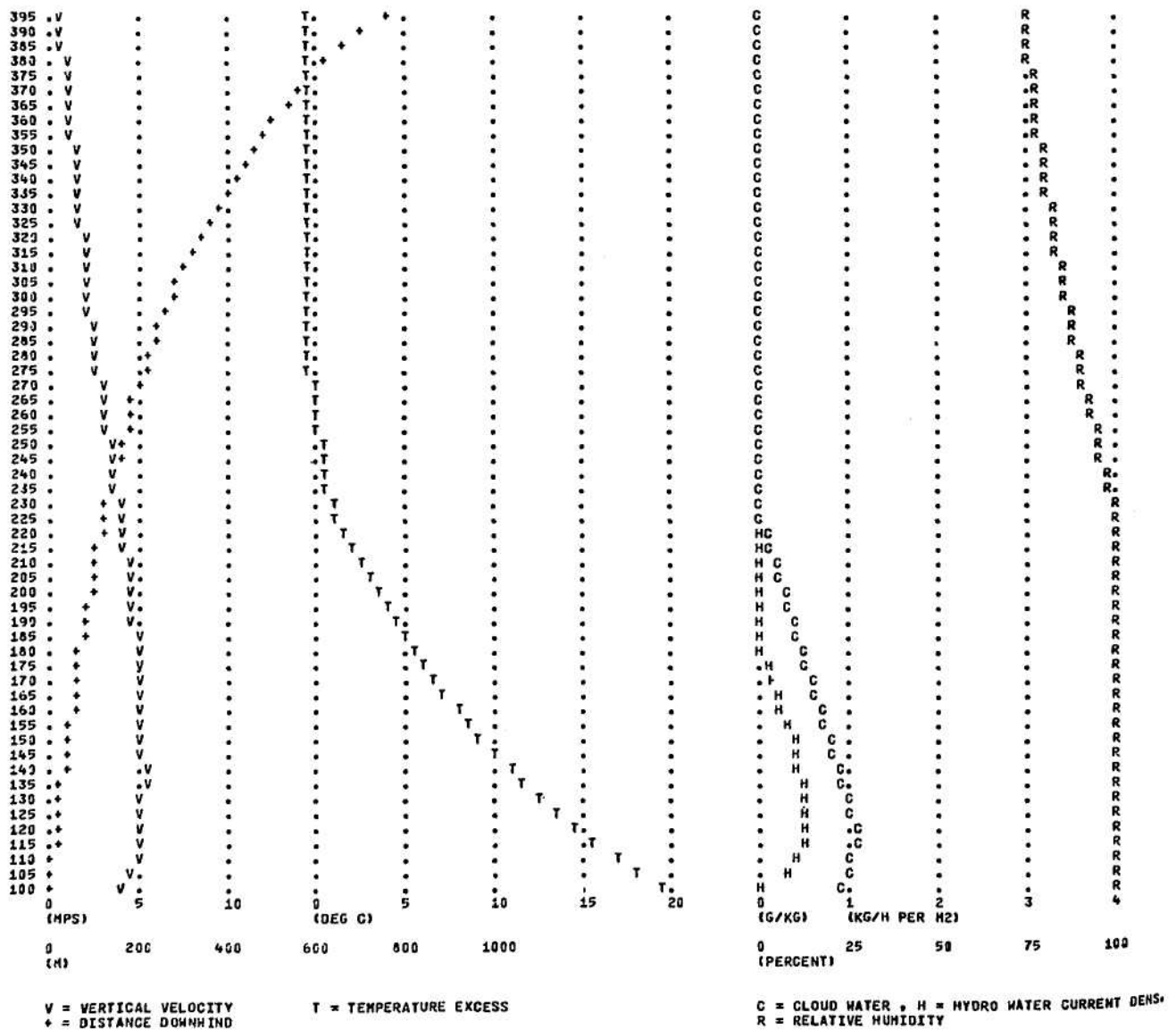
- Geometrie:		
- Höhe	160	m
- Austrittsdurchmesser	8	m
- thermische Leistung	ca. 250	MW
davon latent	ca. 160	MW
- Austrittsdaten		
- Lufttemperatur	ca. 160	°C
- Luftdurchsatz	ca. 500	Nm ³ /sec
- Wassermenge aus Kohle	ca. 64	kg/sec

Die Verfeinerung dieses Ansatzes ist Thema zukünftiger Arbeiten, wie bereits in Kapitel 1.3.4. erläutert wurde.

In der Berechnung gar nicht berücksichtigt sind neben den Nachbarkühltürmen auch alle Kamine (Tab. 5), die verglichen mit den Kühltürmen Luftdurchsätze von ca. 8% und Wasserdampfdurchsätze von rund 50% aufweisen. Sie stellen damit zusätzliche Abwärmequellen dar, die etwa 60% der Kühlturmleistungen erreichen. Trotz den 5 benachbarten Quellen liefert die Einzelnenrechnung (Abb. 8) Resultate, die den Messungen (Abb. 7) über alle 6 Quellen sehr nahe kommen. Sowohl die berechnete sichtbare Fahnenlänge von 200m wie auch ihre Aufstiegshöhe von 260m stimmen sehr schön mit den Beobachtungen überein. Wird hingegen angenommen, dass sich die Schwaden der drei Kühltürme schon ganz in der Nähe der Austrittsöffnungen vermischen, sodass die drei Kühltürme als eine einzige Quelle mit einem $\sqrt{3}$ mal grösseren Austrittsradius betrachtet werden könnten, entsteht das in Abb. 9 gezeigte Resultat. Im Gegensatz zu den Beobachtungen wird die Inversion hier deutlich durchbrochen, was nur mit einer wesentlichen Vergrößerung der Mischungsparameter verhindert werden könnte. Dies hätte aber einerseits eine starke Verkürzung des sichtbaren Schwadens zur Folge und würde andererseits den durch bereits viele Erfahrungen begründeten Toleranzbereich für die Mischungsparameter sprengen. Aus unseren heutigen Erfahrungen, die aber im Verlaufe der Auswertung der übrigen Schwadenmessungen noch modifiziert werden könnten, müsste demnach geschlossen werden, dass der Vermischungseffekt bei Fahnen benachbarter Quellen eine eher untergeordnete Rolle zu spielen scheint. Es könnten daher für die Berücksichtigung aller sechs Quellen näherungsweise die Fahnen jeder einzelnen

Quelle separat berechnet und die sechs Resultate superponiert werden. Eine zusätzliche Koppelung zwischen den einzelnen Fahnen liesse sich ebenfalls im genannten Verfahren ohne Schwierigkeiten berücksichtigen, wenn dies auf Grund der Messresultate als notwendig erscheinen würde.

Abb.9 Instantane Vermischung der drei Kühlturmschwaden



1.4.3 Vergleich zwischen trockenem und nassem Kühlturm für die Sondierung vom 20.11.74

In einer weiteren FOG-Rechnung wurde für die bereits beschriebene Sondierung (Tab. 4, Abb. 6) ein Trockenkühlturm berechnet, der die gleichen geometrischen Abmessungen und den gleichen Luftdurchsatz besitzt wie ein Nasskühlturm des Kraftwerkes Neurath (Tab. 5).

Damit auch dieselbe Leistung nun ohne Verdampfung von Wasser erzielt werden konnte, musste die Austrittstemperatur auf $68,4^{\circ}\text{C}$ erhöht werden. Mit Verwendung der schon im vorangehenden Kapitel benutzten Beimischungsparameter ergab die Rechnung eine Aufstiegshöhe von 410m. Im Gegensatz zum Nasskühlturm durchstösst also der geometrisch gleiche Trockenkühlturm bei gleichem Luftdurchsatz die Inversion sehr deutlich.

Man könnte nun vermuten, dass der Trockenkühlturm dann gleiche Aufstiegshöhen ergeben könnte, wenn Austrittsgeschwindigkeiten und - Temperaturen übereinstimmen würden. Dass aber auch für eine solche Auslegung die Schwaden des Trockenkühlturmes grössere Höhen erreichen würden als diejenigen des Nasskühlturmes zeigt Tab. 6 und ist darauf zurückzuführen, dass der entsprechende Trockenkühlturm den wesentlich grösseren Radius von etwa 40m haben müsste und daher grössere und damit stabilere Pakete produzieren würde.

Die letzte für das Verhalten des Schwadens wichtige Grösse, die bei einem Trockenkühlturm von gegebener Leistung noch variiert werden kann, ist die Austrittsgeschwindigkeit, die für alle obigen Rechnungen gleich derjenigen der Nasskühltürme des Kraftwerkes Neurath gewählt wurde. Es ist bemerkenswert, dass das Aufstiegsverhalten nur wenig von den Austrittsgeschwindigkeiten abhängig ist.

Tab. 6 Aufstieghöhen der Schwaden von 420 MW Trocken-
kühltürmen mit konstanter Austrittsgeschwindig-
keit aber verschiedenen Austrittsradien

Radius (m)	Austrittstemp. (°C)	Aufstieghöhe (m)
22.3	68.4	410
30	36.9	390
40	22.2	350
60	12.5	310
100	7.8	280

Austrittsgeschwindigkeit	4.13 m/sec
Bodentemperatur	5.2 °C
Austrittstemperatur des Nasskühlturmes (Tab. 5)	24.1 °C
Aufstieghöhe des Nasskühlturmes (Abb. 8)	260 m

Die in Tab. 7 zusammengestellten Rechenresultate zeigen eine Abnahme der Aufstieghöhe von nur ca. 5% für eine Vergrösserung der Austrittsgeschwindigkeit von 2 auf 9 m/sec. Der Grund für das sonderbare Verhalten liegt darin, dass bei kleinen Austrittsgeschwindigkeiten hohe Austrittstemperaturen auftreten, die solche Vertikalbeschleunigungen der Luftpakete zur Folge haben, dass sich innerhalb der ersten hundert Meter über der Kühlturmkrone ähnliche Verhältnisse einstellen wie bei den Fällen mit grösseren Austrittsgeschwindigkeiten.

Tab. 7 Aufstiegshöhen der Schwaden von 420 MW Trocken-
kühltürmen mit konstantem Radius aber verschie-
denen Austrittsgeschwindigkeiten

Austritts- geschwindigkeit (m/sec)	Austritts- temperatur (°C)	Aufstiegs- höhe (m)
2	177.5	420
3	100.4	410
4.13	68.4	410
5	55.4	410
7	39.3	410
9	31.0	400

Austrittsradius	22.3 m
Bodentemperatur	5.2 °C
Austrittstemperatur des Nasskühlturmes (Tab.5)	24.1 °C
Aufstiegshöhe des Nasskühlturmes (Abb. 8)	260 m

Dass ein ähnliches Verhalten auch bei grossen Trocken-
kühltürmen zu erwarten ist, zeigt Tab. 8, während Abb. 10
speziell die Rechnung mit einer Austrittsgeschwindigkeit
von 2.5 m/sec detailliert wiedergibt. Gut ersichtlich
ist darin die bereits oben erwähnte Zunahme der Verti-
kalgeschwindigkeit, die die auffallende Unabhängigkeit
der Aufstiegshöhe von der Austrittsgeschwindigkeit be-
gründet.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass für
die gewählte Sondierung die Aufstiegshöhen von Trocken-

kühlturmschwaden relativ wenig von der Kühlturmauslegung und stark von der Turmleistung abhängen. Würde sich dieses Resultat ebenfalls in einer statistischen Studie mit einer repräsentativen Anzahl von Sondierungen ergeben, was nicht auszuschliessen ist, könnte der Schluss gezogen werden, dass die für die klimatischen Auswirkungen wichtigen Aufstiegshöhen nicht wesentlich durch die Kühlturmauslegung, sondern fast ausschliesslich durch die Blockleistung einzelner, genügend weit voneinander entfernter Kühltürme beeinflusst werden könnten. Bei gleicher Blockleistung wären dann grössere Aufstiegshöhen für Schwaden trockener Kühltürme zu erwarten als für nasse Kühltürme.

1.4.4. Durchstossen von Inversionen für einige Trockenkühltürme

Um das Verhalten von Trockenkühlturmschwaden bei Inversionen näher zu beleuchten wurden für drei fiktive, verschieden starke Inversionen Aufstiegsrechnungen für einen 420 MW Trockenkühlturm durchgeführt. Die Inversionen wurden zwischen 200 und 300 m Höhe gewählt und ausserhalb derselben wurde ein normaler Temperaturgradient von $-0.6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ unterhalb 200 m und $-0,8^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ oberhalb 300 m angenommen. Für die Windgeschwindigkeit wurde überall 4 m/sec vorgegeben. Tab. 9 zeigt die gewählten Inversionsstärken sowie die stark davon abhängigen Aufstiegshöhen.

Geht man nun wieder zu einem leistungsfähigeren Kühlturm von 1900 MW über, erhält man für alle vier Sondierungen Aufstiegshöhen zwischen 1050 und 990 m. Es darf wahrscheinlich daraus gefolgert werden, dass die Schwaden von Trockenkühltürmen Inversionen umso besser durchdringen können, je grösser die einzelnen Blockleistungen sind.

Tab. 9 Aufstieghöhen der Schwaden eines 420 MW Trok-
kenkühlturmes bei verschieden starken Inversionen

Temperaturzunahme zwischen 200 und 300m (°C)		Aufstieghöhe (m)
	(Beschreibung)	
-0.8	normal	780
+0.5	schwache Inversion	670
+2.0	starke Inversion	480
+4.0	sehr starke Inversion	340

Austrittsradius	22.3 m
Höhe der Kühlturmkrone	100 m
Austrittsgeschwindigkeit	4.13 m/sec
Austrittstemperatur	68.4 °C

Abschliessend soll noch einmal die bereits früher erwähnte und für alle obigen Berechnungen geltende Warnung betont werden: Da die in den Messkampagnen erhaltenen Daten noch nicht vollständig aufgearbeitet sind und demnach in den Berechnungen nicht mitberücksichtigt werden konnten, sollen die gegebenen Resultate als vorläufig und durch weiter hinzukommende Erfahrungen in gewissen Grenzen modifizierbar betrachtet werden. Was sich jedoch dabei nicht ändern dürfte sind die allgemeinen Zusammenhänge und Tendenzen, auf die daher besonderes Augenmerk gelegt werden soll.

2. Experimentelle Ueberprüfung von Simulationsmodellen

2.1. Notwendigkeit für eine experimentelle Ueberprüfung

Die vorstehend beschriebenen Modelle zur Simulation der Umweltbeeinflussung durch Kühlturmfahnen aus Nass- bzw. Trockenkühltürmen sind in ihrer Güte von der Modellstruktur und den verwendeten Modellparametern abhängig. Zur realitätsgerechten Darstellung des Ausbreitungsverhaltens von Kühlturmschwaden müssen die Modelle bei kritischen Wetterlagen an Messdaten verifiziert bzw. kalibriert werden. Alle mathematischen Modelle kranken jedoch daran, dass bis jetzt kein geeignetes meteorologisches Datenmaterial zur Verfügung stand, mit dem eine umfassende Ueberprüfung der Modelle möglich war.

Die Erarbeitung eines solchen Basisdatenmaterials ist aus folgenden Gründen von grosser Bedeutung:

- die in der Literatur zugänglichen Informationen behandeln nur Teilaspekte oder sind nicht anwendbar
- die bisher versuchten Ansätze für Messkampagnen bringen keine vollständige Erfassung der Einflussphäre der Kühlturmmission und sind zudem sehr ungenau
- die schon in mehreren Instituten durchgeführten Versuche mit physikalischen Modellen (Wassertanks, Windkanäle) bieten grosse Unsicherheiten in der Uebertragbarkeit auf die Realität, da nie alle Ähnlichkeitsforderungen simultan erfüllt werden können
- die in verschiedenen Forschungsinstituten laufenden modelltheoretischen Arbeiten erfordern eine umfassende Verifizierung. Diese ist nur über eine vollständige, d.h. dreidimensionale Erfassung von realen Kühlturmfahnen möglich.

Der letzte aufgeführte Punkt ist von äusserster Wichtigkeit, denn die Modelle sollen so abgesichert sein, dass es möglich ist, damit glaubhafte Standortanalysen für Kernkraftwerke durchzuführen. Dabei müssen die Qualität und Vollständigkeit der Resultate gegenüber bisher durchgeführten Messkampagnen verbessert werden, um verlässliche Extrapolationen auf die geplanten Kraftwerksleistungen zu ermöglichen.

Daraus lässt sich die Anforderung an eine Messkampagne wie folgt formulieren:

- dreidimensionale, quantitative Erfassung des gestörten Temperatur-, Feuchte- und Geschwindigkeitsfeldes bis in Entfernungen von ca. 10km
- Vertikalsondierung mit hoher Auflösung im ungestörten Bereich
- Bestimmung der Austrittsdaten der Quelle
- gute zeitliche Uebereinstimmung aller gemessenen Grössen
- das Messobjekt sollte auf flachem Gelände stehen und eine thermische Leistung von ca. 2000 MW aufweisen
- die Messungen sollten bei verschiedenen, vor allem aber bei kritischen Wetterlagen (z.B. hohe Feuchten, starke Winde, tiefe Temperaturen, Inversionen) stattfinden
- die Datenträger sollten Computer-kompatibel sein

Es ist mit einem akzeptablen Aufwand nicht möglich, für alle klassifizierten Wetterlagen ein Messprogramm durchzuführen. Daher erschien es vertretbar zu sein, die Messzeiträume in Zeiten mit extremen meteorologischen Bedin-

gungen zu legen. Es ist zu erwarten, dass diese Daten für die Verifizierung und Kalibrierung der Modelle ausreichen werden.

Vor der Erarbeitung eines detaillierten Messprogramms zur Ueberprüfung der theoretischen Modelle war eine gründliche Analyse der verschiedenen experimentellen Möglichkeiten nötig. Im einzelnen waren zu analysieren:

- Grundsätzliche Möglichkeiten der dreidimensionalen Vermessung von Kühlturmfahnen
- Umfang der Messkampagne in zeitlicher und sachlicher Hinsicht
- Strategie der Messkampagne unter Berücksichtigung möglicher Schwierigkeiten
- Auswahl der Messobjekte unter Berücksichtigung der Randbedingungen der Ausbreitungsmodelle

2.2. Grundsätzliche Möglichkeiten der dreidimensionalen Vermessung von Kühlturmfahnen

Zur Verifizierung der Rechenmodelle war es notwendig, vier im wesentlichen parallele Messreihen durchzuführen :

- (1) Messung der charakteristischen physikalischen Grössen in der ungestörten Atmosphäre :
 - Temperaturprofil
 - Feuchtigkeitsprofil
 - Windprofil
 - Vertikale Turbulenz
- (2) Messung der gleichen charakteristischen physikalischen Grössen im atmosphärischen Störbereich des Kühlturmes
- (3) Bestimmung der Austrittsdaten des Kühlturms wie :
 - Austrittsgeschwindigkeit
 - Austrittstemperatur
 - Feuchtigkeits- und ev. Wassertröpfchengehalt
- (4) Messung der durch die Kühlturmfahnen am Erdboden verursachten meteorologischen Effekte

2.2.1. Messungen in der ungestörten Atmosphäre

Eine Bestandesaufnahme der realisierbaren Möglichkeiten führte zu folgenden zwei Messalternativen:

Messung der vertikalen Verteilung von Temperatur, Feuchte und Windvektor durch:

- (1) - Uebernahme der Werte von den instrumentierten Meteo-Masten bis 200m.
 - Sondierungen in Höhen zwischen 200-500m mit instrumentierten Fesselballons durch Einsatz eines entsprechend ausgerüsteten Messzuges.
 - Uebernahme der Radiosondierungen des nächsten Wetteramtes für Höhen über 500m, die in diesen Höhen auch für die Verhältnisse in einem grossräumigeren Gebiet repräsentativ sind.
- (2) Ferngelenkte Modellflugzeuge für den Bereich bis 500 m . Darüber Sondierungen mit
 - Dropsonden mit hochauflösenden Messinstrumenten, Abwurfhöhe 1500-2000m, telemetrische Messwertübertragung
 - Instrumentiertem Motorsegler mit hoch auflösenden Messsystemen und digitaler Messwerterfassung auf Magnetband an Bord
 - Ballonaufstieg mit angehängter Radiosonde für Temperatur- und Feuchtesondierungen in grösseren Höhen.

Im Wesentlichen wurde Alternative (2) bei der Messkampagne gewählt, da hierdurch eine redundante Absicherung der Messungen möglich war und die gemessenen Werte für den Standort

des Kühlturms repräsentativer waren als bei der Verwendung der Alternative (1). Zudem konnten die verwendeten Messsysteme auch bei den weiteren Messungen eingesetzt werden.

2.2.2. Messungen im atmosphärischen Störbereich des Kühlturmes

Für diesen Teil des Messprogramms wurden zwei Messprinzipien betrachtet:

- a) Messungen von einer fliegenden Plattform aus
- b) Messungen von bodengebundenen Geräten aus.

- a) Messungen der dreidimensionalen Verteilung von Temperatur, Feuchte und Windvektor von einer fliegenden Plattform aus

Nach gründlicher Analyse der verfügbaren Messsystemträger ergaben sich drei Alternativen, die weiter verfolgt wurden:

- (1) Messungen mit instrumentierten Motorseglern
- (2) Messungen mit einem instrumentierten Hubschrauber
- (3) Messungen mit einem instrumentierten Luftschiff

(1) Messungen mit instrumentiertem Motorsegler

- Vorteile:
- Instrumentierte Motorsegler könnten für diesen Messzweck kurzfristig eingesetzt werden.
 - Es könnte auf ein eingespieltes Team zurückgegriffen werden, das grosse Erfahrungen bei atmosphärischen Messungen hat.
 - Für die Speicherung der Messdaten und deren Weiterverarbeitung bestünde bereits ein Grundstock an zugehöriger Software.
 - Der Einsatz der Flugzeuge könnte von jedem nahegelegenen Flugplatz aus erfolgen.
- Nachteile:
- Die Korrelation von Messdatum und Messort ist wegen der relativ hohen Fluggeschwindigkeit schwieriger.
 - Die Trägheit der Messfühler ist ausschlaggebend für die Güte der Messungen. Der Einbau schnellansprechender Messfühler ist notwendig.
 - Beim Durchflug durch die Kühlturmfahnen wird ein Teil der Messstrecke gestört. Dieser Effekt lässt sich durch vortriebslosen Gleitflug mit einem Motorsegler sowie geeigneter Montage der Messfühler verringern.

(2) Messungen mit instrumentiertem Hubschrauber

- Vorteile:
- Höhere Manövrierfähigkeit des Fluggerätes. Dadurch ist eine einfachere Positionierung und eine bessere Zuordnung von Messort und Messdatum möglich.
 - Geringe Vortriebsgeschwindigkeit dieses Fluggerätes machte die Güte der Messungen nicht so stark von der Ansprechzeit der Messinstrumente abhängig.
 - Starten und Landen dieses Messträgers ist praktisch von jedem Ort aus möglich.
- Nachteile:
- Die Instrumentierung des Hubschraubers (Messgondel) wäre noch zu entwickeln und einzubauen.
 - Für die Genehmigung zu entsprechenden Umbauten wären zeitraubende Genehmigungsverfahren seitens der Luftfahrtsbehörden notwendig.
 - Durch den nach abwärts gerichteten Impuls durch die Rotorbewegung erfolgt eine schwer abschätzbare Verwirbelung der Kühlturmfahne mit entsprechenden Messfehlern.

(3) Messungen mit einem instrumentierten Luftschiff

- Vorteile:
- Die Zuordnung von Messdatum und Messort scheint wegen der sehr geringen Fluggeschwindigkeit besser möglich zu sein.
 - Die Störung der Kühlturmfahne scheint bei Anhängung einer Messgondel in ausreichendem Abstand sehr gering zu sein.
 - Die Verwendung trägerer Messfühler scheint relativ unproblematisch zu sein.
- Nachteile:
- Das Luftschiff stünde nur für wenige Mess-tage zur Verfügung und müsste an jedem Flug-tag von und nach Mühlheim/Ruhr (ca. 100km) überführt werden.
 - Die Manövrierfähigkeit des Luftschiffs ist relativ beschränkt, zumal bei dem starken Auftrieb über den Kühltürmen Schwierigkeiten zu befürchten wären.
 - Die Instrumentierung des Luftschiffs (Mess-gondel) und die zugehörige Datenerfassungsan-lage wären noch zu entwickeln und einzubauen.

Bei der Messkampagne wurde die Alternative (1) "Instrumen-tierter Motorsegler" vorgezogen, da die Zuordnung von Mess-wert und Messort durch extrem schnellansprechende Messfüh-ler und durch den Einsatz einer Radaranlage befriedigend gelöst werden konnte. Ausserdem waren keine weiteren mess-technischen Entwicklungsarbeiten mehr zu leisten, so dass die Messungen ohne Zeitverzug beginnen konnten.

b) Messungen von bodengebundenen Geräten aus

Bodengebundene Geräte können eingesetzt werden:

- als Alternative zu den Messungen von einer fliegenden Plattform aus
- zur Ermittlung der Bodenbelastung durch die Kühlturmschwaden. Diese Messungen sind auch bei Einsatz von Flugzeugmessungen notwendig.

Wenn bodengebundene Messsysteme als Alternative zu den Flugmessungen verwendet werden sollen, kommen insbesondere folgende Systeme in Frage:

- Messungen mit einem Wetterradargerät
- Messungen mit einem Lidargerät
- Messungen mit einem Radiometer

Bei ausschliesslichem Einsatz dieser Messgeräte ist ein Informationsverlust gegenüber den Flugmessungen zu erwarten, da nur integrale Aussagen über Flüssigwassergehalt, mittlere Tröpfchendurchmesser, mittlere Temperatur der Kühlturmfahne und deren Struktur möglich sind.

Vorteil dieser Verfahren ist der mit Flugmessungen verglichen relativ geringe Aufwand. Ausserdem handelt es sich hier um sogenannte Fernerkundungsverfahren, d.h. es treten keine Störungen des Messobjektes durch den Messvorgang auf. Diese Möglichkeit der Messung durch bodengebundene Geräte wird vor allem als Ausweichlösung für den Fall betrachtet, dass Flugmessungen nicht möglich sind.

Die Messungen der Bodenbelastung können vorgenommen werden mittels eines instrumentierten Messwagens oder einer

tragbaren Sonde, mit denen die Felder von Feuchte und Temperatur aufgenommen werden.

Bei der Messkampagne in Neurath sind beide Messsysteme zum Einsatz gekommen.

2.2.3. Bestimmung der Austrittsdaten des Kühlturms

Die Austrittsdaten des Kühlturms können im Prinzip auf zwei Arten ermittelt werden:

1. Direkte Messung von:

- Austrittsgeschwindigkeit der feuchten Luft,
- Austrittstemperatur der Luft,
- Wassertröpfchengehalt der Luft.

Im Falle Neurath konnte hier auf Messungen an einem Nasskühlturm durch verschiedene Hochschulinstitute und des Deutschen Wetterdienstes bei verschiedenen Wetterlagen zurückgegriffen werden.

2. Berechnung der Austrittsdaten nach dem in Kapitel 1.1.3. dargestellten Verfahren. Als (redundanter) Input für die Berechnung können folgende Größen verwendet werden:

- Geometrie des Kühlturms
- Abgegebene elektrische Leistung
- Gesamtwirkungsgrad der Anlage
- Brennstoffverbrauch und Heizwert
- Wasserverbrauch
- Wasserdurchsatz
- Wassertemperaturen

Die erwähnten an den Kühltürmen von Neurath durchgeführten Messungen leisteten für die Kalibrierung und Ueberprüfung des Modelles wertvolle Dienste.

2.2.4. Messung der Bodenbelastung

Für die Messung der Bodenbelastung konnten ebenfalls zwei Messverfahren angewendet werden:

- (1) Messung der interessierenden Grössen wie Luftfeuchtigkeit und Temperatur mittels eines instrumentierten Messwagens
- (2) Messung der gleichen Daten mit einer tragbaren Fussgängersonde

Beide Messverfahren wurden während den Flugmessungen eingesetzt, um eine redundante Absicherung der Messwerte zu erhalten.

2.3. Entwicklung der Strategie für ein Messprogramm

Nach zahlreichen Vorgesprächen mit Behörden, wissenschaftlichen Institutionen und Kraftwerksbetreibern für die durchzuführende Messkampagne konnte eine Strategie erarbeitet werden.

Ziel der Messkampagne war es, im Rahmen des Projektes "Hochtemperaturreaktor mit Heliumturbine (HHT)" meteorologische Daten für die Verifizierung und Kalibrierung von Ausbreitungsmodellen zu gewinnen.

Da die zu kalibrierenden Modelle des HHT-Partners "Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung" sowohl für Nass- als auch Trockenkühltürme anwendbar sind, sollten auch beide Kühlturmsysteme hinsichtlich ihrer Umweltauswirkung vermessen werden.

In der für künftige Kernkraftwerke interessanten Grössenordnung von etwa 1000 MW sind in Europa nur in Gyöngyös (Ungarn) Trockenkühltürme in etwa dieser Leistungsgrösse (800 MW) installiert, wobei zu Beginn der Messkampagne noch unsicher war, ob dort Messungen mit fliegenden Plattformen in der gewünschten Form möglich wären.

Aus diesem Grunde wurden folgende Vorbereitungen getroffen:

- Vorbereitung von Flugmessungen an geeigneten Nasskühltürmen interessanter Grössenordnung
- Vorbereitung von bodengebundenen Messungen an einem geeigneten Trockenkühlturm kleinerer Leistungsgrösse.

In zeitlicher Hinsicht wurde ein Vorgehen in zwei Phasen geplant:

1. Phase: Erprobung des gesamten Messsystems mit dem Ziel, brauchbare Messresultate zu gewinnen und Erfahrungen für die Hauptmesskampagne zu sammeln.
2. Phase: Systematische Messungen während einer kritischen Wetterlage unter Berücksichtigung der Erfahrungen aus der ersten Phase.

Als Messobjekte wurden folgende Kraftwerke ausgewählt:

Trockenkühlturm: Kraftwerk Ibbenbüren der PREUSSAG (1. Phase) mit einer Leistung von 150 MW, Kraftwerk Gyöngyös (Ungarn) mit einer Leistung von 800 MW (2. Phase)

Nasskühlturm: Kraftwerk Neurath der RWE mit einer Leistung von 900 MW, 1. und 2. Phase, Kraftwerk Meppen der RWE mit einer Leistung von 600 MW, 2. Phase

Trockenkühlturm: Das Kraftwerk Ibbenbüren wurde zum Testen des bodengebundenen Systems gewählt, da es den einzigen Trockenkühlturm in der Bundesrepublik besitzt und in ebenem Gelände steht. Somit sind hier keine orographischen Störeffekte zu befürchten.

Kraftwerk Gyöngyös (Ungarn) wurde ausgewählt, da es als einziges Kraftwerk in Europa seine Abwärme vollständig über Trockenkühltürme an die Atmosphäre abgibt. Es steht ausserdem ebenfalls in einer Ebene, so dass auch hier orographische Effekte zu vernachlässigen sind.

Nasskühltürme: Das Kraftwerk Neurath wurde aus folgenden Gründen für die Messkampagne gewählt:

- Es sind drei Blöcke à 300 MW in Betrieb, die durch Naturzugkühltürme moderner Bauart gekühlt sind. Diese Türme sollten den letzten Stand der Tropfenabscheidetechnik reflektieren
- Das Kraftwerk steht auf offenem Gelände und ist von allen Seiten zugänglich
- Das Gelände ist eben, es sind keine störenden Effekte durch orographische Einflüsse zu erwarten
- Es sind keine Zellenkühler auf dem Gelände
- Die Gesamtleistung der drei Kühltürme kommt bis auf ca. 10-15% an die bei HHT anvisierte heran
- An einem Turm sind bereits thermodynamische Messungen durchgeführt worden, so dass dessen Austrittsdaten genau bekannt sein dürften.

Nachteile des Standortes:

- Die Fahnen von drei Kühltürmen und drei Kaminen werden gemeinsam gemessen
- Luftwaffenflugzeuge überfliegen die Kühltürme in niedrigen Höhen und stellen eine ständige Gefährdung dar.

Das Kraftwerk Meppen der RWE, das erst während der Messkampagne in Neurath in Betrieb genommen wurde, war als Messobjekt ausersehen worden, da hier die Auswirkungen eines einzelnen Kühlturmes analysiert werden konnten. Die Nachteile der Vermischung der Rauchgase aus Kraftwerksschloten entfielen hier weitgehend, da das Kraftwerk Meppen mit Erdgas beheizt wird.

Auswahl der Messsysteme

Nach der definitiven Auswahl der Messobjekte musste über den Einsatz der Messsysteme entschieden werden. Es ging dabei um folgende Konzepte:

a) Flugmessungen

Vorteil: Exaktere Messergebnisse

Nachteil: Relativ grosser Aufwand

b) Bodengebundene Messungen

Vorteil: Geringerer Aufwand

Nachteil: Nur globale Erfassung des atmosphärischen Störbereichs

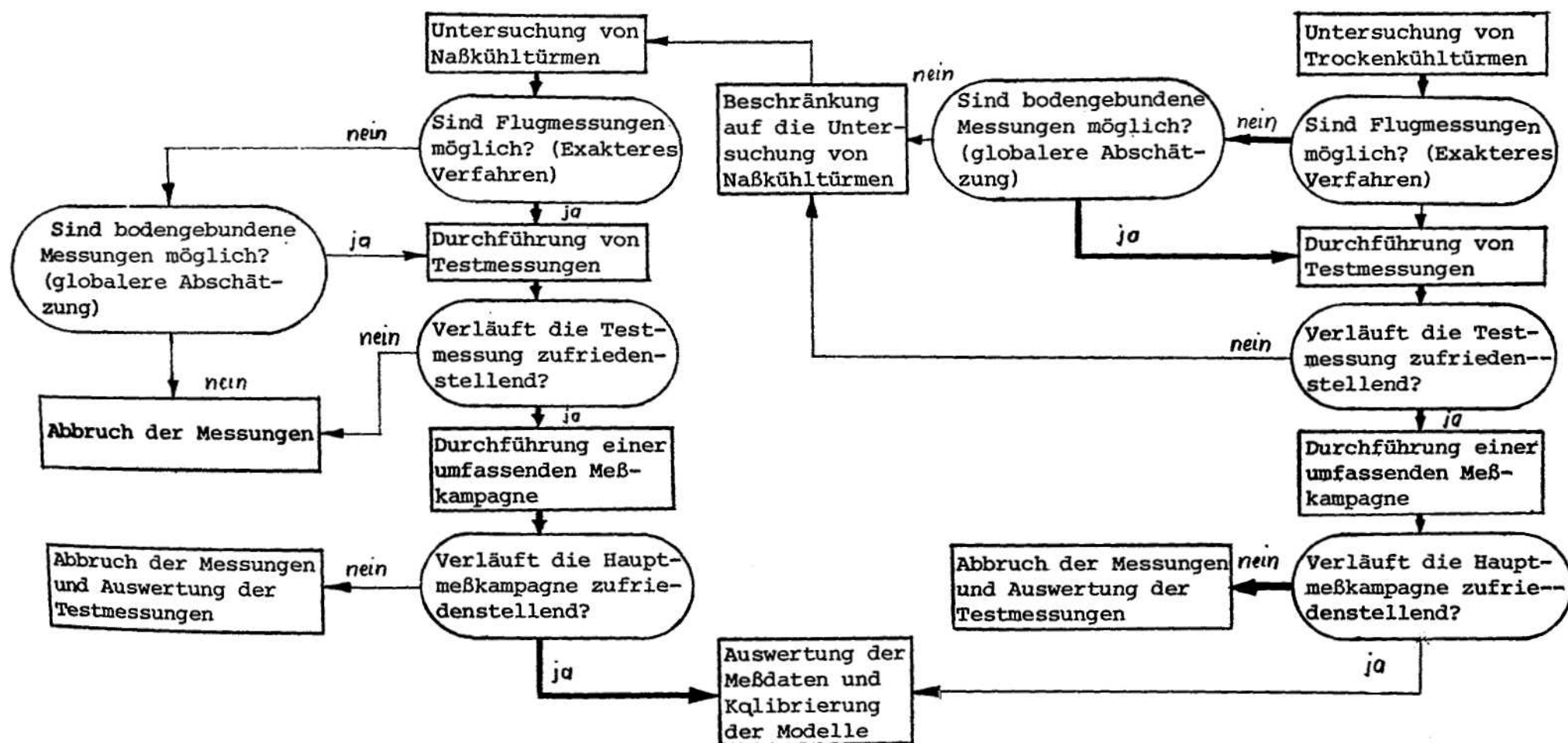
Es wurde generell so entschieden, dass exaktere Messergebnisse prinzipiell vorzuziehen seien und bodengebundene Messungen der Kühlturmefahne nur dann eingesetzt werden sollten, wenn keine Flugmessungen möglich waren.

Die Strategie für die Auswahl der einzusetzenden Messsysteme wurde aus dem in Abb. 11 dargestellten Entscheidungsmodell nach langwierigen Verhandlungen mit Flugsicherungsbehörden, Kraftwerksbetreibern und den Behörden erarbeitet..

Es zeigte sich, dass bei den Messungen an den vorgesehenen Nasskühltürmen Flugmessungen zum Zuge kommen konnten.

Da für die Trockenkühlturm-Anlage des Kraftwerks Gyöngyös nach genauen Absprachen mit den zuständigen Stellen nur bodengebundene Messungen möglich waren, wurde auch bei den Testmessungen an der kleinen Trockenkühlurmeinheit des Kraftwerks Ibbenbüren auf Flugmessungen verzichtet und ausschliesslich bodengebundene Messungen vorgenommen.

Abb. 11 Strategie für die Auswahl der Messsysteme



Aus den Möglichkeiten des Verlaufes der Messungen nach Abb. 11 waren nach Abschluss der Messkampagnen die fett eingezeichneten Pfade verwirklicht.

Die Kriterien für die Auswahl der Messsysteme werden im folgenden näher erläutert.

(1) Flugsystem und Aerologie

Die Messungen sollten zu einem möglichst frühen Zeitpunkt beginnen und nach Möglichkeit von einem eingespielten Team mit Erfahrung in derartigen Grossexperimenten durchgeführt werden.

Für diese Aufgabe konnte das Institut für Physik der Atmosphäre der DFVLR gewonnen werden. Dadurch wurden in das Programm folgende Systeme eingebracht:

1. instrumentierte Motorsegler und instrumentierte Motorflugzeuge
2. instrumentierte Motorflugzeugmodelle
3. Radaranlage
4. synoptische Station
5. Radiosonden und Dropsonden
6. tragbare Radiosonden

Damit konnten folgende Messaufgaben durchgeführt werden:

- Messung der Felder von Temperatur, Luftfeuchte, vertikaler Turbulenz und Windgeschwindigkeit im Bereich der Kühlturmfahne und in der ungestörten Atmosphäre
- Aufnahme der synoptischen Daten und der Bodendaten

Als redundantes System bei der notwendigen Feinaerologie wurde während der zweiten Phase der Messkampagne ein Messzug des Deutschen Wetterdienstes eingesetzt.

(2) Bodengebundene Messungen

Auch dieses System sollte kurzfristig einsetzbar und im Gelände erprobt sein.

Diese Kriterien wurden vom Lidarsystem des Observatoriums des Deutschen Wetterdienstes Aachen erfüllt, das deshalb in das Messprogramm integriert wurde, währenddem Versuche mit einem Radiometer scheiterten und das Wetterradar nach genaueren Ueberlegungen fallengelassen wurde.

Zu dem kompletten System gehörten:

1. ein Messwagen mit Hilfsaggregaten für das Lidargerät
2. Das Lidargerät mit einem Rubinlaser
3. eine elektronische, Computer-kompatible Registrieranlage für die Rückstreusignale

Gelöst werden konnten folgende Messaufgaben:

- globale Erfassung der Störzone eines Trockenkühlturms
- exakte dreidimensionale Vermessung dieser Störzone durch das Schnittebenenverfahren

Die zugehörigen aerologischen Daten der ungestörten Atmosphäre wurden aus den Radiosondenaufstiegen des nächsten Wetteramtes entnommen.

(3) Ablauf der Messkampagnen

Der Ablauf der Messkampagnen soll hier nur in Form einer Uebersicht dargestellt werden.

Eine Darstellung des Verlaufs der einzelnen Phasen nach Messsystemen geordnet und eine Darstellung der Ergebnisse wird in den folgenden Bänden gegeben.

In Tab. 10 sind die einzelnen Messprogramme und deren Zielsetzungen sowie die beteiligten Institute kurz zusammengestellt.

Das Messprogramm an Nasskühltürmen setzte sich aus insgesamt vier Messkampagnen zusammen. Die einzelnen Messkampagnen umfassten folgende Zeiträume für den Feldeinsatz des umfangreichen Messsystems:

Phase I

Neurath I: 1. - 10.4.1974, bei spätwinterlicher, stationärer Hochdruckwetterlage

Phase II

Neurath II: 9. - 23.11.1974, bei zyklonaler, frühwinterlicher Wetterlage mit relativ hohen Windgeschwindigkeiten

Phase I

Meppen I: 13. - 19.2.1975, bei kalter Winterwetterlage

Phase II

Meppen II: 21.4. - 27.4.1975, bei spätwinterlicher Hochdruckwetterlage

Das Gesamtprogramm wurde im wesentlichen von den Mitarbeitern des DFVLR-Institutes für Physik der Atmosphäre durchgeführt.

Im Messprogramm "Nasskühltürme" waren ausserdem folgende Stellen eingeschaltet:

Tab. 10 Messprogramm "Umweltauswirkungen von Kühltürmen"

	<u>Nasskühltürme</u>	<u>Trockenkühltürme</u>
Wissenschaftliche Leitung	Prof. Dr. H. Fortak, DFVLR, Institut für Physik der Atmosphäre	Dipl.-Ing. D. Haschke, Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung
Messprogramme	<u>Neurath I</u> Ziel: Systemerprobung an einem Nasskühlturmkollektiv <u>Neurath II</u> Ziel: Durchführung von Flugmessungen zur Erstellung umfangreichen meteorologischen Datenmaterials an <u>Nasskühlturmkollektiven</u> <u>Meppen I und Meppen II</u> Ziel: Durchführung von Flugmessungen zur Erstellung umfangreichen meteorologischen Datenmaterials an einem <u>einzelnen</u> Nasskühlturm	<u>Ibbenbüren</u> Ziel: Erprobung des Lidarsystems zur Ausmessung des atmosphärischen Störbereichs von Trockenkühltürmen <u>Gyöngyös (Ungarn)</u> Ziel: Ausmessung des atmosphärischen Störbereichs grosser Trockenkühlturmeinheiten
Organisation und Koordination	BONNENBERG + DRESCHER Ingenieurgesellschaft mbH	Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung

- BONNENBERG + DRESCHER Ingenieurgesellschaft mbH
- Eidgenössisches Institut für Reaktorforschung,
Würenlingen
- Kernforschungsanlage Jülich GmbH, HHT-Projektleitung
- Der Regierungspräsident Düsseldorf, Dezernat Luftfahrt
- Der Präsident des Niedersächsischen Verwaltungsbezirks
Oldenburg, Dezernat Luftfahrt
- Deutscher Wetterdienst Offenbach
- DFVLR-Institut für Flugfunk und Mikrowellen
- DFVLR-Flugbereitschaft Oberpfaffenhofen
- Erprobungsstelle 91 der Bundeswehr Meppen
- Rheinisch-Westfälisches Elektrizitätswerk AG
 - Hauptverwaltung Essen
 - Kraftwerk Meppen
 - Kraftwerk Neurath
- Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen -
Institut für Landschaftsökologie und Landschafts-
gestaltung

Das Messprogramm an Trockenkühltürmen bestand aus insgesamt
zwei Messkampagnen und umfasste folgende Zeiträume:

Phase I

KW Ibbenbüren: 7. - 9.5.1974
KW Weisweiler I: 6. - 7.2.1975

Phase II

KW Gyöngyös: 14.4. - 23.4.1975

Das Gesamtprogramm wurde hauptsächlich von Mitarbeitern
des Eidgenössischen Institutes für Reaktorforschung
(EIR) in Würenlingen (Schweiz) und des Observatoriums
des Deutschen Wetterdienstes in Aachen durchgeführt.

Im Messprogramm "Trockenkühltürme" waren darüberhinaus noch folgende Stellen eingeschaltet:

- BONNENBERG + DRESCHER Ingenieurgesellschaft mbH
- Kernforschungsanlage Jülich GmbH
- Preussag Aktiengesellschaft Kohle-Kraftwerk Ibbenbüren.

Die geplante fünfwöchige Messkampagne in Gyöngyös musste nach einer Messwoche durch eine Verfügung der ungarischen Behörden abgebrochen werden. Aus diesem Grunde konnten noch keinerlei Auswertungen unternommen werden und im Teil 2 der vorliegenden Berichtreihe kann deshalb lediglich auf das Lidarsystem an sich sowie auf die damit durchgeführten Testmessungen eingegangen werden.

Anhang : Symbole

C	=	spezifische Wärme für Wasser oder Eis
$C_p^{a,v}$	=	spezifische Wärme bei konstantem Druck für trockene Luft, Wasserdampf
E	=	Collection Efficiency
g	=	Erdbeschleunigung
H	=	Enthalpie im Paket
h	=	Enthalpie pro Masseneinheit
j^h	=	Hydrometeorwasser-Stromdichte
L_e	=	spezifische Verdampfungswärme
L_s	=	spezifische Sublimationswärme
l	=	Fallstrecke eines Wassertropfens
M	=	Molekulargewicht
m	=	Masse im Paket
p	=	Atmosphärendruck
p_s^v	=	Sättigungs-Dampfdruck
Q^{cl}	=	Mischungsverhältnis für Cloud Water
Q	=	Wärmezufuhr zum Paket
q^a	=	Wärmezufuhr zum Paket pro Masseneinheit trockener Luft
R	=	Gaskonstante
R^a	=	Gaskonstante pro Molekulargewicht von trockener Luft
r_c	=	charakteristischer Radius
s	=	Weg auf der Schwadenmittenlinie
T_f	=	Gefrierniveau in der Atmosphäre
U	=	innere Energie im Paket
u	=	Windgeschwindigkeit
u'	=	Abweichung der Windgeschwindigkeit vom Mittelwert
V	=	Volumen des Paketes
v^a	=	Volumen des Paketes pro Masseneinheit trockene Luft
v	=	Paketgeschwindigkeit

v_d	=	Detrainment-Geschwindigkeit
v_{en}	=	Entrainment-Geschwindigkeit
w	=	Vertikalgeschwindigkeit des Paketes
$X_s^{w,i}$	=	Sättigungs-Mischverhältnis von Dampf über Wasser, Eis
X	=	Koordinate in Windrichtung; Mischverhältnis
z	=	Vertikalkoordinate
α	=	Entrainment-Parameter für vertikal stage
γ	=	Entrainment-Parameter für bent over stage
δ	=	Entrainment-Parameter für atmosphärische Turbulenz
ϵ	=	$0,6219 = M^v / M^a$
ϕ	=	Volumenfluss
ρ	=	Dichte
ρ_t^w	=	Schwellwert für Autoconversion
μ_{en}	=	Entrainment-Parameter
η^a	=	dynamische Viskosität von Luft
ζ	=	Winkel zwischen der Vertikalen und der Schwadenmittenlinie

Indices

Indices rechts oben:

a	=	trockene Luft	(air)
cl	=	Wolkenwasser	(cloud water)
d	=	Tröpfchen	(droplet)
h	=	Regentropfen	(hydrometeors)
i	=	Eis	(ice)
L	=	feuchte Luft	
v	=	Wasserdampf	(vapour)
w	=	Wasser	(water)

Indices rechts unten:

e	=	Umgebung	(environment)
en	=	Beimischung	(entrainment)
d	=	Abgabe von Schwadenluft an die Umgebung	(detrainment)
p	=	Paket	(parcel)
s	=	Sättigung	(saturation)
t	=	Schwellwert	(threshold)
v	=	virtuell	(virtual)

Literaturverzeichnis

- (1) P. Berliner, Kühltürme - Grundlagen der Berechnung und Konstruktion, Springer-Verlag Berlin, 1975.
- (2) F. Merkel, Verdunstungskühlung, VDI-Fh 275, 1925.
- (3) J.G. Mehlig, Zur Anwendung der Merkel'schen Hauptgleichung in der Kühlturmtechnik, Diss. Techn. Univ. Dresden, 1965.
- (4) E. Ernst et al., Untersuchungen an einem Naturzug-Nasskühlturm, Fortschr. Ber. VDI 15, 5, Juli 1974, 15 ff.
- (5) G. Markoczy, zu veröffentlichen.
- (6) O.G. Sutton, Micrometeorology, Mc Graw-Hill, New York, 1953.
- (7) Pasquill F., The Estimation of the Dispersion of Windborne Material, Meteor. Mag. 90, 1963, p. 33-49.
- (8) G.A. Briggs, Plume Rise, ORNL, USA: TID-25075, 1969.
- (9) A.I. Weinstein & L.G. Davis, A parameterized numerical Model of Cumulus convection, Penn. State Univ., USA: PB-179 389, Dec. 67, Rev. May 68.
- (10) A.I. Weinstein, A numerical Model of Cumulus Dynamics and Microphysics, Penn. State Univ., J.A.S. 27, 1969, 246ff.
- (11) T. Takeda, Numerical Simulation of Large Convective Clouds, Stormy Weather Group, Scientific Report MW-64, Mc. Gill-University Montreal, Dec. 1969.
- (12) H.D. Orville, A Numerical Study of the Initiation of Cumulus Clouds over Mountainous Terrain, J. Atm. Sc. 22, 1965, 684ff.

- (13) K.J. Vogt et al., Untersuchungen zur Ausbreitung von Abluftfahnen in der Atmosphäre, Jül-1143-ST, KFA Jülich, Sept. 1974.
- (14) P. Bøgh et al., A new method of assessing the environmental influence of cooling towers as first applied to the Kaiseraugst and Leibstadt power plants, NUCLEX 72, Basel, Switzerland, Oct. 16-21, 1972.
- (15) W. Ott, Ein physikalisch-numerisches Modell zur Bestimmung der meteorologischen Umweltbeeinflussung durch Kühltürme, Met. Rdsch. 26, 1973, 97-102.
- (16) J.P. Trepp, A two-dimensional hydrodynamic model for cooling-tower plumes, IAEA-SM-187/3, EIR Würenlingen, Switzerland, 1975.
- (17) G. Abraham, The Flow of round buoyant Jets issuing vertically into ambient Fluid flowing in a horizontal Direction, ADV. Water Poll. Res.: Proc. of 5th Int. Conf. San Francisco and Hawaii 1970, Vol. 2, III-15ff., Ed. Jenkins, Pergamon, 1971.
- (18) G. Doms, A new Method for the Calculation of the Plume Path of Gases emitted by a Stack, Atmospheric Envir., 6, 899-909, 1972.
- (19) D.W. Stephen & W.J. Moroz, Plume Rise from wet Cooling Towers in strong Winds, Engineering Research Bulletin B-107, Penn. State Univ., Sept. 72.
- (20) K. Nester, WALKUERE, Gesellschaft für Kernforschung mbH, Karlsruhe, KFK 2249, 1975.
- (21) D.B. Spalding, The prediction of two-dimensional, steady turbulent flows, Imperial College, Heat Transfer Section, Rep EF/TN/A/16, 1969.
- (22) C.L. Hosler, Wet Cooling Tower Plume Behaviour, Penn. State Univ., 1971.

- (23) W. Klug, Ein Verfahren zur Bestimmung der Ausbreitungsbedingungen aus synoptischen Beobachtungen, Staub- Reinhaltung der Luft 29, 4, 1969, 143-147.
- (24) I.A. Singer, M.E. Smith; Atmospheric dispersion at Brookhaven National Laboratory, Air and Wat. Pollut. Int. J. 10, 1966, 125-135.
- (25) J.L. Mc Elroy, A comparative study of urban and rural dispersion, J. Appl. Meteorol. 8, 1, 1969.
- (26) D.B. Turner, A diffusion model for an urban area, J. Appl. Meteorol 3, 1964, 83.
- (27) E. Kessler, On the Distribution and continuity of Water Substance in Atmospheric Circulation, Met. Monographs 10, No. 32, 1969.
- (28) Steven R. Hanna, Fog and Drift Deposition from Evaporative Cooling Towers, Air Resources, Atmospheric Turbulence and Diffusion Laboratory, NOAA, Oak Ridge, Tennessee, 1973.
- (29) Landolt-Börnstein, Zahlenwerte und Funktionen, III. Band, Astronomie und Geophysik, 6. Aufl., 1952.
- (30) K.J. Vogt, H. Geiss, Tracer Experiments on the Dispersion of Plumes over Terrain of Major Surface Roughness, JÜ1 - 1131 - ST, Okt. 74.
- (31) J.M. Richards, Experiments on the Motion of Isolated Cylindrical Thermals through unstratified Surroundings, Int. J. Air. Wat. Poll. 7, pp. 17-34, 1963.

Unser Dank und unsere Anerkennung für die arbeitsintensiven Messungen, die zum Teil unter vielfach erschwerenden Bedingungen durchgeführt werden mussten, gilt hier den Equipen der Deutschen Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR) und des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Insbesondere sei für die freundliche Bereitschaft und die tatkräftige Mithilfe bei der Konzipierung und Durchführung der Messungen Herrn Prof. Dr. Fortak, Herrn Dr. Reinhardt (DFVLR) sowie Herrn Dipl. Ing. Borchardt und Herrn Dipl. Ing. Caspar (DWD) ein besonderer Dank ausgesprochen. Ebenso gilt unsere Anerkennung Herrn Solfrian (Bonnenberg + Drescher Ingenieur Ges. mbH), der gewissenhaft und ohne Zeitverzug viele Schwierigkeiten aufgelöst hat und so den reibungslosen Ablauf der Messkampagnen erst ermöglicht hat. Unser Dank soll auch die vielen Behörden erreichen, die für die verschiedenen Genehmigungen zuständig waren, ganz besonders aber die Kraftwerksbetreiber, die Verständnis für unsere Probleme und vielfach ungewohnten Wünsche zeigten und uns eine hilfreiche Hand boten.