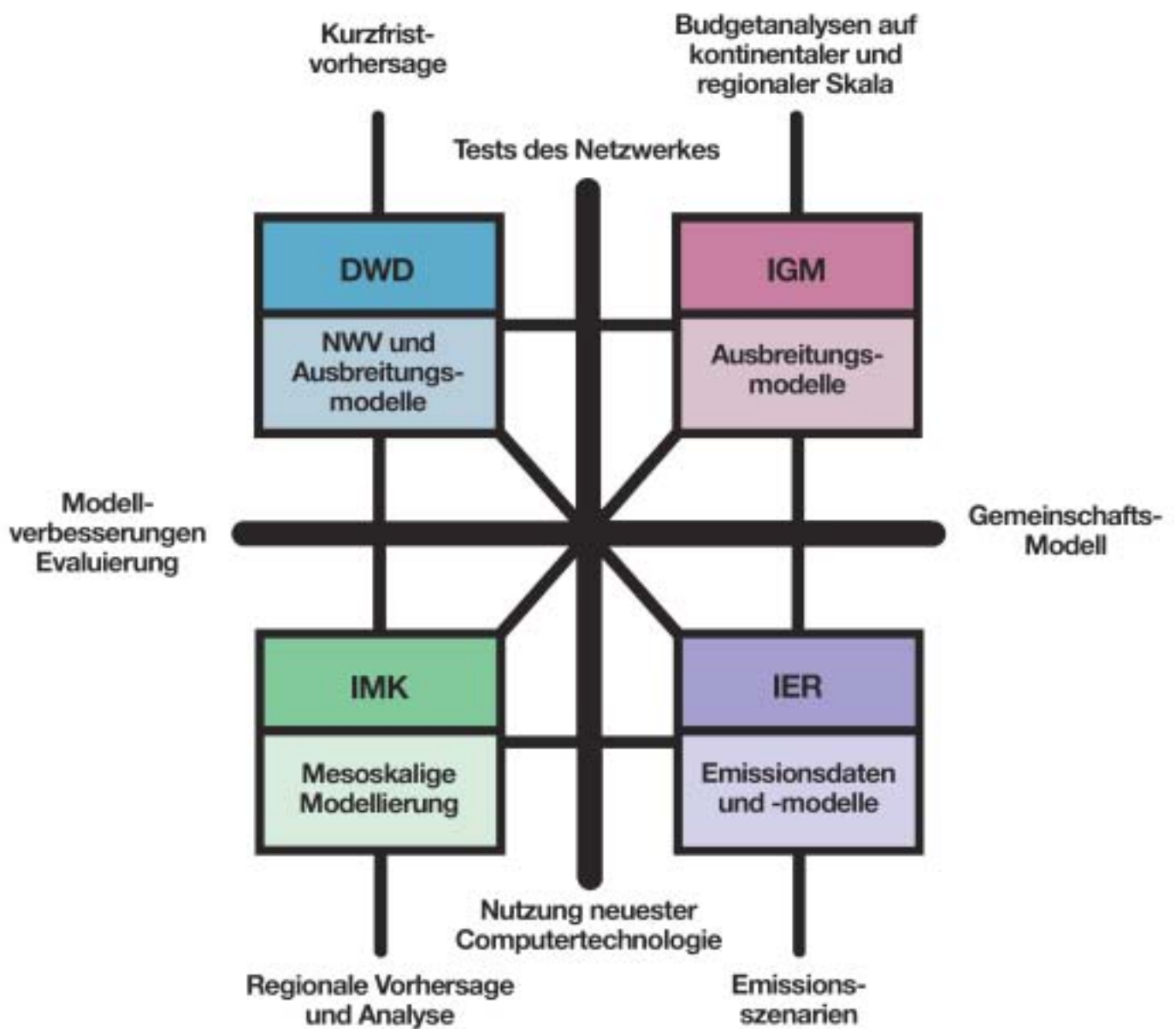




Photosmog II



TFS-Modellnetzwerk

Herausgeber

Deutscher Wetterdienst

Hauptschriftleiter

Dr. H. D. Behr (Hamburg)

Redaktionsausschuß

Dipl.-Met. U. Gärtner (Offenbach a. M.)

Priv.-Doz. Dr. G. Adrian (Offenbach a. M.)

Prof. Dr. J. Egger (München)

Prof. Dr. F. Fiedler (Karlsruhe)

Prof. Dr. G. Groß (Hannover)

Dr. J. Neisser (Lindenberg)

Prof. Dr. C.-D. Schönwiese (Frankfurt a. M.)

Prof. Dr. P. Speth (Köln)

Prof. Dr. G. Tetzlaff (Leipzig)

Zum Titelbild:

Gemeinsame Entwicklung und Erprobung eines Modellsystems für die operationelle Schadstoffprognose im Rahmen des Förderschwerpunktes Troposphärenforschung (TFS) des BMBF. Die Partner waren die Universitäten Karlsruhe (IMK), Köln (IGM), Stuttgart (IER) und der DWD.

promet erscheint im Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes – Frankfurter Straße 135, 63067 Offenbach am Main. Bezugspreis pro Jahrgang (4 Hefte) im Abonnement € 22,50, Einzelheft € 6,50, Doppelheft € 13,-, Dreifachheft € 19,50.

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

Druck:

Weppert GmbH & Co. KG

97421 Schweinfurt

Zehntstraße 17

ISSN 0340-4552

Meteorologische Fortbildung

27. Jahrgang, Heft 1/2, 2001

Thema des Heftes:

Photosmog II

(Fachliche Redaktion: F. Fiedler, Karlsruhe)

	Seite
F. FIEDLER, R. FRIEDRICH	
9 Erforderliche Komponenten für die Ozonmodellierung	1
K. NESTER, H. J. JAKOBS, M. MEMMESHEIMER, B. VOGEL, F. FIEDLER	
10 Modellierung von Ozon auf der regionalen Skala	6
E. SCHALLER, K. H. SCHLÜNZEN, A. EBEL	
11 Evaluierungsstrategien für Chemie-Transportmodelle	17
B. VOGEL, H. VOGEL, M. MEMMESHEIMER, A. OBERMEIER, R. FRIEDRICH	
12 Anwendung von Modellen für die Bewertung von effizienten Minderungsstrategien	31
I. JACOBSEN	
13 Erfordernisse für eine operationelle Ozonprognose und gegenwärtiger Stand	41
F. FIEDLER, A. EBEL, R. FRIEDRICH	
14 Erfolgsaussichten und Risiken für politisches Handeln zur Vermeidung von Photosmog	52
S. TILMES, V. MOHNEN	
15 Messungen, Meßnetze, Qualitätssicherung	55
G. BAUMBACH, U. VOGT, K. GLASER	
16 Einfluß bodennaher Sperrschichten auf das Ozonaufkommen in Stadtgebieten	68
K. ARPE, L. BENGTTSSON, G. S. GOLITSYN, I. I. MOKHOV, V. A. SEMENOV UND P. V. SPORYSHEV	
Zusammenhänge zwischen Meeresspiegel-Schwankungen des Kaspischen Meeres und Temperaturvariationen des tropischen Pazifiks	76
C. C. RAIBLE, E. KIRK, K. FRAEDRICH	
Kurzfristvorhersagen von Niederschlagswahrscheinlichkeit und Temperatur	80
F.-U. DENTLER	
Das Satellitenbild des Monats November 2000	87
Buchbesprechungen – Neuerscheinungen	89
Habilitationen, Promotionen und Diplom-Hauptprüfungen im Jahr 1997	95
Tagungen	100
Anschriften der Autoren dieses Heftes	103
Redaktionelle Hinweise für Autoren	104

9 Erforderliche Komponenten für die Ozonmodellierung

1 Einleitung

Bei der Behandlung des Problems der Photo-smogbildung in der Atmosphäre ist die atmosphärische Wissenschaft – so zeigen es die vorangegangenen Kapitel des Heftes Photo-smog I – mit einer Aufgabe konfrontiert, die weit über das Arbeitsgebiet eines einzelnen Wissenschaftlers und sogar auch weit über das Gebiet einer einzelnen Fachdisziplin hinausreicht. Ein einzelner Wissenschaftler, der sich von verschiedenen Seiten kommend diesem Thema zuwenden möchte, steht hierbei am Scheideweg, ob er sich allein an das Problem heranwagen und sozusagen als Universalist eine Antwort auf eine vorgelegte Frage geben sollte. Bei dieser Lösungsrichtung ist zwangsläufig nur eine sehr grobe und zum Teil oberflächliche oder einseitig tiefgehende Behandlung möglich, da dem einzelnen oft das fachliche Wissen über große Teile des Gesamtproblemkreises fehlt. Der zweite mögliche Lösungsweg besteht darin, möglichst das fundierte Wissen einzelner Fachdisziplinen zusammenzuführen (so wie es in diesen beiden Heften angestrebt wird), um daraus eine gemeinsame Lösung, vor allem für die abschließende Beurteilung, zu entwickeln. Vielfach schreckt man vor einem solchen Weg zurück, da sich in einem derartigen System die zahlreichen Wechselwirkungen zu einem sehr komplexen und auch vor allem für Laien nicht leicht durchschaubaren Gesamtsystem zusammenfügen. Deshalb wird häufig als Gegenreaktion ein einfaches, leicht überblickbares System für die beschriebene Modellbildung gefordert. Durch die dabei vorgenommenen Vereinfachungen in vielen Teilen des Systems entfernt man sich jedoch bei der Modellbildung so weit von der Realität, daß die erreichte Lösung kaum mit der Natur vergleichbar ist. Hier trifft dann der bekannte Ausspruch des Amerikaners H.L. Mencken zu: „To every complex system there is a solution simple and neat – but wrong“.

Im Folgenden wird zunächst das zu behandelnde System dargestellt, darauf aufbauend schließt sich eine Beschreibung der verschiedenen Modelltypen, der zu betrachtenden Modellgebiete und der notwendigen Eingabedaten an.

2 Das zu beschreibende System

Wie in den Kapiteln 1 bis 8 des Heftes Photo-smog I bereits sichtbar geworden, gehören zum vollständigen Verständnis des Problems (i) Kenntnisse über technische Prozesse, um die anthropogenen Emissionen in ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung zu erfassen, (ii) pflanzenphysiologische und bodenphysikalische

Kenntnisse, um die biogenen Emissionen in Abhängigkeit von Pflanzenart, Boden- und Atmosphärenzustand berechnen (oder zuvor auch messen) zu können. Hinzu kommen (iii) Kenntnisse über die meteorologischen Bedingungen des atmosphärischen Transports, der turbulenten Diffusion, der atmosphärischen Strahlung sowie Kenntnisse der Wolkenphysik, um die Wechselwirkung zwischen den Wolkenelementen und den Spurenstoffen berücksichtigen zu können. Ein nahezu unüberschaubares Feld bietet (iv) die weitverzweigte atmosphärische Chemie mit ihren verschiedenartigen Spurenstoffen in der Atmosphäre, die durch Hunderte von chemischen Reaktionen miteinander in Wechselwirkung treten und dadurch Substanzen ständig auf- und abbauen. Schließlich sind die zahlreichen Prozesse zu betrachten, durch die die einzelnen Substanzen aus der Atmosphäre wieder entfernt werden. Die Ablagerung der Substanzen am Erdboden, sei es durch den Pfad über die Niederschlagstropfen (nasse Deposition) oder über den Pfad des turbulenten Transports, durch den die Substanzen mit dem Erdboden, den Wasserflächen oder den Pflanzen in Berührung gebracht und von diesen partiell aufgenommen werden (trockene Deposition), stellt ebenfalls ein höchst kompliziertes über mehrere Fachdisziplinen greifendes Teilproblem dar.

Das physikalische Prinzip der Massenerhaltung muß bei der Formulierung eines Modells auf jeden Fall beachtet werden. Bei chemischen Umwandlungen bleibt zwar nur die Gesamtmasse in einem abgeschlossenen System erhalten, die Partialmassen besitzen dagegen im Inneren des Modellgebietes Quellen und Senken. Dieses Prinzip erlaubt es, für sehr komplexe Zusammenhänge eine klare Formulierung des Problems vorzunehmen.

Die Modellgleichungen, die die zeitliche Änderung einer Substanz an einem gegebenen Ort beschreiben, enthalten Terme für (i) die Advektion, in die das Strömungsfeld wie auch die Gradienten der Spurenstoffe eingehen, (ii) die Diffusion, in der die Turbulenz direkt oder in parametrisierter Form beschrieben wird und (iii) die chemischen Umwandlungen im Inneren des betrachteten Gebietes. Dabei wird die chemische Bildung von Ozon im wesentlichen durch die Reaktionen von atomarem Sauerstoff $O(3P)$ mit molekularem Sauerstoff bewirkt. Die Geschwindigkeit der Nettoproduktion ist eng mit dem Abbau von Spurengasen verknüpft und wird durch die Verfügbarkeit von NO_x gesteuert (siehe dazu Photo-smog I Kapitel 2, S. 90). Die zeitlichen Änderungen der Konzentrationen lassen sich unter Berücksichtigung der chemischen Umwandlungen durch Gleichungen der Form beschreiben, wie

sie beispielsweise im folgenden für die Konzentration von Stickstoffmonoxid angegeben ist:

$$\begin{aligned} \frac{\partial[NO]}{\partial t} = & -\bar{u} \frac{\partial[NO]}{\partial x} - \bar{v} \frac{\partial[NO]}{\partial y} - \bar{w} \frac{\partial[NO]}{\partial z} & (9.1) \\ & + \frac{\partial}{\partial x} K_{cx} \frac{\partial[NO]}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} K_{cy} \frac{\partial[NO]}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} K_{cz} \frac{\partial[NO]}{\partial z} \\ & + j_1 [NO_2] + j_4 [HONO] + j_7 [NO_3] \\ & + k_{19} [NO_3] [NO_2] \\ & - k_6 [O_3] [NO] - k_9 [HO_2] [NO] - k_{15} [NO] [OH] \\ & - k_{16} [NO] [NO] [O_2] - k_{18} [NO_3] [NO] - k_{57} [MO_2] [NO] \\ & - k_{58} [HC3P] [NO] - k_{60} [HC5P] [NO] - k_{62} [HC8P] [NO] \\ & - k_{64} [OL2P] [NO] - k_{65} [OLTP] [NO] - k_{66} [OLIP] [NO] \\ & - k_{77} [MGLY] [NO_3] - k_{67} [ACO_3] [NO] - k_{68} [TCO_3] [NO] \\ & - k_{69} [TOLP] [NO] - k_{70} [XYLP] [NO] - k_{71} [ETHP] [NO] \\ & - k_{72} [KETP] [NO] - k_{73} [OLNP] [NO] - k_{131} [XO_2] [NO] \end{aligned}$$

In dieser Gleichung sind die Konzentrationen in eckigen Klammern angegeben. Die ersten drei Terme auf der rechten Seite stellen die Advektion dar, die drei weiteren die Diffusion, die restlichen Terme geben die chemischen Reaktionen an, die für den chemischen Auf- und Abbau von Stickstoffmonoxid wirksam sind. Vor den Konzentrationen stehen bei den chemischen Termen jeweils Koeffizienten, die als Reaktionskonstanten bezeichnet werden. Ähnliche Gleichungen gehen für jeden weiteren Stoff in das Modell ein.

Wie bei allen Differentialgleichungen müssen auch hier noch die Randbedingungen für die Stoffflüsse durch die seitlichen Ränder, den oberen und den unteren Rand zusätzlich angegeben werden. Ziemlich aufwendig sind dabei die Angaben über (i) die verschiedenartigen Quellen am Erdboden aus dem Verkehr und allen anderen Verbrennungsprozessen aus Industrie- und Hausbrand sowie (ii) die Angabe der Flüsse aus Pflanzen und den Böden (Emission) bzw. die Aufnahme der Stoffe durch den Boden und die Pflanzen (siehe Photosmog I, Kapitel 3 und 4).

3 Modellarten

Die in Abschnitt 2 angegebene Gleichung (9.1) zeigt auf, daß zu ihrer Lösung das Windfeld, die Turbulenzintensität und zahlreiche chemische Reaktionskonstanten bekannt sein müssen, um an einem Ort die zeitliche Änderung der Konzentration einer Substanz berechnen zu können. Hieraus ist ersichtlich, welcher Aufwand nötig ist, um ein Modell anzuwenden und welche Daten zur Nutzung eines Modells benötigt werden, nämlich das Strömungsfeld und die Turbulenz. Die Berechnung des Strömungsfeldes erfordert die Hinzunahme der Bewegungsgleichung und wegen der Abhängigkeit der Strömung von der thermischen Schichtung auch die Gleichung für die innere Energie. Beispiele hierfür sind in Kapitel 11 dieses Heftes zu finden. Viele Modelle, in denen primär auf die Chemiezusam-

menhänge Wert gelegt wird, geben das Strömungsfeld und damit implizit auch die Turbulenz über vorgegebene Diffusionskoeffizienten beispielsweise als Monatsmittel aus Beobachtungen vor, um damit die Konzentrationsfelder berechnen zu können. Derartige Chemie-Transportmodelle (CTM) sind gut geeignet, um den chemischen Ablauf über eine längere Zeit studieren zu können. Sobald jedoch die zeitliche Veränderung des Strömungsfeldes bedeutsam wird, wie sie im Tagesgang durch regionale Modelle oder beim Durchzug von Tiefdruckgebieten von größerskaligen Modellen z.B. durch Wettervorhersagemodelle beschrieben wird, ist dieses Verfahren nicht mehr befriedigend.

In den vergangenen Jahren sind vermehrt Modelle entwickelt worden, die sowohl alle Gleichungen für den Impuls (Wind), die innere Energie (Temperatur) und die Partialmassen der einzelnen Substanzen (Konzentrationen) gleichzeitig lösen. Sie erfordern allerdings einen erhöhten Rechenaufwand. Diese Vorgehensweise besitzt jedoch wesentliche Vorteile, um das sehr breite Spektrum der ineinandergreifenden Einzelprozesse: Transport, Diffusion und chemische Umwandlungen naturgetreuer nachzuvollziehen zu können. Der Aufbau eines Modells zur Ozonsimulierung für den regionalen Bereich und die benötigten Teilm Informationen zur Anwendung derartiger Modelle ist in der Abb. 9-1 schematisch angegeben. Es enthält zunächst die Bewegungsgleichung und die Gleichung für die innere Energie (Temperatur) und die spezifische Feuchte, um die meteorologischen Bedingungen bereitstellen zu können.

Der zweite Modellteil enthält die Bilanzgleichungen für die während des Transports unterschiedlich raschen chemischen Reaktionen unterliegenden Substanzen. Einzelne Untermodelle werden wegen ihrer Bedeutung besonders hervorgehoben und in eigenen Abschnitten des Heftes Photosmog I behandelt wie z.B. anthropogene (Kapitel 3) und biogene Emissionen (Kapitel 4). Wobei es sich um die Aufgabe handelt, Konzentrationen chemischer Substanzen als Funktion von Ort und Zeit zu berechnen. Da diese in einem turbulenten Fluid transportiert und dabei durch die Turbulenz vermischt werden und ferner während des Transports chemischen Reaktionen unterliegen, die noch zusätzlich durch die Temperatur und die Sonneneinstrahlung beeinflusst werden, ist es zunächst erforderlich, diese einzelnen Prozesse genau genug zu beschreiben. Die kritischsten Bereiche sind zweifellos die atmosphärische Turbulenz im thermisch geschichteten Medium sowie die chemischen Reaktionen. Da ein Modell nie vollständig sein kann, wird immer wieder die Frage gestellt, wie viele Reaktionen zur Beurteilung des Photosmogproblems hinzugenommen werden müssen. Das Boden-Vegetationsmodell stellt für die meteorologischen Bedingungen eine wichtige Schnittstelle zwischen der Atmosphäre und dem Boden dar. Hier werden der Impuls sowie der Wärme- und Feuchteausaustausch zwischen Atmosphäre und Untergrund unter Berücksichtigung der Geländegestalt, der Bodenart mit den Bodenparamet-

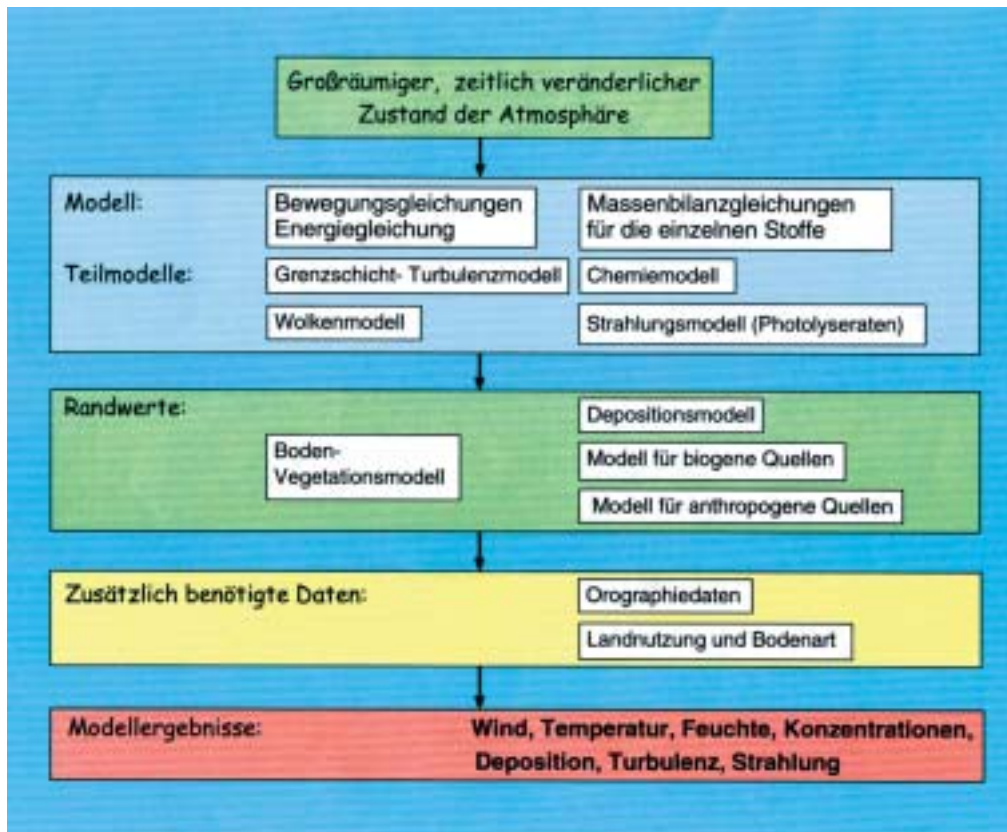


Abb. 9-1: Modellkomponenten für die Photosmogberechnung und benötigte Eingabedaten.

tern wie Bodenrauigkeit, Bodenalbedo, Bodendichte, Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Wasserspeicherkapazität, der Vegetation mit unterschiedlich tief in den Boden hineinreichender Wurzelstruktur geregelt. Von der Beschreibung der Wechselwirkungen zwischen Erdboden, Vegetation und Atmosphäre hängt die gesamte Höhenentwicklung der Grenzschicht während eines Tages ab. Modellrechnungen weisen immer wieder aus, daß die Grenzschichthöhe eine sehr kritische Größe darstellt, die den Ausbreitungsraum bestimmt. Eine zu niedrig berechnete Grenzschichthöhe im Vergleich zu den Beobachtungen bedeutet einen verminderten Vermischungsraum, über den am Boden freigesetzte Stoffe vermischt werden können, und als Folge davon eine zu hohe Konzentration der Substanzen in ihr. Beispiele dazu sind im Kapitel 16 in diesem Heft aufgeführt. In einem anderen Untermodell ist in entsprechender Weise zur dynamischen und thermodynamischen Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Unterlage ein aufwendiger Parametrisierungsansatz für die Deposition enthalten, durch den die Aufnahme von Substanzen durch die Stomataöffnungen oder durch die Cuticula der Pflanzen in Abhängigkeit von Wasser- und Wärmestress beschrieben wird. Ozon ist nicht nur als Reaktionspartner für andere Gase beteiligt, sondern kann unter besonderen Bedingungen auch bei den Oberflächenprozessen der Aerosole eine Rolle spielen.

Betrachtet man die Gesamtheit der erforderlichen Modellgleichungen für die Beschreibung des atmosphärischen Systems als eine „black box“ und geht zusätzlich davon aus, daß das vorliegende Modell vollständig ist und die Einzelprozesse genau beschreibt, so ist danach das Ergebnis, das damit errechnet wird, in hohem Grade abhängig von der Vollständigkeit der Anfangs- und Randwerte für die Modellvariablen wie auch für zahlreiche Modellparameter. In letztere gehen alle Koeffizienten der Parametrisierungen turbulenter Transporte, der atmosphärischen Strahlung sowie der Konvektion und der Wolkenphysik ein. Hinzu kommt die Fülle der Reaktionskonstanten im Chemiemodell, die vorwiegend durch aufwendige Messungen im Labor zu bestimmen ist.

Neben den notwendigen Vereinfachungen im Gleichungssystem stellt die mangelhafte Verfügbarkeit von Parameterdaten für das Modellgebiet bei vielen Anwendungen eine der wichtigsten Fehlerquellen dar. Aufgrund der zahlreichen Wechselwirkungen in einem solchen Modell ist es häufig sehr schwer oder sogar unmöglich, genau abschätzen zu können, welcher Anteil des Fehlers zu Lasten der unvollkommenen physikalisch-chemischen Beschreibung und welcher Anteil zu Lasten ungenauer bzw. unvollständiger Ausgangsdaten geht.

5.1 Eingabedaten

In dieser Kategorie sind erforderlich:

- Daten über die Geländehöhe als Funktion des geographischen Ortes in der notwendigen Auflösung,
- Daten über Boden- und Vegetationstypen, aus denen zahlreiche Parameter abgeleitet werden wie beispielsweise aerodynamische Rauigkeit, Albedo, Stomatawiderstände, Wärmeleitfähigkeit und andere,
- Emissionsdaten.

Für die Bereitstellung der Daten ist ein erheblicher Aufwand zu erbringen, da für die Schätzung der Emissionen der zahlreichen Substanzen Emissionsfaktoren der Verbrennungsprozesse ebenso eingehen wie die zeitliche und räumliche Variabilität der Quellprozesse, z.B. in Abhängigkeit von den Prozeßabläufen in Wirtschaftsunternehmen oder des Straßenverkehrs.

Ferner ist es erforderlich, im Inneren des Modellgebietes und an den äußeren Rändern die physikalischen und chemischen Bedingungen zum Beginn der Rechnung festzulegen. Erforderlich sind:

- großräumige meteorologische Daten als Antrieb für die Prozesse im Inneren des Gebietes,
- Anfangswerte der meteorologischen und luftchemischen Daten mit den bodenphysikalischen Größen wie beispielsweise des Bodenwassergehalts,
- Konzentrationswerte der chemischen Substanzen an der Einströmseite, um die Vorbelastung der Luft berücksichtigen zu können.

5.2 Daten für die Modellüberprüfung, insbesondere aus geeigneten Feldmeßkampagnen

Solche Daten ermöglichen den Nachweis der Brauchbarkeit eines Modells zur Analyse einer gegebenen Situation. Deshalb müssen sie besonders detaillierte Informationen von im Modellsystem behandelten Pro-

zessen enthalten, um die Verifikation durchführen zu können. In den Kapiteln 7 und 16 wurden beispielhaft Experimente zur Gewinnung derartiger Datensätze vorgestellt. Man erhofft sich von ihnen Informationen über:

- die Höhenentwicklung der turbulenten Grenzschicht im Tagesverlauf,
- zeitliche und räumliche Variationen der Energie- und Massenflüsse am Boden,
- tageszeitliche Variationen von meteorologischen und chemischen Variablen an verschiedenen ausgewählten Standorten.

6 Schlußbemerkungen

Die Modelle müssen die wichtigsten Prozesse (Strahlungsübertragung, Verdunstung, turbulente Diffusion, Wärmeleitung) enthalten, die für eine Anwendung auf mit der Natur vergleichbare Fälle erforderlich sind. Erst wenn das Modell auch anhand von Vergleichen mit zahlreichen durch Messungen gut dokumentierten Fällen seine Brauchbarkeit nachgewiesen hat, sind zahlreiche Einsatzmöglichkeiten denkbar. Eine Anwendung auf einen durch Messungen belegten Fall erfordert einen weitaus größeren Aufwand als eine prinzipielle Darstellung eines Vorgangs.

Bei vielen Anwendungen haben sich Modellsimulationen bereits als ein höchst nützliches Arbeitsmittel erwiesen. Für Fragen der Umweltvorsorge, bei denen aufgrund der Gegebenheiten keine experimentellen Untersuchungen möglich sind, stellen sie das einzige Hilfsmittel dar, objektive Aussagen über das Verhalten des höchst komplexen atmosphärischen Systems zu erhalten.

10 Modellierung von Ozon auf der regionalen Skala

Einleitung

In der regionalen Skala ist die Ozonverteilung im wesentlichen durch die Quellenverteilung der Vorläufersubstanzen, die Orographie und den Ferntransport bestimmt. Die wesentlichen Quellen der Vorläufersubstanzen NO_x und VOC's sind städtische, stark industrialisierte Regionen sowie stark befahrene Straßen, vor allem die Autobahnen. Neben der Quellenverteilung prägen die orographischen Strukturen im regionalen Bereich die Ozonverteilung. Zum einen durch ihren Einfluß auf die Strömung und zum anderen dadurch, daß die Quellen der Vorläufersubstanzen sich vorwiegend in den Tälern befinden. Die wesentlichen Prozesse, die die Ozonkonzentration tagsüber bestimmen, sind in Bodennähe die vertikale Diffusion, die Deposition und die chemische Umwandlung. In größeren Höhen spielt die Advektion eine zunehmende Rolle.

Um den Einfluß der Quellenverteilung und der Orographie sowie die davon beeinflussten dynamischen und chemischen Prozesse realistisch mit einem Modell beschreiben zu können, müssen diese Strukturen gut im Modell aufgelöst werden. Dies erfordert eine horizontale Maschenweite von mindestens 1 km bis 5 km. Die vertikale Auflösung sollte in Bodennähe etwa 10 m und in einigen Kilometern Höhe wenige 100 m betragen. Dies ist vor allem erforderlich, um die Vertikalstrukturen der Schadstoffverteilungen in der atmosphärischen Grenzschicht realistisch erfassen zu können.

Bei der heutigen Rechnergeneration ist bestenfalls eine horizontale Auflösung von etwa 10 km für die Modellierung von Schadstoff-Episoden auf der europäischen Skala möglich, wenn die benötigten Computerressourcen sich in einem vertretbaren Rahmen bewegen sollen. In der Regel liegt die horizontale Auflösung für die europäische Skala jedoch eher bei etwa 50 km, insbesondere wenn die wissenschaftliche oder umweltpolitische Zielstellung die Durchführung mehrerer Simulationen für die gleiche Episode erfordert. Für die hier betrachtete regionale Modellierung muß wegen der feinen horizontalen Gitterauflösung das Modellgebiet auf einige hundert Kilometer Ausdehnung in beiden horizontalen Richtungen beschränkt werden. Diese Beschränkung erfordert für die Simulation der Ozonkonzentrationsverteilung eine Information über den Ferntransport von Ozon und seiner Vorläufersubstanzen, da die Schadstoffverteilung innerhalb des regionalen Modellgebiets stark von den Schadstoffen in der herantransportierten Luftmasse abhängen kann.

Die Eingabedaten für die regionale Modellierung, wie Landnutzung, Höhe des Geländes und Emissionen, müssen aufgrund der feinen horizontalen Auflösung detailliert vorliegen. Findet eine Kopplung mit einem gröberskaligen Modell statt, sollten sie konsistent zu

den Daten des gröberskaligen Modells sein. Bei den Emissionen bedeutet dies z. B., daß im regionalen Modell die Summe der Emissionen innerhalb einer gröberskaligen Masche mit der Emission für diese Masche im gröberskaligen Modell übereinstimmen sollte.

Im folgenden werden verschiedene Verfahren erläutert, wie die Informationen aus dem überregionalen Bereich in das regionale Modellgebiet eingebracht werden können. Erfolgt bei diesem als Nestung bezeichneten Verfahren die Übergabe innerhalb des gleichen Modells, wird dies interne Nestung genannt. Bei der Übergabe in ein anderes Modell ist das eine externe Nestung. Neben den Verfahren werden Ergebnisse gezeigt, die demonstrieren, welche Feinstrukturen bei einer verbesserten Auflösung im Vergleich zur größeren Auflösung auftreten. Durch Vergleiche mit Messungen läßt sich erkennen, inwieweit bessere Ergebnisse durch eine höhere Auflösung zu erzielen sind. Ergänzt werden die Vergleiche durch eine statistische Auswertung der unterschiedlichen Modellergebnisse.

2 Die interne Nestung – am Beispiel des EURAD-Modells

In vielen Fällen ist es bei der numerischen Simulation atmosphärischer Konzentrationsfelder wünschenswert, ausgewählte Gebiete mit hoher horizontaler Auflösung zu behandeln, um die dynamischen und chemischen Prozesse mit größerer Genauigkeit erfassen zu können. Dazu ist es erforderlich, Simulationen für Gebiete unterschiedlicher Ausdehnung und Gitterweite durchzuführen. Um den Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Skalen Rechnung tragen zu können, wird die Technik der Nestung eingesetzt.

Man unterscheidet dabei die sogenannte Ein-Wege- und Zwei-Wege-Nestung. Bei der Ein-Wege-Nestung werden die Randwerte eines Teilgebiets (eines Nests) durch die Ergebnisse der Simulation des darüberliegenden Modellgebietes bestimmt. Bei der Zwei-Wege-Nestung wird zusätzlich auch die Auswirkung des Nests auf das darüberliegende Gebiet berücksichtigt. In den derzeit verwendeten „State of the art“-Modellen ist zu meist die Ein-Wege-Nestung realisiert. Die Zwei-Wege-Nestung befindet sich teilweise noch im Entwicklungsstadium und wird deshalb bei wissenschaftlichen Anwendungen nur bedingt eingesetzt. Die Ein-Wege-Nestung ermöglicht auch relativ problemlos die Kopplung unterschiedlicher Modellsysteme über die Randwerte, wie sie im Abschnitt 3 beschrieben wird. Dies ist bei der Zwei-Wege-Nestung kaum möglich.

Am Beispiel des Europäischen Ausbreitungs- und Depositionsmodells EURAD (Hass et al. 1995, Memmes-

NESTUNG

EURAD: Chemie-Transport-Simulation

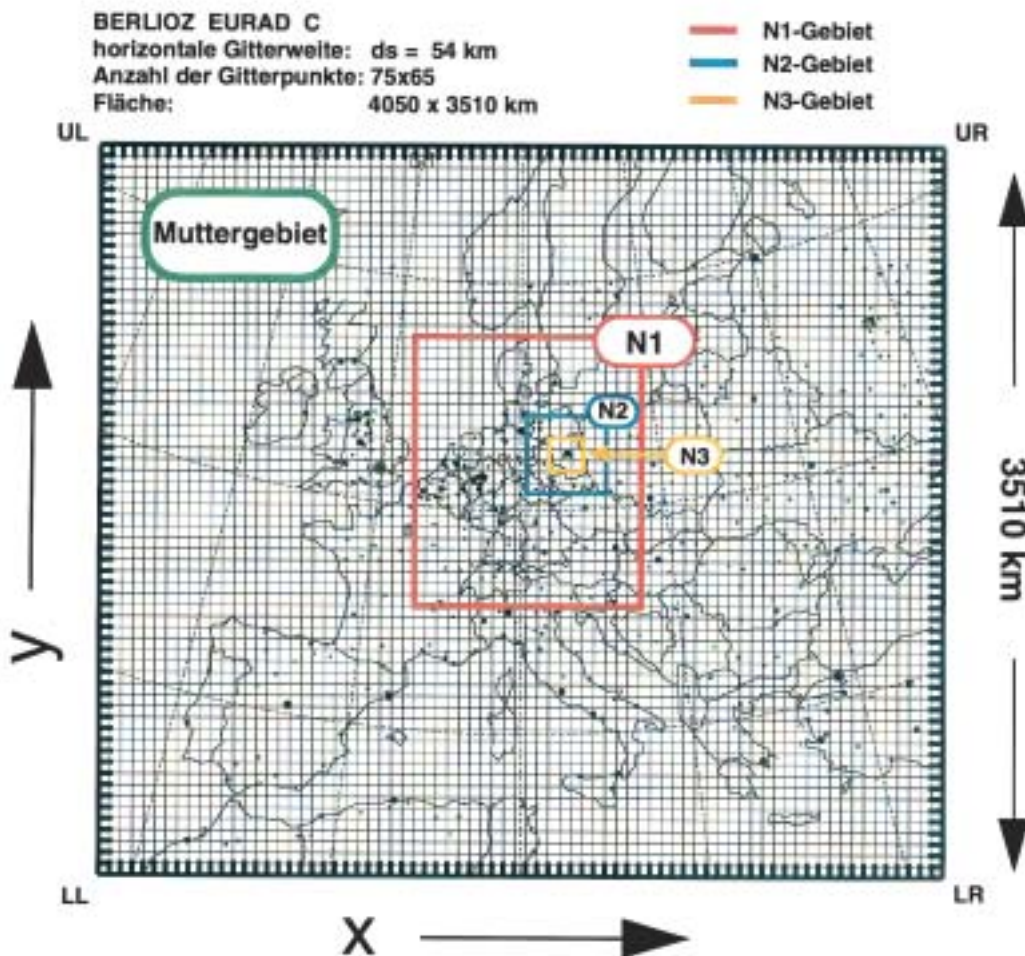


Abb. 10-1:

Anordnung der Modellgebiete (Muttergebiet mit den Nestgebieten N1 bis N3) für die Nestung-Anwendung für den Juli 1994.

heimer et al. 1997) wird im folgenden die interne Ein-Wege-Nestung dargestellt.

2.1 Simulation der Ozonepisode vom Juli 1994

Die Nestung wurde im EURAD-Modell bereits mehrfach angewendet, wie z.B. in Jakobs et al. 1995. Die nachfolgend betrachtete Anwendung des EURAD-Modells ist die numerische Simulation einer sommerlichen Ozonepisode im Juli 1994 (Memmesheimer et al. 1999). Die Nestung-Konfiguration ist in Abb. 10-1 veranschaulicht. In dem hier dargestellten Beispiel einer Ein-Wege-Nestung wird mit der numerischen Simulation für das Muttergebiet begonnen. Daran schließt sich sequentiell die Rechnung mit den Nestgebieten N1, N2 und N3 an. In diesem Fall wurde mit drei Nest-Ebenen gerechnet, die von der europäischen Skala bis in die urban geprägte Skala der Stadt Berlin reichen. Die horizontalen Maschenweiten betragen 54 km für die europäische Skala, 18 km für Nest 1, 6 km für

Nest 2 und 2 km für Nest 3. Das Modell erstreckt sich vom Boden bis zu 100 hPa (Sigma-Koordinaten) und umfaßt bei dieser Anwendung 15 Schichten in der Vertikalen, davon etwa 8 Schichten unterhalb von 3000 m (Grenzschicht). Die Dicke der untersten Schicht beträgt etwa 70 m. Die Eingabedaten (Emissionen, Landnutzung, Topographie), die für alle Nest-Ebenen vorliegen müssen, wurden vom IER, Universität Stuttgart und vom IfU, Garmisch-Partenkirchen bereitgestellt. Die benötigten meteorologischen Datenfelder wurden mit dem MM5 (Mesoscale meteorological Model, Version 5; PennState/NCAR) erzeugt.

Die Randwerte für die Simulation im genesteten Gebiet werden jeweils aus den Ergebnissen der übergeordneten Simulation bestimmt. Dadurch, daß es sich immer um das gleiche Modell handelt, ergeben sich keine Probleme durch unterschiedliche Parametrisierungen. Es ist lediglich erforderlich, an den Rändern eine Interpolation auf die zusätzlichen Gitterpunkte durchzuführen. Dabei wird die unterschiedliche Höhe des Geländes berücksichtigt.

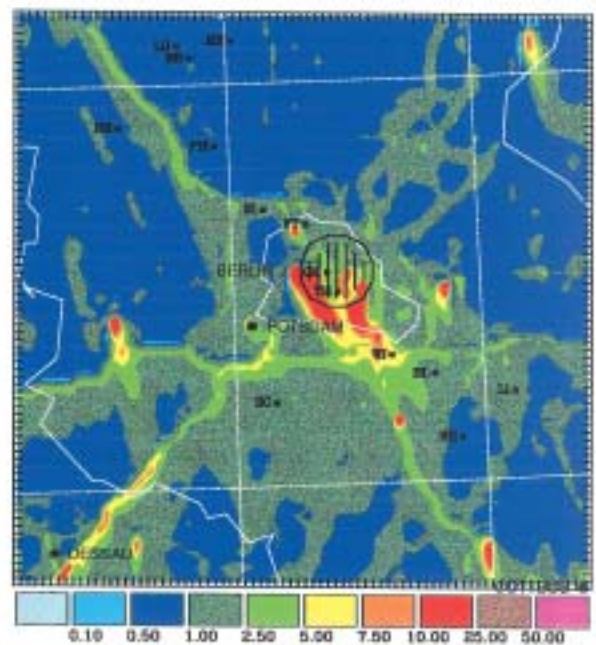
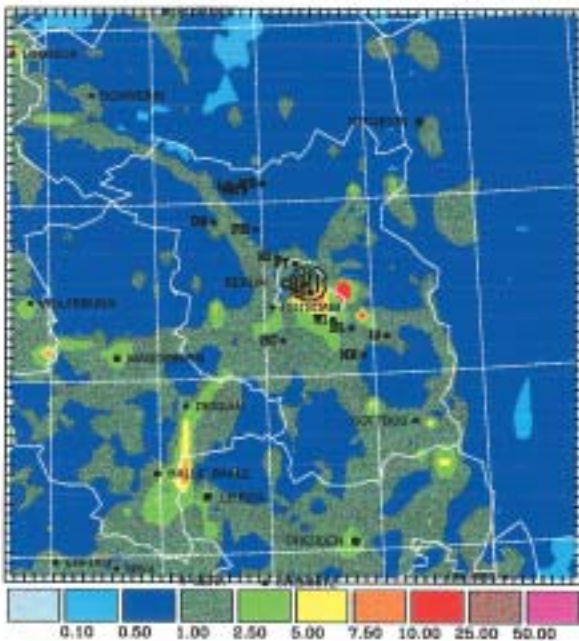
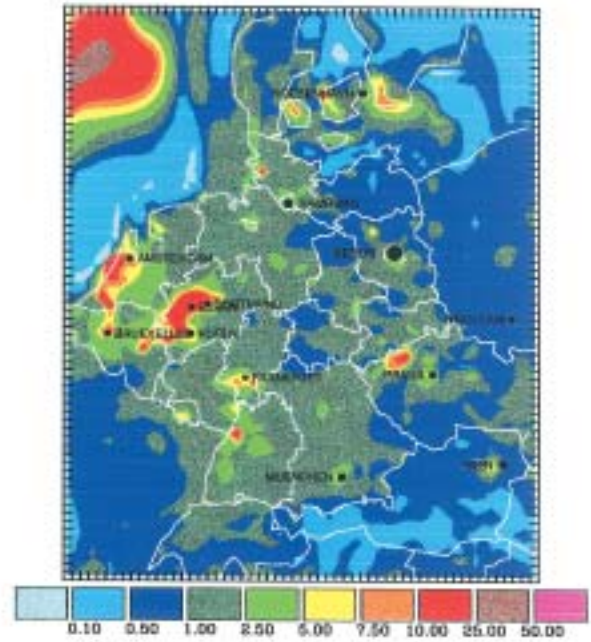
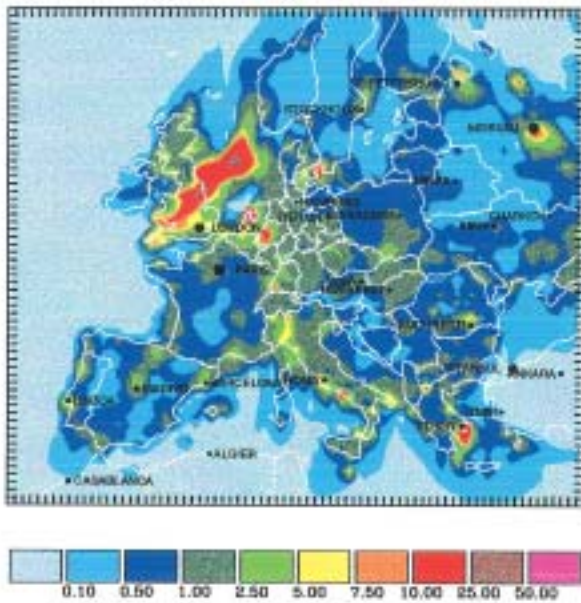


Abb. 10-2: Berechnete NO_x -Konzentration in ppbv am 27. Juli 1994, 14 UTC

2.2 Ergebnisse für den 27. 7. 1994

Die Ergebnisse einer Rechnung mit Nestung sind in den Abbildungen 10-2, 10-3 und 10-4 beispielhaft für den 27. Juli 1994 dargestellt. Abb. 10-2 zeigt die NO_x -Konzentration am 27. Juli 1994 um 14 UTC für die unterste Modellschicht. Man erhält sowohl einen Eindruck von der NO_x -Konzentration in Europa, wie auch – räumlich hochaufgelöst – im Berliner Raum. Der Einfluß und die Notwendigkeit der Nestung zeigen sich besonders augenfällig beim Übergang vom Muttergitter (Europa, oben links) zum Nest 1 (Deutschland und

Zentraleuropa, oben rechts). Die aus den englischen Industriegebieten stammende NO_x -Fahne über der Nordsee wirkt sich über die Randwerte im Nest 1 aus und wird damit berücksichtigt, obwohl die verursachenden Quellregionen außerhalb des Nest 1-Gebietes liegen. Im Berliner Raum treten deutlich die Autobahnen und die Quellen im Stadtzentrum hervor.

Die Ozonkonzentrationen für den 27. Juli 1994 (06 UTC und 14 UTC) sind in den Abbildungen 10-3 und 10-4 sowohl für die unterste Schicht als auch für den Höhenbereich um 1500 m dargestellt. Die dargestellten

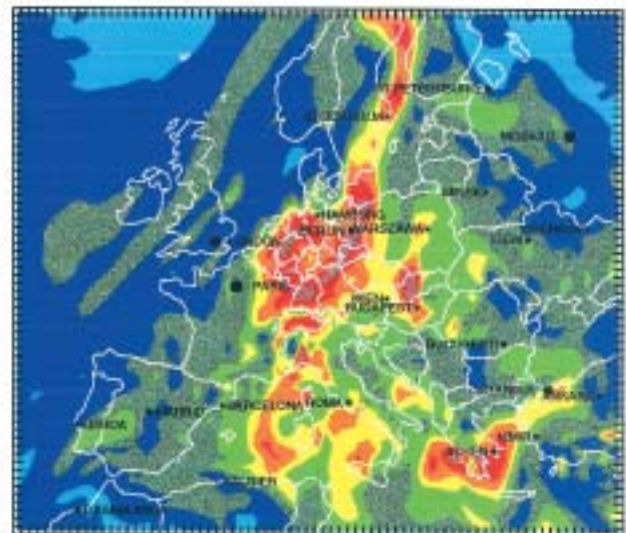
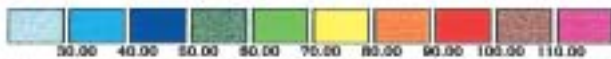
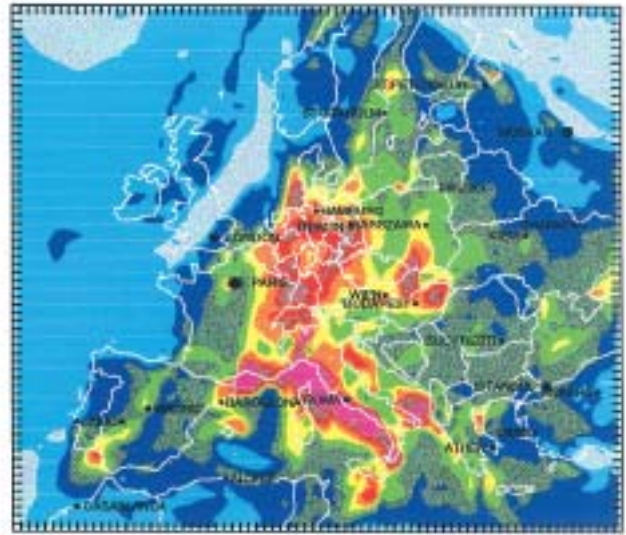


Abb. 10-3: Ozonkonzentration in ppbv über Europa am 27. Juli 1994, 06 UTC (linke Seite) und 14 UTC (rechte Seite), jeweils für die unterste Modellschicht (oben) und etwa 1500 m Höhe (unten).

Felder zeigen die Ozonkonzentrationen für das Muttergitter, das fast ganz Europa überdeckt (Abb. 10-3) und für das Nest 3 (Berliner Raum, Abb. 10-4).

Die Ozonkonzentration in den Morgenstunden in der bodennahen Modellschicht (oben links) ist durch relativ hohe Werte außerhalb der Emissionsregionen gekennzeichnet (Mittelmeerraum, Bergregionen), in höheren Schichten (etwa 1500 m; unten links) treten Ozonwerte von über 100 ppb auf. Es handelt sich um Ozon, das an den Vortagen innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht gebildet wurde und nachts in die

sen Höhen kaum abgebaut wird. Seine Verteilung wird dort durch atmosphärische Zirkulationssysteme stärker beeinflusst und in diesem Fall bis nach Schweden verfrachtet. Am Tage ist in Mitteleuropa sowohl bodennah wie in etwa 1500 m Höhe ein deutlicher Anstieg der Konzentrationen zu erkennen. Ozonproduktion findet im Bereich des über Mitteleuropa liegenden Hochs in der gesamten gut durchmischten Grenzschicht statt, da die Vorläufersubstanzen, die zur Ozonbildung benötigt werden, infolge der guten vertikalen Durchmischung in die gesamte Grenzschicht gelangen können. Die Bedeutung der Nestung zeigt sich beson-

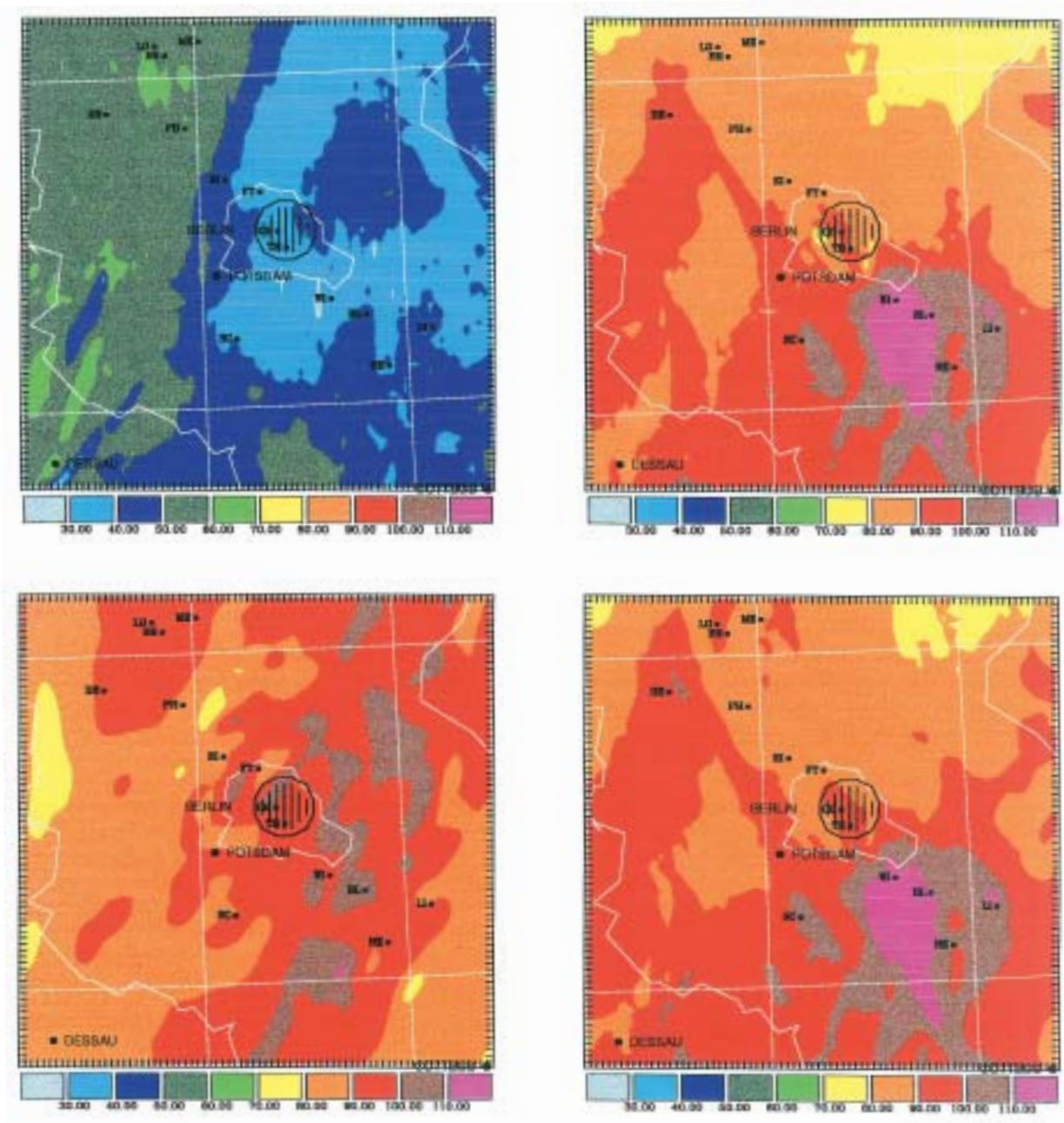


Abb. 10-4: Ozonkonzentration in ppbv über Berlin (Nest 3) am 27. Juli 1994, 06 UTC (linke Seite) und 14 UTC (rechte Seite), jeweils für die unterste Modellschicht (oben) und etwa 1500 m Höhe (unten).

ders in Abb. 10-4. Bereits am frühen Morgen werden im Berliner Raum in etwa 1500 m Höhe über 80 ppb Ozon modelliert, während in Bodennähe zwischen 30 und 50 ppb berechnet werden. Die hohen Werte in etwa 1500 m sind offenbar großräumigen Strukturen zuzuordnen. Sie sind Teil des Bandes mit hohen Ozonwerten, das sich von der Schweiz über Deutschland nach Schweden erstreckt und am Morgen des 27. Juli 1994 auch über Berlin liegt (siehe Abb. 10-3). Nachmittags bildet sich dann im Lee der Stadt eine Ozonfahne mit mehr als 110 ppb aus. Auch am Nachmittag liegen die Ozonkonzentrationen nicht nur in der Berliner Ozonfahne sondern im gesamten Bereich des Nest 3-Gebietes über 80 ppb. Auch zu diesem Zeitpunkt ist das N3-Gebiet noch in

großräumige Strukturen eingebettet, die nur durch Nestung-Verfahren in geeigneter Weise berücksichtigt werden können.

3 Die externe Nestung – am Beispiel des KAMM/DRAIS-Modells

Das interne Nestung-Verfahren ermöglicht die gleichzeitige Berechnung im großskaligen Gebiet und in einem Teilgebiet mit besserer Auflösung. Das externe Nestung-Verfahren erfolgt ebenfalls in einem Teilgebiet mit besserer Auflösung, allerdings erst nachdem die großskalige Simulation abgeschlossen ist. Dabei ist es

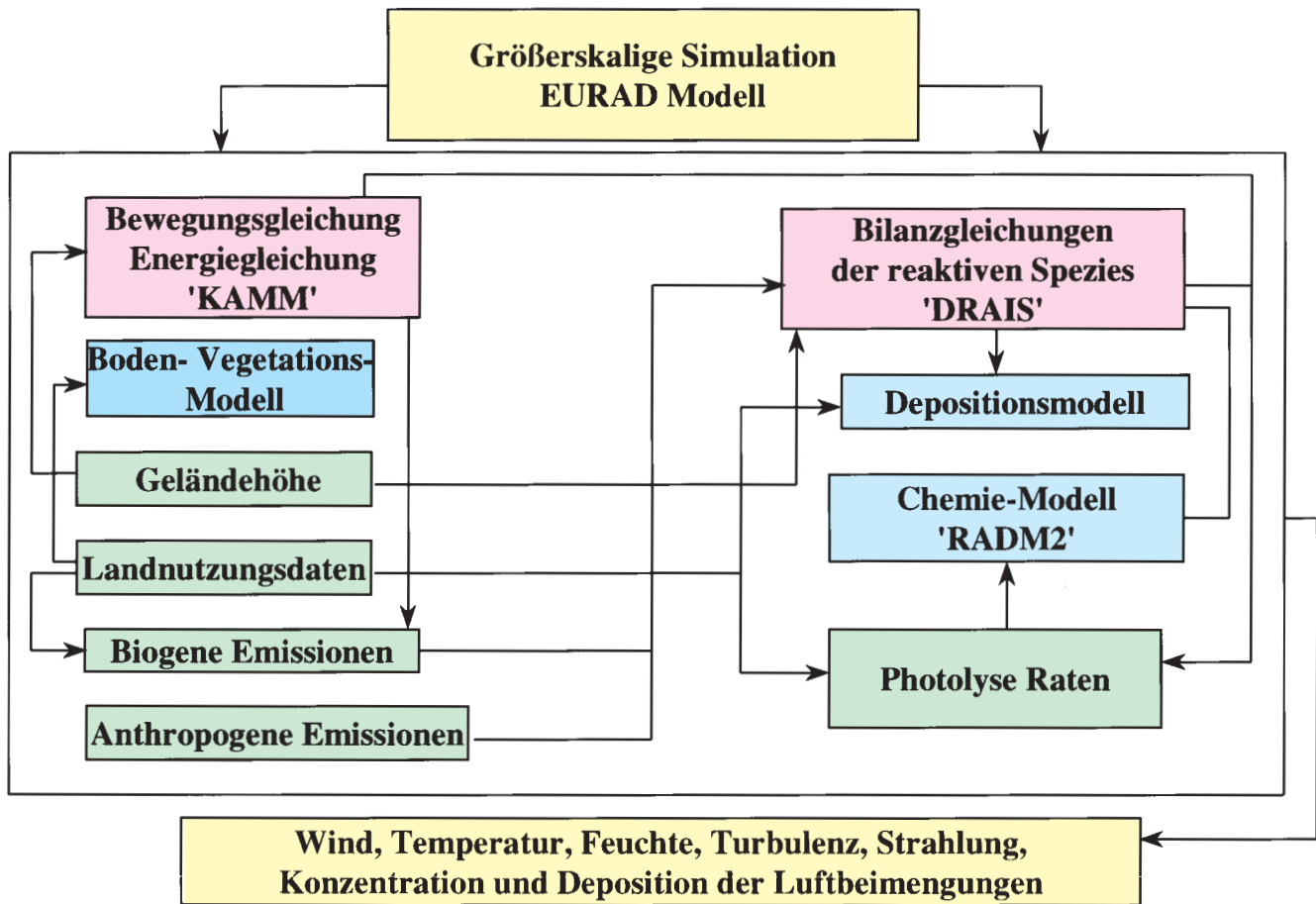


Abb. 10-5: Schematische Darstellung des Modellsystems KAMM/DRAIS

nicht erforderlich, daß es sich bei dem Modell, das für das Teilgebiet rechnet um das gleiche Modell wie für die große Skala handelt. Die Simulation für ein Teilgebiet kann sowohl an einer anderen Stelle als auch zu einem wesentlich späteren Zeitpunkt erfolgen. Die Ergebnisse des größerskaligen Modells werden zur Initialisierung und zur Bereitstellung der Randwerte für das kleinerkalige Modell verwendet. Dabei wird von den Ergebnissen des größerskaligen Modells nur der Ausschnitt benötigt, der das Teilgebiet umschließt. Eine solche Kopplung ist zwischen dem europaskaligen Modell EURAD und dem mesoskaligen Modellsystem KAMM/DRAIS (Nester et al. 1998) realisiert. Im folgenden wird als Beispiel einer externen Nestung diese Kopplung beschrieben. An Beispielergebnissen wird gezeigt, wie sich eine solche bessere Auflösung auf die Verteilung von Ozon in einem Teilgebiet auswirkt.

3.1 Die Anbindung des KAMM/DRAIS-Modellsystems an das EURAD-Modell

Das KAMM/DRAIS-Modellsystem besteht aus dem nicht-hydrostatischen, 3-dimensionalen, prognostischen Strömungsmodell KAMM (**K**arlsruher **A**tmosphärisches **M**esoskaliges **M**odell) und dem Schadstoffausbreitungsmodell DRAIS (**D**reidimensionales **A**us-

breitungs- und **I**mmissions-Simulationsmodell). Das KAMM-Modell simuliert die zeitliche Entwicklung der relevanten meteorologischen Größen in der Atmosphäre und im Boden in einem mesoskaligen Gebiet. Diese Ergebnisse werden benutzt, um mit dem DRAIS-Modell die Konzentrationen der Luftbeimengungen in der Atmosphäre und deren Deposition am Boden im gleichen Gebiet zu berechnen. KAMM und DRAIS sind gekoppelte Euler'sche Gittermodelle, die simultan ablaufen. Die horizontalen Gitterweiten liegen im allgemeinen zwischen 1 km und 5 km. Die vertikale Auflösung variiert zwischen 10 m und 20 m in Bodennähe und einigen 100 m am Modelloberrand, der meist in 5 km Höhe liegt. Eine schematische Darstellung ist in Abb. 10-5 gegeben. Das KAMM-Modell verwendet zur Berücksichtigung der größerskaligen Bedingungen einen Grundzustand, der die Größen geostrophischer Wind, potentielle Temperatur und Druck umfaßt. Dieser Grundzustand wird aus den entsprechenden großräumigen Feldern des EURAD-Modells mittels optimaler Interpolation für jede dritte Stunde bestimmt. Im Modell wird der Grundzustand auf die jeweilige Simulationszeit interpoliert. Hierzu wird eine Lagrange Interpolation verwendet. Durch die Anbindung des Modells KAMM an das EURAD-Modell über den Grundzustand sind größere Unterschiede zwischen der Gitterweite beider Modelle möglich. Bei

besonders starken zeitlichen Änderungen des großräumigen Windfeldes, hat sich gezeigt, daß die Anpassung des Windfeldes im kleinerskaligen Modell allein über die zeitliche Änderung des geostrophischen Windes nicht schnell genug erfolgt. Deshalb wird ein Nudgingverfahren verwendet. Bei diesem Verfahren wird durch Einführen eines Reibungsterms erreicht, daß das kleinerskalige horizontale Windfeld nicht zu stark vom gröberskaligen Windfeld (Nudgingfeld) abweicht. Die Nudgingfelder des horizontalen Windes werden ebenfalls aus den Windfeldern des EURAD-Modells bestimmt. Das KAMM-Modell benötigt außerdem noch Anfangs- und Randwerte für die potentielle Temperatur und die spezifische Feuchte, die ebenfalls aus den entsprechenden Ergebnissen des gröberskaligen Modells übernommen werden. Dies gilt auch für die Anfangsbedingungen der Bodenoberflächentemperatur, wobei die unterschiedliche Geländehöhe berücksichtigt wird.

Das DRAIS-Modell löst die Bilanzgleichungen für die Luftbeimengungen. Dabei werden auch die chemischen Reaktionen zwischen den betrachteten Spezies und deren Deposition berücksichtigt. Als Reaktionsmechanismus wird RADM2 (Stockwell et al. 1990) verwendet. Die Anfangs- und Randbedingungen für die Simulation der Luftbeimengungen werden den Ergebnissen des EURAD-Modells entnommen. Da beide Modelle mit demselben Chemiemechanismus rechnen, ist keine Transformation in andere Stoffgruppen erforderlich. Weitere wichtige Eingabedaten für das DRAIS-Modell sind die anthropogenen und biogenen Emissionen. Beide Modelle benötigen zudem noch Informationen über die Geländehöhe und die Landnutzung. Als Ergebnis liefert das KAMM-Modell die Verteilungen des Windes, der Temperatur und der Feuchte sowie der Diffusionskoeffizienten und der Mischungsschichthöhe. Das Modell DRAIS berechnet die Verteilungen der Konzentration und der Deposition der betrachteten Spezies.

3.2 Das Verfahren zur Nestung

Wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben, werden für die Simulationen in Teilgebieten in der Mesoskala Daten aus dem gröberskaligen Modell benötigt. Für das KAMM/DRAIS-Modellsystem wurde ein Verfahren entwickelt, das diese Daten aus den Ergebnissen des EURAD-Modells berechnet (Nester et al. 1995). Prinzipiell läßt sich diese Anbindung analog auch mit den Ergebnissen anderer Modelle durchführen. Dazu ist es lediglich notwendig, die Ergebnisse eines solchen Modells in die für die Anbindung an das EURAD-Modell festgelegte Datenstruktur überzuführen. Für die Berechnung dreidimensionaler Felder, wie z. B. das Anfangsfeld der spezifischen Feuchte, wird zunächst eine horizontale Interpolation der EURAD-Ergebnisse auf das horizontale KAMM/DRAIS-Gitter in den vertikalen Levels des EURAD-Modells vorgenommen.

Anschließend erfolgt die vertikale Interpolation auf die geländefolgenden vertikalen Levels des KAMM/DRAIS-Modells. Es wurden mehrere Interpolationsverfahren getestet. Nur bei linearer Interpolation ist immer gewährleistet, daß keine unrealistischen Maxima oder Minima auftreten. Da die Berechnung dieser Felder in Form eines Preprocessing automatisch erfolgen soll, wurde die lineare Interpolation gewählt. Ein besonderes Problem stellt die vertikale Interpolation in Bodennähe dar. Da die Höhe des Geländes in beiden Modellen unterschiedlich ist, muß in Bodennähe eine spezielle Anpassung vorgenommen werden. Dabei wurde bei den meisten Variablen davon ausgegangen, daß die Bodenwerte in beiden Modellen übereinstimmen. Dies gilt vor allem für solche Größen, bei denen sich Quellen am Boden befinden. Besonders schwierig ist diese Anpassung bei der Temperatur. Hier mußte eine wesentlich komplexere Anpassung entwickelt werden, welche gewährleistet, daß die Grenzschicht erhalten bleibt und die Höhenabhängigkeit der Temperatur berücksichtigt wird. Die Routinen, die die Interpolation der 3-D Felder durchführen, werden auch für die 2-D Randfelder verwendet. Die Randwerte werden für jede Stunde bereitgestellt und im Modell auf die Simulationszeit linear interpoliert.

Die Einbindung der Randwerte erfolgt über die Advektion. Am Einströmrand wird der Einströmfluß der advehierten Größe berechnet. Dabei wird zur Berechnung des Flusses der interpolierte Wert der Größe aus dem gröberskaligen Modell und die Geschwindigkeit aus dem kleinerskaligen Modell verwendet. Da im KAMM/DRAIS-Modellsystem ein Flußkorrekturverfahren zur Berechnung der Advektion benutzt wird, läßt sich eine solche Randbedingung einfach realisieren.

3.3 Vergleich der Ergebnisse des gröberskaligen und des kleinerskaligen Modells.

Die Unterschiede in den Ergebnissen zwischen dem gröberskaligen und dem kleinerskaligen Modell sind beispielhaft in Abb. 10-6 dargestellt. Es handelt sich um die Ozonkonzentrationsverteilung in Bodennähe um 5 UTC und um 12 UTC für den 27.7.94 um Berlin. Man erkennt, daß die Ozonverteilung in beiden Modellen eine ähnliche Struktur aufweist. Wie zu erwarten, treten in der Mesoskala zusätzliche Feinstrukturen auf. Um die Mittagszeit zeigen sich in der EURAD-Simulation zwei Ozonmaxima im Luv und im Lee von Berlin. In den DRAIS-Ergebnissen werden solche Maxima zwar auch gefunden, sie sind aber nicht so punktförmig ausgeprägt. In den Morgenstunden treten östlich und südlich von Berlin bei der mesoskaligen Simulation deutlich niedrigere Ozonkonzentrationen auf als bei der europaweiten Simulation. Aufgrund der feineren Auflösung sind vor allem die NO-Konzentrationen in Bodennähe deutlich höher als bei der gröberen Auflösung, was zu einem stärkeren Abbau der Ozonkonzentrationen führt. Der Vergleich an den Stationen Grunewald und Brandenburg/Havel am 26./27.7.94

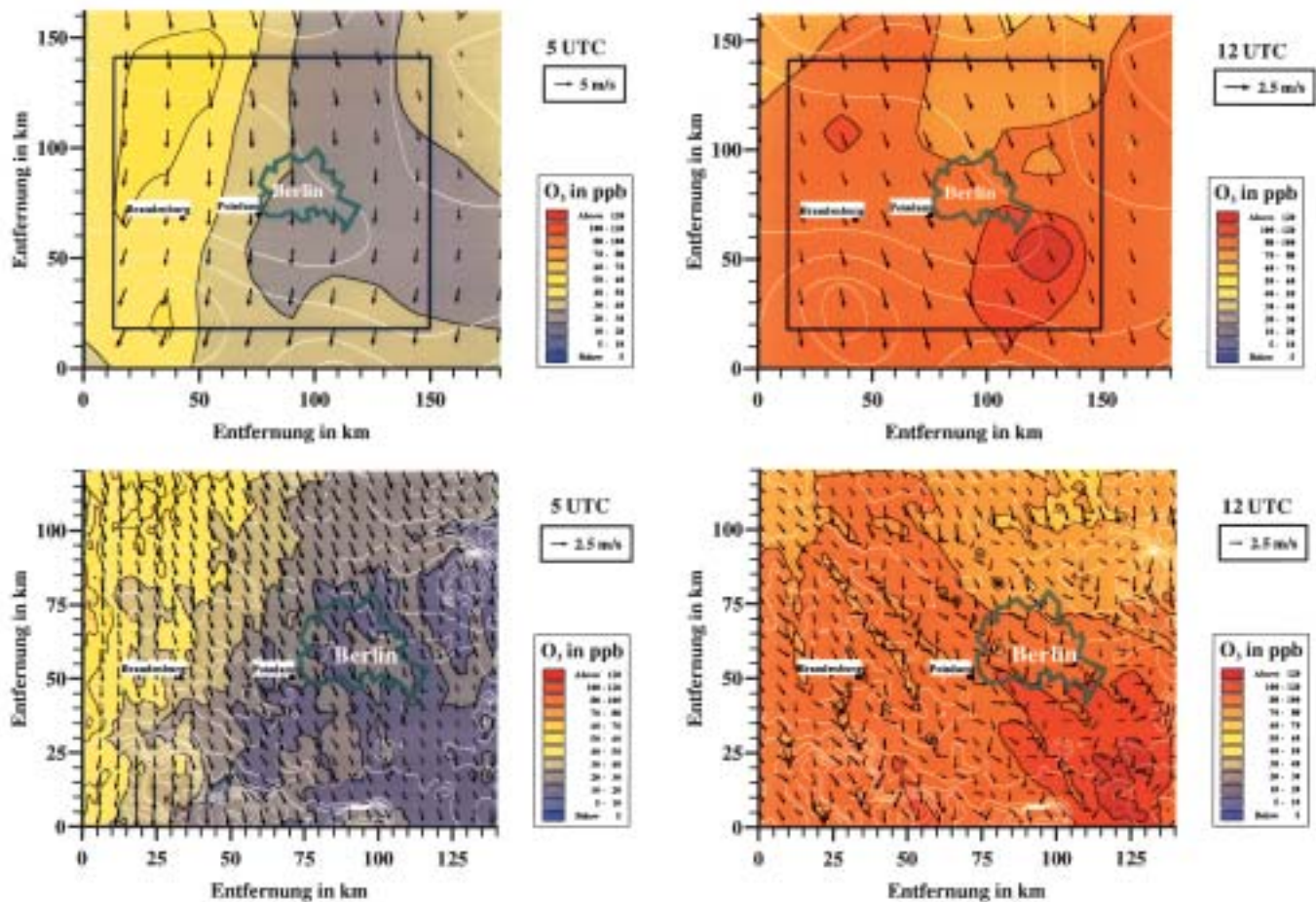


Abb. 10-6: Horizontale Ozon-Verteilungen der EURAD (oben)- und KAMM/DRAIS (unten)-Simulation am 27.07.1994.

(Abb.10-7) zeigt, daß die KAMM/DRAIS-Simulation nahezu die gleichen Ergebnisse liefert wie das EURAD-Modell.

Im Rahmen der Auswertung der FLUMOB Episode (26./27.7.1994 im Großraum Berlin) wurden die Ozonkonzentrationen an den Bodenstationen im kleiner-skaligen Modellgebiet mit den entsprechenden Simulationsergebnissen verglichen (Fiedler et al. 1999). Es wurden die Zeiträume (11-16) UTC und (3-21) UTC betrachtet, wobei im ersten Zeitraum üblicherweise die höchsten Ozonkonzentrationen auftreten. Um die Mittagszeit (11 UTC bis 16 UTC) ist kein signifikanter Unterschied beim Vergleich der Simulationsergebnisse des EURAD und KAMM/DRAIS-Modells mit den Meßdaten zu erkennen. Sowohl die Steigung der Regressionsgerade als auch der Korrelationskoeffizient haben nahezu den gleichen Wert. Auch die Summenhäufigkeitsverteilung der Differenz zwischen den gemessenen und berechneten Ozonkonzentrationen ist nahezu identisch. In 50% der Fälle ist diese Differenz kleiner als 8 ppb, was etwa 10% des Mittelwerts der Ozonkonzentration entspricht. Zwar sind die lokalen Einflüsse in dieser Zeitperiode am geringsten, trotzdem sollte man erwarten, daß durch die bessere Auflösung (2 km statt 18 km) die räumliche Feinstruktur der Ozonverteilung besser wiedergegeben wird.

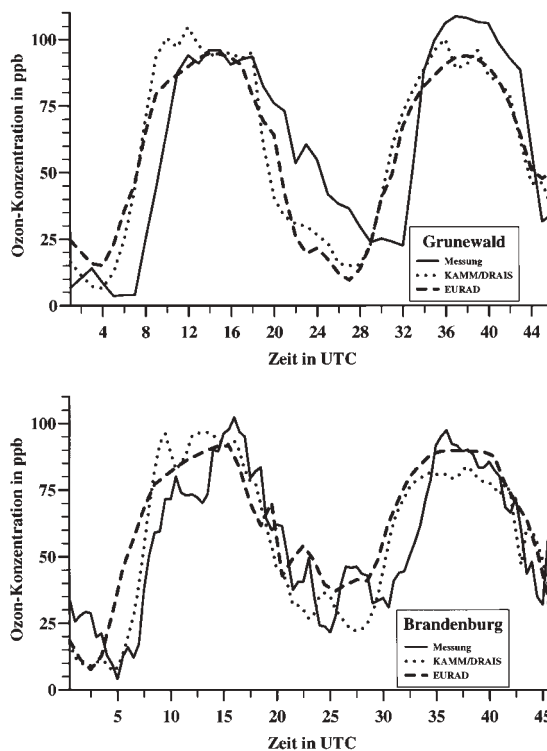


Abb. 10-7: Tagesgänge der O₃-Konzentration an den Stationen Berlin-Grunewald und Brandenburg/Havel vom 26./27.7.94

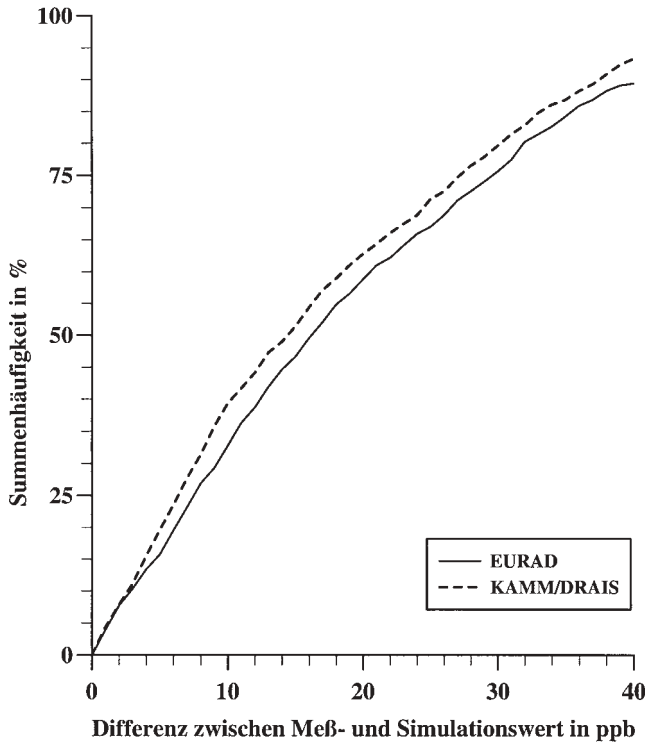


Abb. 10-8: Summenhäufigkeit der Ozonkonzentrationsdifferenz für den Zeitraum 3 bis 21 UTC

Vergleicht man die Ergebnisse beider Modelle mit den Messungen für den Zeitraum von 3 UTC bis 21 UTC, findet man, daß das KAMM/DRAIS-Modell eine etwas bessere Übereinstimmung mit den Meßdaten liefert als das EURAD-Modell. Der Unterschied in der Summenhäufigkeitsverteilung beträgt beim 50% Wert allerdings nur 2 ppb (Abb.: 10-8).

4 Simulationen ohne Einbettung in ein größerskaliges Modell.

Nicht für alle Simulationen ist es möglich, das regionale Modell in ein größerskaliges Modell einzubetten. Dies liegt zum einen darin begründet, daß für bestimmte Simulationen für die übergeordnete Skala keine Emissionsdaten bzw. Emissionsdaten unterschiedlicher Qualität zur Verfügung stehen. Zum anderen sind auch prinzipielle Untersuchungen denkbar, bei denen die Notwendigkeit der richtigen Beschreibung des großräumigen Zustandes im Sinne der Vergleichbarkeit mit Messungen nicht besteht. In diesem Zusammenhang sind Prozeßstudien bzw. Sensitivitätsuntersuchungen zu nennen. Möchte man also numerische Simulationen in der regionalen Skala ohne Einbeziehung von Modellergebnissen aus der übergeordneten Skala durchführen, so müssen die Randbedingungen für die einzelnen Substanzen, die an der Ozonbildung beteiligt sind, in zu den Modellgleichungen konsistenter Form vorgegeben werden. Wie dies geschehen kann, soll im folgenden dargelegt werden.

Die Ausströmränder des Modellgebietes sind hierbei unproblematisch. Schwieriger gestaltet sich die Behandlung des Einströmrandes. Wir betrachten dies am Beispiel eines Einströmrandes an der Stelle $x=0$. Die Modellgleichung lautet an diesem Rand, wenn man horizontal homogene Verhältnisse in x -Richtung voraussetzt und lediglich Quellen am Erdboden zuläßt:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -v \frac{\partial c_i}{\partial y} - w \frac{\partial c_i}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{c,h} \frac{\partial c_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{c,v} \frac{\partial c_i}{\partial z} \right) + P_i + L_i + Q_i (x = 0, y, z = 0, t)$$

c_i ist die Konzentration des Stoffes i , v und w sind die Windkomponenten in y - bzw. z -Richtung, $K_{c,h}$ und $K_{c,v}$ sind der horizontale bzw. vertikale turbulente Diffusionskoeffizient, P_i und L_i beschreiben die chemische Produktion und den Verlust der Substanz i und Q_i die zeitliche Änderung auf Grund von Quellen.

Die einfachste Form der Vorgabe von Randwerten wäre die Vorgabe zeitlich konstanter Werte, was natürlich wegen der zeitlichen Variation der meteorologischen Variablen von vornherein zum Scheitern verurteilt ist. Die nächste Möglichkeit bestünde darin, Startwerte für die einzelnen Stoffe vorzugeben und diese dann entsprechend den Modellgleichungen der zeitlichen und räumlichen Variation durch physikalische und luftchemische Vorgänge zu unterwerfen. Auch dies führt bei fehlenden Emissionen auf dem Rand zu unrealistischen Ergebnissen, da z.B. nach wenigen Stunden das vorgegebene Stickoxid chemisch abgebaut und in der Folge über den Einströmrand NO freie Luft in das Gebiet transportiert wird. Gibt man Startwerte und Emissionen am Einströmrand vor, so stellen sich am ehesten realitätsnahe Bedingungen ein. Dennoch ist bei der Vorgabe der Emissionen Vorsicht geboten. Befindet sich zum Beispiel am Einströmrand eine starke Einzelquelle (z.B. ein Straßenabschnitt) so simuliert das Modell wegen der Voraussetzung horizontaler Homogenität am Einströmrand eine Linienquelle und damit unrealistisch hohe Konzentrationen in der näheren Umgebung des Einströmrandes. Vogel et al. (1995) haben daher folgendes Verfahren zur Behandlung der Emissionen auf den Rändern des Simulationsgebietes vorgeschlagen. Man mittelt zu jedem Zeitpunkt die Emissionen auf einem Streifen der Breite b parallel zu den einzelnen Einströmrändern. Typische Werte für b lagen bei den bisherigen Anwendungen von KAMM/DRAIS je nachdem mit welcher Maschenweite gerechnet wurde zwischen 5 und 20 km. Die mittleren Emissionen werden dann zu jedem Zeitschritt an jedem Gitterpunkt des jeweiligen Einströmrandes vorgegeben. Diese Randbedingung realisiert die Vorstellung, daß sich vor dem eigentlichen Simulationsgebiet ein unendlich ausgedehntes Gebiet mit einheitlichen Emissionen befindet. Diese einheitlichen Emissionen sollen den mittleren Verhältnissen des betrachteten Simulationsgebietes entsprechen.

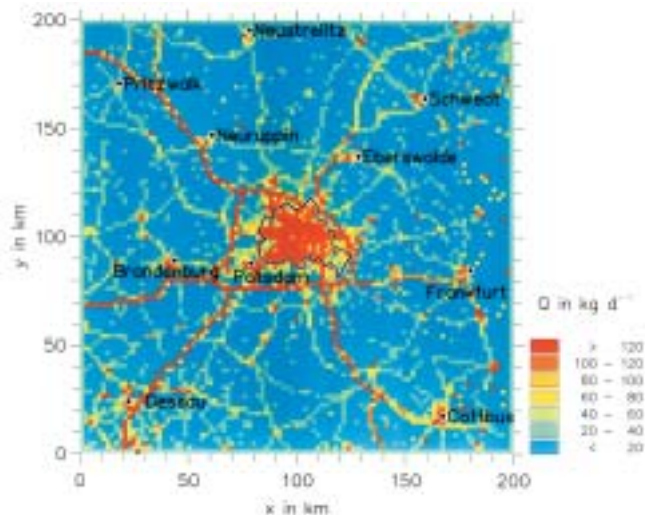


Abb. 10-9: Horizontalverteilung der Tagessumme der NO_x -Emissionen für den 20.7.1998, $b=20$ km

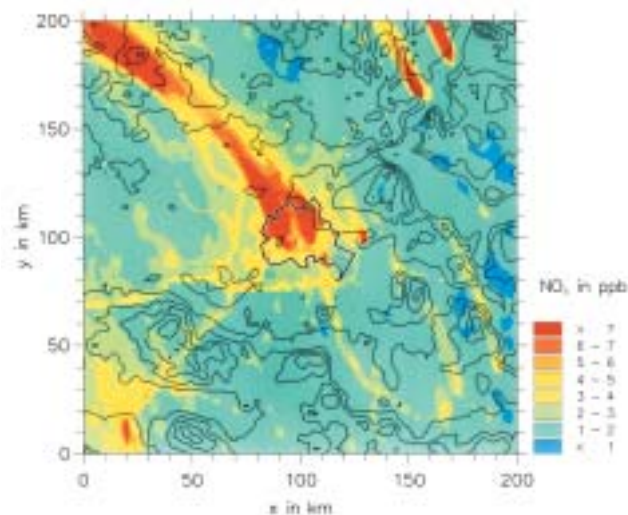


Abb. 10-10: Simulierte Horizontalverteilung der NO_x -Konzentration in 16 m über Grund für den 20.7.1998, 12 UTC

Die Abb. 10-9 zeigt die räumliche Verteilung der Tagessumme der NO_x -Emissionen vom 20.07.1998, wie sie in die Simulationen der BERLIOZ Kampagne mit KAMM/DRAIS unter Verwendung der hier beschriebenen Randbedingung eingeflossen sind. Die Emissionen erfolgten auf einem Streifen der Breite $b = 20$ km parallel zu den einzelnen Einströmrändern. Deutlich heben sich die einheitlichen Streifen entlang der Ränder des Simulationsgebiets von den übrigen räumlich variierenden Emissionen ab. Unter Vorgabe dieser Emissionen führte Hammer (2001) Simulationen für den Zeitraum der ersten Intensivmeßphase von BERLIOZ durch. Die Abb. 10-10 zeigt die für den 12 Uhr Termin des 20.07.1998 berechnete Verteilung der NO_x -Konzentration. Man erkennt, daß sich am Einströmrand NO_x Konzentrationen einstellen, die in der Größenordnung liegen, wie man sie in weniger belasteten Gebieten antrifft. Es steht somit ein Verfahren zur Verfügung, welches es erlaubt, die Randbedingungen für die Konzentrationen der luftchemischen Variablen in modellkonsistenter Form zu bestimmen.

4.1 Vor- und Nachteile der Methode

Wie bereits am Anfang erwähnt, eignet sich das hier beschriebene Verfahren zur Behandlung der Einströmränder in den Fällen, in denen keine Einbettung des regionalen Modells in ein großskaliges Modell möglich oder dieses nicht notwendig ist. Letzteres gilt zum Beispiel im Falle von Prinzipstudien, bei denen die detaillierte Kenntnis des Ferntransportes von untergeordneter Bedeutung ist. Strebt man die Simulation einer realen Sommersmogepisode an, wobei man eine möglichst optimale Übereinstimmung mit Beobachtungen erreichen möchte, so ist prinzipiell die Einbettung in ein großskaliges Modell vorzuziehen. Es sei denn, die Ergebnisse des großskaligen Modells weisen bereits größere Abweichungen zu den Beobachtungen auf.

Diese Abweichungen würden dann über die Randbedingungen dem regionalen Modell aufgeprägt. **Schlußfolgerungen**

Bei der Modellierung der Ozonkonzentration auf der regionalen Skala für reale Episoden ist die beste Methode die direkte Nestung innerhalb eines großskaligen Modells, wie dies z. B. im EURAD-Modell realisiert ist. Der Vorteil liegt darin, daß es sich um das gleiche Modell handelt und die Gitter zueinander passen, wodurch keine Übergangsprobleme auftreten. Der einzige gewisse Nachteil gegenüber der indirekten Nestung besteht darin, daß im allgemeinen bei der direkten Nestung keine Verfeinerung der vertikalen Maschenweite erfolgt. Die Ergebnisse des KAMM/DRAIS-Modells zeigen, daß auch mit einer indirekten Nestung gute Resultate erzielt werden können. Die Lösung, den Ferntransport durch Vorgabe der Emissionen auf dem Rand, zu realisieren, ist nur dann zu empfehlen, wenn eine großskalige Simulation nicht zur Verfügung steht oder deren Ergebnisse nicht realistisch genug erscheinen.

Bei allen Nestung Verfahren können die mittleren Ozonkonzentrationen und deren Tagesgang in mesoskaligen Gebieten durch die keinerskaligen Simulationen realistisch wiedergegeben werden. Vor allem in den Mittagsstunden, in denen die höchsten Ozonkonzentrationen auftreten, unterscheiden sich die Ergebnisse des großskaligen Modells nur wenig von denen des keinerskaligen Modells. Dies hat damit zu tun, daß trotz der besseren Auflösung die beobachteten räumlichen Variationen von den keinerskaligen Simulationen nur unzureichend wiedergegeben werden. Dieses Ergebnis läßt vermuten, daß es noch Defizite in den Modellparametrisierungen oder in den Modelleingabedaten gibt. Dies gilt insbesondere für die anthropogenen und biogenen Emissionen, die mit abnehmender Gitterweite ungenauer werden. Zur Klärung dieser

Fragen sind weitere Untersuchungen notwendig. Bezieht man in den Vergleich die Nachtstunden mit ein, liefern die Ergebnisse der kleinerskaligen Simulation – auch statistisch gesehen – eine etwas bessere Übereinstimmung mit den gemessenen Ozonkonzentrationen als die der größerskaligen Simulation.

Literatur

- FIEDLER F., K. NESTER, W. WILMS-GRABE, T. ZHAO, 1999: Evaluation of the model system KAMM/DRAIS, Proceedings of the 3rd GLOREAM Workshop, Ischia September 22-24, 69-81.
- HAMMER, M.-U., 2001: Photochemische Indikatoren zur Charakterisierung der Photooxidantienbildung bei Hochdruckwetterlagen. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 134 S.
- HASS, H., H.J. JAKOBS, M. MEMMESHEIMER, 1995: Analysis of a regional model (EURAD) near surface gas concentration predictions using observations from networks, *Met. Atmos. Phys.*, 57, 173-200.
- JAKOBS H.J., H. FELDMANN, H. HASS, M. MEMMESHEIMER, 1995: The use of nested models for air pollution studies: an application of the EURAD model to a SANA episode, *J. Appl. Met.*, 34, 1301-1319.
- MEMMESHEIMER M., M. ROEMER, A. EBEL, 1997: Budget calculations for ozone and its precursors: seasonal and episodic features based on model simulations, *J. Atmos. Chem.*, 28, 283-317.
- MEMMESHEIMER M., H.J. JAKOBS, J. TIPPKE, A. EBEL, G. PIEKORZ, M. WEBER, H. GEISS, B. JANSEN, B. WICKERT, R. FRIEDRICH, U. SCHWARZ, G. SMIA TEK, 1999: Simulation of a Summer Episode in July 1994 on the European and Urban Scale with Special Emphasis on the Photo-Oxidant Plume of BERLIN. In P.M. BORRELL and P. BORRELL (Hrsg.), *Proc. of EUROTRAC Symposium 98*, 2, 591-595, WIT-Press, Southampton.
- NESTER K, F. FIEDLER, H.J. PANITZ, 1998: Simulation of mesoscale air pollution with the model system KAMM/DRAIS, Proceedings of the 11th World Clean Air and Environment Congress, Durban, South Africa, Vol.4, Paper-No. 10D2.
- NESTER K, H.J. PANITZ, F. FIEDLER, 1995: Comparison of the DRAIS and EURAD model simulations of air pollution in a mesoscale area. *Meteorol. Phys.*, 57, 135-158.
- STOCKWELL W.R., P. MIDDELTON, J. S. CHANG, 1990: The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modelling. *J. Geoph. Res.*, 95, 16343-16367.
- VOGEL B., F. FIEDLER, H. VOGEL, 1995: Influence of topography and biogenic volatile organic compounds emission in the state of Baden-Württemberg on ozone concentrations during episodes of high air temperatures, *J. Geophys. Res.*, 100, 22907-22928.

11 Evaluierungsstrategien für Chemie-Transport-Modelle

1 Einführung

Seit mehr als zwanzig Jahren werden weltweit mesoskalige Modelle entwickelt und zur Simulation von regionalen Strömungsphänomenen sowie der damit verbundenen Ausbreitungsbedingungen angewendet. Diese sog. Chemie-Transport-Modelle (CTMs) beschreiben die in der Atmosphäre ablaufenden physikalischen Prozesse und chemischen Reaktionen. Ein wichtiger Anwendungsschwerpunkt der letzten Jahre ist dabei die Sommersmogproblematik mit episodenhaft auftretenden erhöhten Photooxidantienkonzentrationen. Hierüber wird in den beiden Promet-Heften Photosmog I und II ausführlich berichtet.

Einer der wichtigsten Aspekte jeder Modellentwicklung, nämlich die Evaluierung der Simulationsgüte, hat in der Vergangenheit zumindest in quantitativer Hinsicht weniger Aufmerksamkeit als erforderlich erfahren. Unter Evaluierung wird dabei die Überprüfung des Modells am Stand der wissenschaftlichen Forschung und die

Beurteilung der mit diesem Modell erzielten Ergebnisse an Hand von vorgegebenen Anforderungen, den sogenannten Qualitätszielen, verstanden. Die geringe Gewichtung der Modellevaluierung ist auf zwei Aspekte zurückzuführen, nämlich zum einen auf einen Mangel an geeigneten Datensätzen, die zum Vergleich mit Simulationsergebnissen herangezogen werden können, und zum anderen auf das Fehlen geeigneter Maßzahlen zur Bestimmung der absoluten und der relativen Genauigkeit nicht-linearer CTMs. Die Diskussion geeigneter Genauigkeitsmaße ist dabei fast so alt wie die Modellentwicklung selbst, siehe z.B. Willmott (1981). Auf für einen Vergleich geeignete Datensätze, die in den letzten zehn Jahren während vergleichsweise komplexer Experimente in der bodennahen Atmosphäre gewonnen worden sind, wird später noch ausführlicher eingegangen. Zunächst wird die Evaluierungsmethode beschrieben. Die Betrachtungen sind dabei auf Gittermodelle (Euler'sche Modelle) beschränkt, d.h. insbesondere, daß die Leistungsfähigkeit empirischer/statistischer oder Lagrange'scher Modelle hier nicht untersucht wird.

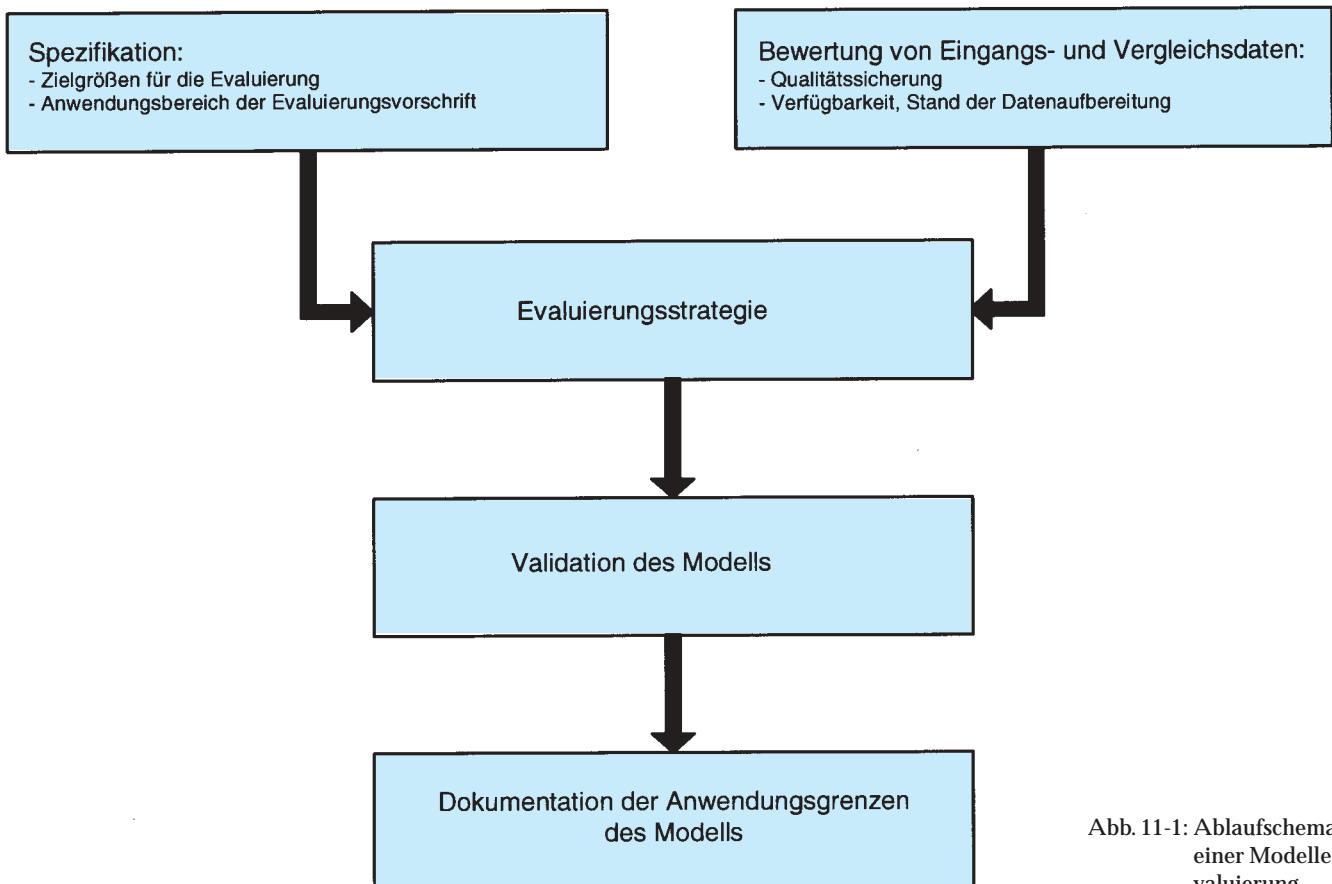


Abb. 11-1: Ablaufschema einer Modellevaluierung

2 Evaluierungsstrategien

Mesoskalige Euler'sche Modelle enthalten auch heute noch eine Reihe von Ursachen für Ungenauigkeiten, wie z.B. eine

- unvollständige Beschreibung der beteiligten physikalischen Prozesse und/oder der chemischen Umsetzungen,
- eine unzureichende numerische Umsetzung der Grundgleichungen,
- Ungenauigkeiten in den benötigten Anfangs- und Randfeldern, vorwiegend bedingt durch deren lückenhafte Kenntnis.

Dies kann sich auf die Rechenergebnisse in unterschiedlicher Art und Weise auswirken. Daher ist es bei der Entwicklung einer Evaluierungsstrategie zunächst erforderlich, Zielgrößen zur Untersuchung der Simulationsgüte sowie den gewünschten räumlichen und zeitlichen Anwendungsbereich der Modellergebnisse festzulegen. Dies hat vor dem Hintergrund der verfügbaren Eingangs- und Vergleichsdaten zu geschehen, die aus verschiedenen Quellen – Meßdaten, Sensitivitätsuntersuchungen, Plausibilitätstests – stammen können. Im folgenden wird ausschließlich auf den Vergleich zwischen Modellrechnungen und gemessenen Daten eingegangen.

Das Schemabild in Abb. 11-1 zeigt den Ablauf einer Modellevaluierung. Qualitätsziele und Bewertung der Eingangs- und Vergleichsdaten bestimmen gemeinsam die Evaluierungsstrategie, wobei nach Dennis (1990) drei Strategien unterschiedlicher Komplexität denkbar sind:

Operationelle Evaluierung

Bei dieser am einfachsten durchführbaren Methode werden die Modellergebnisse für die Zielgrößen mit routinemäßig gewonnenen Daten verglichen. Die heute verfügbaren Datenbasen enthalten überwiegend bodennahe Werte, während Vertikalinformationen, vor allem bei Spurenstoffkonzentrationen, aus Radiosonden- und Satellitenmessungen seltener zur Verfügung stehen. Diese Evaluierungsmethode erlaubt die Bestimmung der Modellgüte sowohl für Episoden als auch für längere Zeiträume von einem Monat oder mehr. Es ist damit jedoch kein Urteil darüber möglich, warum ein Modell mit Beobachtungen übereinstimmt oder nicht.

Diagnostische Evaluierung

Wie bei der operationellen Evaluierung werden auch bei der diagnostischen Evaluierung die vereinbarten Zielgrößen mit experimentell gewonnenen Daten verglichen. Allerdings stammen die Meßwerte in der Regel nicht aus Routinemessungen, sondern aus einem bezüglich meteorologischer und luftchemischer Größen möglichst umfangreichen Datensatz, der unter Verwendung aktueller Meßmethoden in speziell zu diesem Zweck geplanten Experimenten ermittelt worden ist. Ein solch großer Meßaufwand läßt sich nur für kürzere Zeiträume (typischerweise einige Wochen) betreiben, so daß die diagnostische Evaluierung dann sinnvoll ein-

gesetzt wird, wenn die Simulation der räumlichen und zeitlichen Zielgrößenverteilung während bestimmter Episoden getestet werden soll. Eine wesentliche Schwierigkeit bei diesem Vergleich liegt in der notwendigen Übereinstimmung der jeweils berücksichtigten Raum- und Zeitskalen. So liefert z.B. ein Meßflugzeug in wenigen Sekunden, d.h. in einem räumlichen Abstand von wenigen hundert Metern, einen Satz aller gemessenen Parameter. Im Gegensatz dazu gelten die CTM-Werte für Volumina, die durch die Abstände des Euler'schen Modellgitters bestimmt und für jedes Modell verschieden sind. Die verwendete Modellphysik, der Modellzeitschritt und das gewählte Zeitintervall für die Mittelung definieren die im Modell berücksichtigten Zeitskalen.

Auch bei dieser Evaluierungsmethode ist kein vollständiges Urteil darüber möglich, warum ein Modell mit Beobachtungen übereinstimmt oder nicht. Durch die gegenüber Routinebeobachtungen erhöhte Zahl von Meßgrößen können jedoch Hinweise auf die Ursachen für Unterschiede zwischen Modellergebnissen und Messungen gewonnen werden.

Prozeß-orientierte Evaluierung

Im Rahmen dieser Evaluierungsstrategie werden Modellteile (Module) für Einzelprozesse, wie z.B. für den chemischen Reaktionsmechanismus, die Freisetzung von Schadstoffen aus Flächen- und Punktquellen, die Dynamik des Windfeldes, die trockene und feuchte Deposition, mit Hilfe von Daten aus gezielt zum jeweiligen Zweck durchgeführten Experimenten verglichen. Im Unterschied zur diagnostischen Evaluierung sind die für die prozeß-orientierte Evaluierung gemessenen Größen aber primär durch den zu untersuchenden Mechanismus bestimmt. Die Schwierigkeiten beim Vergleich von Simulationsergebnissen und Beobachtungswerten liegen in der Separierung der für den untersuchten Prozeß relevanten Raum- und Zeitskalen von den übrigen in der Atmosphäre ablaufenden Vorgängen.

Im folgenden werden je eine operationelle und eine diagnostische Evaluierungsstudie mit mehreren CTMs beschrieben, die im Leitthema 1 „Erstellung und Anwendung einer mesoskaligen Modellhierarchie zur Diagnose und Prognose der Schadstoffverteilung über Europa und Deutschland“ des BMBF-Förderschwerpunkts „Troposphärenforschung“ (1996–2000) durchgeführt worden sind.

3 Beispiel einer operationellen Evaluierung: Sommersmog, Juli 1994

Im Sommer 1974 sind zum ersten Mal Fahrverbote im Zusammenhang mit hohen Ozonkonzentrationen in Deutschland ausgesprochen worden. Das Bundesimmissionsschutzgesetz hatte eine zeitlich befristete, mittlerweile ausgelaufene, Ergänzung hinsichtlich verschiedener Warnschwellen bei der Ozonkonzentration erfahren, deren Eintreten ausschließlich durch gemes-



Abb. 11-2: Lage der insgesamt 15 Stationen des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen, deren Ozonmessungen als Datenbasis für die operationelle Evaluierung verschiedener mesoskaliger Chemie-Transport-Modelle verwendet worden sind.

sene Ozonwerte festgelegt worden war. In diesem Zusammenhang ist es interessant zu prüfen, inwieweit mesoskalige CTMs als Alternative zu den Messungen hätten herangezogen werden können.

Für eine solche Anwendung sind hohe Ansprüche an die Simulationsgüte der Modellrechnungen zu stellen. Folgerichtig sind die Qualitätsziele sehr ambitioniert angesetzt worden: Die Differenzen der gemessenen und modellierten Mittelwerte der Ozonkonzentration zwischen 11 UTC und 15 UTC bzw. zwischen 11 UTC und 17 UTC sowie des täglichen maximalen Halbstundenmittels sollten an jeder Station nicht mehr als $\pm 10\%$ betragen. Als Gütemaß dient dann der Prozentsatz (die Anzahl) an Stationen, an denen das Qualitätsziel erreicht wird. Es muß zur Klarstellung darauf verwiesen werden, daß ein Qualitätsziel von $\pm 10\%$ nicht vergleichbar ist mit der Luftreinhaltepraxis, wo es durchaus üblich ist, den Prozentsatz der Übereinstimmung am Faktor 2 zu orientieren, d.h. Übereinstimmung liegt dann vor, wenn der Modellwert zwischen 50 % und 200 % des Meßwertes liegt.

Als Vergleichsdatenbasis sind nach verschiedenen Kriterien geprüfte und hinsichtlich der Repräsentativität bewertete halbstündige Werte der Ozonkonzentration von 15 Stationen aus dem 33 Stationen umfassenden Meßnetz des Landesumweltamtes Nordrhein-Westfalen ausgewählt worden. Die räumliche Verteilung der Meßorte ist in Abb. 11-2 gezeigt. Man erkennt eine gewisse Häufung entlang der Rheinschiene und im Ruhr-

gebiet. Aber auch ländliche Stationen in der Eifel sowie im Egge- und im Rothaargebirge, die eine Abschätzung der Simulationsgüte hinsichtlich Transportrichtung und Ozonbildungsgeschwindigkeit erlauben, sind enthalten. Der Untersuchungszeitraum umfaßt mit dem 26. und dem 27. Juli 1994 zwei Tage aus einer Sommermogepisode mit hohen Ozonkonzentrationen am Tag. Andere Spurenstoffkonzentrationen (zusätzlich zum Ozon) und meteorologische Parameter haben nicht im gleichen Umfang vorgelegen und konnten deshalb nicht zum Vergleich herangezogen werden.

Die zeitliche Auflösung beträgt bei beiden Datenarten (Messung, Modellwert) jeweils eine halbe Stunde. Allerdings ist der Untersuchungszeitraum (zwei Tage) recht kurz, was eine reduzierte Ensemblegröße zur Folge hat. Die räumliche Zuordnung eines Meßwertes erfolgt für jedes Modell auf unterschiedliche Art und Weise, da bodennahe Messungen in drei bis fünf Metern Höhe an räumlich unterschiedlich repräsentativen Meßstellen mit den Volumenmittelwerten der jeweils untersten Modellschicht verglichen werden. Bei einer vertikalen Mächtigkeit der untersten Modellschicht von bis zu 70 m und horizontalen Gitterweiten von bis zu 54 km werden unterschiedliche Einflußgebiete betrachtet. Trotzdem macht der durchgeführte Vergleich Sinn, wenn man die Anwendungsfragestellung berücksichtigt, da auf absehbare Zeit keine Meßnetze, die den Erfordernissen eines mesoskaligen CTMs entsprechen und somit zum Vergleich besser geeignet wären, verfügbar sein werden.

Die Simulationen sind mit den Modellen

- EURAD (Universität zu Köln, siehe Hass (1991)),
 - REMO (Max-Planck-Institut für Meteorologie, siehe Jacob und Podzun (1997); Langmann und Bauer (2001)),
 - KAMM/DRAIS (Universität/Forschungszentrum Karlsruhe, siehe Adrian und Fiedler (1991); Nester et al. (1995)),
 - METRAS/MECTM (Universität Hamburg, siehe Schlünzen (1997), Müller et al. (2000))
- in verschiedenen Varianten durchgeführt worden.

Unterschiede zwischen den einzelnen Modellrechnungen können aus verschiedenen Gründen entstehen, nämlich vor allem durch

- die Art der numerischen Lösung der Grundgleichungen,
- die Parametrisierungen für die subskaligen Prozesse,
- die horizontale und vertikale Gittermaschenweite, die den Detailreichtum der Strömung mitbestimmt,
- die verwendeten Eingangsinformationen, vor allem bei den meteorologischen Daten, den Emissionen sowie der Orographie und der Landnutzung.

Um die Auswirkungen der verschiedenen Einflußfaktoren exemplarisch untersuchen zu können, sind einige Modelle in verschiedenen Varianten gerechnet worden, so z.B. EURAD, für das Rechenläufe mit zwei

Modellkonfigurationen (ohne und mit zusätzlichem Aerosolmodul) durchgeführt worden sind, die jeweils verschiedene horizontale Gitterweiten (54 und 18 km bzw. 27, 9 und 3 km) haben. Außerdem liegen für die EURAD-Variante ohne erweitertes Aerosolmodul Simulationen mit zwei unterschiedlichen Emissionskatastern (EMEP und IER Stuttgart) vor, siehe hierzu auch die Kapitel 3 und 4 im Heft Photosmog I. Die über alle Meßorte gemittelte Zeitreihe der Ozonkonzentration vom 26.07.1994, 0 UTC bis zum 27.07.1994, 24 UTC ist für jede Modellvariante einzeln im Vergleich zum Mittelwert aller Stationsmessungen (identisch in allen Teilbildern) jeweils in der linken Spalte der Abb. 11-3, 11-4 und 11-5 gezeigt. Dabei verbessert sich die räumliche Auflösung der Modelle sukzessive.

Das vorgenannte strenge Qualitätsziel ($\pm 10\%$) wird nur an etwa einem Drittel der 15 Stationen erreicht. Bei der Bewertung dieser Aussage ist unbedingt zu berücksichtigen, daß, wie oben schon am Beispiel der Luftreinhaltepraxis diskutiert, weniger strenge Anforderungen an die Abweichungen zwischen Messungen und Modellergebnissen den Grad an gefundener Übereinstimmung selbstverständlich verbessern. Setzt man das Qualitätsziel auf $\pm 20\%$ hoch, dann wird dieses weiter gefaßte Ziel an etwa der Hälfte aller Stationen erreicht. Im Rahmen dieses Kapitels macht es keinen Sinn, die Unterschiede zwischen Messungen und Modellrechnungen an Einzelstationen zu diskutieren.

Die in den oberen beiden Zeilen der Abb. 11-3 dargestellten Rechenläufe unterscheiden sich nur durch das verwendete Emissionskataster, d.h. in der Verteilung, der Quellstärke und den technischen Parametern der Emittenten, während sowohl das Strömungsmodell (MM5) als auch das chemische Reaktionsschema (CTM2) identisch sind. Die vermeintliche Erwartung, daß die Veränderung des Emissionskatasters einen großen Einfluß auf die Ozonkonzentration habe, bestätigt sich jedoch für den speziellen Untersuchungszeitraum und das Mittel über die insgesamt 15 Stationen in Nordrhein-Westfalen nicht. Dies könnte daran liegen, daß die Gesamtsumme der Emissionen der Quellgebiete, die an diesen beiden Tagen Nordrhein-Westfalen beeinflusste, in beiden Katastern annähernd gleich groß ist, so daß trotz eventuell unterschiedlicher Einzelquellencharakteristika (Anzahl, Quellstärke, technische Merkmale) die Gesamtmengen der Ozonvorläufersubstanzen nicht stark voneinander abweichen. Für dieses Argument spricht beispielsweise auch, daß die (zeitlichen) Mittelwerte der Ozonkonzentration über die gesamte 48 Stundenperiode mit 55,4 ppbv (EMEP-Emissionen) bzw. 52,4 ppbv (IER-Emissionen) nur wenig von einander abweichen und zudem der aus den Messungen gemittelte Wert (53,4 ppbv) gerade dazwischen liegt. Diese gute Übereinstimmung der Periodenmittelwerte darf jedoch über die vorhandenen systematischen Unterschiede nicht hinwegtäuschen, die darin bestehen, daß die modellierten Werte in den Nachtstunden stets größer, am Tag stets kleiner sind als

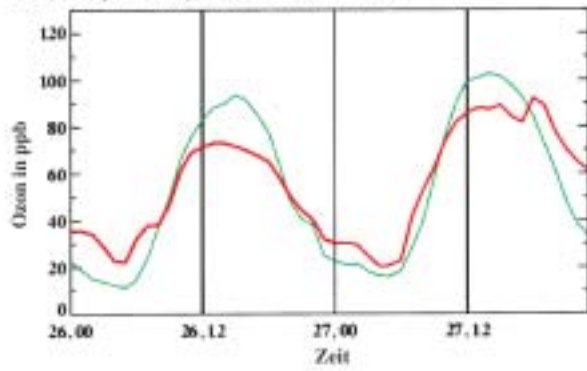
die Beobachtungen. Dies ist zudem im Hinblick auf die eingangs erwähnte Zielstellung – Untersuchung, ob Modelle geeignet sind, die täglichen Ozonmaxima an einer vorgegebenen Station zu diagnostizieren bzw. zukünftig auch vorherzusagen – besonders zu beachten.

Nun wird die vierte Zeile der Abb. 11-3, in der die Ergebnisse von EURAD-MADE dargestellt sind, in die Betrachtungen einbezogen. Anders als bei EURAD sind jetzt die mit dem Aerosol zusammenhängenden chemischen Prozesse detaillierter berücksichtigt. Außerdem ist die Dicke der bodennächsten Schicht auf die Hälfte herabgesetzt. Es zeigt sich, daß die Unterschätzung des täglichen Ozonmaximums verschwindet. Sowohl die nächtlichen Ozonminima als auch das Tagesmaximum am 26.07.1994 werden gut getroffen, das Tagesmaximum am 27.07.1994 sogar leicht überschätzt. Die um den Faktor 2 auf 27 km reduzierte Maschenweite leistet, wie aus dem Vergleich mit der vierten Zeile der Abb. 11-4 hervorgeht, einen weitaus geringeren Beitrag zur Anhebung des Ozonkonzentrationsmaximums. Der Vergleich der EURAD-MADE-Simulationen mit 27 und 9 km (jeweils letzte Zeile der Abb. 11-3 und 11-4) erbringt das überraschende Ergebnis, daß die verbesserte horizontale Auflösung, die u. a. eine detailliertere Verteilung der Landnutzung zur Folge hat, sowohl hinsichtlich der primär interessanten Tagesmaxima als auch bezüglich des zeitlichen Verlaufs zu einer Verschlechterung der Ergebnisse führen kann.

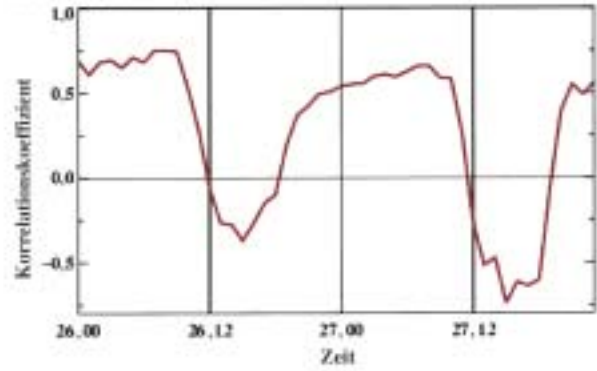
In der linken Spalte der dritten Zeile in den Abb. 11-3 und 11-4 werden die Ergebnisse für das regionale Klimamodell (REMO), an das in jedem Zeitschritt („online“) das chemische Reaktionsschema CTM2 von EURAD angekoppelt ist, vorgestellt. REMO benutzt geographische Koordinaten, wobei die in Abb. 11-3 gezeigte Auflösung von einem halben Grad etwa 43 km in Ost-West-Richtung und etwa 55 km in Nord-Süd-Richtung entspricht. Die in der dritten Zeile der Abb. 11-4 gezeigten Ergebnisse unterscheiden sich davon nur durch eine um den Faktor 3 reduzierte horizontale Maschenweite. Für die Halbgrad-Auflösung zeigt sich im Vergleich zu EURAD (zweite Zeile) in noch stärkerem Maß die Unterschätzung der Tagesmaxima in der Ozonkonzentration, obwohl das Emissionskataster (IER Stuttgart) und auch das chemische Reaktionsschema (CTM2) in beiden Modellen gleich sind. Dies führt zu der Hypothese, daß vor allem eine schlechtere Simulation der Strömungssituation, verbunden mit einer unterschiedlichen Advektion sowohl von Ozon als auch von dessen Vorläufersubstanzen, die Ursache für die stärkeren Abweichungen bei REMO ist.

Auch anhand der beiden REMO-Simulationen kann exemplarisch die Veränderung aufgrund einer verbesserten Auflösung diskutiert werden. Hier ist – erwartungsgemäß – eine merkliche Verbesserung bei kleinerer Gitterweite zu beobachten. Allerdings reicht diese Verbesserung nicht aus, um die beobachteten Ozontagesmaxima zu simulieren.

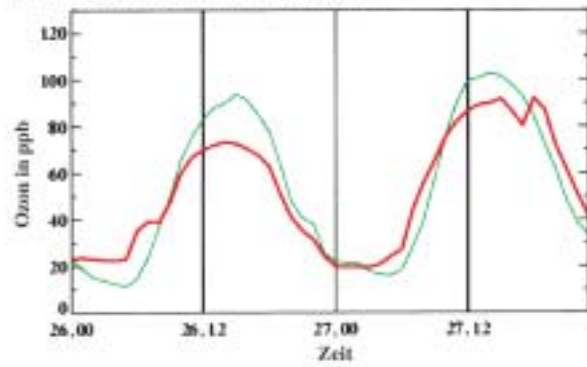
EURAD, 54 km, EMEP-Emissionen



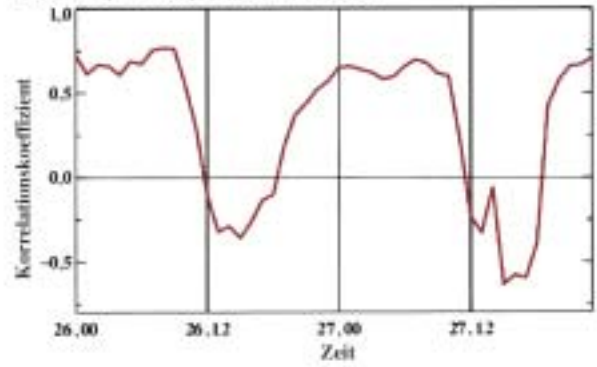
EURAD, 54 km, EMEP-Emissionen



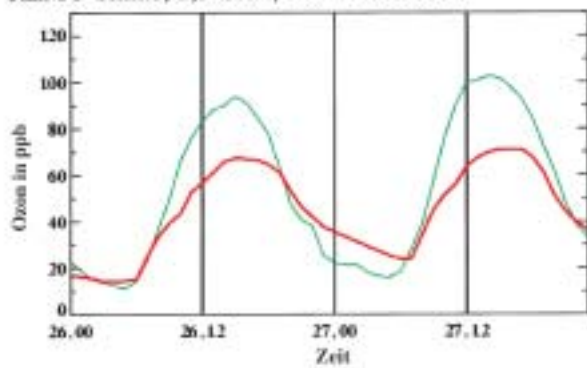
EURAD, 54 km, IER-Emissionen



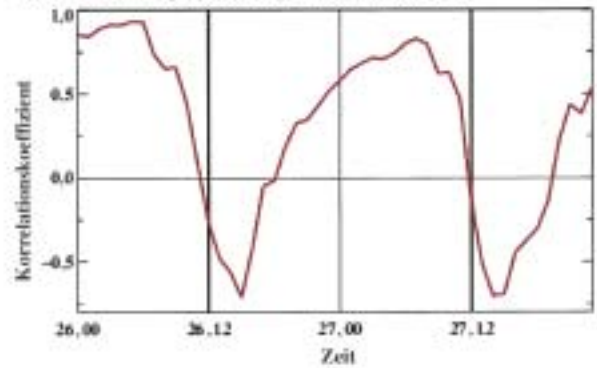
EURAD, 54 km, IER-Emissionen



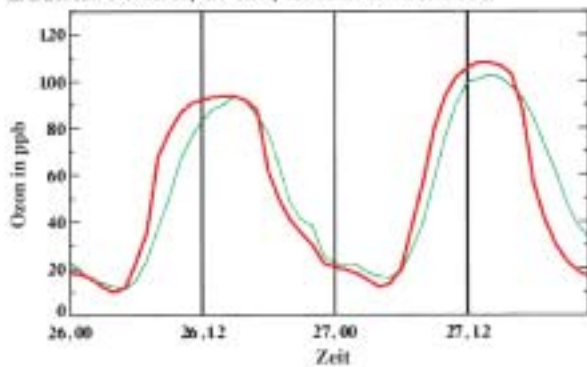
REMO-online, 0,5 Grad, IER-Emissionen



REMO-online, 0,5 Grad, IER-Emissionen



EURAD-MADE, 27 km, EMEP-Emissionen



EURAD-MADE, 27 km, EMEP-Emissionen

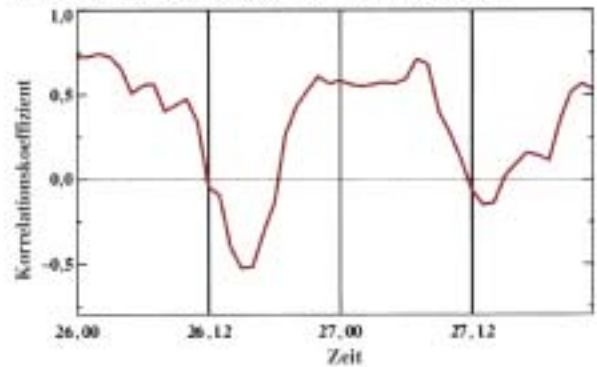


Abb. 11-3, linke Spalte: Vergleich von gemessenem und mit verschiedenen Chemie-Transport-Modellen simuliertem Ozon-Tagesgang für den 26./27.07.1994 (Abszissenbeschriftung: Tag.Uhrzeit in UTC). Die grüne Linie beschreibt den mittleren Tagesgang an den 15 in Abb. 11-2 gezeigten Stationen, die rote Linie den mittleren simulierten Tagesgang des jeweiligen Modells basierend auf den Werten derjenigen Gitterzellen, in denen die einzelnen Stationen liegen. Rechte Spalte: Korrelation zwischen gemessenen und simulierten Werten als Funktion der Uhrzeit (in UTC) für den gleichen Zeitraum und die gleichen Modelle wie in der linken Spalte.

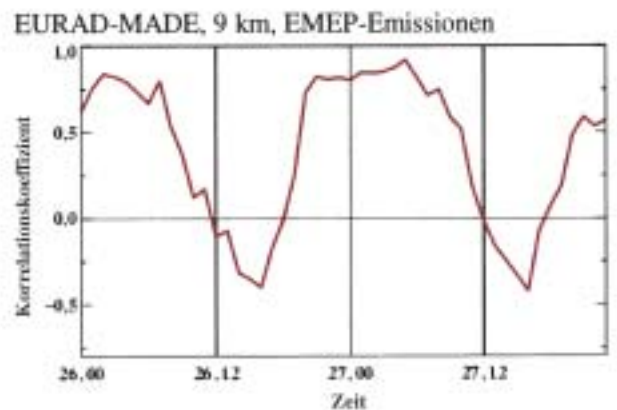
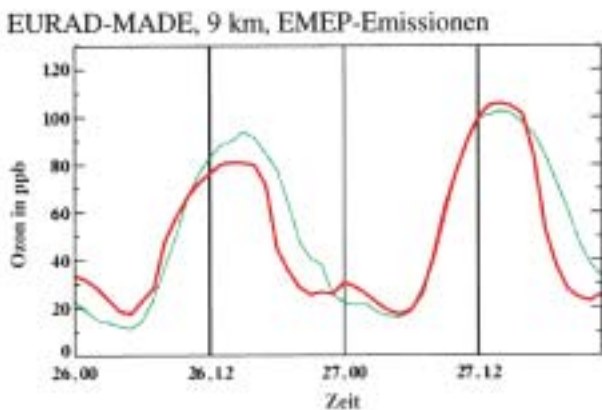
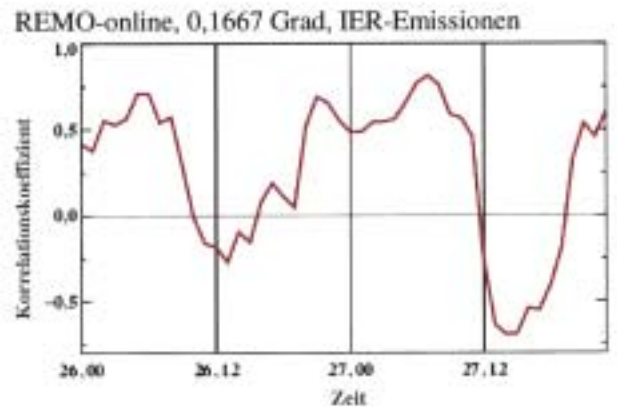
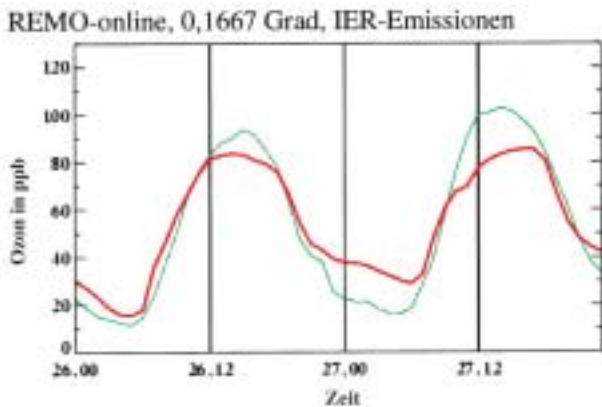
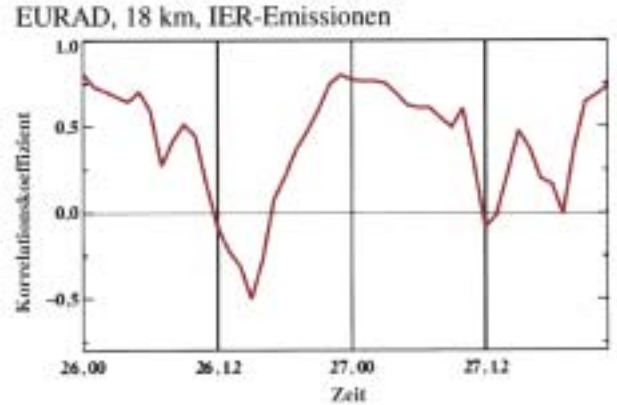
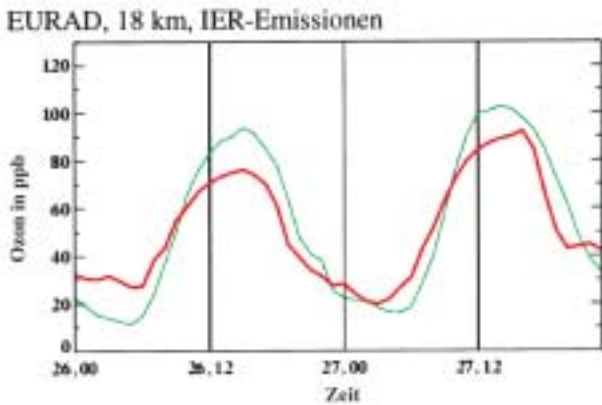
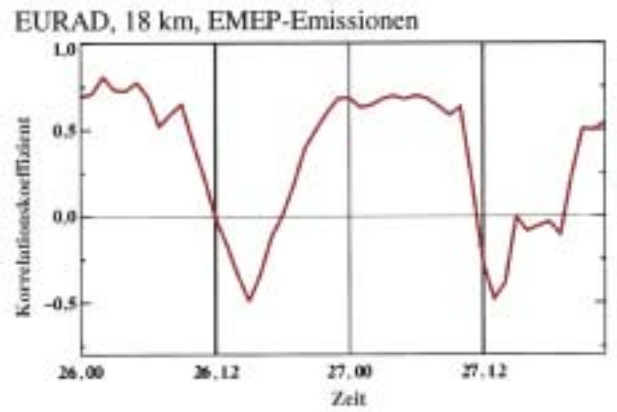
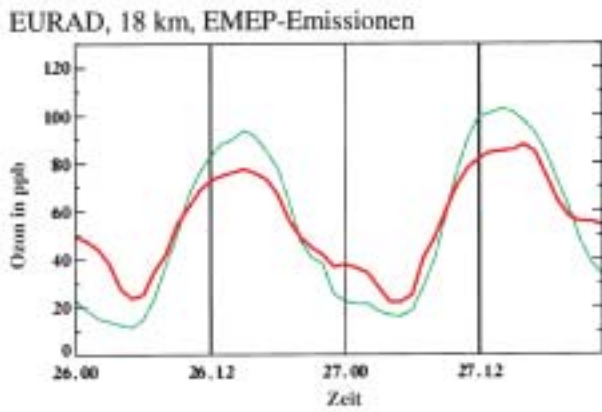
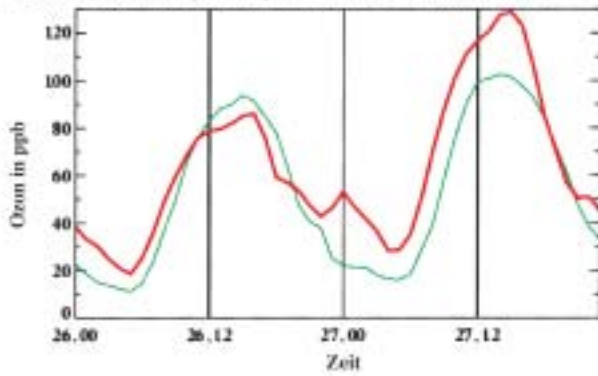
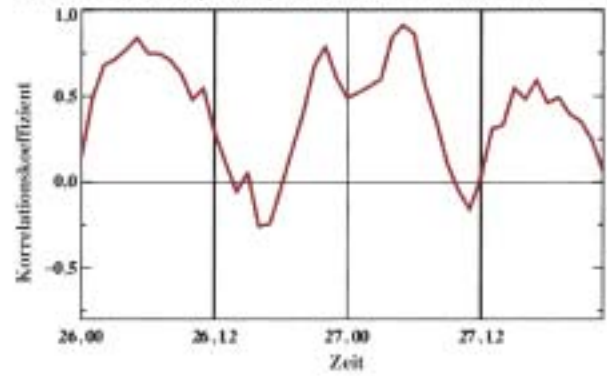


Abb. 11-4: wie Abb. 11-3, wobei die Simulationen mit den gleichen Modellen, aber mit einer um den Faktor 3 verbesserten räumlichen Auflösung durchgeführt wurden.

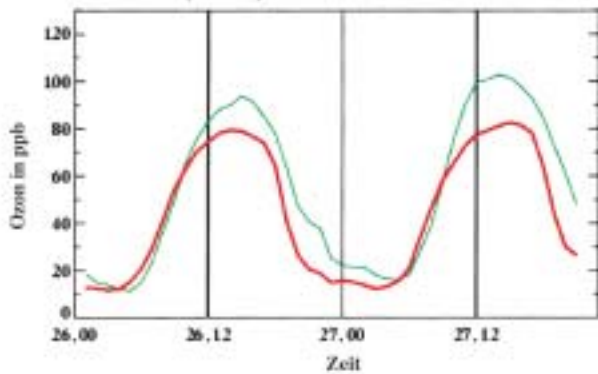
EURAD-MADE, 3 km, LUA/NRW-Emissionen



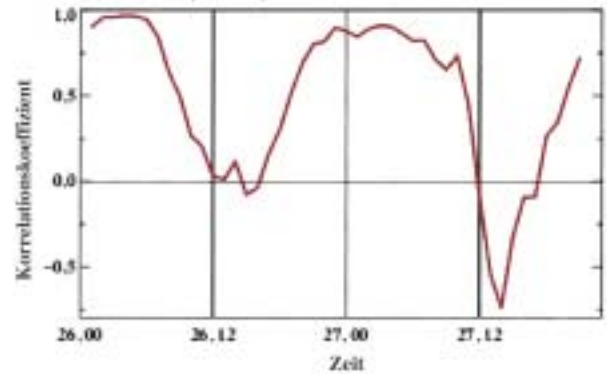
EURAD-MADE, 3 km, LUA/NRW-Emissionen



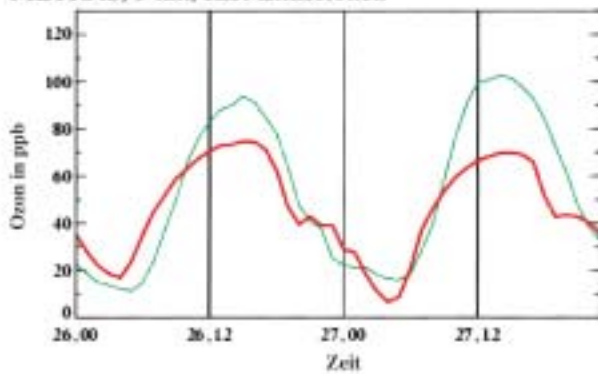
KAMM/DRAIS, 3 km, IER-Emissionen



KAMM/DRAIS, 3 km, IER-Emissionen



METRAS, 3 km, IER-Emissionen



METRAS, 3 km, IER-Emissionen

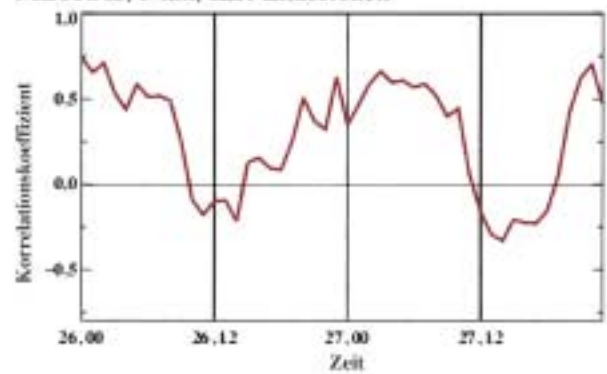


Abb. 11-5: wie Abb. 11-3, wobei die Chemie-Transport-Modelle nun der Mesoskala- γ zuzurechnen sind. Die horizontale Maschenweite der Modellgitter beträgt jeweils 3 km.

Nicht den Erwartungen entsprechen auch die in Abb. 11-5 gezeigten Ergebnisse von drei Simulationsläufen mit einer räumlichen Gitterweite von nur 3 km, wenn man davon ausgeht, daß die Stationsbeobachtungen eher einen repräsentativen Wert für eine Umgebung von 9 km² darstellen als für die z.T. um ein Mehrfaches größeren Gitterzellen der in den Abb. 11-3 und 11-4 diskutierten Simulationsergebnisse. Zusätzlich verwenden KAMM und METRAS die nicht-hydrostatische Variante der dritten Bewegungsgleichung, wodurch die Auftriebseffekte besser berücksichtigt werden. Trotz dieser Modellkonfiguration unterscheidet

sich z.B. die METRAS-Zeitreihe der Ozonkonzentration (dritte Zeile, linke Spalte, Abb. 11-5) nur wenig von der REMO-Zeitreihe (dritte Zeile, linke Spalte, Abb. 11-3), was der Vergleich der beiden Periodenmittelwerte (44,4 ppbv für REMO, 46,6 ppbv für METRAS/MECTM) bestätigt. Die Periodenmittelwerte von REMO und METRAS/MECTM weichen vom beobachteten Periodenmittel (53,4 ppbv) stärker ab als eine Persistenzvorhersage (47,2 ppbv), bei der man einfach annimmt, daß der Wert der Ozonkonzentration zu einer bestimmten Tageszeit genau dem Wert zur gleichen Zeit am Vortag entspricht.

Wir wenden uns nun der rechten Spalte der Abb. 11-3 bis 11-5 zu, in der für jede der insgesamt elf Modellvarianten der zeitliche Verlauf des Korrelationskoeffizienten für die Ensembles der gleichzeitigen Wertepaare, bestehend aus Stationsbeobachtung und Modellwert in derjenigen Gitterzelle, in der die Station liegt, dargestellt ist. Ein zu einem bestimmten Zeitpunkt ermittelter Korrelationskoeffizient von Eins würde besagen, daß zu dieser Zeit die räumliche Struktur von Meß- und Modellwerten übereinstimmt, d.h. dort, wo hohe Konzentrationen beobachtet werden, liegen auch im Modell die Gebiete mit hohen Konzentrationen. Entsprechend würde ein Korrelationskoeffizient von -1 bedeuten, daß die höchsten Konzentrationen dort modelliert werden, wo man die niedrigsten Konzentrationen beobachtet hat, und umgekehrt.

Interessant ist zunächst, daß alle Zeitreihen den selben generellen Verlauf zeigen. Die Korrelationen sind hoch während der zweiten Nachthälfte und in den frühen Morgenstunden, zeigen jedoch ein mehr oder weniger ausgeprägtes Minimum (d.h. maximale negative Korrelationen) am Nachmittag, d.h. gerade dann, wenn die Ozonkonzentration in der Nähe ihres täglichen Maximums liegt. Vor allem am 27.07.1994 werden von fast allen Modellen dabei Minima erreicht, die kleiner als $-0,5$ sind. Es wird nur erwähnt, aber nicht im Bild gezeigt, daß diese eindeutig negativen Korrelationen am Nachmittag deshalb auftreten, weil die Modelle die Ozonkonzentration entlang der Rheinschiene und im Ruhrgebiet eindeutig unterschätzen. Ausführliches Bildmaterial hierzu ist in Tilmes et al. (1999) zu finden.

Abschließend wird noch einmal nachdrücklich darauf hingewiesen, daß weitere Sommersmogepisoden mit der gleichen Evaluierungsstrategie überprüft werden müssen, bevor eine Generalisierung der hier vorgestellten Ergebnisse erfolgen kann. Hinweise hierzu sind auch in Tilmes et al. (2001) zu finden.

4 Beispiel einer diagnostischen Evaluierung: TRACT, September 1992

Ziel des im EUROTRAC-Subprojekt TRACT (**T**ransport of atmospheric constituents over **c**omplex **t**errain) im September 1992 durchgeführten Experimentes war es, den Schadstofftransport über orographisch gegliedertem Gelände (Oberrheingraben mit seinen begrenzenden Gebirgen, vor allem Vogesen und Schwarzwald) in einem zeitlich befristeten qualitätsgesicherten Meßprogramm zu untersuchen, das zusätzlich zu den Messungen meteorologischer und luftchemischer Größen in Bodennähe Flugzeugmessungen und verschiedene atmosphärische Sondierungen umfaßt. Details zum Experiment sind dem Operationsplan zu entnehmen (Zimmermann 1995).

Die Kontrolle der Ergebnisgüte erfolgt auch bei TRACT durch Vergleich von Messungen und Ergeb-

nissen von Modellrechnungen. Dabei wird dieses Mal aber diagnostisch vorgegangen, d.h. es werden die räumlichen und zeitlichen Verteilungen der Zielgrößen nicht nur in Bodennähe, sondern auch in und oberhalb der atmosphärischen Grenzschicht untersucht, ohne daß die primären Ursachen als Folge der beteiligten Einzelprozesse analysiert werden. Untersucht wird das Verhalten der Modelle EURAD, REMO, KAMM/DRAIS und METRAS/MECTM am 16.09.1992 im Zeitraum von 11 UTC bis 15 UTC.

Aufgrund des verfügbaren Datenmaterials ist zunächst die Anzahl der Vergleichsgrößen erhöht worden. Während in dem im vorherigen Abschnitt beschriebenen Sommersmogbeispiel allein die Ozonkonzentrationen gegenübergestellt worden sind, umfaßt der TRACT-Vergleich meteorologische Parameter (potentielle Temperatur, spezifische Feuchte, Windgeschwindigkeit und -richtung, Grenzschichtdicke) und die Konzentrationen von Ozon (O_3), reaktiven Stickoxiden (NO_x) und Kohlenmonoxid (CO). Als Qualitätsziel (Maßzahl für die Abweichungen zwischen gemessenen und errechneten Werten) für Ozon wurden trotz der ernüchternden Erfahrungen beim Vergleich mit dem nordrhein-westfälischen Bodenstationsnetz erneut ± 10 % verwendet. Für die anderen Größen sollten die Differenzen innerhalb von ± 50 % bei NO_x , ± 30 % bei CO , $\pm 1,5$ K bei der potentiellen Temperatur, ± 10 % bei der spezifischen Feuchte, $\pm 0,75$ m/s in der Windgeschwindigkeit, sowie $\pm 15^\circ$ bei der Windrichtung, falls die gemessene Windgeschwindigkeit über 1,5 m/s betragen hat, und ± 30 % bei der Grenzschichtdicke liegen, um als „Treffer“ in der Statistik berücksichtigt werden zu können. Alle prozentualen Abweichungen sind dabei durch den Median der jeweiligen Meßwerte festgelegt.

Nachfolgend wird die Modellgüte für die Konzentrationen von O_3 und NO_x sowie für die Grenzschichtdicke vorgestellt. Dieser Teil des Vergleichs stützt sich ausschließlich auf qualitätsgesicherte Daten von zwei Flügen am 16.09.1992 (siehe Kanter et al. 1996) ab. Die erste Maschine ist an diesem Tag um 11:12 UTC gestartet und war bis 14:47 UTC in der Luft, während beim zweiten Flugzeug 11:26 UTC als Startzeit und 14:38 UTC als Zeitpunkt der Landung protokolliert sind.

Abb. 11-6 zeigt die modellierte räumliche Verteilung der Ozonkonzentration in etwa 200 m über Grund im Oberrheingraben und den angrenzenden Regionen am 16.09.1992 um 11 UTC. Das linke obere Teilbild gilt für das EURAD-Modell mit einer horizontalen Gitterweite von 20 km, das rechte obere Teilbild für die Modellkombination REMO/CTM2 mit einer räumlichen Auflösung von einem Sechstel Grad (in 50° N entspricht dies etwa 14 km in Ost-West-Richtung und etwa 18,5 km in Nord-Süd-Richtung). Man erkennt die in dieser Auflösung vereinfachten Orographieformen. Auch sind Vogesen und Schwarzwald merklich niedriger als in Wirklichkeit, so daß sich das Strömungsfeld auf ein vereinfachtes

Relief einzustellen hat. Trotzdem erfolgt eine Kanalisierung im Oberrheingraben, die allerdings bei den beiden Modellen entgegengesetzt verläuft. EURAD zeigt schwache, eher südliche Winde, während REMO nördliche Winde von zum Teil über 3 m/s simuliert.

In Abb. 11-6 erkennt man bei beiden Modellen eine direkte Antikorrelation zwischen der Ozonkonzentration und der aus dem Profil der potentiellen Temperatur abgeleiteten Grenzschichtdicke. Dieser Rückschluß vom Temperaturprofil auf die Grenzschichtdicke ist möglich, da die Messungen beider Flugzeuge während der Mittagstunden des 16.09.1992 eine Schicht mit vertikal nahezu konstanter potentieller Temperatur oberhalb der untersten Flughöhe in 150 m über Grund zeigen, die nach oben durch eine signifikante Temperaturinversion begrenzt ist. In den Modellen ist demgemäß die Höhenlage der Untergrenze derjenigen Schicht, in der die Zunahme der potentiellen Temperatur beginnt, als Grenzschichtdicke interpretiert worden. Vergleicht man die untere mit der oberen Zeile, so sind Gebiete höherer Ozonkonzentrationen gleichzeitig Gebiete geringerer Grenzschichtdicke, was die höheren Konzentrationen als eine Folge der reduzierten Verdünnung und umgekehrt, erscheinen läßt.

Abb. 11-7 zeigt die gleichen Größen (oben: Ozonkonzentration, unten: Grenzschichtdicke) für die beiden nicht-hydrostatischen Modelle KAMM/DRAIS (links) und METRAS/MECTM (rechts). Im Vergleich zur Abb. 11-6 beträgt bei diesen beiden Modellen die horizontale Auflösung in beiden Koordinatenrichtungen jeweils 5 km, was in jeder Richtung einen Faktor 4 im Vergleich zum EURAD-Modell bedeutet. Die feinere Auflösung hat eine verfeinerte Orographie und damit auch detailreichere Windfelder zur Folge. Dieser erhöhte Detailreichtum darf jedoch nicht automatisch als Gütemaß für die Simulationen herangezogen werden. Die bezüglich der Verdünnung für die gröber auflösenden Modelle gezeigte Tendenz gilt nämlich auch für die in Abb. 11-7 gezeigten Ergebnisse der beiden nicht-hydrostatischen Modelle.

Hinsichtlich der Simulationsgüte sind die Abb. 11-8 bis 11-10 wesentlich wichtiger. Abb. 11-8 zeigt den Zusammenhang zwischen gemessenen Werten (Abszisse) und Modelldaten (Ordinate) für die über die Grenzschichtdicke gemittelte Ozonkonzentration. Für jedes der vier Modelle wird ein eigenes Streudiagramm gezeigt. Mit eingezeichnet sind jedes Mal die 1:1-Gerade (gestrichelt) sowie die den Qualitätszielen ($\pm 10\%$ des Medians der Meßwerte) entsprechenden maximal möglichen Über- bzw. Unterschreitungen (punktirt). Jeder durch ein Kreuz markierte Mittelwert gilt entweder für einen Auf- oder einen Abstieg eines der beiden Flugzeuge, womit insgesamt ein Ensemble von knapp über 90 Werten zur Verfügung gestanden hat. Die Verteilungen von EURAD und KAMM/DRAIS sind zumindest für größere Ozonwerte sehr ähnlich. Eine Unterschätzung der Ozonwerte ist bei KAMM/DRAIS zwischen 40 und

50 ppbv zu finden. Beim feiner auflösenden Modell METRAS/MECTM entsteht der qualitative Eindruck, daß mehr Wertepaare außerhalb der durch das Qualitätsziel von $\pm 10\%$ vorgegebenen Grenzen liegen als bei EURAD. In der Tat beträgt der Anteil von Wertepaaren (Kreuzen), die das Qualitätsziel für Ozon erfüllen, also innerhalb der beiden gepunkteten Linien liegen, bei EURAD 58 %, bei METRAS/MECTM 42 %, bei REMO 37 % und bei KAMM nur 34 %.

Dieses nicht unbedingt erwartete Ergebnis bedarf der weiteren Diskussion. Der Verdünnungseffekt in der atmosphärischen Grenzschicht ist bereits qualitativ besprochen worden. Abb. 11-9 zeigt hierzu die Streudiagramme für die Grenzschichtdicke. Das Qualitätsziel – Differenzen zwischen Meß- und Modellwerten sollten innerhalb von $\pm 30\%$ des Medians der Meßwerte liegen – wird von REMO in 57 %, von EURAD in 52 %, von KAMM/DRAIS in 51 % und von METRAS/MECTM in 49 % aller Fälle erreicht. Der auf einen Verdünnungseffekt hindeutende Zusammenhang, geringste „Trefferquote“ sowohl bei der Ozonkonzentration als auch bei der Grenzschichtdicke, kann somit nicht bestätigt werden. Vielmehr liegt bei allen Modellen eine eindeutige Tendenz zur Überschätzung der Grenzschichtdicke vor, was im Falle korrekter Emissionen zu einer Unterschätzung der Konzentrationswerte in den Modellen führen muß.

Diese Hypothese kann anhand der NO_x -Konzentrationen noch weiter geprüft werden. Abb. 11-10 zeigt deshalb die Streudiagramme dieser Größe für alle vier betrachteten Modelle. Ebenso wie für die Ozonkonzentration zeigt sich auch für das NO_x eine Tendenz zu kleineren modellierten Konzentrationswerten. Am ehesten trifft dies für KAMM/DRAIS zu, während bei den anderen drei Modellen auch häufiger Überschätzungen zu beobachten sind. Dies gilt insbesondere, wenn man die mit stärkeren Unsicherheiten behafteten Messungen unterhalb von 2 ppbv ausblendet. Auch bei den reaktiven Stickoxiden erzielt REMO mit 54 % den höchsten prozentualen Anteil von innerhalb der durch das Qualitätssicherungsziel vorgegebenen Grenzen ($\pm 50\%$ des Medians der Meßwerte wegen der erhöhten Meßunsicherheiten) liegenden Wertepaaren. Die anderen Modelle liegen mit 38 % (KAMM/DRAIS), 36 % (EURAD) und 35 % (METRAS/MECTM) im Vergleich zu REMO/CTM2 doch merklich zurück.

Eine niedrigere NO_x -Konzentration müßte in allen Modellen bei den während TRACT in Bodennähe gefundenen VOC-Konzentrationsniveaus eigentlich eine verstärkte Ozonproduktion zur Folge haben, die mit der Unterschätzung der NO_x -Konzentration durch das jeweilige Modell ansteigt. Dies wirkt sich aber nicht in einer Überschätzung der Ozonkonzentration aus – im Gegenteil, wie in Abb. 11-8 gezeigt worden ist.

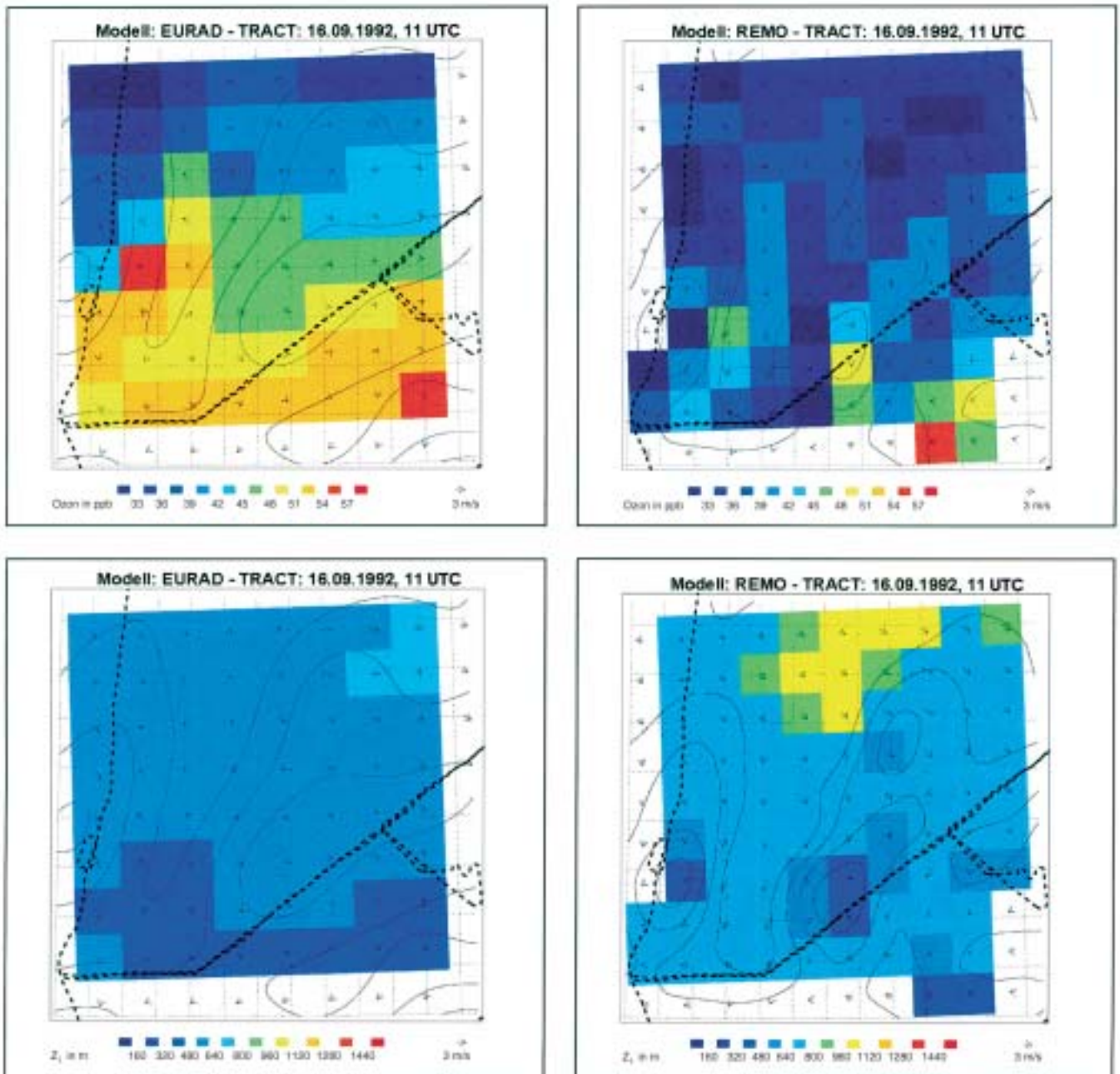


Abb.11-6, obere Reihe: Modellerte Verteilung der Ozonkonzentration in ppbv (links: EURAD, rechts: REMO) in etwa 200 m über Grund im Oberrheingraben und den angrenzenden Regionen am 16.09.1992 um 11 UTC. Die Flächenelemente repräsentieren die Lage und die Grundfläche der einzelnen Modellgitterboxen. Ebenfalls eingezeichnet sind das simulierte Windfeld (Pfeile, Maßstab unter der Graphik), die Orographie (dünne durchgezogene Linien) und der Flugweg des im nördlichen Teil des TRACT-Gebietes an diesem Tag operierenden Flugzeugs (dicke gestrichelte Linie).
Untere Reihe: wie obere Reihe, aber für die Grenzschichtdicke Z_i in m.

Die zuletzt geführte Diskussion zeigt die Grenzen der diagnostischen Evaluierungsmethode auf. Mit den während TRACT durchgeführten Messungen ist es eben nicht vollständig möglich, die zur räumlichen und zeitlichen Ozonverteilung beitragenden Prozesse (horizontaler und vertikaler Transport, Bildung bzw. Abbau aufgrund von chemischen Reaktionen) einzeln abzuschätzen oder gar zu berechnen. Ein experimenteller Naturdatensatz, der dies erlauben würde, ist jedoch auch in den fast neun Jahren nach TRACT nicht erstellt worden, so daß die Durchführung einer

prozeß-orientierten Evaluierung (und damit die Erklärung der diagnostisch gefundenen Unterschiede zwischen Messung und Rechnung) eine Herausforderung für die Zukunft bleibt.

5 **Schlußfolgerungen**

In der 22. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz (22. BImSchGV) wird vom Gesetzgeber verlangt, daß die Bevölkerung informiert werden muß, so

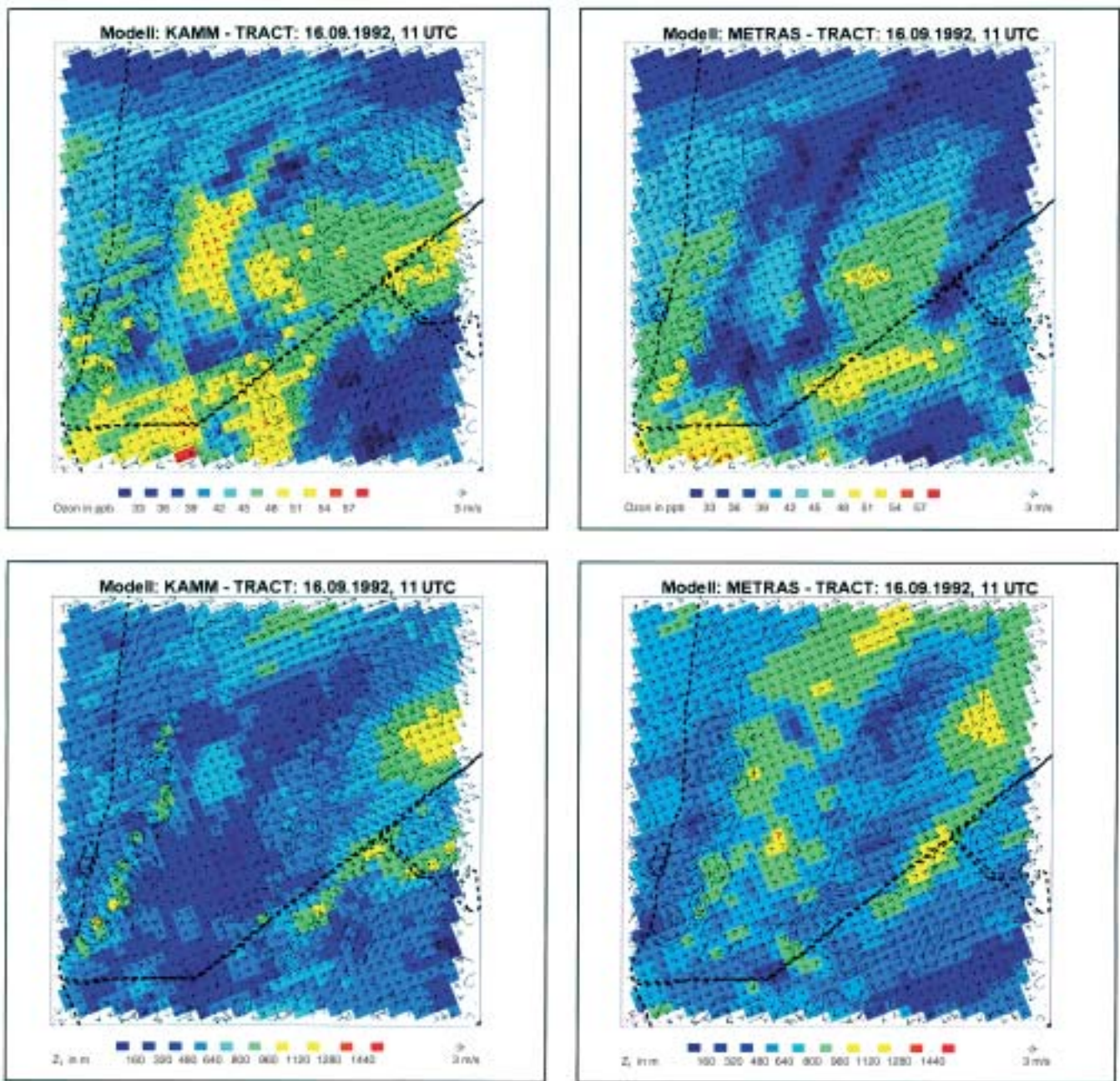


Abb. 11-7: Ozonverteilung und Windfeld in etwa 200 m über Grund sowie Grenzschichtdicke in gleicher Darstellung wie Abb. 11-6, jedoch für die feiner auflösenden Modelle KAMM/DRAIS (links) und METRAS/MECTM (rechts).

bald die Ozonkonzentration einen Schwellenwert von $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ($\approx 90 \text{ ppbv}$) überschreitet. Dabei ist auch eine Vorhersage über die Entwicklung der Konzentrationswerte, über die betroffene Region und über die voraussichtliche Dauer der Smogperiode abzugeben. Andererseits wird eine routinemäßige Ozonprognose in einigen europäischen Ländern gegenwärtig erst erprobt; erste Ergebnisse sind z.B. bei Tilmes et al. (2001) zu finden. Die hier vorgestellten beiden Evaluierungsfälle legen den Schluß nahe, daß eine stationsgenaue Ozonprognose mit den derzeitigen CTMs im Sinne der hier

benutzten und gegenüber der Luftreinhaltepraxis deutlich verschärften Qualitätsanforderungen (Differenzen von maximal $\pm 10 \%$ anstelle von innerhalb des Faktors 2 liegenden Differenzen) nicht möglich sein wird. Das bedeutet nicht automatisch, daß die Modelle zur Ozonvorhersage untauglich wären, sondern daß man die feste Orts- und Zeitbindung zwischen Beobachtung und Simulationsergebnis lockern muß. So scheint die Vorhersage der Ozonbelastung in einer größeren Region nach Definition neuer Qualitätsziele durchaus mit einiger Sicherheit machbar, z.B. durch die Bestimmung

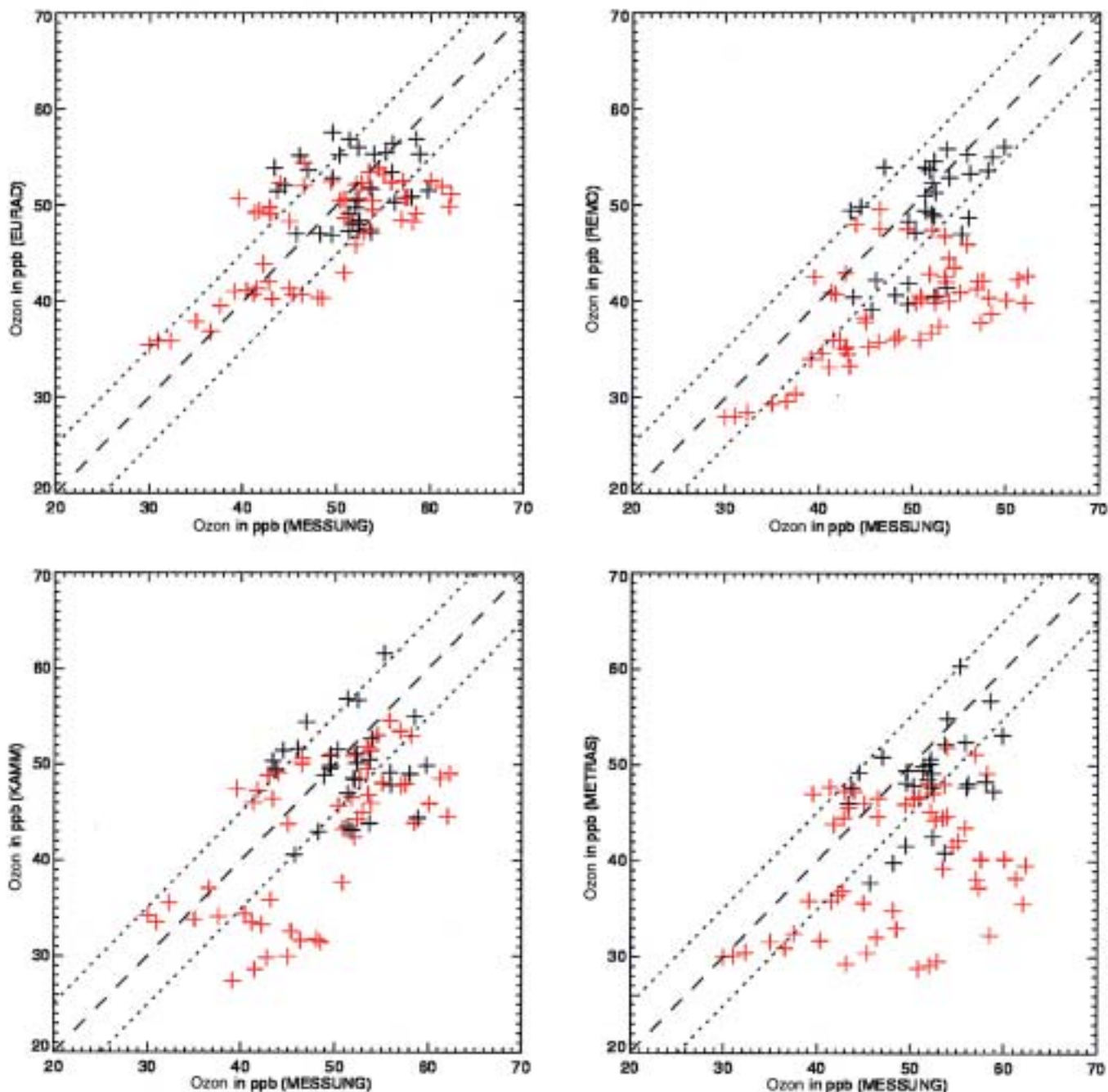


Abb. 11-8: Streudiagramm der modellierten (Ordinate) und vom Flugzeug gemessenen (Abszisse) Werte der vertikal über die Grenzschichtdicke gemittelten Ozonkonzentration; es sind die vier Modelle EURAD, REMO, KAMM/DRAIS und METRAS/MECTM einzeln dargestellt. Die roten Symbole gelten für den Flug über dem nördlichen, die schwarzen Symbole für einen zweiten Flug über dem südlichen Teil des Experimentgebietes. Beide Flüge fanden am 16.09.1992 um die Mittagszeit statt.

maximaler Tageswerte für die interessierende Region. Auch die Vorhersage der Überschreitungswahrscheinlichkeit von Grenzwerten erscheint für solche Regionen machbar. Insgesamt bleibt aber festzuhalten, daß neben der Verbesserung der Eingangsdatensätze auch eine Erhöhung der Genauigkeit bei der Strömungssimulation dringend erforderlich ist. Dies gilt sowohl für die Vorhersage der mittleren Windrichtung und -geschwindigkeit als auch für die konsistente Beschreibung von Bodenenergiebilanz und turbulenter Vermischung in der atmosphärischen Grenzschicht.

Literatur

ADRIAN, G., F. FIEDLER, 1991: Simulation of unstationary wind and temperature fields over complex terrain and comparison with observations. Beitr. Phys. Atmosph. 64, 27-48.

DENNIS, R.L., 1990: Model evaluation in the context of NAPAP. In: Dennis, R.L., Barchet, W. R., Clark, T. L., Seilkop, S. K., Roth, P.M.: Acid deposition: State of Science and Technology, Report 5: Evaluation of regional acidic deposition models (part I), 5-33 - 5-42.

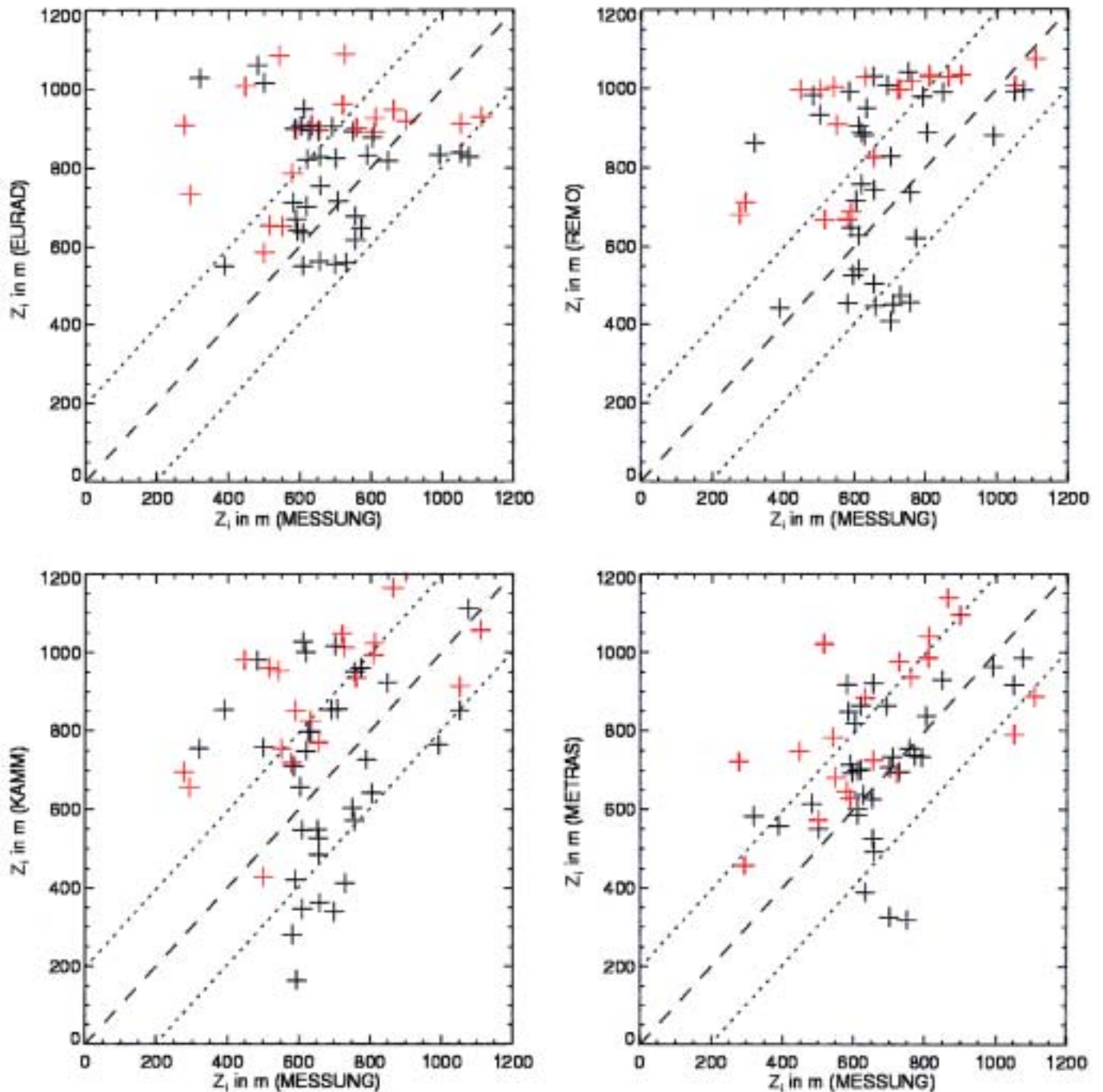


Abb. 11-9: Streudiagramm der modellierten (Ordinate) und aus den Flugzeugmessungen der potentiellen Temperatur abgeleiteten (Abszisse) Werte der Grenzschichtdicke Z_i ; im übrigen entspricht der Aufbau der Darstellung der Abb. 11-8.

HASS, H., 1991: Description of the EURAD-chemistry-model version 2 (CTM2). Heft 83 der Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, Hrsg. A. Ebel, F.M. Neubauer, P. Speth, 100 Seiten.

JACOB, D., R. PODZUN, 1997: Sensitivity studies with the regional climate model REMO. Meteorol. Atmosph. Phys. 63, 119-130.

KANTER, H. J., F. SLEMR, V. MOHNEN, 1996: Airborne chemical and meteorological measurements made during the 1992 TRACT experiment: Quality control and assessment. J. Air & Waste Management Association 46, 710-724.

LANGMANN, B., S. E. BAUER, 2001: On the importance of reliable background concentrations of ozone for regional scale photochemical modelling. Zur Publikation angenommen in J. Atmosph. Chemistry.

MÜLLER, F., K. H. SCHLÜNZEN, M. SCHATZMANN, 2000: Test of numerical solvers for chemical reaction mechanisms in 3D air quality models. Environmental Modelling Software 15, 639-646.

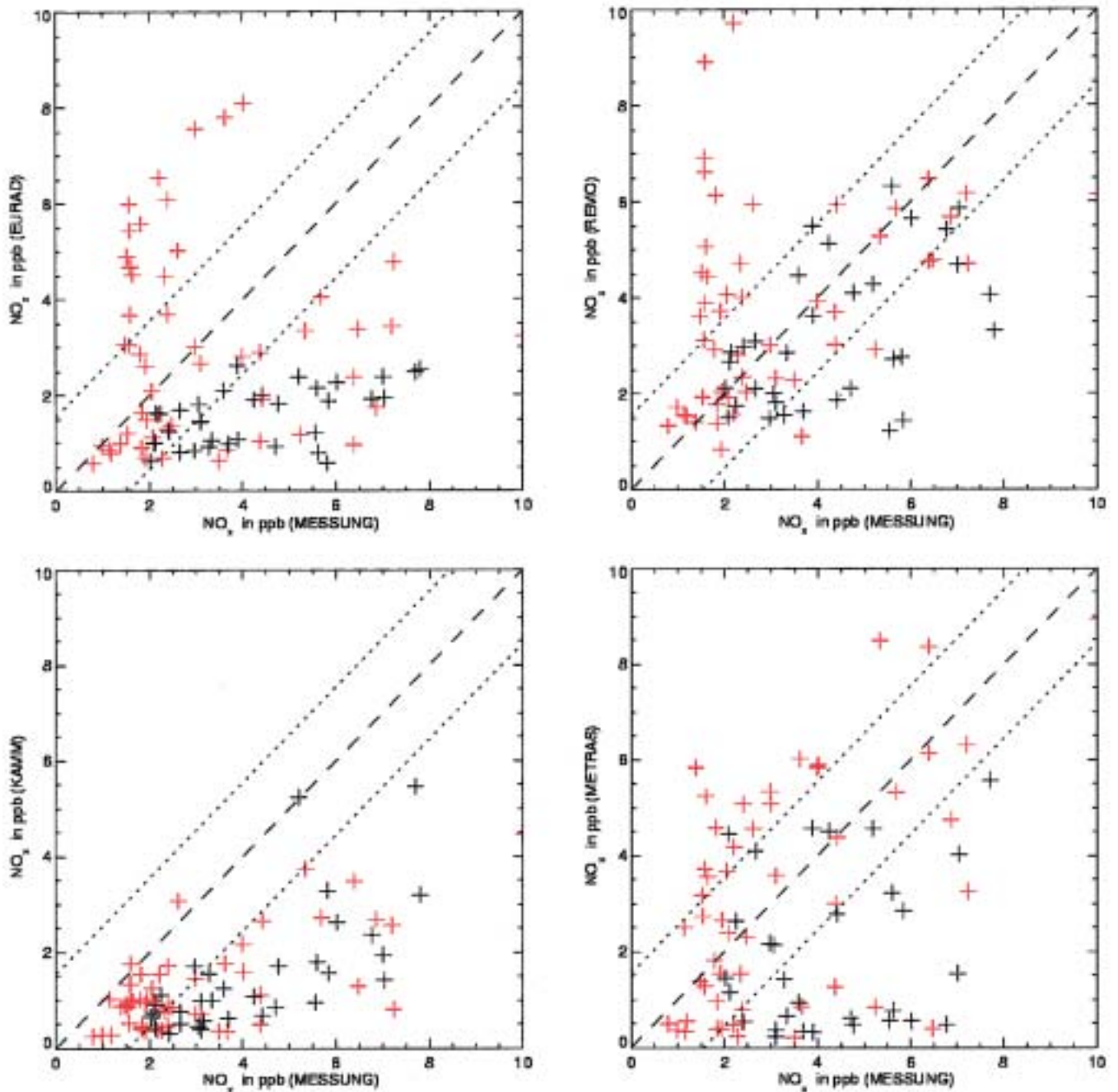


Abb.11-10: Streudiagramm der errechneten (Ordinate) und vom Flugzeug gemessenen (Abszisse) Werte der vertikal über die Grenzschichtdicke gemittelten Konzentrationen der reaktiven Stickoxide (NO_x); im übrigen entspricht der Aufbau der Darstellung der Abb.11-8.

NESTER, K., H.-J. PANITZ, F. FIEDLER, 1995: Comparison of DRAIS and EURAD model simulations of air pollution in a mesoscale area. *Meteorol. Atmosph. Phys.* 57, 135-158.

SCHLÜNZEN, K. H., 1997: On the validation of high resolution atmospheric mesoscale models. *J. Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* 67/68, 479-492.

TILMES, S., V. MOHNEN, E. SCHALLER, 1999: TFS Model Evaluation. Case 2: NRW, 26 and 27-July-1994. Brandenburgische Technische Universität, 128 Seiten (zu beziehen vom dritten Autor).

TILMES, S., J. BRANDT, F. FLATØY, R. BERGSTRÖM, J. FLEMMING, J. LANGNER, J.H. CHRISTENSEN, L.M. FROHN, Ø HOV, I. JACOBSEN, E. REIMER, R. STERN, J. ZIMMERMANN, 2001: Comparison of five Eulerian air pollution forecasting systems for the summer 1999 using the German ozone monitoring data. *J. Atmosph. Chemistry*, im Druck.

WILLMOTT, C. J., 1981: On the validation of models. *Phys. Geography* 2, 184-194.

ZIMMERMANN, H., 1995: Field phase report of the TRACT field measurement campaign. EUROTRAC, International Scientific Secretariat, Garmisch-Partenkirchen, Selbstverlag, 196 Seiten.

12 Anwendungen von Modellen für die Bewertung von effizienten Minderungsstrategien

1 Einleitung

Emissionsminderungsmaßnahmen sind mit einem erheblichem finanziellen Aufwand verbunden und stellen einen volkswirtschaftlichen Faktor dar. Es besteht daher ein großes Interesse, verschiedene Minderungsstrategien gegeneinander abzuwägen und auf ihre Effizienz zu überprüfen. Während im Falle von nicht reagierenden Luftverunreinigungen eine Reduktion der Emissionen mit einer Reduktion der Konzentrationen einhergeht, ist wegen der Nichtlinearität der Ozonbildung eine Minderung der Emissionen der Vorläufer-substanzen nicht notwendigerweise mit einer Reduktion der Ozonkonzentration verbunden. Die Vorläufer-substanzen von Ozon (Stickoxide (NO_x) und flüchtige organische Verbindungen (VOC)) haben jedoch nicht nur anthropogene Quellen, sie werden auch in erheblichem Maße durch die Biosphäre in die Atmosphäre eingebracht (siehe Kapitel 4). So erreichen die biogenen Emissionen der VOC an warmen und strahlungsreichen Sommertagen die gleiche Größenordnung wie die anthropogenen Emissionen. Bei der Erarbeitung effizienter Emissionsmaßnahmen ist diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, da die natürlichen Emissionen die untere Grenze dessen darstellen, was sich durch eine Reduktion der anthropogenen Emissionen in bezug auf eine Reduktion der Gesamtemissionen erreichen läßt.

Die Auswirkungen der Änderungen in den Emissionen lassen sich im Falle von Ozon durch Beobachtungen nur in Einzelfällen nachweisen, da die durch Minderungsmaßnahmen zu erreichenden Änderungen der Ozonkonzentration in der gleichen Größenordnung liegen, wie diejenigen, die sich durch das von Jahr zu Jahr ändernde Wettergeschehen einstellen.

Numerische Modelle stellen daher das wesentliche Werkzeug dar, mit dem es möglich ist, die Auswirkung von vorgesehenen bzw. denkbaren Minderungsmaßnahmen auf die Ozonkonzentration abzuschätzen. Zu diesem Zweck werden unter Beibehaltung der meteorologischen Bedingungen Simulationen mit unterschiedlichen Emissionsszenarien durchgeführt. Die so erhaltenen Differenzen der simulierten Konzentrationen lassen sich eindeutig auf die Änderungen der Emissionen zurückführen. An die numerischen Modelle ist die Forderung zu stellen, daß sie die physikalischen und chemischen Vorgänge in adäquater Weise und dem Stand des Wissens entsprechend berücksichtigen. Bei der Bewertung der Modellergebnisse muß jedoch stets bedacht werden, daß sowohl in Bezug auf die physikalischen und die luftchemischen Vorgänge als auch in Bezug auf die Genauigkeit der zur Verfügung stehenden Emissionsdaten noch erhebliche Unsicherheiten bestehen.

Die denkbaren Minderungsstrategien zur Vermeidung von Episoden mit hohen Ozonkonzentrationen lassen sich bezüglich ihrer räumlichen und zeitlichen Erstreckung wie folgt klassifizieren:

Ad hoc Maßnahmen (siehe Abschnitt 2)

Hierunter fallen Maßnahmen, die erst dann greifen, wenn ein bestimmter Grenzwert der Ozonkonzentration bereits überschritten ist. Zu diesen Maßnahmen zählen zeitlich befristete Tempolimits und Fahrverbote. Denkbar ist hier, daß ad hoc Maßnahmen auf bestimmte Regionen (Städte, Bundesländer) beschränkt bleiben oder großräumigen Charakter haben.

Langfristige Maßnahmen (siehe Abschnitt 3)

Unter diesem Begriff sollen Maßnahmen zusammengefaßt werden, die einen vorbeugenden Charakter aufweisen, d.h. permanent greifen. Zu diesen Maßnahmen zählen die Einführung von Katalysatoren in Kraftfahrzeugen oder der Ersatz bestimmter Lösemittel in industriellen und privaten Anwendungen.

Im folgenden werden die Erfolgsaussichten einiger Maßnahmen vorgestellt, wobei bis auf eine Ausnahme auf die Ergebnisse von numerischen Simulationen zurückgegriffen wird.

2 Ad hoc Maßnahmen

Zu den zumindest in der Öffentlichkeit am meisten diskutierten Maßnahmen zur Vermeidung hoher Ozonkonzentrationen zählen räumlich begrenzte und zeitlich befristete Maßnahmen, wie Produktionseinschränkungen und Fahrverbote für den Fall der Überschreitung von bestimmten Grenzwerten. Die erste Frage, die sich in diesem Zusammenhang stellt, ist die nach der Andauer von Photosmogeperioden.

Grabe (1995) untersuchte für das Gebiet von Baden-Württemberg, wie lange einzelne Ozonepisoden im Mittel dauern. Es zeigte sich für alle Stationen, daß die Mehrzahl der Ozonepisoden nicht länger als 3 Tage anhält. Nach Ablauf dieses Zeitraums werden die meisten Episoden durch Frontdurchgänge oder andere Wetterumstellungen beendet. In Weil am Rhein dauerten nur 12 % und an der Station Schwarzwald-Süd nur 24 % aller Episoden länger als drei Tage. Dies zeigt, daß Sofortmaßnahmen unmittelbar wirksam sein müßten, damit sich die dadurch bedingten Änderungen noch vor einer Umstellung der großräumigen synoptischen Situation beobachten lassen.

Basierend auf den Ergebnissen numerischer Simulationen mit dem Modellsystem KAMM/DRAIS (Vogel

et al. 1995, Nester et al. 1995) wurde die Effizienz verschiedener ad hoc Maßnahmen untersucht und quantifiziert. Eine der denkbaren Maßnahmen wäre, die Emissionen kleinräumig (z.B. in einem Ballungszentrum) und zeitlich befristet zu reduzieren. Um den Erfolg einer solchen Maßnahme zu überprüfen, wurden für den nördlichen und den südlichen Teil von Baden-Württemberg Modellrechnungen durchgeführt (Obermeier et al. 1995, Vogel et al. 1996). Bei einer der Simulation wurden die Emissionen dem Istzustand entsprechend vorgegeben, bei einer zweiten wurden im Großraum Heilbronn alle anthropogenen Emissionen auf Null gesetzt. Damit ging die vorgegebene Emissionsminderung über das hinaus, was in der Realität durch eine solche ad hoc Maßnahme zu erreichen wäre. Alle anderen Eingabedaten entsprachen denen des Ausgangsfalles. Es zeigte sich, daß im Stadtgebiet, die Ozonkonzentration im Vergleich zum Ausgangsfall leicht anstieg. Dies ist verständlich, wenn man bedenkt, daß in den Emissionsgebieten die Stickoxidemissionen überwiegend in Form von NO erfolgen, welches lokal zu einem Ozonabbau führt (siehe Kapitel 2). Werden diese Quellen abgeschaltet, so kommt es lokal zu einer Erhöhung der Ozonkonzentration. Eine geringfügige Abnahme der Ozonkonzentration wurde im Lee der Stadt gefunden, wobei die maximale Abnahme des Ozons, die etwa in 40 km Entfernung auftritt, mit 2,5 ppb sehr gering ausfällt. Diese Simulationsergebnisse, die bereits vor dem 1994 in Heilbronn durchgeführten Ozonversuch vorlagen, zeigten, daß kleinräumige Maßnahmen nicht zu einer wesentlichen Verringerung der Ozonbelastung beitragen können. Diese Aussage wurde später durch den Ozonversuch „Heilbronn“ betätigt (Umweltministerium Baden-Württemberg 1995). Da offensichtlich räumlich begrenzte ad hoc Maßnahmen nicht den gewünschten Rückgang der Ozonkonzentration bewirken, soll als nächstes der Frage nachgegangen werden, inwieweit großräumige Sofortmaßnahmen geeignet sind.

Um den Erfolg kurzfristiger großräumiger Maßnahmen zu bewerten, bietet sich neben der numerischen Simulation auch die Auswertung von Messungen an, da an jedem Wochenende ein großräumiges Emissionsreduktionsexperiment stattfindet. Bedingt durch den Rückgang im Individualverkehr und der industriellen Produktion reduzieren sich die Emissionen der Vorläufersubstanzen von Ozon.

Vergleicht man die Tagesgänge der Emissionen für die einzelnen Wochentage miteinander, so fällt auf, daß an den Samstagen und noch verstärkt an den Sonntagen die Emissionen der Vorläufersubstanzen für die Ozonbildung gegenüber den anderen Wochentagen deutlich reduziert sind. Da dieses an jedem Wochenende der Fall ist, steht somit eine Vielzahl von Daten zur Verfügung, um die Auswirkungen dieser zweitägigen großräumigen Emissionsminderungsmaßnahme auf die Ozonkonzentration untersuchen zu können. Ausgewertet wurden die Daten der Stationen des Meßnetzes des Landes Baden-Württemberg für die Jahre 1986 – 1995 (Grabe 1995).

Die berechneten Tagesgänge der Emissionen von NO_x für verschiedene Stationen sind für den Zeitraum vom 03. – 05.08.1990 in Abb. 12-1 dargestellt. Es zeigt sich, daß die Emissionen an allen Stationen am Wochenende deutlich zurückgehen. Betrachtet man die Emissionen für das gesamte Gebiet, so liegt der Rückgang bezogen auf die Stickoxide bei 30 %. Der Rückgang bei den Kohlenwasserstoffen beträgt sogar 70 %. Dies belegt, daß über einen Zeitraum von zwei Tagen massive Emissionsreduzierungen vorliegen. Dieser Rückgang der Emissionen ist auch in den beobachteten Konzentrationsverhältnissen der Vorläufersubstanzen deutlich sichtbar. In Abb. 12-2 sind die über den Zeitraum Mai bis September gemittelten Wochengänge für NO und NO₂ jeweils für die Stationen Freiburg-Mitte, Emmendingen und Schwarzwald-Süd dargestellt. Berücksichtigt wurden hierbei nur Tage, an denen die Maximaltemperatur über 25 °C lag und die daher die Ozonproduktion begünstigen (siehe Kapitel 5). Die Konzentrationen von NO sind am Samstag um bis zu 40 % niedriger, am Sonntag gehen sie sogar um bis zu 75 % zurück. Beim NO₂, welches eine höhere Lebensdauer als NO besitzt, ist ein Rückgang der Werte von 20 % am Samstag und um bis zu 50 % am Sonntag zu verzeichnen. Berechnet man für die Wochenendtage die relativen Änderungen sowohl der Emissionen als auch der Immissionen bezogen auf die Verhältnisse am Freitag, so ergibt sich das in Abb. 12-3 exemplarisch für die Station Stuttgart-Mitte dargestellte Bild. Man sieht daraus, daß die Verläufe sowohl qualitativ als auch quantitativ gut übereinstimmen. Dies belegt auch, daß die zeitliche Variation der berechneten Emissionen sehr gut erfaßt wird. Weiterhin demonstrieren die Wochengänge, daß sich die geringeren Emissionen an den Wochenenden unmittelbar in den beobachteten Konzentrationsverläufen der Stickoxide und Kohlenwasserstoffe wiederfinden. In Hinblick auf Sofortmaßnahmen beim Überschreiten bestimmter Grenzwerte der Ozonkonzentration in Form von Verkehrsbeschränkungen ist zu untersuchen, wie sich die reduzierten Emissionen der Vorläufersubstanzen an den Wochenenden auf die Ozonkonzentration auswirken.

Die Abbildung 12-4 enthält die Wochengänge der Ozonkonzentration für die gleichen Stationen wie in Abbildung 12-2. Bei genauerer Betrachtung findet man an Stationen, die sich in Gebieten mit hohen Emissionen befinden, daß die Ozonkonzentration am Wochenende geringfügig ansteigt. Dies ist eine Folge der geringeren NO-Konzentrationen. An Stationen, die sich am Stadtrand befinden oder in Gebieten mit geringeren Emissionen verändert sich das Ozonniveau kaum. Einzig an der Station Schwarzwald-Süd nimmt die Ozonkonzentration am Sonntag leicht ab, wobei aber an dieser Station auch die Variation der Tagesgänge der Vorläufersubstanzen weitaus geringer ist als bei den übrigen Stationen. Weitergehende Auswertungen dieser Daten findet man bei Grabe (1995).

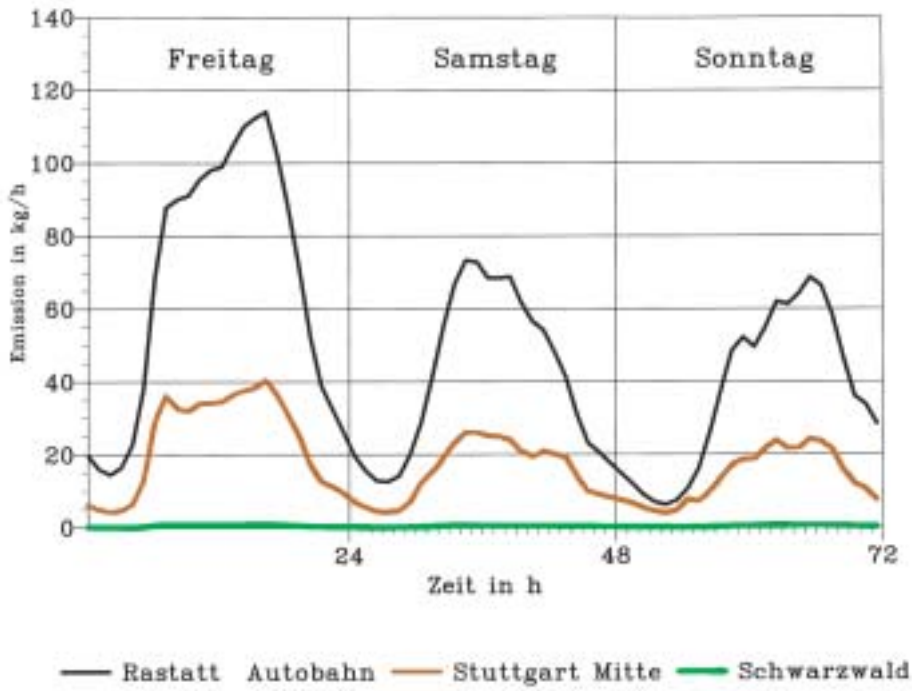


Abb. 12-1:
Tagesgänge der NO_x-Emissionen vom
03.08.-05.08.1990

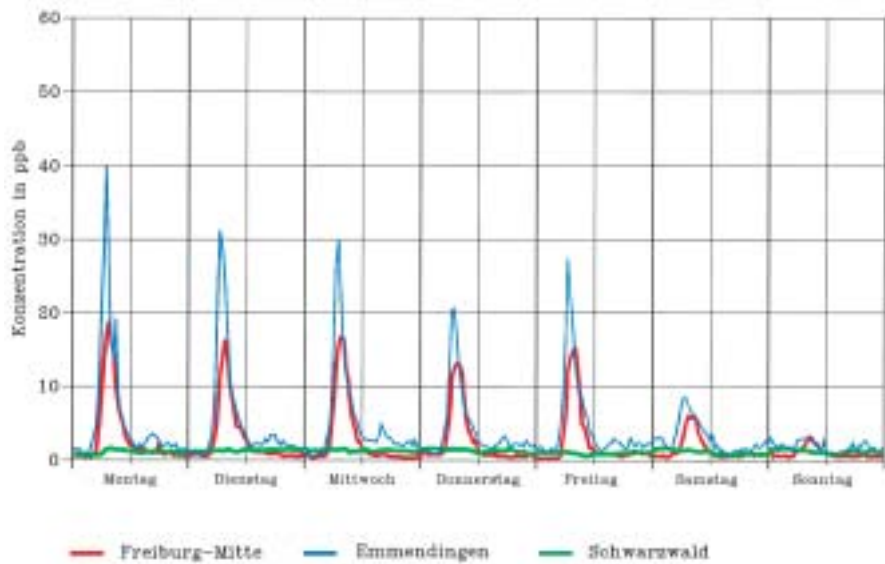
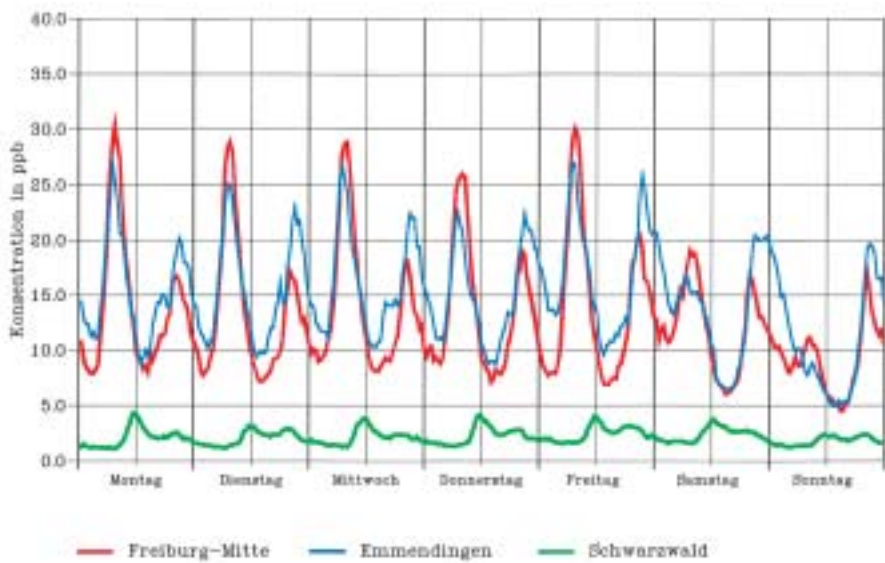


Abb. 12-2:
Wochengänge der NO (oben) und NO₂
(unten) Konzentration. Die Daten wurden
über alle Tage mit einer Maximaltempe-
ratur ≥ 25 °C (Mai - August 1986 - 1995)
gemittelt.



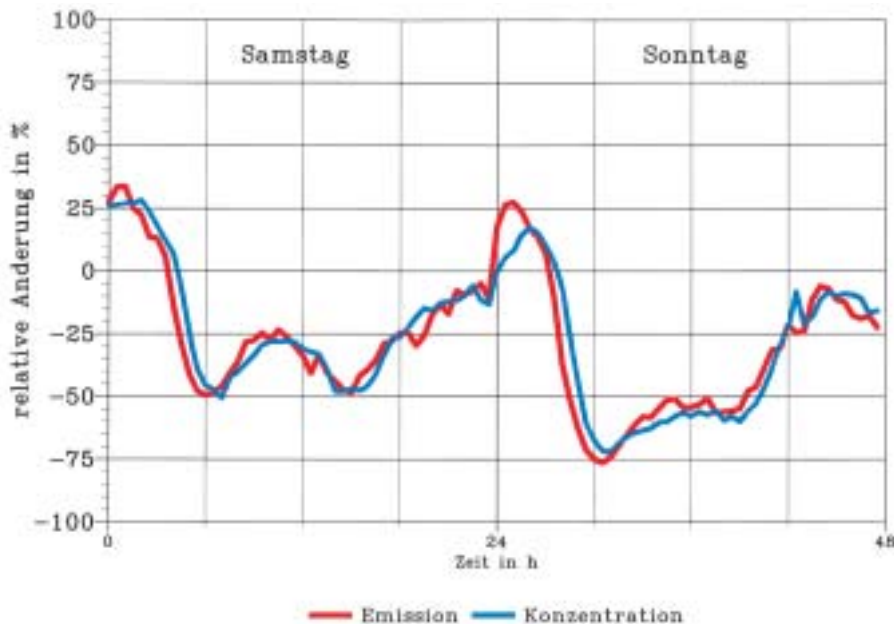


Abb. 12-3:
Relative Änderung der NO_x-Emissionen und NO_x-Konzentrationen gegenüber Freitag in Stuttgart-Mitte

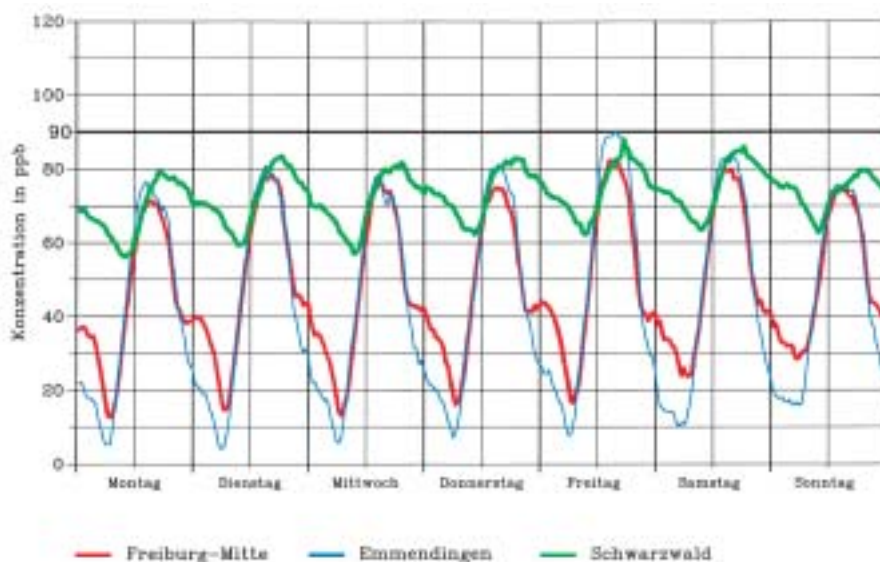


Abb. 12-4:
Wochengänge der Ozonkonzentration. Die Daten wurden über alle Tage mit einer Maximaltemperatur $\geq 25^\circ\text{C}$ (Mai - August 1986 - 1995) gemittelt.

Zusammenfassend kann man sagen, daß die Analyse der Meßdaten zeigt, daß eine kurzzeitige massive Emissionsminderung, selbst wenn sie großräumig durchgeführt wird, nur wenig Auswirkung auf die Ozonkonzentration hat. In den Hauptemissionsgebieten und damit auch in den dichter besiedelten Gebieten führt sie sogar zu einer geringfügigen Zunahme der Ozonkonzentration. In den mehr entlegenen Gebieten ist zwar eine Abnahme zu finden, jedoch ist diese nur minimal. Die Ursache hierfür ist die Lebensdauer des Ozons, die in der atmosphärischen Grenzschicht bei 2-3 Tagen liegt. Eine kurzfristige Maßnahme kann also nur dann zu einer Absenkung der Ozonkonzentration führen, wenn sie bereits zu Beginn einer sich abzeichnenden Episode durchgeführt wird, oder auf den Punkt gebracht: Die Maßnahme muß bereits einsetzen, wenn es draußen noch regnet und eine Schönwetterepisode von den Wetterdiensten vorhergesagt wird.

3 Langfristige Maßnahmen

Langfristige Minderungsmaßnahmen, hierunter sind Maßnahmen zu verstehen die dauerhaft die Emissionen senken, haben im Gegensatz zu den ad hoc Maßnahmen vorbeugenden Charakter. Sie senken auch die Konzentrationen der Vorläufersubstanzen in Zeiträumen, in denen es nicht zur Ausbildung von Photozonsituationen kommt, und entlasten somit die Umwelt. Ihr möglicher Nachteil ist darin zu sehen, daß die Verwirklichung einen gewissen Zeitraum in Anspruch nimmt, der zum Beispiel, wenn man an die Einführung von Katalysatoren denkt, bei der Lebenszeit von Fahrzeugflotten anzusiedeln ist. In verschiedensten Studien wurden in der Vergangenheit die Auswirkungen langfristiger Minderungsstrategien auf die Photooxidantienbildung untersucht, einige Ergebnisse werden hier exemplarisch vorgestellt. Dabei konzentriert sich die Darstellung auf

solche Studien, in denen realistische d.h. entweder bereits vom Gesetzgeber vorgesehene oder darüber hinausgehende, aber technisch machbare Maßnahmen zur Erstellung der Szenarien herangezogen wurden.

Für das Gebiet des südlichen Oberrheingrabens wurden die Emissionen der Vorläufersubstanzen von Ozon für eine Sommersmogepisode, die sich im August 1990 ereignete, ermittelt. Ausgehend davon wurden verschiedene Emissionsszenarien für einen Vergleichszeitraum im August des Jahres 2005 entwickelt (Obermeier et al. 1997). In einem Trendszenario (T2005) wurde dabei die zu erwartende Entwicklung der Emissionen auf der Grundlage der zum Zeitpunkt der Szenarienerstellung geltenden und bereits beschlossenen gesetzlichen Regelungen zur Luftreinhaltung berücksichtigt. In einem Szenario weitergehender Emissionsminderung (M2005) wurde demgegenüber unterstellt, daß seitens des Gesetzgebers bzw. der Aufsichtsbehörden zusätzliche Initiativen ergriffen werden, welche zu einer weiteren Verminderung der Emissionen von Ozonvorläufersubstanzen führen. Zu diesen damals angenommenen weitergehenden Maßnahmen zählten insbesondere eine verstärkte Umsetzung von Maßnahmen zur Minderung von Lösemittel-Emissionen und die Umsetzung der EURO3-Norm bei Kraftfahrzeugen.

Bezogen auf das gesamte Untersuchungsgebiet, welches den Südwesten von Baden-Württemberg, das angrenzende Elsaß und den nördlichen Teil der Schweiz umfaßte, ergaben sich die in den Abbildungen 12-5 und 12-6 dargestellten Tagesgänge der NO_x - und der VOC-Emissionen.

Bezogen auf das Jahr 1990 ergibt sich für die über 24 Stunden integrierten Emissionen des Szenarios T2005 bei den NO_x -Emissionen ein Rückgang um 47 % (62 %) und bei den VOC-Emissionen ein Rückgang um 43 % (63 %). Die in den Klammern angegebenen Rückgänge beziehen sich auf das Szenario M2005.

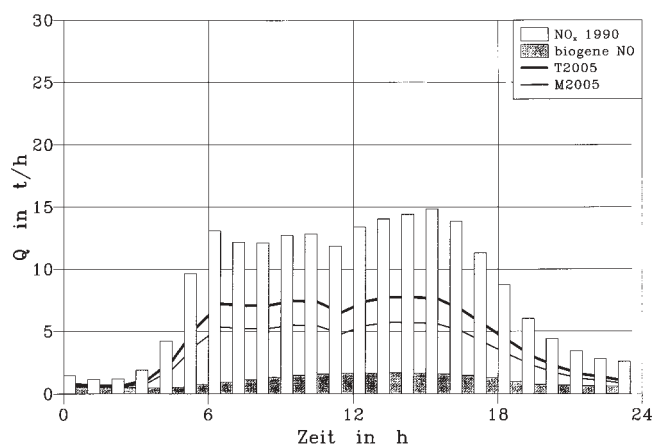


Abb. 12-5:
Zeitlicher Verlauf der Stickoxidemissionen im Simulationsgebiet für den Referenzfall und die Szenarien

Neben den anthropogenen Emissionen sind in den Abbildungen 12-5 und 12-6 auch die Tagesgänge der über das Untersuchungsgebiet integrierten biogenen Emissionen dargestellt. Es zeigt sich, daß insbesondere die biogenen VOC-Emissionen im betrachteten Zeitraum, der mit Lufttemperaturen von weit über 30 °C einherging, etwa 50 % der anthropogenen Emissionen ausmachen. Der prozentuale Rückgang der gesamten VOC-Emissionen fällt also deutlich geringer aus als der Rückgang der anthropogenen Emissionen.

Die Abbildung 12-7 zeigt die mit den Emissionsdaten für den August 1990 berechnete Verteilung der Ozonkonzentration um 15 Uhr in 18 m über Grund. Zu diesem Zeitpunkt fällt besonders der Konzentrationsgradient von Nord nach Süd auf. Die eingezeichnete weiße Isolinie kennzeichnet die Bereiche, in denen der Schwellenwert von 90 ppb überschritten wird. Die höchsten Werte treten am Rande der Schwarzwaldes auf mit Konzentrationen von über 100 ppb. Die höheren Konzentrationen im nördlichen Teil des Untersuchungsgebietes sind eine Folge der unterschiedlichen Strömungsverhältnisse. Um dieses zu verdeutlichen, ist in Abbildung 12-8 das Strömungsfeld um 15 Uhr in 200 m über Grund dargestellt. Im nördlichen Teil wird die Strömung entlang der Rheintalachse kanalisiert. In diesem Bereich kommt der Wind aus nördlicher Richtung, und die Windgeschwindigkeiten sind sehr niedrig. Südlich von Basel hat man einen Bereich mit relativ hohen Windgeschwindigkeiten aus vorwiegend östlicher Richtung. Am südlichen Rand des Untersuchungsgebietes weist die Windrichtung jedoch auch eine südliche Komponente auf. Dadurch werden dort Luftmassen mit geringer Belastung nach Norden transportiert und infolgedessen entwickelt sich hier bis in höhere Schichten eine Ozonkonzentration, die niedriger ist als im nördlichen Teil.

Um die Auswirkungen der veränderten Emissionsverhältnisse auf die räumliche und zeitliche Verteilung der

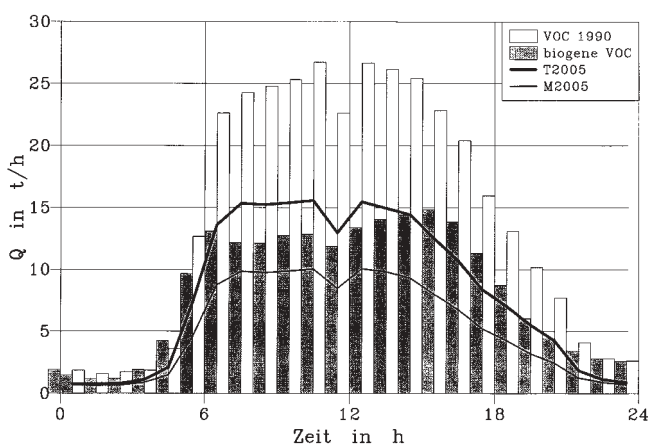


Abb. 12-6:
Zeitlicher Verlauf der Kohlenwasserstoffemissionen im Simulationsgebiet für den Referenzfall und die Szenarien

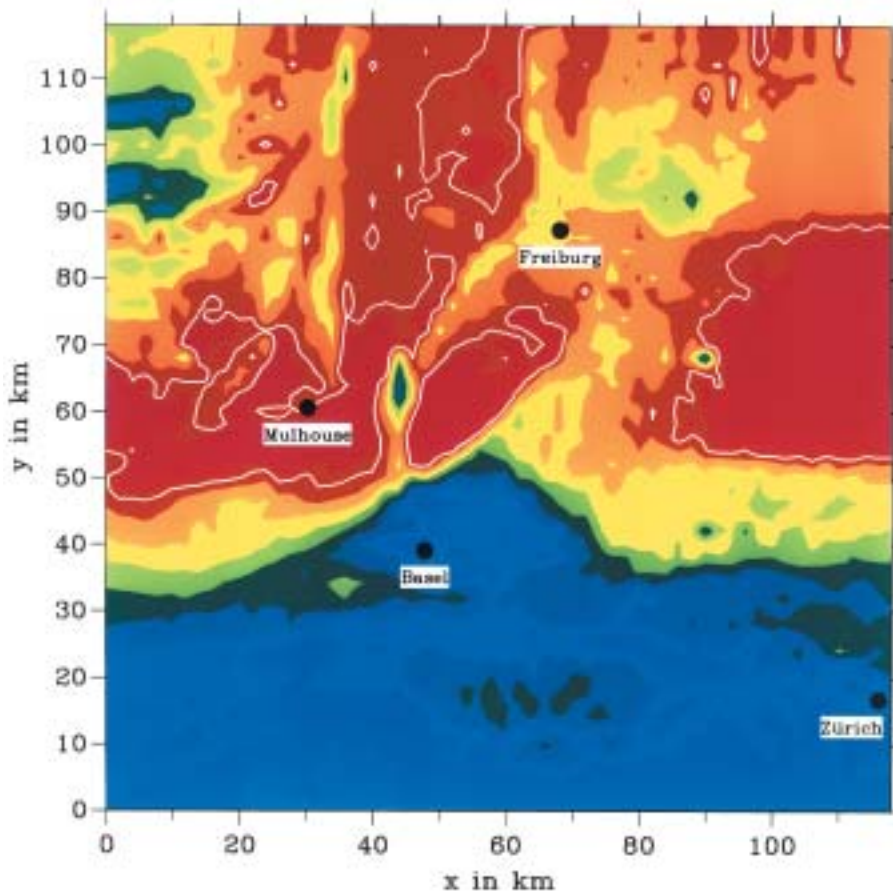


Abb. 12-7:

Horizontalverteilung der Ozonkonzentration in 18 m über Grund um 15 Uhr für den 03.08.1990. Die weißen Isolinien umschließen Gebiete mit Konzentrationen von mehr als 90 ppb.

15:00 Uhr

O₃ in ppb

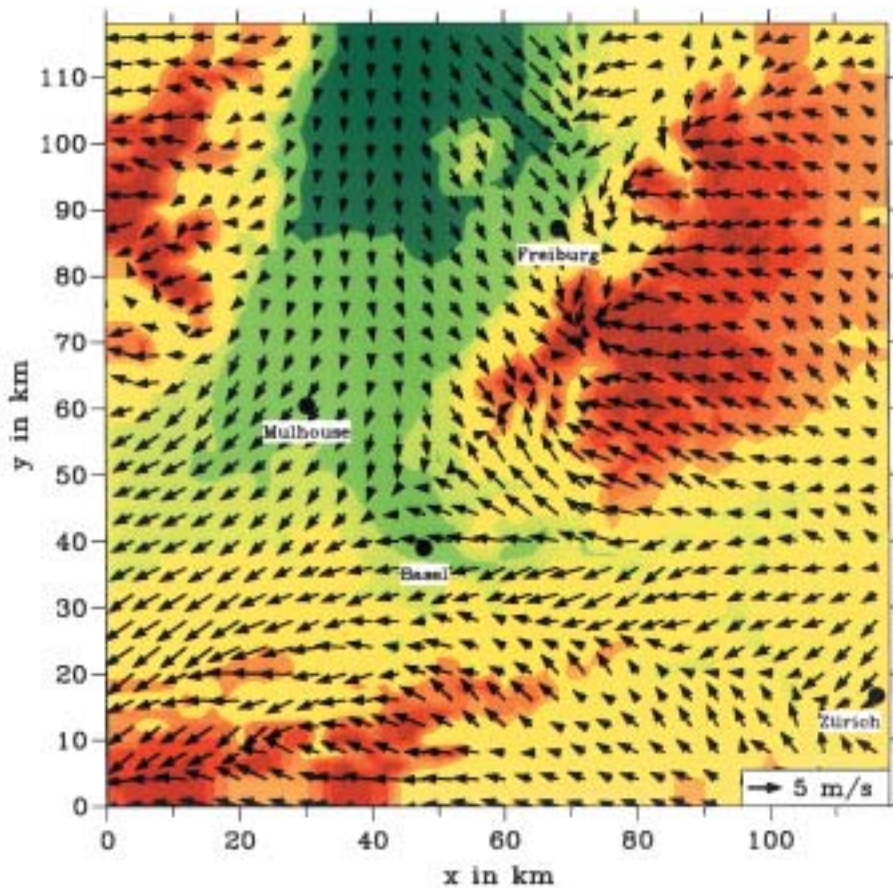
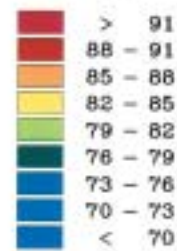
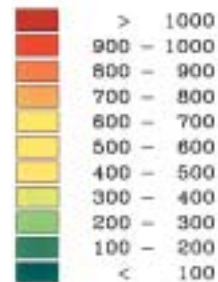


Abb. 12-8:

Horizontalverteilung der Windgeschwindigkeit in 200 m über Grund

15:00 Uhr

Höhe in m



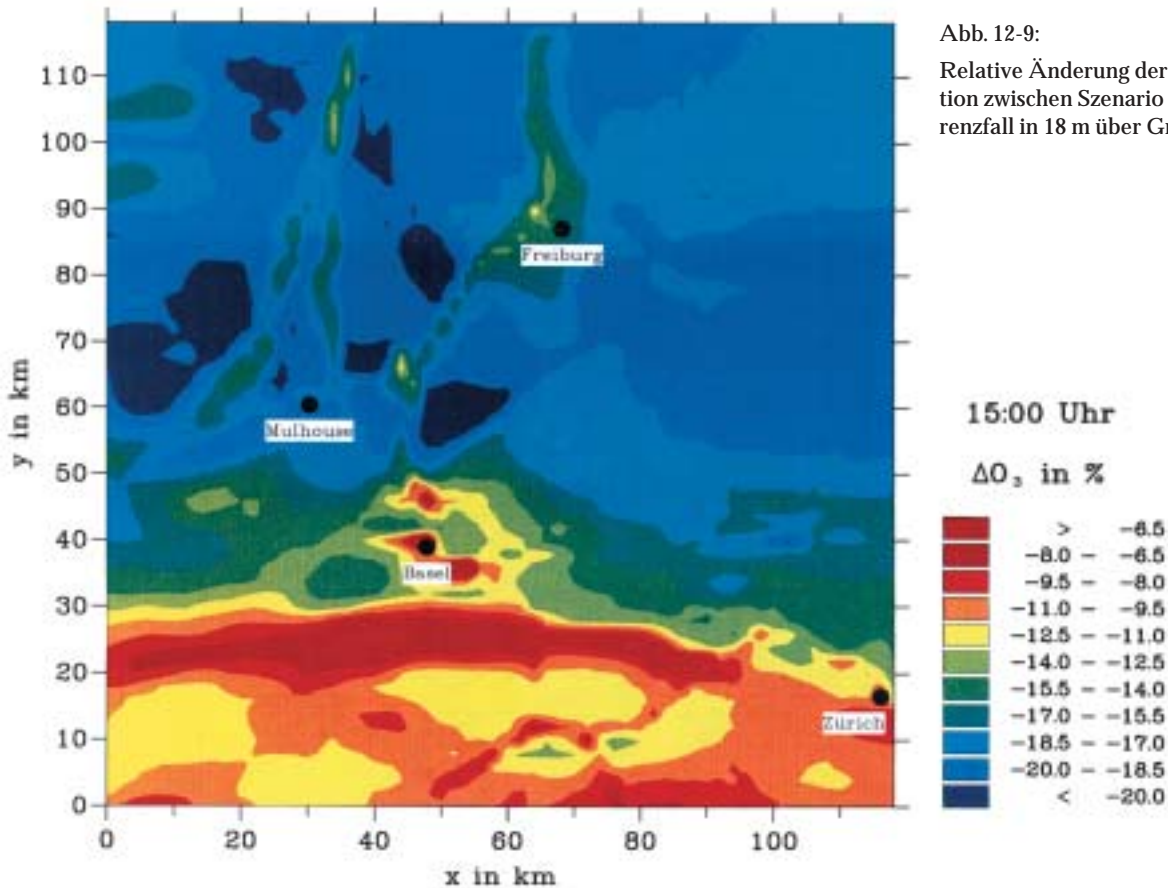


Abb. 12-9:

Relative Änderung der Ozonkonzentration zwischen Szenario M2005 und Referenzfall in 18 m über Grund um 15 Uhr.

Ozonkonzentration im südlichen Oberrheingebiet zu untersuchen, wurde eine weitere Simulation durchgeführt, bei der lediglich die anthropogenen Emissionen modifiziert wurden. Alle anderen Modellparameter wurden gegenüber dem Referenzfall unverändert beibehalten.

Da die entwickelten Szenarien Maßnahmen sind, die nicht lokal oder zeitlich beschränkt sind, kann man davon ausgehen, daß die Vorbelastung der Atmosphäre und die Belastung der herantransportierten Luftmassen geringer sein wird als beim Referenzfall. Daher wurde neben den Emissionen auch die Vorbelastung der herantransportierten Luftmassen reduziert und zwar um den gleichen Prozentsatz, wie es auch bei den Emissionen der einzelnen Stoffklassen der Fall war. Um abzuschätzen, was bei Ausnutzung sämtlicher im Jahre 1995 bereits absehbarer Minderungsmaßnahmen und zusätzlich denkbarer Maßnahmen hinsichtlich einer Minderung der Ozonkonzentration zu erreichen ist, wurde diese Simulation mit dem Szenario M2005 durchgeführt.

Mit dieser Vorgabe erhält man den in der Abbildung 12-9 dargestellten prozentualen Rückgang der Ozonkonzentration gegenüber dem Ausgangsfall. Es zeigt sich, daß die Ozonkonzentration deutlich zurück geht. Die Maximalkonzentrationen liegen jetzt unter 70 ppb. Südlich von Basel ist die Konzentration um 6 % geringer, im Bereich des Schwarzwaldes nimmt sie im Vergleich

zum Referenzfall um bis zu 20 % ab. Das beweist, daß im Falle der Realisierung der entwickelten Emissionsszenarien die Ozonkonzentration deutlich zurückgeht.

Wegen der relativ langen Lebensdauer von Ozon spielt beim Photosmog auch der Ferntransport eine wesentliche Rolle. Um die mit regionalen Modellen erzielten Ergebnisse auf ihre Verallgemeinerbarkeit bezüglich der Auswirkungen von Emissionsminderungsmaßnahmen hin zu überprüfen, ist es notwendig, auch größer-skalige Modelle einzusetzen. Mit dem EURAD Modell (Hass et al. 1993, Memmesheimer et al. 1994, Hass et al. 1995), welches für die europäische Skala entwickelt wurde, wurden neben den Auswirkungen von ad hoc Maßnahmen auch die Auswirkungen langfristiger Maßnahmen untersucht (Memmesheimer et al. 1995). Für eine Photosmogepisode, die sich vom 25. Juli bis zum 11. August 1990 erstreckte, wurden Simulationen mit drei verschiedenen Emissionsszenarien durchgeführt. Neben einem Emissionsszenario, welches dem Ausgangszustand entspricht, wurden von der PROGNOSE AG (Prognos 1995) zwei Szenarien für das Jahr 2005 erstellt. Es handelt sich dabei um großräumige Emissionsminderungsszenarien auf nationaler/europäischer Ebene, die auf den 1995 beschlossenen Maßnahmen (TREND 2005) und darüber hinausgehenden, möglichen Maßnahmen (REDUKTION 2005) basieren. Die Ergebnisse dieser Simulationen werden im weiteren als G0 (Basislauf), G1 (Lauf mit TREND 2005) und G2 (Lauf mit REDUKTION 2005) bezeichnet.

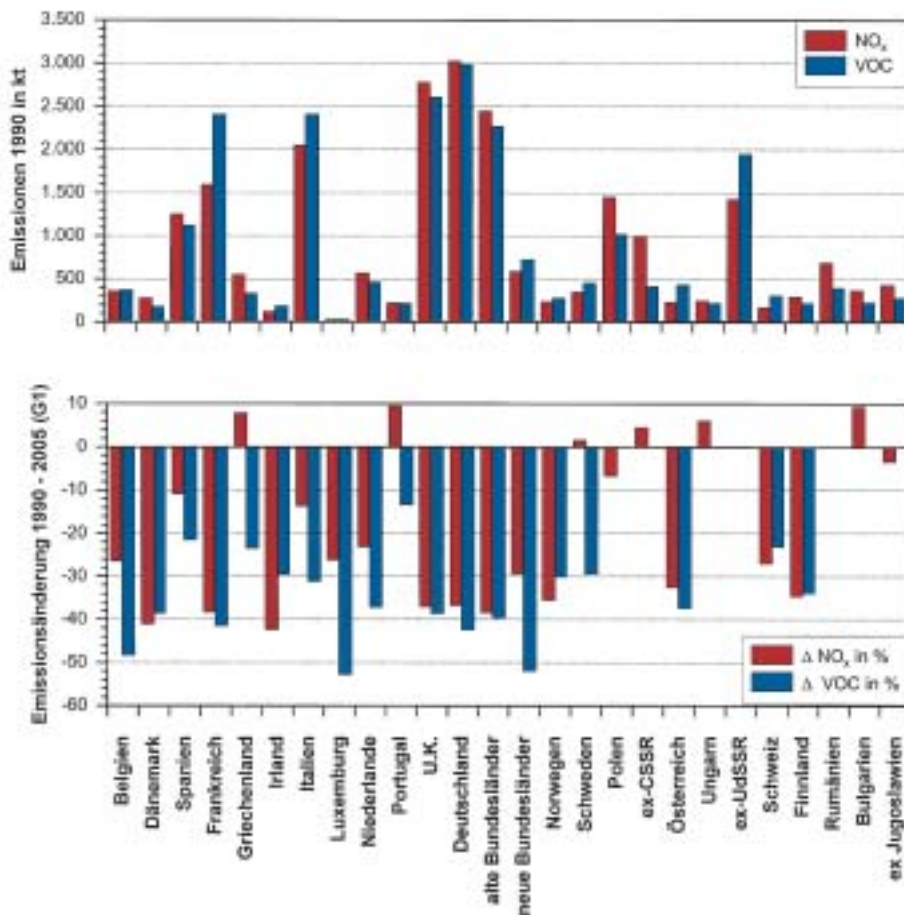


Abb. 12-10: Gesamtemission von NO_x und VOC für das Referenzjahr 1990 und prozentuale Änderung der Emissionen für das Trendszenario 2005 (G1).

Die Abbildung 12-10 zeigt aufgliedert nach einzelnen Ländern zum einen die Emissionen von Stickoxiden und flüchtigen organischen Verbindungen, die dem Basislauf zu Grunde liegen, zum anderen die relativen Änderungen der Emissionen für das Szenario TREND 2005. Es zeigt sich für den Ausgangsfall, daß Spanien, Frankreich, Italien, das Vereinigte Königreich, Deutschland, Polen und die Gemeinschaft Unabhängiger Staaten (GUS) mengenmäßig die höchsten Emissionen aufweisen.

Im Rahmen der sommerlichen Ozonepisode des Jahres 1990 (25. Juli – 11. August) werden vor allem im Westen der Bundesrepublik Deutschland, in den Benelux-Staaten, Frankreich und Großbritannien hohe Ozonwerte von mehr als 120 ppb erreicht. In Osteuropa bleiben die Ozonwerte meist unter 100 ppb, liegen also erheblich niedriger.

Die Abbildung 12-11 zeigt die Anzahl der Stunden, an denen an den Gitterpunkten der Schwellenwert der Ozonkonzentrationen von 90 ppb innerhalb der Episode (25.7.-11.8.1990) überschritten wird. Überschreitungen des Schwellenwertes von 90 ppb werden für den Westen Deutschlands, die Benelux-Staaten, Nordfrankreich und Südengland sowie für Teile Südeuropas simuliert.

Für das Szenario TREND 2005 schrumpft die Größe der Gebiete, in denen 90 ppb überschritten werden, stark. Die Überschreitungen bleiben dann auf die be-

siedelten Küstenregionen Südenglands, Italiens und Südfrankreichs beschränkt. Die relativen Änderungen, die sich für das Szenario TREND 2005 bei der Anzahl der Stunden mit Konzentrationen von mehr als 90 ppb ergeben, sind in der Abbildung 12-12 dargestellt. Im wesentlichen kommt es in allen Fällen zu einer Abnahme des Ozons. Lediglich im Bereich der Ballungszentren und ihrer Einflußzonen kann es zu einer Zunahme der Schwellenwertüberschreitungen kommen.

Eine integrale Bewertung der Maßnahmen erlaubt die Betrachtung der Gesamtsumme der Anzahl der Stunden, während der der Schwellenwert überschritten wird, für die gesamte Episode. Die entsprechenden Werte sind für die Bundesrepublik Deutschland in Abbildung 12-13 wiedergegeben. Beide Szenarien zeigen für Ozonwerte oberhalb von 40 ppb bereits eine Abnahme der Stundenzahl in Deutschland. Die Abnahme der Stundenzahl nimmt mit höheren Ozonwerten meist zu. Für 60 ppb nehmen für das Szenario TREND 2005 die Überschreitungshäufigkeiten um 33%, für REDUKTION 2005 um 67% ab, für 90 ppb betragen diese Werte 73% bzw. 94%.

4 Zusammenfassung

Numerische Simulationsmodelle sind das einzige verfügbare Werkzeug für die Bewertung von effizienten Minderungsstrategien. Hinsichtlich der Verminderung hoher sommerlicher Ozonkonzentrationen sind verschiedene

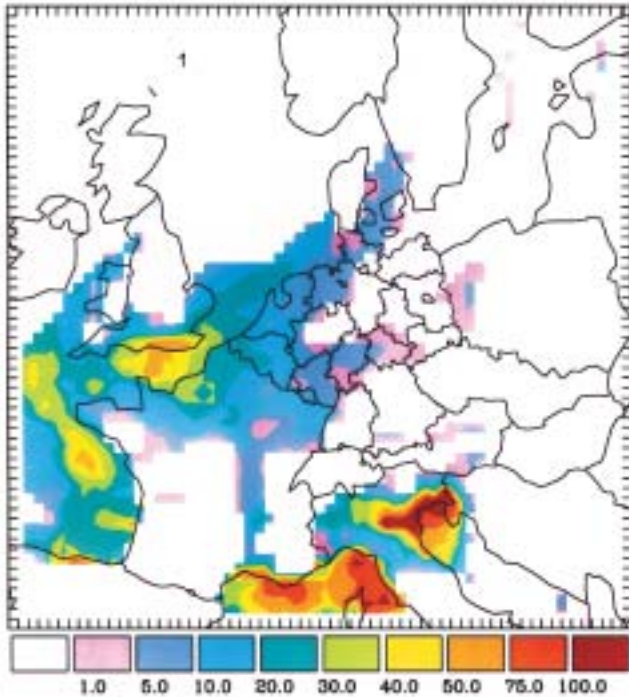


Abb. 12-11:
Anzahl der Stunden, an denen die Ozonkonzentration den Wert von 90 ppb während der Episode (25. Juli - 11. August 1990) überschreitet (Basislauf).

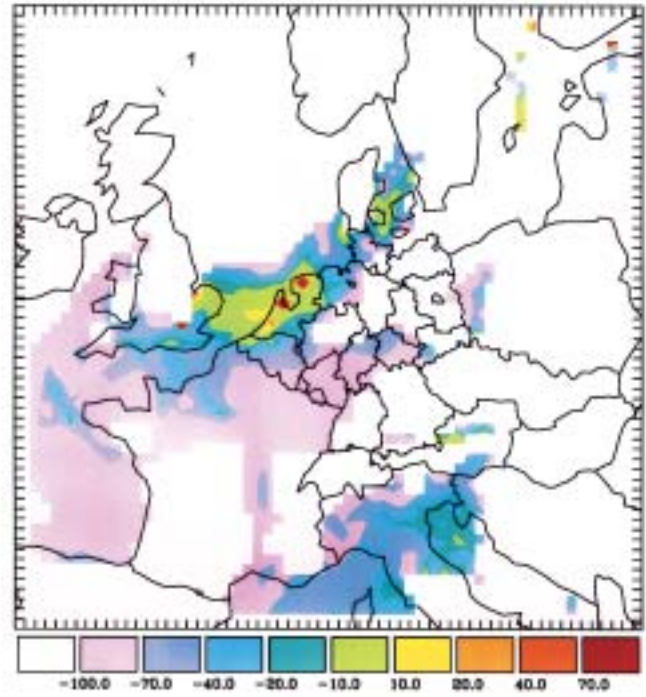


Abb. 12-12:
Relative Änderung der Gitterstunden in % für einen Ozonwert von 90 ppb bei Vorgabe des Szenarios G1.

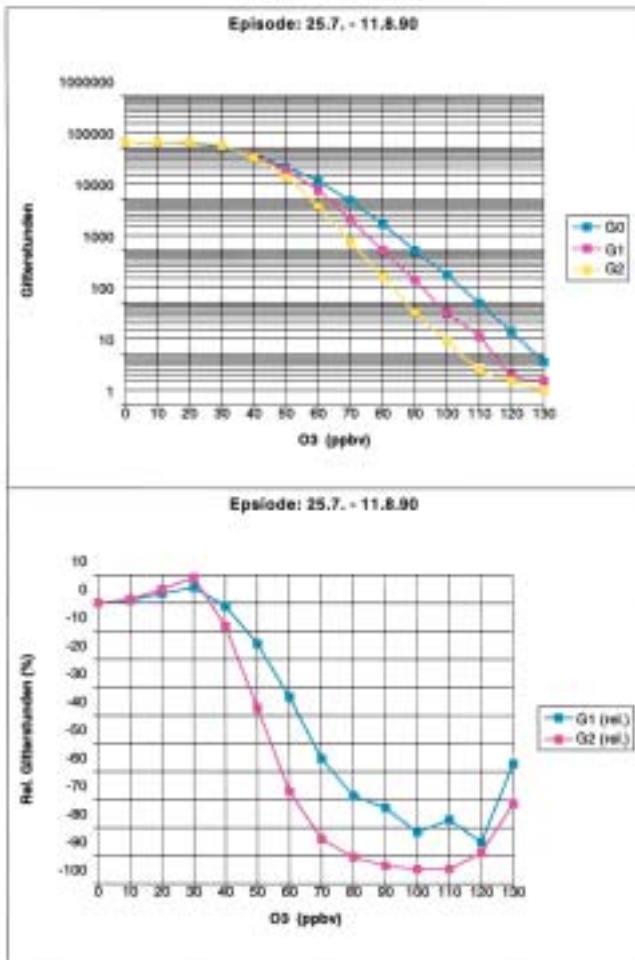


Abb. 12-13:
Summe der Stunden an allen Gitterpunkten, an denen in Deutschland ein bestimmter Ozonwert überschritten wird (oben) und prozentuale Änderung der Anzahlstunden bei Vorgabe der Szenarien G1 und G2 (unten).

Möglichkeiten der Reduktion von Emissionen der Vorläufersubstanzen denkbar. Als wenig wirksam haben sich, wie durch experimentelle Untersuchungen als auch durch numerische Simulationen gezeigt wurde, kleinräumige Maßnahmen erwiesen. Kleinräumige Emissionsminderungen führen im allgemeinen im Quellgebiet eher zu einer Erhöhung der Ozonkonzentration. Auch großräumige kurzzeitige Minderungsmaßnahmen, die erst dann greifen, wenn bestimmte Schwellenwerte für die Ozonkonzentration überschritten sind, erweisen sich als wenig wirkungsvoll. Solche Maßnahmen, zu denen Fahrverbote und Geschwindigkeitsbeschränkungen zählen, führen nur zu relativ geringen Rückgängen der Emissionen von Vorläufersubstanzen. Hinzu kommt, daß die meisten Ozonepisoden nicht länger als 2-3 Tage andauern. Dieser Zeitraum entspricht der Lebensdauer von Ozon in der Grenzschicht. Bereits bestehende hohe Ozonkonzentrationen klingen selbst bei ei-

nem kräftigen Rückgang der Emissionen nur langsam ab. Dieses Verhalten zeigt sich sowohl in den Beobachtungen als auch in den Ergebnissen numerischer Simulationen. Als einzig sinnvolle und wirksame Minderungsmaßnahme haben sich großräumige und dauerhafte Minderungsmaßnahmen erwiesen. Diese Maßnahmen haben zudem den Vorteil, daß sie zu einer permanenten Reduktion von Stickoxiden und von flüchtigen organischen Verbindungen und als Folge auch von Ozon führen und somit die Umwelt entlasten. Sowohl für Teilgebiete von Deutschland als auch für Europa konnte gezeigt werden, daß das Auftreten von Photosmogepisoden bezogen auf die Zeiträume 1990 – 2005 eine deutlich rückläufige Tendenz aufweisen sollte. So bleibt zu hoffen, daß die für Europa und für Deutschland prognostizierten Emissionsrückgänge tatsächlich eintreten.

Literatur

- GRABE, F., 1995: Die Auswirkungen geänderter Emissionsverhältnisse an Wochenenden auf die Ozonverteilung: Beobachtungen und numerische Simulationen. Diplomarbeit, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Universität Karlsruhe.
- HASS, H., A. EBEL, H. FELDMANN, H.J. JAKOBS, M. MEMMESHEIMER, 1993: Evaluation studies with a regional chemical transport model (EURAD) using air quality data from the EMEP monitoring network. *Atmos. Environm.*, 27A, 867-887.
- HASS, H., H.J. JAKOBS, M. MEMMESHEIMER, 1995: Analysis of a regional model (EURAD) near surface gas concentration predictions using observations from networks. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 57, 173-200.
- MEMMESHEIMER, M., H. JAKOBS, G. PIEKORZ, A. EBEL, H. HASS, 1995: Großräumige Ozon-Modellrechnungen mit verschiedenen Emissionsminderungsszenarien mit Hilfe des Modellsystems EURAD. Abschlußbericht zum Teilvorhaben A-5: Großräumige Ozon-Ausbreitungsrechnungen, FE-Vorhaben 104 02 812/01, „Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon“ des Umweltbundesamtes, Köln.
- MEMMESHEIMER, M., H. HASS, H.J. JAKOBS, A. EBEL: Simulation of a photo-smog episode in summer 1990, EUROTRAC Symposium '94, (Hrsg. P.M. Borrell et al.), 858-861, SPB Academic Publishing bv, 1994.
- NESTER, K., H.-J. PANITZ, F. FIEDLER, 1995: Comparison of the DRAIS and EURAD Model Simulations of Air Pollution in a Mesoscale Area. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 57, 135-158.
- OBERMEIER, A., R. FRIEDRICH, C. JOHN, J. SEIER, H. VOGEL, F. FIEDLER, B. VOGEL, 1995: Photosmog, Möglichkeiten und Strategien zur Emissionsminderung, Ecomed, Landsberg, Germany.
- OBERMEIER, A., R. FRIEDRICH, C. JOHN, J. SEIER, H. VOGEL, F. FIEDLER, B. VOGEL, 1997: Ozonproblematik im südlichen Oberrheingraben: Emissionen, Minderungsszenarien und Immissionen. Forschungsbericht FZK-PEF162. Projekt Europäisches Forschungszentrum für Maßnahmen zur Luftreinhaltung im Forschungszentrum Karlsruhe.
- PROGNOS 1995: Aktionsprogramm und Maßnahmenplan Ozon, Zwischenbericht zum 3.3.1995. Untersuchung im Auftrag des Umweltbundesamtes, F&E-Vorhaben 104 02 812/01, Berlin/Basel.
- UMWELTMINISTERIUM Baden-Württemberg, 1995: Ozonversuch Neckarsulm/Heilbronn, Band II., Schlußbericht zu den wissenschaftlichen Auswertungen des Ozonversuchs, Stuttgart.
- VOGEL, B., F. FIEDLER, H. VOGEL, 1995: Influence of topography and biogenic volatile organic compounds emission in the state of Baden-Württemberg on ozone concentrations during episodes of high air temperatures, *J. Geophys. Res.*, 100, 22907-22928.
- VOGEL, H., F. FIEDLER, B. VOGEL, 1996: Auswirkungen von verschiedenen Emissionsminderungsmaßnahmen auf die Ozonbildung im südlichen Oberrheingraben. Forschungszentrum Karlsruhe, FZKA-PEF 142 Seiten, 243-53.

13 Erfordernisse für eine operationelle Ozonprognose und gegenwärtiger Stand

1 Einleitung – Erfordernisse für eine operationelle Ozonprognose

Die Ozonspitzenwerte nehmen in Europa ab, – wie in Kapitel 6 dargestellt –, während die mittlere Belastung weiter wächst. Zugleich sind sich alle Experten einig, daß kurzfristige Maßnahmen (siehe Kapitel 12) nicht geeignet sind, um hohen Ozonkonzentrationen entgegenzuwirken. Daher gibt es auch für das 1999 ausgefallene Sommersmoggesetz in Deutschland keine Nachfolgeregelung.

Eine Ozonprognose, so die eindeutige Botschaft der Vertreter der EU und der Europäischen Umweltagentur (European Environmental Agency – EEA) auf dem vom Deutschen Wetterdienst veranstalteten EUMETNET Workshop on Ground-level Ozone Forecasting in Langen (21. – 23. Februar 2000), wird jedoch weiterhin zur Information der Bevölkerung erforderlich sein. Zugleich werden operationelle Modellsysteme benötigt, um:

- langfristige Belastungen zu ermitteln (z.B. Einträge in Ökosysteme),
- Auswirkungen von Emissionsänderungen vorausschauend zu berechnen,
- Konzentrationen weiterer Luftverunreinigungen kurz- und langfristig zu berechnen.

Beide Aufgaben, die kurzfristige, zeitkritische Schadstoffprognose, wie auch die Ermittlung von langfristigen Auswirkungen oder die Durchführung von Szenarienrechnungen erfordern Modellsysteme, an die besondere Anforderungen (siehe Kapitel 9) zu stellen sind.

Die Forderungen an operationelle Modellsysteme lassen sich wie folgt zusammenfassen.

- Sie müssen in kurzer Zeit Ergebnisse liefern. Die Mindestanforderung an eine operationelle Ozonprognose ist, daß am Nachmittag die Prognoseergebnisse für den Folgetag vorliegen. Bei Szenarienrechnungen sind oft eine Vielzahl von Modellrechnungen erforderlich, und für die Ermittlung von langfristigen Belastungen sind Monate bis Jahre zu simulieren.
- Die Modelle müssen für eine Vielzahl von Wetterlagen getestet sein. Nach Möglichkeit soll der Anwendung eine ausgedehnte prä-operationelle Testphase vorausgegangen sein.
- Ein operationell eingesetztes Modellsystem muß mit einer Routineevaluierung, die Routinemessungen verwendet, verknüpft sein.
- Die routinemäßige Versorgung mit Eingabedaten (meteorologische Daten und bei deterministischen

Modellen auch Emissionsdaten) muß sichergestellt sein.

- Durch ausgedehnte prä-operationelle Tests muß sichergestellt werden, daß nicht nur einzelne Extremwerte sondern auch Mittelwerte und andere statistische Maßzahlen sicher simuliert werden.

Diese Forderungen lassen sich so zusammenfassen, daß ausreichend getestete und schnelle Modellsysteme benötigt werden, deren Datenversorgung (Meteorologie, Emissionen, Meßdaten) sichergestellt und automatisiert ist. Damit besteht ein ganz ähnliches Anforderungsprofil wie bei der numerischen Wettervorhersage.

Die chemische Ausbreitungsprognose ist jedoch wesentlich aufwendiger. Während bei der numerischen Wettervorhersage typischerweise weniger als zehn Größen vorhergesagt werden (Windkomponenten, Temperatur, Druck, Feuchteparameter), erfordern moderne chemische Reaktionsmechanismen (wie z.B. RADM2, Stockwell et al. 1990) die Integration von 40, 50 oder mehr Konzentrationsgleichungen, die zudem wegen zum Teil schneller Reaktionszeiten mit aufwendigen numerischen Verfahren behandelt werden müssen. Als Konsequenz kommt kaum ein operationelles Modellsystem für die chemische Ausbreitungsrechnung ohne Modellvereinfachungen aus.

Die radikalste Lösung ist es, statische Modelle zu verwenden (z.B. Bel et al. 1999), die oft nur die gemessene Ozonkonzentrationen und die vorhergesagte Maximaltemperatur berücksichtigen. Modelle dieses Typs sind weit verbreitet (siehe u.a. EEA 1997).

Der Einsatz vereinfachter Chemiemechanismen in deterministischen Modellsystemen ist rückläufig. Häufiger werden meteorologische Vereinfachungen vorgenommen:

- Berechnung der Schadstoffverteilung entlang einer Trajektorie,
- Verringerung der Vertikalauflösung (z.B. nur eine Schicht vom Boden bis zur Obergrenze der Mischungsschicht),
- Verringerung der Horizontalauflösung im Vergleich zum meteorologischen Vorhersagemodell.

2 Statistische Modelle

Statistische Modelle werden, wie die Erhebung der Europäischen Umweltagentur zeigt (EEA 1997) und wie es auch aus den Vorträge beim EUMETNET

Workshop on Ground-level Ozone Forecasting (Langen, 21.–23. Februar 2000) hervorgeht, sehr häufig und auch mit einigem Erfolg für die Ozonprognose eingesetzt. Obwohl sie in der Regel mit einem minimalen Dateninput auskommen (gemessene Ozonmaxima, Tageshöchsttemperatur und evtl. noch Windrichtung und -geschwindigkeit) erzielen sie zur Zeit noch eine ähnliche Vorhersagegenauigkeit wie deterministische Modelle. Durch jahreszeitenabhängige Koeffizienten kann selbst das Ozonmaximum im Frühjahr simuliert werden. Besonders häufig werden Modelle dieses Typs für die Vorhersage in Ballungsräumen angewandt (Lyon, Oberitalien) aber auch für Länder wie Belgien und (vom Umweltbundesamt) für ganz Deutschland (siehe Internet-Seiten I4 und I7 – Adressen am Ende der Artikels).

Da statistische Modelle aus den gemessenen Beobachtungen lernen, können sie diese (im Rahmen der Korrelationen mit den Eingangsparametern, wie z.B. der Maximumtemperatur) bestmöglich umsetzen. Damit gelten die so gewonnenen Ergebnisse zunächst nur für die einzelnen Meßstationen. Die Analyse zeigt jedoch, daß die Meßwerte in vielen Fällen stark von örtlichen Gegebenheiten beeinflusst werden und daher oft nur für eine kleine Umgebung repräsentativ sind. Aus der in Abb. 13-1 dargestellten Auswertung für die Meßstationen des Bundes und der Länder ergibt sich, daß die räumliche Korrelation an ländlichen Stationen zur Zeit des Ozonmaximums am besten ist. Nachts und an verkehrsnahen Standorten sind die Korrelationslängen deutlich kleiner. Für eine Flächendarstellung müssen die jeweiligen Stationscharakteristiken berücksichtigt werden. Wegen der besonders nachts ausgeprägten starken Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten werden statistische Modelle auch nur zur Vorhersage der täglichen Ozonmaxima eingesetzt.

Da statistische Modelle zudem keine physikalisch-chemische Erklärung liefern, sind sie für die Aufgabe, die Auswirkungen von Emissionsminderungen vorherzusagen oder den Eintrag in Ökosysteme zu berechnen, nicht geeignet.

3 Deterministische Modelle

Bei deterministischen Modellen werden der Transport, die chemischen Reaktionen und die Deposition berechnet. Alle Modelle dieser Typenklasse benötigen daher möglichst aktuelle Emissionsdaten – im Idealfall sogar Emissionsprognosen, die schadstofffreisetzende menschliche Aktivitäten in Abhängigkeit von der meteorologischen Situation (oder sogar der Wettervorhersage) berücksichtigen. Da Ozon als sekundäre Luftbeimengung aus den primären Emissionen mit unterschiedlich langen Reaktionszeiten gebildet wird, spielt der Transport eine wesentliche Rolle. Daher werden bei Eulerschen Modellen (siehe Abschnitte 3.2 und 3.3) seitliche Randbedingungen benötigt, und die Verfrachtungswege in Trajektorien-Box-Modellen (siehe

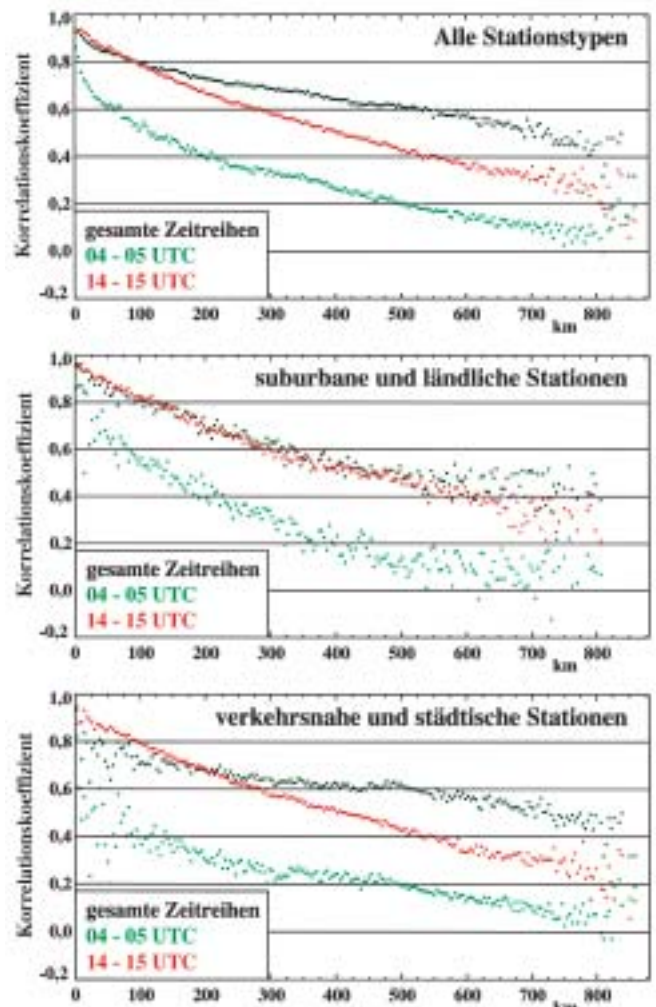


Abb. 13-1: Korrelation zwischen den an deutschen Stationen gemessenen Ozonkonzentrationen als Funktion des Stationsabstandes unterteilt nach Stationstypen und Beobachtungszeit.

Abschnitt 3.1) müssen ausreichend lang gewählt werden. Dies wirkt sich vor allem auf Vorhersagen für kleinere Gebiete (z.B. Ballungsräume) aus. Sie benötigen Randwerte aus größerskaligen Modellen. Daher werden für diese Aufgabenstellung noch vielfach statistische Modelle verwendet. Eulersche Modelle benötigen zusätzlich Anfangsfelder für die chemischen Luftbeimengungen. Diese werden meistens durch die Vorhersagen der vorausgegangenen Tage bereitgestellt, zumal die Emissionen zusammen mit der Modellchemie einen starken Antrieb für sie darstellen.

3.1 Trajektorien-Box-Modelle

Trajektorien-Box-Modelle sind seit langem ein beliebter Modelltyp, weil sie mit vergleichsweise geringem Rechenaufwand auskommen. Zunächst werden Rückwärtstrajektorien, ausgehend von Rezeptorpunkten (z.B. Meßstationen), berechnet. Anschließend, auf dem

Wege zurück – vom Trajektorienendpunkt zum Rezeptorpunkt – werden die Emissionen, chemische Reaktionen und Ablagerungsmechanismen (trockene und nasse Deposition) entlang den Trajektorien berücksichtigt. Bei Trajektorien-Box-Modelle werden also die folgenden Grundannahmen hinsichtlich der vertikalen und horizontalen Struktur und der meteorologischen Prozesse gemacht:

- a) Vertikal: Der Transport findet in einer vollständig durchmischten Schicht (Mischungsschicht) statt.
- b) Horizontal: Divergenzen und Diffusenzen sowie der turbulente horizontale Austausch können vernachlässigt werden.

Ein Trajektorien-Box-Modell wird u.a. in Großbritannien zur Ozonvorhersage verwendet (siehe I3 sowie Stedman und Willis 1996). In Frankreich wird es zur Gewinnung von Randwerten für die Ozonprognose im Ballungsraum Paris genutzt (siehe I6)

3.2 Eulersche Modelle für die Mischungsschicht

Die Eulerschen Modelle für die Mischungsschicht verzichten auf die zweite einschränkende Annahme (b) der Trajektorien-Box-Modelle. Bei ihnen wird (wie in den Trajektorien-Box-Modellen) der Horizontaltransport mit einem repräsentativen Wind in der Mischungsschicht berechnet. Die Annahme (a) über die vollständige vertikale Durchmischung bleibt jedoch bestehen. In der Regel werden diese Modelle (wie auch die Trajektorien-Box-Modelle) als Zwei- oder Drei-Schichten-Modelle betrieben. Da die Mischungsschicht im Laufe des Tages ihre Mächtigkeit ändert (starkes Anwachsen nach Sonnenaufgang und Zusammenbruch bei Sonnenuntergang), liegt über der Mischungsschicht eine Reservoirschicht, in der die tagsüber emittierten oder gebildeten chemischen Spezies während der Nacht weiter transportiert werden, um beim erneuten Anwachsen der Mischungsschicht am Folgetag wieder in die Mischungsschicht aufgenommen zu werden. Anders als in Trajektorien-Box-Modellen erfolgt der Horizontaltransport mit einem für diese Schicht ermittelten Windvektor. Damit kann die Windscherung wenigstens grob berücksichtigt werden. Das ist besonders wichtig für die Nacht, wenn die Mischungsschicht und die Reservoirschicht weitgehend entkoppelt sind und sich folglich ein Low Level Jet ausbilden kann. Die freie Troposphäre wird durch eine Schicht mit vorgegebenen, konstanten Randwerten abgebildet.

Dieser Modelltyp, der seine Rechenzeitökonomie aus einer geringen Vertikalauflösung gewinnt, benötigt daher repräsentative Horizontalwinde und eine explizite Vorgabe der Mischungsschichthöhe. Windscherungen innerhalb der Schichten sowie Konzentrationsgradienten können nicht berücksichtigt werden. Dem liegt die Annahme zugrunde, daß hohe Ozonkonzentrationen vor allem bei Wetterlagen mit hochsommerlichen Temperaturen und starkem turbulentem Austausch auf-

treten. Ein weiteres Problem liegt in der Ableitung der Mischungsschichthöhe aus den Ergebnissen der numerischen Wettervorhersagemodelle.

Trotz dieser erheblichen Einschränkungen liefern auch Modelle dieses Typs (z.B. REM3, Flemming et al. 1998 und 2000; Reimer et al. 2000; Stern 1997) brauchbare Ergebnisse.

3.3 Eulersche Mehrschichtenmodelle

Die Atmosphäre mit allen relevanten Prozessen möglichst genau zu modellieren, war und ist der grundlegende Ansatzpunkt der numerischen Wettervorhersage. Daß er sich bewährt hat, zeigt die kontinuierlich gewachsene Vorhersagegüte. Die Befreiung von einschränkenden Annahmen wie der Übergang vom barotropen zum baroklinen Modell und später die Berücksichtigung der Feuchte hat die Vorhersagegüte entscheidend verbessert. Daher sind auch für die chemische Ausbreitungsrechnung Chemie-Transport-Modelle mit einer angemessenen Beschreibung der chemischen Prozesse und der möglichst vollständigen Berücksichtigung der meteorologisch-physikalischen Prozesse die erste Wahl. Wegen der erheblichen Anforderungen durch eine große Zahl zusätzlicher Prognosegleichungen für die chemischen Spezies muß jedoch die horizontale Maschenweite verglichen mit der numerischen Wettervorhersage um einen Faktor zwei bis drei vergrößert werden, um eine operationelle Vorhersage zu ermöglichen. Im Falle des im Abschnitt 5.1 ausführlicher dargestellten Modellsystems des TFS-Netzwerks heißt das, daß statt der Maschenweite von rund 7 km des operationellen Lokal-Modells (LM) des DWD mit einer Maschenweite von 21 km gerechnet werden muß.

4 Modellsysteme in Europa

An verschiedenen Stellen in Europa sind in den vergangenen Jahren operationelle Modellsysteme für die chemische Ausbreitungsrechnung und dabei vor allem für die Ozonprognose aufgebaut worden. Dabei haben vor allem die skandinavischen Länder eine Vorreiterrolle übernommen.

Ausgehend von ihren Aktivitäten im Rahmen von UNECE-EMEP (Economic Commission for Europe des UN – Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe) haben der norwegische Wetterdienst (DNMI) und das norwegische Forschungsinstitut für Luftreinhaltung (NILU) ein Modellsystem aufgebaut, das ein Box-Modell, ein Trajektorien-Modell und ein Eulersches Ausbreitungsmodell umfaßt (siehe I1, Flatøy et al. 1995, 1996, 2000 sowie Flatøy und Hov 1997).

Die Ozonprognose mit dem Ausbreitungsmodell MATCH (Robertson et al. 1999) ist nur ein Teil des vom schwedischen Wetterdienst (SMHI) für die Umweltbehörde des Landes entwickelten Baltic HOME Projekts (siehe I2). Das Modellsystem wurde entwickelt, um Konzentrationen, Depositionen und die Einträge

von Luftschadstoffen in Flüsse sowie die Ost- und Nordsee zu berechnen.

In Frankreich kooperiert Météo France mit AIRPARIF (siehe I6). Das Modellsystem MOGAGE, das Météo France entwickelt, soll verschiedene Skalen vom Globalen bis zu einer regionalen Auflösung von 2 bis 0,25 Grad abdecken und für die Prognose wie auch klimatologische Untersuchungen unter Einschluß der Stratosphäre verwendet werden. AIRPARIF konzentriert sich auf den Ballungsraum Paris und verwendet sowohl ein Multi-Box-Modell wie ein Eulersches Modell, die beide von einem Trajektorien-Box-Modell mit Randwerten versorgt werden.

Noch einen Schritt weiter geht das vom dänischen Umweltforschungsinstitution (National Environmental Research Institution – NERI) entwickelte Modellsystem DMU-ATMI-THOR, bei dem an das Eulersche Modell (DEM) durch ein Modell für die Simulation der Strömung und Ausbreitung von Luftbeimengungen in Straßen (OSPM – Operational Street Pollution Model) angeschlossen ist (siehe I8 und Brandt et al. 2000 und 2001 a - c). OSPM berechnet die induzierten Strömungen (z.B. Rotationswirbel) in Straßenschluchten und, ausgehend von den Verkehrsemissionen in den Straßen und den eingemischten Luftverunreinigungen über den Dächern, Konzentrationsverteilungen in den Straßen. Damit können auch die dort vorgenommenen Messungen besser interpretiert werden.

5 Modellsysteme in Deutschland

Vom deutschen Umweltbundesamt sowie den Umweltämtern der Länder werden zur Zeit operationell ausschließlich verschiedene Typen von statistischen Modellen eingesetzt (siehe I7).

An der Freien Universität Berlin wird an der Verknüpfung der Ergebnisse des Eulerschen Drei-Schichten-Modells REM3 mit statistischen Ansätzen (fuzzy- und neuro-fuzzy-Verfahren) gearbeitet (Flemming et al. 1998 und 2000, Reimer et al. 2000, Stern 1997).

Die TFS-Modell-Netzwerk-Gruppe (siehe Abschnitte 5.1 und 5.2) hat sich zum Ziel gesetzt, ein komplexes, vertikal hochauflösendes Modellsystem zu entwickeln.

5.1 Das TFS-Modell-Netzwerk

Im Rahmen des Förderschwerpunktes Troposphärenforschung (TFS) des BMBF war es das Ziel der Kooperationspartner: den Universitäten Karlsruhe (IMK), Köln (IGM), Stuttgart (IER) sowie des DWD aus vorhandenen und neu zu erstellenden Modellen ein möglichst vollständiges Modellsystem (siehe Abb. 13-2) für die chemische Ausbreitungsrechnung zu entwickeln und in einer mehrmonatigen Anwendung seine praktische Einsatzfähigkeit unter operationellen Bedingungen nachzuweisen.

Grundsätzlich besteht jedes Modellsystem für die chemische Ausbreitungsrechnung aus den folgenden Bestandteilen:

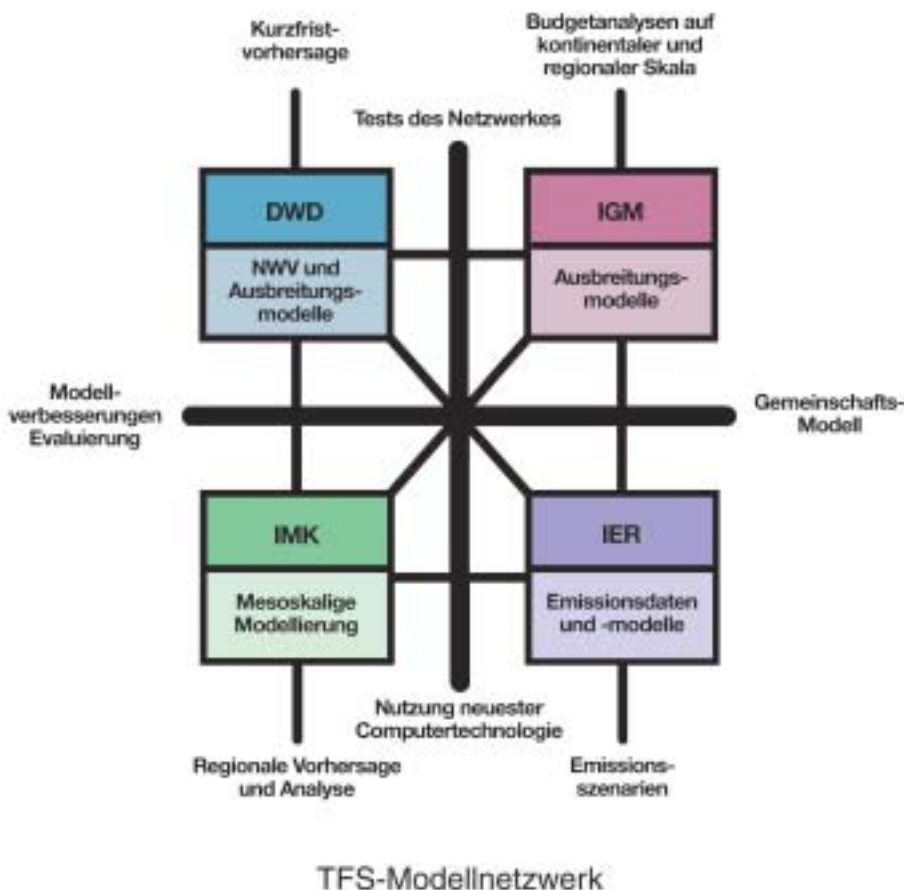


Abb. 13-2:

TFS-Modellnetzwerk und Aufgaben der einzelnen Kooperationspartner
DWD: Deutscher Wetterdienst, Offenbach,
IMK: Universität Karlsruhe/ Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Meteorologie und Klimaforschung,
IGM: Universität zu Köln, Institut für Geophysik und Meteorologie,
IER: Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

- ein Modell für die Vorhersage der meteorologischen Parameter, d.h. ein numerisches Wettervorhersagemodell (NWV),
- ein Modell für die Vorhersage der Emissionen und
- ein Chemie-Transport-Modell (CTM).

Die konsequenteste Lösung ist, alle Modellteile in einem Modell (einem sog. on-line-Modell) zusammenzufassen und damit die meteorologische Information zu jedem Zeitschritt an den Chemieteil weiterzugeben. Das sollte auf jeden Fall immer dann geschehen, wenn bei hoher Auflösung konvektive Prozesse direkt simuliert werden. Bei größeren Maschenweiten und einer parametrisierten Konvektion reicht jedoch eine off-line-Kopplung der Modelle aus, bei der zunächst die meteorologische Vorhersage durchgeführt und deren Ergebnisse in festen Zeitabständen (z.B. einer Stunde) an das Chemie-Transport-Modell weitergegeben werden. Diese off-line-Kopplung wurde auch beim TFS-Netzwerk-Modellsystem verwirklicht:

- Der DWD steuerte sein Lokal-Modell (LM), (Doms und Schättler 1999) bei,
- das Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendungen (IER) der Universität Stuttgart entwickelte das Emissionsmodell CAREAIR-ECM, (Friedrich et al. 1999),

- die EURAD-Gruppe der Universität zu Köln stellte das EURAD-CTM zur Verfügung (Ebel et al. 1997; Hass 1991) und
- das Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) der Universität Karlsruhe/Forschungszentrum Karlsruhe adaptierte sein gekoppeltes Modell KAMM/DRAIS für kleinräumige, hochauflösende Rechnungen (Nester et al. 1998).

Die off-line-Kopplung über Datentransfers gibt zwar größere Freiheiten für die Ausgestaltung der einzelnen Modelle. Dennoch ist es erforderlich, wesentliche Basisgrößen zu vereinheitlichen. Dazu gehören neben dem Gitternetz vor allem die Landnutzungsparameter, weil diese im meteorologischen und im chemischen Modell den Austausch mit dem Boden und der Vegetation sowie die turbulenten Transporte in der atmosphärischen Grenzschicht maßgeblich bestimmen. Es muß sichergestellt werden, daß die Deposition von chemischen Spezies und auch die biogenen Emissionen konsistent mit dem Impuls-, Wärme- und Feuchtetransfer im meteorologischen Modell sind. Die dafür erforderlichen Landnutzungsdaten wurden vom Institut für Umweltforschung (IFU) der Fraunhofer Gesellschaft in Garmisch-Partenkirchen bereitgestellt.

Der im Sommer 1999 erreichte Stand (siehe Reißmann et al. 1999) weicht noch etwas von der Idealvorstellung

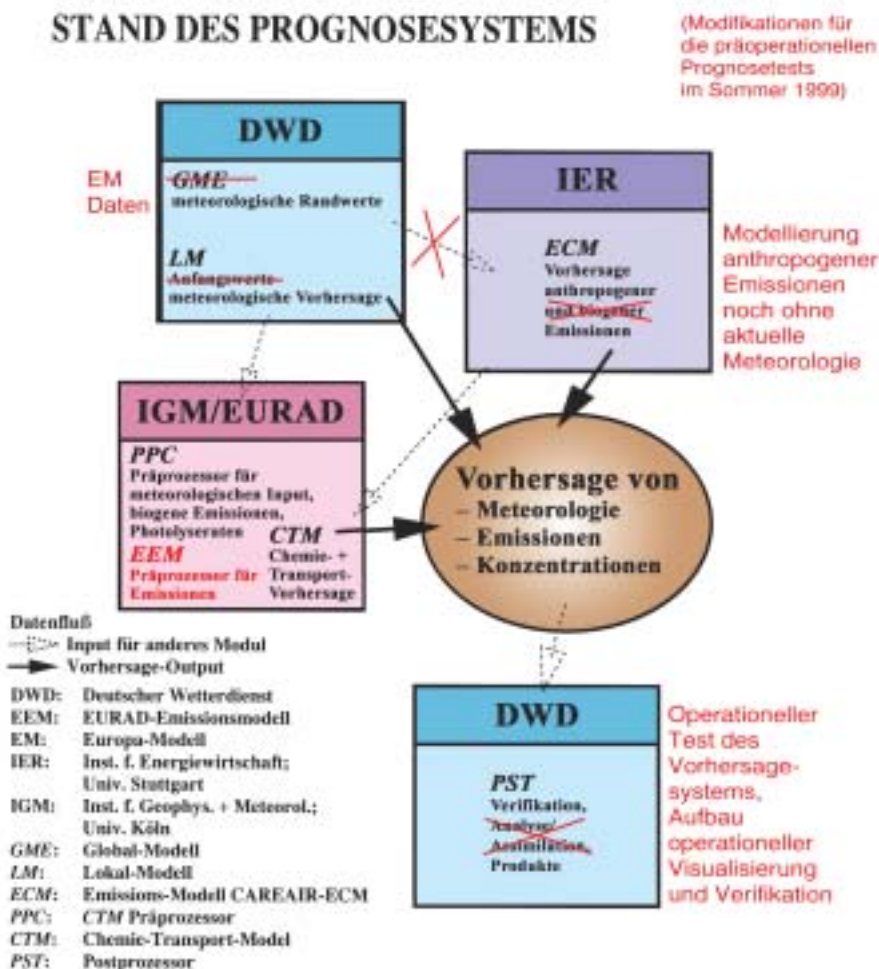


Abb. 13-3:
TFS-Prognosesystem:
Zielvorstellung und Realisierung für die präoperationelle Anwendung im Sommer 1999

ab. Wie in der Abb. 13-3 veranschaulicht, wurden die anthropogenen Emissionen mit Klimawerten anstelle der vorhergesagten Meteorologie und die biogenen Emissionen in einem eigenen Präprozessor berechnet.

Eine deutliche Schwäche der chemischen Ausbreitungsrechnung ist, daß noch keine operationell einsatzfähigen Verfahren zur Datenassimilation für chemische Luftbeimengungen zur Verfügung stehen. In der numerischen Wettervorhersage ist die Datenassimilation ein qualitätsbestimmender Schritt. Für chemische Luftbeimengungen fehlt jedoch auch ein der Meteorologie vergleichbares, auf die Unterstützung von Modellrechnungen ausgelegtes Meßnetz (siehe Kapitel 15). Als Anfangsfelder dienen daher die Vorhersagen der vorausgegangenen Tage. Da die Emissionen zusammen mit der Modellchemie einen starken Antrieb darstellen, kommt diesen somit eine erhebliche Bedeutung zu. Die Entwicklung von Datenassimilationsverfahren unter Nutzung aller verfügbarer Messungen (Bodenbeobachtungen, Flugzeugmessungen, Sonden, boden- und satellitengestützter Fernerkundung) ist jedoch erforderlich und wird an verschiedenen Stellen in Europa vorangetrieben.

5.2 Ergebnisse der prä-operationellen Ozonprognose mit dem TFS-Netzwerk-Modellsystem im Sommer 1999

Ein wesentlicher Teil eines jeden operationellen Systems ist die Modellverifikation anhand von aktuellen Daten. In Deutschland werden die bodennahen Ozondaten des Umweltbundesamtes und der Länder von der UMEG in Karlsruhe gesammelt. Diese Meßstationen (siehe die Abb. 15-1 im Kapitel 15) sind zwar nicht auf die Bedürfnisse der flächendeckenden Überwachung von Photooxidantien ausgelegt, weil viele Stationen wegen ihrer verkehrsnahen Lage nur eingeschränkt repräsentativ für ihre Umgebung sind. Sie stellen zur Zeit aber die einzige Datenquelle für einen zeitnahen Vergleich von Modellrechnungen mit Beobachtungen in Deutschland dar.

In der Abbildung 13-4 sind für die Tage 1 bis 24 des September 1999 verschiedene Maßzahlen dargestellt für die Messungen und die Prognose (Perzentile und Standardabweichung) sowie für den Vergleich der Ozonprognose mit Messungen (mittlere Abweichung, mittlerer quadratischer Fehler und Korrelationskoeffizient). Der September 1999 war insofern ungewöhnlich, als sehr spät im Jahr die höchsten Ozonwerte erreicht wurden.

Aus den Standardabweichungen ist abzulesen, daß die Modellvorhersagen im Mittel glatter sind, d.h. die räumliche Varianz der Messungen nicht vollständig reproduzieren können. Das gilt vor allem für die Nachtstunden, in denen, wie Abbildung 1 zeigt, die räumliche Korrelation schneller mit der Entfernung abfällt.

In der Regel nimmt die Prognosegüte vom ersten (rot) auf den zweiten (grün) Tag im Vergleich mit den Beobachtungen merklich ab. Das zeigt sich vor allem im

mittleren quadratischen Fehler (RMSE) und im Korrelationskoeffizient. Eine wesentliche Ursache ist in der meteorologischen Vorhersage zu suchen. Gerade bei für die chemische Ausbreitungsrechnung maßgeblichen Größen (Wolken mit ihrem Einfluß auf die Strahlung, Höhe der Mischungsschicht und Austausch zwischen Grenzschicht und freier Troposphäre) weist die numerische Wettervorhersage noch deutliche Defizite auf.

Zur Beurteilung der Korrelationskoeffizienten bei dieser Art der Auswertung, die alle Meßstationen unabhängig von ihrer Repräsentativität verwendet, sind die in Abb. 13-1 dargestellten Ergebnisse zu berücksichtigen. Danach sind selbst für die nachmittäglichen Ozonmaxima Korrelationskoeffizienten über 0,9 nicht zu erreichen. Nachts liegt die Obergrenze je nach Modellauflösung noch tiefer. Das erklärt auch die Tagesgänge, die beim mittleren quadratischen Fehler besonders ausgeprägt sind. Sie deuten zudem darauf hin, daß das Modellsystem mit einer Maschenweite von rund 21 km einen ländlicheren Charakter hat als die Stationsverteilung, die zum erheblichen Teil städtisch geprägt ist. Das wird auch belegt durch die räumliche Darstellung der statistischen Größen. Die relative grobe horizontale Auflösung des Modellsystems (Maschenweite 21 km) reicht nicht aus, die räumliche Differenzierung der Emissionen und der daraus folgenden sekundären chemischen Luftbeimengungen abzubilden. Dies führt u.a. zu deutlichen regionalen Abweichungen zwischen Modellrechnungen und Prognosen in der Rhein-Ruhr-Schiene oder im Ballungsraum Mannheim/Ludwigshafen. Ob die erhöhten Differenzen entlang des Erzgebirgskamms durch mangelhafte Emissionsdaten für die Tschechische Republik oder eine zu grobe Darstellung der Orographie im Modell verursacht werden, kann derzeit nicht abschließend beurteilt werden. Kleinräumige Modellrechnungen mit dem Modellsystem KAMM/DRAIS (siehe dazu Nester et al. 1995) unter Verwendung der LM-CTM-Prognosen als Randwerte zeigen jedoch eindeutig, daß sich die Felder der bodennahen Ozonkonzentrationen bei höherer räumlicher Auflösung von Emissionen und meteorologischen Daten wesentlich ändern.

Bei den mittleren Abweichungen (BIAS) sind dagegen keine signifikanten Unterschiede zu finden. Das Modellklima ist daher gesund.

In Abb. 13-5 ist die 38-stündige Prognose für den 10. 09. 1999 14 UTC (Teilbild a), repräsentativ für die ausgeprägteste Ozonepisode des Jahres, zusammen mit einer statistischen Auswertung (Teilbild b) dargestellt. Leider hatte zu dieser späten Zeit im Jahr das Land Bayern bereits die Datenübermittlung eingestellt. Das vollständige Meßnetz der Stationen des Bundes und der Länder zeigt Abb. 15-1. Die Verteilung der Abweichungen zwischen Modell und Beobachtungen ist nahezu symmetrisch, siehe Teilbild c. Der bias beträgt 3,77 ppb, der RMSE 12,59 ppb. Der Korrelationskoeffizient von 0,69 deutet auf eine überdurchschnittliche Prognosequalität hin. Weitere Einzelheiten siehe Tab. 13-1. Die chemische Ausbreitungsprognose hat somit noch nicht die Qualität der numerischen Wettervorhersage bzgl. Druck, Temperatur und Wind erreicht. Sie ist eher mit der der Niederschlagsprognose vergleichbar.

O₃-Monatsverifikation - TFS Netzwerkmodellsystem

Zeitraum: 01.-24.09.1999

Modellprognose an den Stationen gegen Beobachtungen

(vorläufige Daten der Meßnetze des Bundes und der Länder)

Beobachtung: schwarz

Prognose für heute: rot

Prognose für morgen: grün

Anzahl der Stationen/Datenabdeckung > 50 %

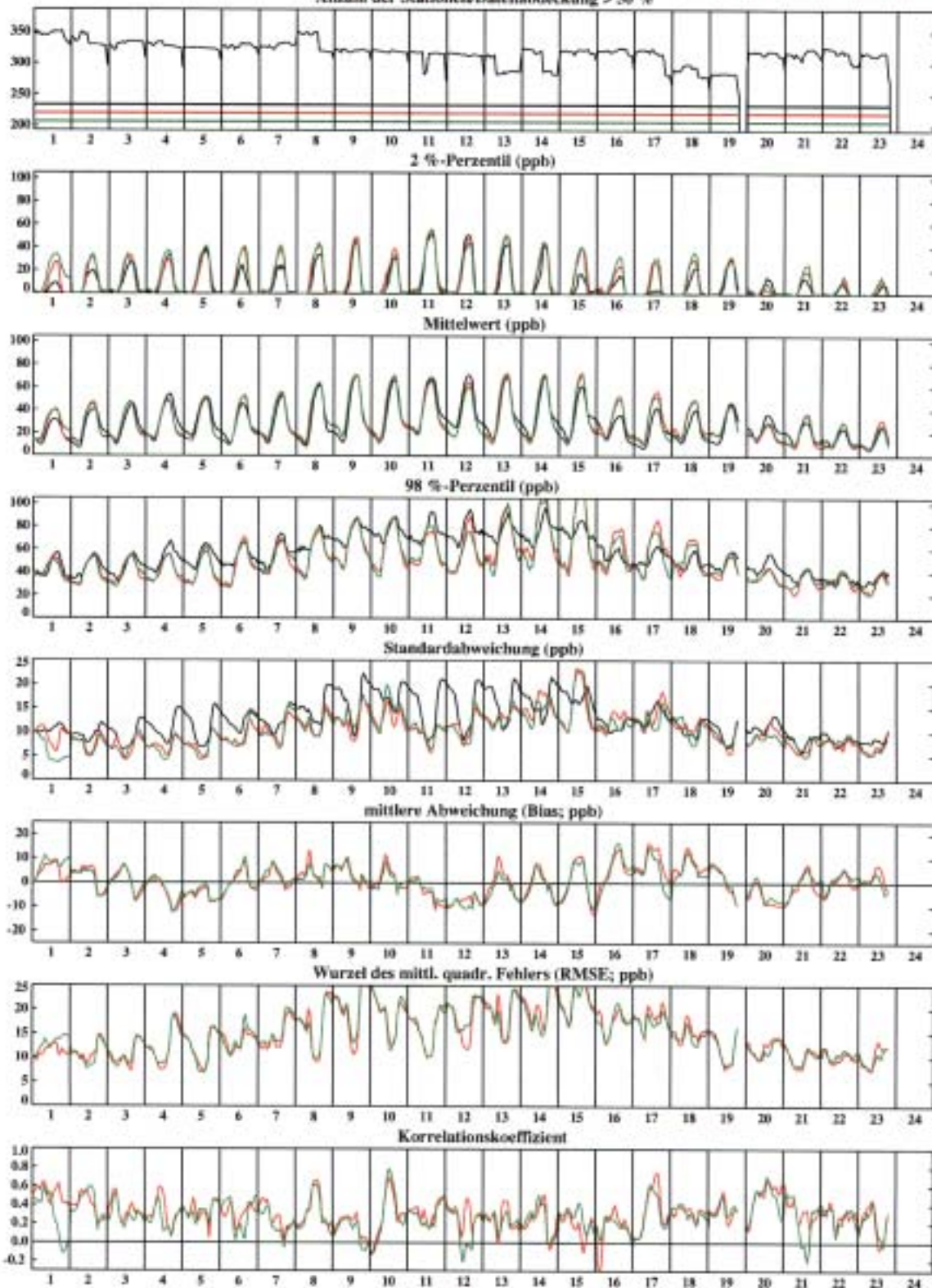
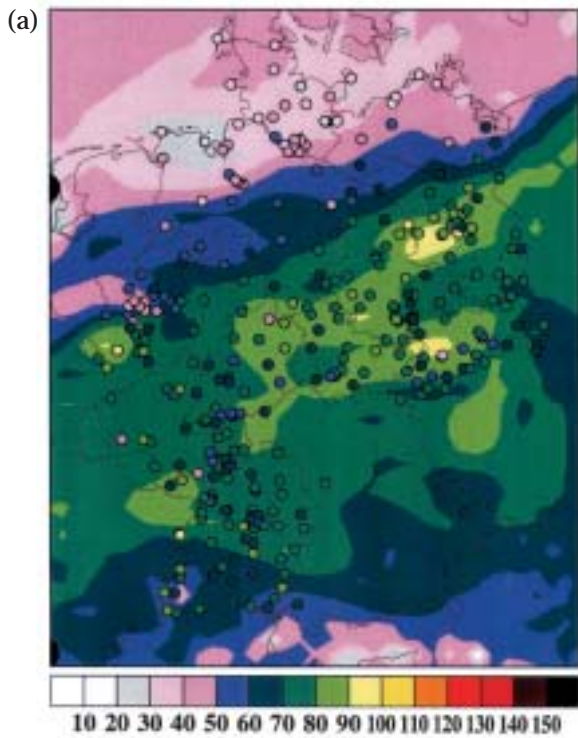
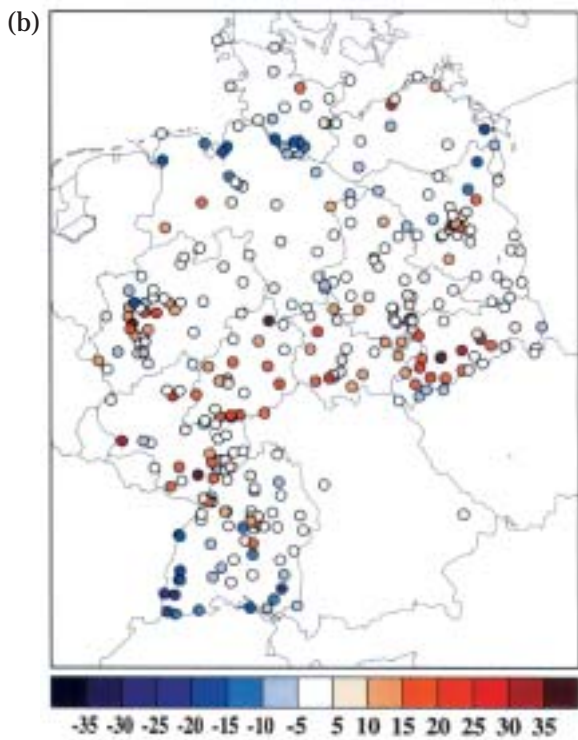


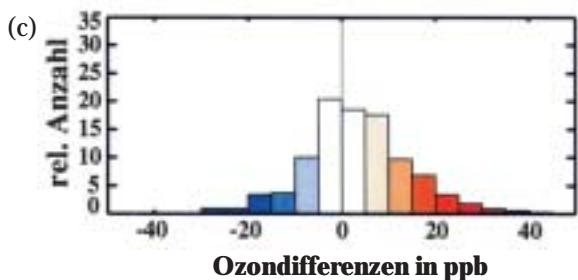
Abb. 13-4: TFS-Netzwerk-Modellsystem:
Monatsverifikation der Ozonprognosen für die Tage 1 bis 24 des September 1999



Ozonzonmischungsverhältnisse in ppb



Ozondifferenzen in ppb



Ozondifferenzen in ppb

	Minimum in ppb	Maximum in ppb	Mittel in ppb	Standard- abweichung in ppb
Messung	7,50	94,60	65,82	14,86
Modell (an Stationen)	18,68	93,73	69,58	15,55

Tab.13-1: Vergleich zwischen den durch die 38-stündige Ozonvorhersage für den 10.09.1999 an den Stationen prognostizierten Werten und den betreffenden Stationsmeßwerten.

6 Weiterentwicklung von Modellsystemen und Empfehlungen des EUMETNET Workshop on Ground-Level Ozone Forecasting

Im Vergleich mit der numerischen Wettervorhersage zeigt sich, daß bei der Ozonprognose noch wesentliche Schritte zur Weiterentwicklung ausstehen. Zunächst ist auffällig, daß die Ozonprognose noch mit verschiedenen Modelltypen arbeitet, während bei der numerischen Wettervorhersage die Entscheidung längst zugunsten deterministischer Modelle mit hoher Vertikalaufösung gefallen ist. Während bei der numerischen Wettervorhersage der internationale Datenaustausch, Modellvergleiche und mit dem Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) als europäische Referenz seit langer Zeit eine erfolgreiche internationale Zusammenarbeit existiert, wird die operationelle Ozonprognose noch weitgehend als nationale wenn nicht sogar als regionale Insellösung betrieben.

Daher standen beim EUMETNET Workshop on Ground-Level Ozone Forecasting Empfehlungen zu einer besseren Zusammenarbeit an oberster Stelle:

- Organisation eines internationalen Austauschs von Messungen luftchemischer Schadstoffe,
- Ermittlung, wo Prognosen veröffentlicht werden (Internet-Adressen),
- Organisation von Modellvergleichen,
- bis hin zur Forderung für ein Europäisches Zentrum für Ausbreitungsprognosen.

Die Bestandsaufnahme der operationellen Ozonprognose in Europa zeigte, daß, wenn es allein um die Vorhersage der täglichen Ozonmaxima geht, statistische Modelle noch konkurrenzfähig sind. Da jedoch für die Aufgabe, Maßnahmen zur Emissionsreduzierung zu

Abb.13-5: 38-stündige Ozonvorhersage für den 10.09.1999, 14 UTC.

Verifikation gegen 319 Meßstationen und Häufigkeitsverteilungen der Differenzen an Hand von vorläufigen Daten der Meßnetze des Bundes und der Länder.

(a) Modellergebnisse, (b) Differenzen an den einzelnen Stationen zwischen Modell und Meßwert. Die zugehörigen statistischen Ergebnisse sind in Tab. 13-1 zusammengefaßt. (c) Relative Häufigkeit der Differenzen an den einzelnen Stationen zwischen Modell und Meßwert.

quantifizieren und Einträge in Ökosysteme zu ermitteln, deterministische Modelle benötigt werden, sollten zunächst die Vorteile beider Modelltypen kombiniert werden. Das in der Meteorologie gebräuchliche Verfahren mit statistischen Methoden (z.B. Modell-Output-Statistic – MOS) oder Kalman-Filterung, ausgehend von den Ergebnissen der numerischen Wettervorhersage, die Punktvorhersage zu optimieren, bietet sich gerade bei der Luftchemie an, weil die lokalen Emissionsbedingungen die kleinräumige Konzentrationsverteilung erheblich beeinflussen.

Neben der Weiterentwicklung deterministischer Modelle werden Qualitätssteigerungen vor allem durch bessere Eingangswerte erwartet, durch

- eine Datenassimilation für die chemischen Luftbeimengungen und
- genauere Ermittlung biogener und anthropogener Emissionen, wobei für den Einsatz in der Prognose vor allem genauere Kenntnisse der räumlichen und zeitlichen Struktur und ihrer Berücksichtigung in Emissionsmodellen erforderlich sind.

6.1 Erste Konsequenzen aus dem EUMETNET Workshop on Ground-Level Ozone Forecasting

Ausgehend von den Empfehlungen des Workshops wurde erstmals ein Langzeitvergleich der Ergebnisse von Eulerschen Modellsystem mit in Routinemeßnetzen gewonnenen Ozonmessungen durchgeführt (Tilmes et al. 2001). Wie für den Test des TFS-Modellsystems wurden dabei die deutschen Messungen für die Monate Mai bis September 1999 genutzt. An diesem Vergleich waren beteiligt:

- die dänische Umweltforschungsinstitution NERI,
- das norwegische Forschungsinstitut für Luftreinhaltung (NILU),
- der schwedische Wetterdienst (SMHI) und
- aus Deutschland der DWD mit dem TFS-Modellsystem sowie die Freie Universität Berlin (FUB).

Während die Systeme von DWD, NILU und SMHI 14 bis 18 vertikale Schichten haben, berechnen NERI und FUB den Transport mit Drei-Schichten-Modellen mit zeitlich variabler Mischungsschichthöhe. Die beste horizontale Auflösung hat das DWD-System mit 21 km für Meteorologie und Ausbreitung. Alle anderen verwenden Maschenweiten von rund 50 km. Die Ausbreitung von der FUB wurde dann jedoch auf etwa halber Maschenweite unter Nutzung entsprechend aufgelöster Emissionsdaten berechnet. Für eine ausführlichere Beschreibung der Modellsysteme (Meteorologie, Chemiecode, Emissionsdaten) wird auf Tilmes et al. (2001) verwiesen.

Das Ergebnis des Modellvergleichs (siehe Abbildungen 13-6 und 13-7, entnommen aus Tilmes et al. 2001) zeigt eindeutig, daß höhere horizontale und vertikale Auflösungen zusammen mit möglichst aktuellen Emis-

sionsdaten zu den besten Ergebnissen führen. Wegen der vergleichsweise groben Horizontalauflösung können alle drei skandinavischen Modelle (NERI, NILU und SMHI) die vornehmlich in Städten auftretenden nächtlichen Minima nicht richtig simulieren. Die Prognose der Maxima ist jedoch zufriedenstellend. Zugleich unterstreicht diese Untersuchung die aus der numerischen Wettervorhersage bekannte Tatsache, daß für eine erfolgreiche Weiterentwicklung der Modellsysteme ein internationaler Datenaustausch, Modellvergleiche und der Wettbewerb zwischen verschiedenen Institutionen unverzichtbar ist.

Um den qualitativen Vergleich der Ozonprognosen zu erleichtern, hat EUMETNET die Internet-Seite <http://www.eumetnet.eu.org/contozon.html> für europäische Ozonprognosen eingerichtet.

Literatur:

- ADRIAN, G., F. FIEDLER, 1991: Simulation of Unstationary Wind and Temperature Fields over Complex Terrain and Comparison with Observations. *Contr. Atmos. Phys.*, 64, 27-48.
- BAER, M., K. NESTER, 1992: Parametrization of Trace Gas Dry Deposition Velocities for a Regional Mesoscale Diffusion Model. *Ann. Geophysicae*, 10, 912-923.
- BRANDT, J., CHRISTENSEN, J. H., FROHN, L. M., BERKOWICZ, R., F. PALMGREN, 2000: The DMU-ATMI THOR Air Pollution Forecast System - System Description, NERI Technical Report No. 321, National Environmental Research Institute, Roskilde, Denmark, 60 S.
- BRANDT, J., J. H. CHRISTENSEN, L. M. FROHN, F. PALMGREN, R. BERKOWICZ, Z. ZLATEV, 2001a: Operational air pollution forecasts from European to local scale. *Atmospheric Environment*, 35, Sup. No. 1, 91-98.
- BRANDT, J., J. H. CHRISTENSEN, L. M. FROHN, R. BERKOWICZ, 2001b: Operational air pollution forecast from regional scale to urban street scale. Part 1: system description, *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 26, No. 10, 781-786.
- BRANDT, J., J. H. CHRISTENSEN, L. M. FROHN, 2001c: Operational air pollution forecast from regional scale to urban street scale. Part 2: performance evaluation, *Physics and Chemistry of the Earth (B)*, 26, No. 10, 825-830.
- BEL, L., L. BELLANGER, V. BONNEAU, G. CIUPERCA, D. DACUNHA-CASTELLE, C. DENIAU, B. GHATTAS, M. MISITI, G. OPPENHEIM, J.M. POGGI, R. TOMASSONE, 1999: Eléments de comparaison de prévisions statistiques des pics d'ozone, *Re. Statistiques appliquée*, XLVII(3), 7-25.

Periode: 1. Juli – 31. August 1999

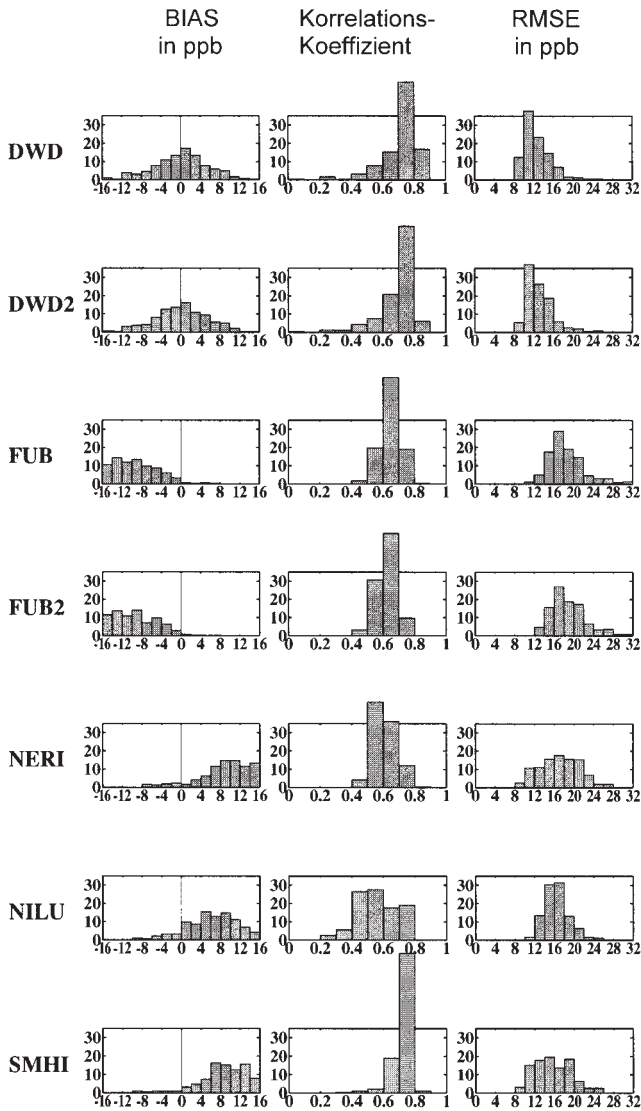


Abb. 13-6:

Relative Häufigkeitsverteilungen des mittleren Fehlers (BIAS), des Korrelationskoeffizienten und der mittleren quadratischen Abweichung (RSME) in Prozent für den Vergleich mit den deutschen Ozonmessungen der Monate Juli und August 1999 und alle stündlichen Werte für die 5 Modellsysteme DWD(TFS), FUB, NERI, NILU, SMHI, Ziffer 2 hinter DWD und FUB für die Vorhersage für den zweiten Tag.

Entnommen aus: Tilmes et al. 2001.

Periode: 1. Juli – 31. August 1999
(tägliche Maxima)

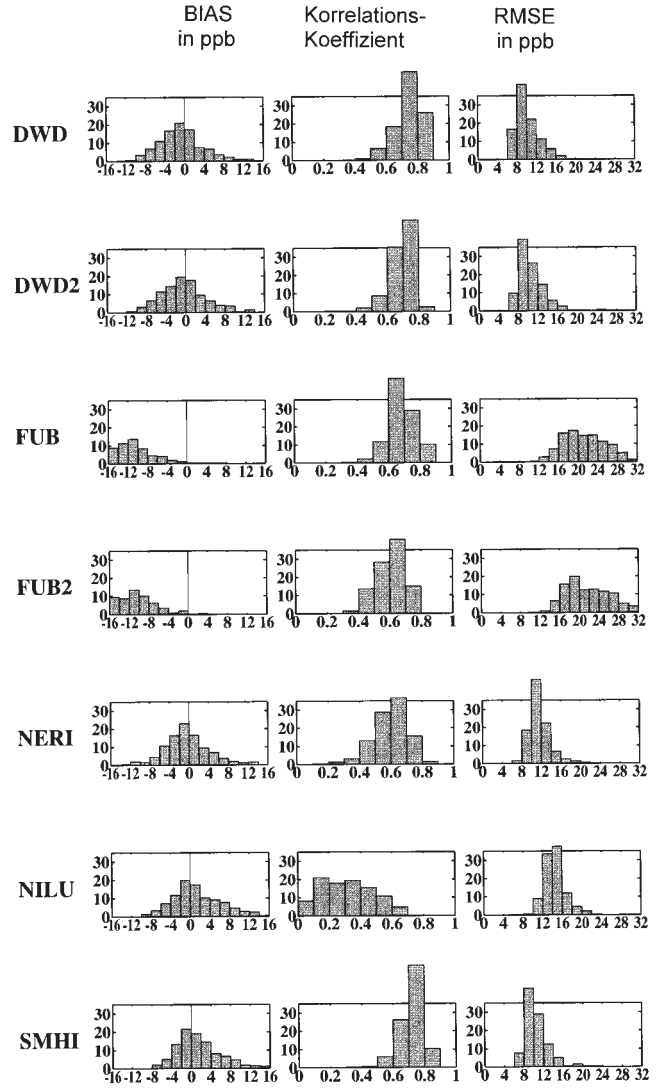


Abb. 13-7:

Wie Abb. 13-6, jedoch nur für die täglichen Maxima.

DOMS, G., SCHÄTTLER, U., 1999: The nonhydrostatic limited-area model LM (Lokal-Modell) of DWD. Part I: Scientific Documentation, Deutscher Wetterdienst (DWD), Offenbach, 174 S.

EBEL, A., ELBERN, H., FELDMANN, H., JAKOBS, H. J., KESSLER, C., MEMMESHEIMER, M., OBERREUTER, A., G. PIEKORZ, 1997: Air Pollution Studies with the EURAD

Model System (3): EURAD – European Air Pollution Model System, Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, (Hrsg.: A. Ebel, M. Kerschgens, F.M. Neubauer, P. Speth), Nr. 120, 172 S.

EEA, 1997: National ozone forecasting systems and international data exchange in Northwest Europe, EEA, Technical Report No. 9, R.M. van Aalst and F.A.A.M. de Leuw (editors), September 1997, 50 S.

- FLATØY, F., HOV, Ø., H. SMIT, 1995: Three-dimensional model studies of exchange processes in the troposphere over Europe, *J. Geophys. Res.*, 100, 11465-11481.
- Flatøy, F., Hov, Ø., Gerbig, C., S.J. Oltmans, 1996: Model Studies of the Meteorology and Chemical Composition of the Troposphere over the North Atlantic During August 18-30, 1993, *J. Geophys. Res.*, 101, 29317-29334.
- Flatøy, F., Ø. Hov, 1997: NO_x from lightning and the calculated chemical composition of the free troposphere, *J. Geophys. Res.*, 102, 21373-21382.
- FLATØY, F., HOV, Ø., SCHLAGER, H., 2000: Chemical forecasts used for measurement flight planning during POLNIAT2, *Geophys. Res. Lett.*, 27, 951-954.
- FLEMMING, J., E. REIMER, R. STERN, 1998: Comparison of photochemical model results based on diagnostic and prognostic meteorological input data, *Proceedings of the EUROTRAC Symposium 1998*, WIT Press, Southampton, 473-477.
- FLEMMING, J., REIMER, E., STERN, R., 2000: Impact of special features of numerically predicted and analysed meteorological data on the results of ozone forecast by a PBL-CTM, *Air Pollution Modelling and its Application XIII*, eds.: S.-E. Gryning and E. Batchvarova, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 39-45.
- HASS, H., 1991: Description of the EURAD Chemistry-Transport-Model Version 2 (CTM2), *Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln*, Hrsg. A. Ebel, F.M. Neubauer und P. Speth, No. 83, Köln, 100 S.
- NESTER, K., H.-J. PANITZ, F. FIEDLER, 1995: Comparison of the DRAIS and EURAD Model Simulations of Air Pollution in a Mesoscale Area. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 57, 135-158.
- NESTER, K., FIEDLER, F., H.-J. PANITZ, 1998: Simulation of mesoscale air pollution with the model system KAMM/DRAIS, *Papers of the 11th World Clean Air and Environment Congress*, 13-18 September 1998, Paper 10D-2, Volume 4, Durban, South Africa.
- NESTER, K., F. FIEDLER, W. WILMS-GRABE, T. ZHAO, 2000: Establishment of a Model Network and its Application for the Prediction of the Air Pollution in a Mesoscale Area. *Proceedings of the Millennium NATO/CCMS International Technical Meeting and its Application*, May 2000, Boulder, USA, paper 2.6A, 92-99.
- NESTER, K., F. FIEDLER, T. ZHAO, 2000: Application of a Model Network for the Prediction of Ozone Concentrations in Southwest Germany. To appear in *Proceedings of the EUROTRAC-2 Symposium 2000*, Garmisch-Partenkirchen, Germany, 27th to 31st March, 2000.
- REIMER, E., WIEGAND, G., FLEMMING, J., DLABKA, M., ENKE, W., BERENDORF, K., WEIB, W., R. STERN, 2000: Erstellung einer Ozone-Kursfristprognose für das Smogfrühwarnsystem, *Abschlußbericht des UBA F&E Vorhabens 29543817*, Berlin.
- RIßMANN, J., S. TILMES, I. JACOBSEN, J. ZIMMERMANN, 1999: Ein Sommer operationeller Prognose atmosphärischer Spurengase mit dem TFS-Netzwerk-Modellsystem, *Deutscher Wetterdienst, Forschung und Entwicklung, Arbeitsergebnisse Nr. 58*, September 1999, 49 S.
- ROBERTSON, L., J. LANGNER, M. ENGHARDT, 1999: An Eulerian limited-area atmospheric transport model, *J. appl. Meteor.*, 38, 190-210.
- STERN, R., 1997: Entwicklung und Anwendung eines dreidimensionalen photochemischen Ausbreitungsmodells mit verschiedenen chemischen Mechanismen, *Meteorologische Abhandlungen Serie A, Band 8*, Institut für Meteorologie der FU-Berlin.
- STEDMAN, J.R., P. G. WILLIS, 1996: Air quality forecasting in the United Kingdom, *AEA Technology, National Environmental Technology Centre, Report AeA/RAMP/20008001/002*.
- STOCKWELL, W.R., P. MIDDLETON, R. S. CHANG, X. TANG, 1990: The second generation regional acid deposition model chemical mechanism for regional air quality modeling, *J. Geophys. Res.*, 95, 16343-16367.
- TILMES, S., BRANDT, J., FLATØY, F., BERGSTRÖM, R., FLEMMING, J., LANGNER, J., CHRISTENSEN, J.H., FROHN, L.M., HOV, Ø., JACOBSEN, I., REIMER, E., STERN, R., J. ZIMMERMANN, 2001: Comparison of five Eulerian air pollution forecasting systems for the summer 1999 using the German ozone monitoring data, *J. Atmos. Chem.*, im Druck.

Internet-Seiten:

- I1: <http://ask.ii.uib.no/~climate/>
- I2: http://www.smhi.se/sgn0102/n0205/baltichome_real/luftkvalitet.htm
- I3: <http://www.aeat.co.uk/netcen/airqual/index.html>
- I4: http://www.irceline.be/~celinair/english/homeen_java.html
- I5: <http://www.dmi.dk/vejrozon/smog.html>
- I6: <http://callas.ens.fr/npollux> und <http://euler.polytechnique.fr/europollux>
- I7: <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-daten/daten/aod.htm>
- I8: <http://www.dmu.dk/AtmosphericEnvironment/thor/index.htm>
- Eine fortlaufend aktualisierte Liste mit Links zu den einzelnen Institutionen ist unter <http://www.eumetnet.eu.org/contozon.html> zu finden.

14 Erfolgsaussichten und Risiken für politisches Handeln zur Vermeidung von Photosmog

1 Einleitung

Die industrielle Entwicklung und die parallel zu ihr verlaufende rasante Zunahme der Weltbevölkerung hat es mit sich gebracht, daß unsere Umwelt und insbesondere die Atmosphäre starken Beeinträchtigungen unterworfen ist. Hier kam es bis vor wenigen Jahren allen Akteuren entgegen, daß der „gasförmige oder partikelförmige Müll“, wenn er nur einmal dem Wind übergeben ist, als entsorgt galt. Die Luft trägt ihn über weite Strecken davon und verdünnt ihn dabei durch Turbulenz so intensiv, daß in der chemischen Meßtechnik enorme Anstrengungen gemacht werden mußten, um ihn in der Luft fern von den Quellen noch oder wieder nachweisen zu können.

Weitausgedehnte Schäden haben sich bekanntlich erst als Folge der akkumulierenden Wirkung der schädlichen Substanzen gezeigt wie bei der Versauerung der Seen in Skandinavien und den daraus entstandenen Folgen für den Fischbestand und für die Vegetation, wie beim sogenannten Waldsterben und beim Photosmogproblem in großen Siedlungsräumen, das sich besonders ausgeprägt in seiner extremsten Form in Mexiko-City zeigt.

Rückschauend auf diese Entwicklungen kann übereinstimmend festgestellt werden, daß mit dem Erkennen der Auswirkungen jeweils immense Forschungsanstrengungen einsetzten, um die phänomenologischen Fakten zusammenzutragen, um Hypothesen bezüglich wichtiger Prozeßketten aufzustellen und sie durch geeignete Meßprogramme nachzuweisen und schließlich, um auch Prognosen für die zukünftige Entwicklung mit den in ihnen enthaltenen Schreckensszenarien zu erarbeiten. In den USA und Europa (Solomon et al. 1999) wurden in den letzten 10 Jahren mehr als 600 Millionen Dollar allein für Feldmeßprogramme zum Studium der Ozonchemie, der meteorologischen Ausbreitungsprozesse, zur Bestimmung der Emissionen und für entsprechende Modellsimulationen ausgegeben.

Schreckensszenarien finden besonders in der Öffentlichkeit breite Beachtung. Sie erzeugen, getragen von einer breiten Medienunterstützung, einen immensen Druck auf die Entscheidungsträger, auf Politiker, öffentliche Verwaltungen und auf alle industriellen Bereiche der Wirtschaft, die mit den Schäden in Verbindung gebracht werden können. Als Reaktion darauf agieren Entscheidungsträger häufig mit Sofortmaßnahmen, um sich wenigstens partiell von dem öffentlichen Druck zu befreien.

Bei den meisten Umweltproblemen, denen die Zivilisation heute gegenübersteht, handelt es sich jedoch um sehr komplexe Vorgänge. Das gilt in besonderer Weise auch

für das Photosmogproblem. Charakteristisch für komplexe Vorgänge ist, daß zahlreiche nebeneinander existierende Einzelprozesse für die beobachtbaren Felder der verschiedenen Feldgrößen, insbesondere der auftretenden Konzentrationen, verantwortlich sind. Es treten zahlreiche Wechselwirkungen zwischen diesen Prozessen auf, so daß zeitliche Änderungen, kurzzeitige, z. B. im Tagesrhythmus, und langzeitige, die über mehrere Jahre oder Jahrzehnte laufen, verschiedene Ursachen haben können. Besonders häufige Parallelbezüge bestehen bei den beobachteten zeitlichen Änderungen der Konzentration, im Entwicklungstrend der Emissionen der Verursacherstoffe und den von Jahr zu Jahr oder sogar über eine Dekade auftretenden Schwankungen der Witterung. Einige aufeinander folgende Sommer mit einer oder zwei Hochdruckwetterlagen weniger können bezüglich der Photosmogbelastung, gemessen an der mittleren Ozonkonzentration, zu einem ähnlichen Trend führen wie eine Reduktion der primären Substanzen aus den industriellen oder verkehrsbedingten Quellen. Wegen weiterer Einzelheiten wird auf die Kapitel 3 bis 6 des Heftes Photosmog I verwiesen.

Eine oft beobachtbare Schwierigkeit für die Wissenschaft ergibt sich insofern, als es aufgrund der Komplexität des Gesamtsystems, in dem alle Vorgänge gleichzeitig ablaufen, und des Umfangs der notwendigen Datenerhebung, die für eine wissenschaftlich abgesicherte Beurteilung der Vorgänge erforderlich ist, eine längere Zeit dauert, bis ein hinreichendes Verständnis erzielt werden kann. In dieser Zeit können sich die Lebensbedingungen bereits in erheblichen Maße verändern, beispielsweise durch eine intensivere Reisetätigkeit, durch Einführung abgasärmerer Kraftfahrzeuge und andere abgasmindernde Maßnahmen, durch Inanspruchnahme größerer Wohnflächen, durch Modernisierung ganzer Industriezweige, so daß nach Abschluß der Forschungsarbeiten über einen längeren, vielleicht zehnjährigen Zeitraum die Ausgangsbedingungen nicht mehr gültig sind. Dabei möchte die Wissenschaft Erklärungen vorlegen, die als Grundlage für Handlungsempfehlungen für die Zukunft dienen sollen.

2 Wissenschaftliche Information und politische Entscheidung

Vor wenigen Jahren hat in den USA eine neue Entwicklung in bezug auf die Photosmogsituation eingesetzt (NRC 1991). Diese wurde durch die Erkenntnis ausgelöst, daß trotz mehr als zwanzigjähriger Bemühungen die verbreitet auftretende Photosmogbelastung in Form von weitflächigen Überschreitungen der von der Umweltbehörde zum Schutz der Gesundheit festgelegten

Schwellenwerte durch Emissionsabsenkungen bzw. Emissionsbegrenzungen keine nennenswerten Verbesserungen erreicht werden konnten. Dabei waren diese Maßnahmen zum großen Teil durch wissenschaftliche Empfehlungen gestützt. Von politischer Seite wurden 1970 Entscheidungen getroffen mit dem Ziel, im Jahre 1975 eine wesentliche Verbesserung erreichen zu können. Aber selbst 1977 waren kaum Erfolge dieser Maßnahmen zu erkennen. Man sah sich nunmehr gezwungen, ergänzende Maßnahmen zu ergreifen, um bis zum neuen Zieljahr 1982 die Einhaltung der maximalen Überschreitungshäufigkeiten der vorgegebenen Schwellenwerte zu erreichen. Es waren jedoch bis zum Jahr 1990 keine klaren Verbesserungen der Photosmogbelastung festzustellen. Im Gegenteil, in den achtziger Jahren gab es Phasen, in denen die Zahl der Gebiete mit deutlichen Überschreitungen der Grenzwerte drastisch anstieg.

Es wurde damit sichtbar, daß bis in die neunziger Jahre hinein die politischen Anstrengungen in Form von Emissionskontrollen und Emissionsproduktion über zwanzig Jahre hinweg extrem langsam vorstatten gingen. Dieser Umstand erzwang letztlich eine neue Dimension des Herangehens an dieses Problem. Ähnliche Entwicklungen waren auch in Europa und in Deutschland in den vergangenen Jahren sichtbar.

Das Bekanntwerden der hohen Ozonbelastung in der breiten Öffentlichkeit während länger anhaltender Hochdruckwetterlagen im Sommer löste einen starken Druck auf Behörden und politische Entscheidungsträger aus. Damit wurde der Ruf nach einer raschen Lösung zum Schutz der Bevölkerung vor hohen Konzentrationen immer stärker, was schließlich zu kurzfristigen Maßnahmen führte. Besonders bevorzugt wurden Fahrverbote für stark emittierende Fahrzeuge ohne Katalysator oder es wurden Geschwindigkeitsbegrenzungen auf Autobahnen und Landstraßen sowie in innerstädtischen Bereichen verordnet.

Darüber hinaus wurde vereinzelt, wie in Baden-Württemberg, angestrebt, an Großversuchen den Nachweis der Wirkung von Geschwindigkeitsreduzierungen und Fahrverboten zu erbringen. Der wohl bekannteste Vorstoß wurde mit dem „Ozonversuch Neckarsulm/Heilbronn“ (Umweltministerium Baden-Württemberg 1995) ausgeführt. Dabei sollte die Wirksamkeit von zeitlich befristeten und auf das Umfeld einer Stadt begrenzten Maßnahmen für die Absenkung von Ozonspitzenwerten nachgewiesen werden. Dieser Versuch wurde in erster Linie von politischer Seite favorisiert, sozusagen als praktische Maßnahme. Damit wurde der Versuch unternommen, das Problem mehr von praktischer Seite anzugehen und weniger die Handlungsweise nach wissenschaftlichen Erkenntnissen zu einem schwer durchschaubaren Problemkreis auszurichten. In den Kapiteln 12 und 16 dieses Heftes wird näher auf diesen Versuch eingegangen. Dieses Beispiel zeigt deutlich das Spannungsfeld, in dem sich die Wissenschaft und die politische Entscheidungsebene befinden.

Daraus sind folgende Grundbausteine ersichtlich, die für die Handelnden ausschlaggebend sind:

1. Bei der umfangreichen Verflechtung der Einflüsse, die auf die Phänomene einwirken, ist stets davon auszugehen, daß kaum genügend Systemverständnis vorliegen wird, um alle Unsicherheiten in befriedigender Weise auszuschließen.

Beim Photosmogproblem wie bei anderen Betrachtungen von Stoffhaushalten in der Atmosphäre sind an erster Stelle die Emissionen der Vorläufersubstanzen aus anthropogenen und biogenen Quellen als besonders gravierende Fehlerquellen für die Verlässlichkeit der Aussagen zu nennen. (Siehe dazu auch die Kapitel 3 und 4 des Heftes Photosmog I). Die wichtigsten Vorläufersubstanzen sind zwar identifiziert, ihre Quantifizierung in städtischen und ländlichen Regionen ist aufgrund der hohen Zahl der Einzelquellen und der Vielfalt der Quellformen nach wie vor sehr schwierig und aufwendig. Dies schließt auch die Emissionsfaktoren verschiedener technischer Verbrennungssysteme ein.

Aufwendige Emissionserhebungen sind meist nur für kürzere Zeitabschnitte vorhanden. Überdies liegen die erforderlichen Informationen über den Einsatz von Primärstoffen in der Industrie, über den Verkehr und über andere beeinflussenden Aktivitäten wie z. B. den weit verbreiteten Einsatz von Lacken und Lösungsmitteln erst einige Zeit nach einem bestimmten Beobachtungszeitraum vor. Die der Emissionsberechnung zugrunde liegenden Statistiken und sonstigen Daten sind zudem mit einem weitgehend unbekanntem, möglicherweise aber in Teilbereichen durchaus hohen Fehler behaftet. Die Ermittlung der daraus entstehenden Fehler der Emissionsdaten erhält jedoch erstaunlicherweise nicht immer höchste Priorität seitens der Politik.

An zweiter Stelle sind die Unsicherheiten zu nennen, die in der Vollständigkeit der chemischen Reaktionsketten und deren Genauigkeit zu sehen sind. Wegen der sich ständig verschiebenden Randbedingungen (z. B. bedingt durch die Einführung von Katalysatoren im Kraftfahrzeugbereich) können die verschiedenen Reaktionspfade unterschiedliche Bedeutung gewinnen.

Die meteorologischen Transport- und Vermischungsbedingungen spielen neben der atmosphärischen Chemie, der Emission und der Deposition eine herausragende Rolle für das Zustandekommen der beobachteten Konzentrationsverteilungen. Bei allen bisher angewandten Methoden zur Vorhersage von Photosmog ist die Bedeutung der meteorologischen Bedingungen besonders betont worden. Die Schwierigkeiten, die sich hier dem Anwender von Modellsimulationen oder anderen empirischen Verfahren zur Prognose auf tun, sind durch die starke Regionalisierung von stagnierenden Luftmassen sowie von Strömungsbedingungen infolge komplexer Geländestrukturen bedingt. Darüber hinaus ist eine verlässliche Ozonpro-

gnose kaum zu erreichen, wenn nicht die dreidimensionalen Transportvorgänge, d.h. die Verflechtung der bodennahen Konzentration mit den Transporten in den höheren Schichten, berücksichtigt werden. Hierüber liegen häufig in den Räumen, in denen sich Photo-smog ausbildet, nicht genügend meteorologische Information vor. Die adäquate Stichprobenerhebung leidet in den meisten Fällen an den hohen Kosten des erforderlichen Personal- und Geräteeinsatzes.

Die Erfassung der Verteilung der Spurenstoffe, die an der Photosmogentwicklung beteiligt sind, stellt eine enorme Herausforderung an die chemische Meßtechnik. Gerade der Umstand, daß immer zahlreichere Substanzen als bedeutsam für die Ozonbildung in Laboruntersuchungen erkannt wurden, stellt die in-situ-Erfassung meist vor sehr schwierige Aufgaben. Zu erkennen, welche Prozesse in einzelnen Zonen wirklich maßgeblich sind, erfordert eine hohe, in vielen Fällen noch nicht erreichbare, Meßgenauigkeit. Da Chemie-Transportmodelle in vielen Teilen von dem empirischen Wissen in Form von Parametrisierungen abhängig sind, wirken sich die Meßgenauigkeiten auch auf die Güte einer Modellrechnung aus.

2. Es ergibt sich daraus die zweite Problematik: wie kann und muß man mit der unsicheren Information umgehen? Im umweltpolitischen Raum ist häufig auch feststellbar, daß bei weitem nicht das bisher in der Wissenschaft erarbeitete Wissen für Entscheidungen genutzt wird.

Wegen der teilweise vorhandenen Unsicherheit des Wissens, die durch divergierende Äußerungen in der Wissenschaft zutage tritt, ist nicht auszuschließen, daß der Hinweis auf diese unklare Einschätzung dazu benutzt wird, entweder eine Entscheidung unter größlicher Mißachtung der wissenschaftlichen Erkenntnisse zu treffen oder daß jene Richtung als Entscheidungsgrundlage gewählt wird, die in der Öffentlichkeit wegen ihrer Erwartungen unter dem Einfluß dramatischster Gefährdungsszenarien größte Popularität verspricht.

Wegen der extrem hohen Kosten, die mit der Verbesserung der Luftqualität verbunden sind, kann die Forderung nach einer wesentlich intensiveren Nutzung des Wissens, das durch die Grundlagenforschung bereitgestellt wird, nicht laut genug erhoben werden. Daneben sollte eine Abschätzung der Unsicherheit bzw. der Qualität der erarbeiteten Entscheidungshilfen mehr als bisher Bestandteil der Ergebnisse bzw. von deren Präsentation sein.

3 Zukünftige Entwicklung

Anhand der Analysen des Umweltbundesamtes (UBA 2000) aller Ozonmessungen, die in der Bundesrepublik Deutschland von den Landesämtern und vom Umweltbundesamt durchgeführt werden, ist erkennbar, daß die Überschreitungshäufigkeit des Schwellenwertes von 240

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ (≈ 120 ppbv) seit dem Beginn der achtziger Jahre zurückgeht. Dies kann vor allem der Reduzierung der Stickstoffemissionen zugeschrieben werden. Es ist somit ein Beleg, daß vor allem durch großflächig angelegte Verbesserungen der Emissionssituation eine Verbesserung der Überschreitungsstatistik erreicht werden kann.

Nach dem Entwurf der Europäischen Kommission für eine neue EU-Ozonrichtlinie ist eine mehrstufige Zielvorgabe mit Zielwerten vorgesehen, die bis 2010 einzuhalten sind, in Form von (i) Langfristzielen, (ii) einer Informationsschwelle (definiert als Alarmschwelle für empfindliche Bevölkerungsgruppen) und einer (iii) Alarmschwelle. Die längerfristigen Ziele sollen durch generelle Reduzierung der Emissionen der Vorläufersubstanzen, festgelegt in der „Richtlinie über nationale Emissionshöchstgrenzen für bestimmte Luftschadstoffe“, erreicht werden. Außerdem ist vorgesehen, daß die Bevölkerung über eine Überschreitung des Informationsschwellenwertes der Konzentration von Ozon von $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (als Mittelwert über 1 Stunde) informiert wird. Ferner sollen Aktionspläne über kurzfristig zu ergreifende Maßnahmen erstellt werden, wenn das Risiko einer Überschreitung der Alarmschwelle von $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (als Mittelwert über 1 Stunde) gegeben ist und wenn ein nennenswertes Potential zur Risikominderung wahrscheinlich existiert.

Während die Vorgabe von Zielwerten, die möglichst beim Auftreten einer Photosmogsituation nicht überschritten werden sollen, mit den wissenschaftlichen Erkenntnissen im Einklang stehen, ist die Beibehaltung von Kurzfristmaßnahmen bei Überschreitung des Alarmwertes von Ozon weniger mit wissenschaftlichen Erkenntnissen in Übereinstimmung zu bringen. Gerade in diesem Punkt ist erkennbar, daß die Einführung einer operationellen Ozonprognose, vergleichbar mit der allgemeinen Wettervorhersage, die bessere Handlungsstrategie darstellt, um frühzeitig, nämlich etliche Tage bevor eine Überschreitung des Warnwertes erfolgt, eine entsprechende Maßnahme zur Emissionsvermeidung beispielsweise durch Fahrverbote einzuleiten. Dieser Schritt, den Wetterbericht operationell durch eine Prognose der Luftbelastung für entsprechende Zeitabschnitte zu ergänzen und vorausschauende Minderungsmaßnahmen zu ergreifen, wäre eine weit bessere Strategie als erst dann in die Verkehrssituation einzugreifen, wenn die Schwellenwerte bereits überschritten sind.

Literatur

- NCR, NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1991: Rethinking The Ozone Problem in Urban and Regional Air Pollution. National Academy Press, Washington D. C.
- SOLOMON, P.A., E. B. COWLING, G. M. HIDY, C. S. FURINNESS, 1999: Comparison of scientific findings from major ozone field studies in North America and Europe, Atmos. Environ. 34, 1885-1920.
- UBA, 2000: Ozonsituation 2000 in der Bundesrepublik Deutschland, Umweltbundesamt Berlin.
- UMWELTMINISTERIUM BADEN-WÜRTTEMBERG, 1995: Ozonversuch Neckarsulm/Heilbronn. Band 1 Dokumentation der Vorbereitung und Durchführung.

15 Messungen, Meßnetze, Qualitätssicherung

1 Einleitung

In den letzten Jahrzehnten hat sich die für die Luftverschmutzung verantwortliche chemische Zusammensetzung der Atmosphäre kontinuierlich geändert. In den 1950er und 1960er Jahren waren die Emissionen von Staub und SO_2 das Hauptproblem. Insbesondere in Großbritannien gab es schwerwiegende Folgen für die Gesundheit der Bevölkerung. In den 1970er und 1980er Jahren waren die Emissionen von SO_2 und der damit verbundene weiträumige Transport sowie die Versauerung von Ökosystemen das dominierende Thema. Zumindest in Westeuropa sind die SO_2 -Konzentrationen seither deutlich zurückgegangen, trotzdem ist das Problem der sauren Deposition noch nicht gelöst. Im letzten Jahrzehnt des Jahrtausends sind Photooxidantien und das Ozon in den Vordergrund gerückt, der regionale Sommersmog (siehe Kapitel 1). Zum Beispiel die Einführung der Katalysatoren für PKWs aber auch weitgreifende Maßnahmen in der Industrie bewirkten in den letzten Jahren eine signifikante Verminderung der Emissionen von NO_x (Summe aus NO und NO_2) und VOCs (flüchtigen Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffen). Ein Trend zu niedrigeren Ozonspitzenwerten ist die Folge aber auch eine abgesenkte Wahrscheinlichkeit für das Auftreten geringer Ozonkonzentrationen sowie ein Anstieg der Mittelwerte (siehe Kapitel 6). Dies hat zur Folge, daß die Sommersmogproblematik vermehrt überregionalen Charakter bekommt. Die Probleme der Luftverschmutzung in den kommenden Jahren werden darüber hinaus zum Beispiel durch ultrafeine Partikel bestimmt, die aufgrund ihrer geringen Größe lungengängig und damit schädlich für die menschliche Gesundheit sind.

Die physikalischen und chemischen Vorgänge, die für die Zusammensetzung der Atmosphäre verantwortlich sind, sind hochgradig nichtlinear und noch zu einem großen Teil Gegenstand aktueller Forschung. Daraus, sowie aus den sich wandelnden Schwerpunkten der Luftverschmutzung, entstehen hohe Anforderungen an die Strategien und Methoden zur meßtechnischen Erfassung des chemischen Zustandes der Atmosphäre. Geringe Mischungsverhältnisse der Spurenstoffe (in Bereichen bis zu Verhältnissen von einem Molekül des Spurenstoffes pro 10^{12} Luftmolekülen), Wertebereiche über viele Größenordnungen sowie vielfältige Quersensitivitäten und hohe Reaktivitäten sind nur eine kleine Auswahl an Schwierigkeiten für die Analytik. Neben den „klassischen“ Methoden der insitu Beobachtungen werden mehr und mehr aus der Ferne messende Systeme entwickelt, die boden- oder satellitengestützt aber auch von Flugzeugen aus operieren. Je nach Zweck der

Messung sind darum die Prioritäten unterschiedlich in Bezug auf die zu erfassenden Größen, die räumliche und zeitliche Abdeckung und die mögliche Qualität der Beobachtungen. Dieses Kapitel soll einen Einblick in gegenwärtigen Aktivitäten im Bereich der Messung atmosphärischer Spurenstoffe mit dem Schwerpunkt Luftverschmutzung geben und eine Einführung in die integrierte Qualitätssicherung in der atmosphärischen Umweltforschung und -überwachung bieten.

2 Meßsysteme zur Erfassung der chemischen Zusammensetzung der Luft

2.1 Systeme zur Überwachung der Luftgüte und Einhaltung von Richtlinien

Mitte der 1960er Jahre wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) ein Meßnetz zur Überwachung der großräumigen Luftqualität gegründet. 1974 wurde dieses vom Umweltbundesamt (UBA) übernommen. Heute besteht das Netz aus 23 in überwiegend ländlicher Umgebung gelegenen Stationen, wovon 9 Meßstellen personell besetzt sind. An allen Stationen werden SO_2 , NO_x , Ozon, Gesamtschwebstaub und meteorologische Größen in halbstündigen Meßintervallen gemessen. Einige Stationen mit erweitertem Programm messen unter anderem auch CO_2 , CH_4 , PAN und die Bestandteile im Schwebstaub wie Sulfat, Nitrat und Schwermetalle. Die gewonnenen Datensätze sind in bezug auf Probenahme und Analyse konsistent und werden eingehenden Qualitätskontrollen unterzogen. Stündlich werden die Meßwerte der kontinuierlich registrierenden Analysatoren an die Meßnetzdatenzentrale, die sich zur Zeit in Langen, südlich von Frankfurt/Main, befindet, übermittelt. Von dort werden z. B. Ozon- und Meteorologiedaten in das Sommersmog-Informationssystem nach Karlsruhe weitergeleitet aber nicht zur Auslösung von Maßnahmen herangezogen, da dies im Aufgabenbereich der Länder liegt.

Dazu werden in jedem Bundesland ähnliche Meßnetze von den nach Landesrecht zuständigen Behörden in festgesetzten Untersuchungsgebieten betrieben. Die Verpflichtung dazu leitet sich aus §44 BImSchG (Bundes-Immissionsschutzgesetz) ab. Danach sind in festgesetzten Untersuchungsgebieten Art und Umfang bestimmter Luftverunreinigungen, die schädliche Umwelteinwirkungen hervorrufen können, festzustellen. Gleiches gilt für Gebiete, in denen eine Überschreitung von Immissionswerten oder Immissionsleitwerten, die im deutschen oder europäischen Immissionsschutzrecht festgelegt sind, festgestellt wird oder zu erwarten ist.

Die Überwachung der Ozon-Belastung (Sommersmog) ist eine Hauptaufgabe dieser Meßnetze. Auslöser für die Unterrichtung oder Warnung der Bevölkerung vor hohen Ozonkonzentrationen ist die Überschreitung der von der Europäischen Gemeinschaft festgelegten und mit der Verordnung über Immissionswerte (22. BImSchV) in nationales Recht umgesetzten Schwellenwerte. Auslöser für Verkehrsverbote ist die Überschreitung der im BImSchG, § 40 a, festgelegten Ozonkonzentration in Verbindung mit weiteren Kriterien (z. B. Prognose, Stationsabstand). Dieses Gesetz galt bis Ende 1999, eine Nachfolgeregelung gibt es derzeit nicht. Auch die Daten dieser Meßnetze werden in das Sommersmog-Informationssystem weitergeleitet. Dort werden von Mai bis September tagsüber stündlich die Ozonkonzentrationen zentral gesammelt und ausgewertet. Insgesamt werden in Deutschland derzeit über 360 Stationen zur routinemäßigen Überwachung des Sommersmogs betrieben. Abb. 15-1 zeigt die Verteilung der Stationen der Meßnetze des Bundes und der Länder.

Auch in den übrigen Ländern der Europäischen Union werden vergleichbare Meßnetze betrieben. Nach der EU-Richtlinie 92/72/EEC von 1992 über die Luftverschmutzung durch Ozon sind Überschreitungen bestimmter Grenzwerte zur Information und Warnung der Bevölkerung innerhalb eines Monats nach dem Auftreten an die Europäische Kommission zu melden. Dazu müssen die Daten nicht validiert sein. Die ent-

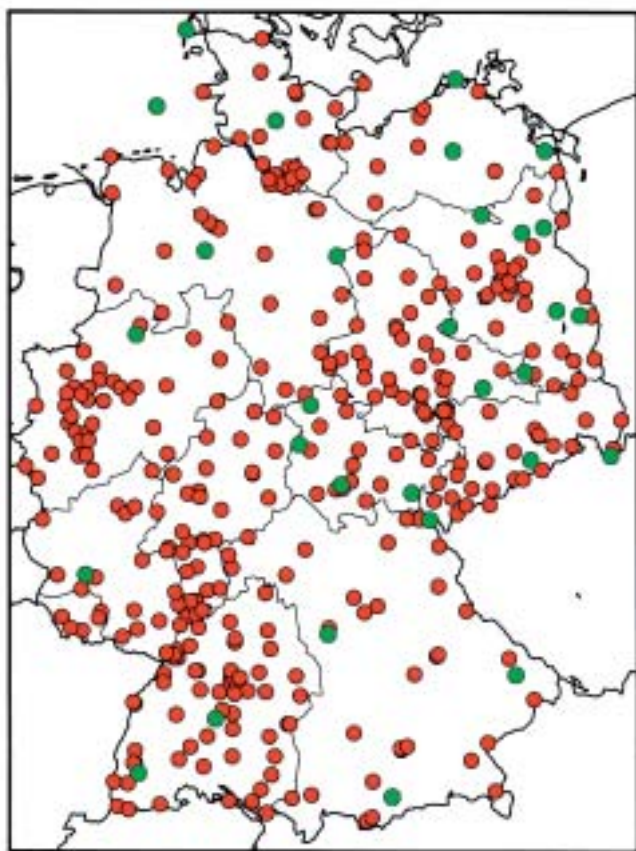


Abb. 15-1: Meßnetze des UBA (grüne Kreise) und der Länder (rote Kreise), Stand: August 1999.

sprechenden Grenzwertüberschreitungen einschließlich zusätzlicher Statistiken aus validierten Daten müssen der Kommission spätestens 6 Monate nach Ablauf des Kalenderjahres vorliegen. In Tab. 15-1 sind die in der Richtlinie genannten Werte aufgelistet. Im Rahmen dieser Richtlinie wurden 1999 etwa 1450 Stationen betrieben. Die Bearbeitung und Berichterstattung ist Aufgabe des „European Topic Centre on Air Quality (ETC-AC)“ der „European Environmental Agency (EEA)“ (Europäisches Umweltamt in Kopenhagen).

Eine weitere europäische Initiative im Bereich der Luftverschmutzung ist das EMEP-Programm (Co-operative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-Range Transmission of Air Pollutants in Europe). Im Rahmen der LRTAP-Konvention (Convention on Long Range Transboundary Air Pollution, eine Konvention der United Nations Economic Commission for Europe, UN/ECE, von 1979) ist es die Hauptaufgabe des EMEP-Programms, für Regierungen regelmäßig qualifizierte wissenschaftliche Informationen bereitzustellen, um damit die Entwicklung – und weiter die Evaluierung – der internationalen Protokolle zur Reduktion von Emissionen innerhalb der Konvention zu unterstützen.

Ursprünglich lag der Schwerpunkt des EMEP-Programms in der Bewertung des grenzüberschreitenden Transportes im Hinblick auf Versauerung und Eutrophierung in Europa. Später wurden die Aufgaben ausgedehnt auf die Bildung von bodennahem Ozon und auf langlebige organische Verbindungen (persistent organic pollutants, POPs) sowie Schwermetalle. Hauptarbeitsgebiete sind das Sammeln von Emissionsdaten, Messungen zur Qualität der Luft und des Niederschlags sowie die Modellierung des atmosphärischen Transportes und der Deposition von Luftschadstoffen (siehe auch Kapitel 13). In diesem Rahmen werden Meßdaten von etwa 150 Stationen, die zum großen Teil mit Stationen des obengenannten europäischen Netzes zur Überwachung des Sommersmogs identisch sind, gesammelt, soweit möglich qualitätsgesichert und nach einer Bearbeitungsphase von zwei bis drei Jahren in verschiedenen Berichten veröffentlicht.

Ein weltweites Überwachungsprogramm der Weltorganisation für Meteorologie (WMO, eine Fachorganisation der UNO) ist das „Global Atmosphere Watch (GAW)“-Programm. Ziel dieses langfristig angelegten

Grenzwert für:	Konzentration ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mittelungs-Zeitraum (h)
Schutz der Gesundheit	110	8
Schutz der Vegetation	220	1
	65	24
Information der Bevölkerung	180	1
Warnung der Bevölkerung	360	1

Tab. 15-1: Grenzwerte für Ozonkonzentrationen nach der EU-Verordnung 92/72/EEC.

Programms ist es, auf hohem Qualitätsniveau Informationen über die Hintergrundbelastung der Atmosphäre mit Luftverunreinigungen und anderen Spurenstoffen zu gewinnen. Mit Hilfe der gleichzeitigen Messung einer großen Zahl von meteorologischen Größen sollen die Zusammenhänge mit Klima und Umwelt besser verstanden werden. Hauptthemen sind dabei z. B. der Treibhauseffekt, das Ozonloch und resultierende Klimaänderungen. Insbesondere die schleichenden Veränderungen der Konzentrationen von Spurenstoffen in der Hintergrundatmosphäre sind nur mit präzisen Langzeitbeobachtungen zu erkennen. Dazu besteht das Meßnetz derzeit aus 21 Globalstationen und zusätzlich noch rund 300 sogenannten „Regionalstationen“, die notwendige zusätzliche Informationen in der Fläche liefern, deren Meßprogramm jedoch weniger umfangreich ist. Die Qualitätssicherungsaktivitäten im Rahmen von GAW werden im Abschnitt 3.6 behandelt.

Die deutsche Globalstation Zugspitze/Hohenpeißenberg wird gemeinsam vom Deutschen Wetterdienst (DWD) und dem UBA an zwei Standorten betrieben: auf der Zugspitze, dem höchsten Berg Deutschlands am Nordrand der Alpen, 2960 m ü. NN, bzw. in der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS) in 2650 m ü. NN und am Hohenpeißenberg (Meteorologisches Observatorium Hohenpeißenberg, MOHp) im Alpenvorland, 40 km nördlich der Zugspitze in 985 m ü. NN (siehe dazu auch die früheren PROMET-Hefte 4/1996 und 1/2/1997). Im Rahmen des DACH-Projektes besteht eine enge Kooperation mit der Schweizer Meteorologischen Anstalt (SMA) und der österreichischen Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZMAG). Das Ziel dieser Kooperation ist es, die Meßdaten der deutschen Globalstation durch Daten zweier weiterer Alpenstationen zu ergänzen: Jungfraujoch (Schweiz, 3580 m ü. NN) und Sonnblick (Österreich, 3106 m ü. NN).

Zur Überwachung der stratosphärischen Ozonschicht gibt es in Europa ein Netz von etwa 10 Stationen (Network for the Detection of Stratospheric Change, NDSC), an denen ein- bis zweimal pro Woche vertikale Profile mittels Ozonsonden gemessen werden. Diese Sonden werden größtenteils von den nationalen Wetterdiensten betrieben. In Deutschland werden vom DWD am MOL (Meteorologisches Observatorium Lindenberg, seit 1974) und am MOHp (seit 1967) Ozonprofile gemessen. Seit 1987 werden die Ballonsondierungen am MOHp durch ein Laser-Radar (LIDAR)-Gerät ergänzt. Dieses liefert sehr genaue Ozonprofile zwischen 15 und 50 km Höhe. Auch im internationalen Vergleich verfügt das Observatorium Hohenpeißenberg damit über ein hervorragendes Instrumentarium zur Ozonüberwachung. Die angewandten Meßverfahren sind voneinander größtenteils unabhängig, was bereits im operationellen Meßbetrieb für eine Kontrolle sorgt und eine hohe Datenqualität gewährleistet. Durch die von Anfang an strenge Qualitätsüberwachung wurde in bezug auf die Homogenität der Reihe ein weltweit einmaliger Ozondatensatz geschaffen.

Die von den Sonden gemessenen Ozonprofile werden in Echtzeit an das Norwegische Institut für Luftforschung (NILU) übermittelt und dort zentral verwaltet. Neben der Überwachung der Ozonschicht sind die Sondendaten aufgrund ihrer hohen Qualität zum Beispiel wichtig für die Validierung von Satellitenprodukten. Beim Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW, in Reading/England) werden sie in Kürze in der operationellen Datenassimilation zur Verbesserung der Vorhersage des Strömungsfeldes in der Tropopausenregion genutzt.

2.2 Forschungsaktivitäten

Als erstes Beispiel für Forschungsaktivitäten im Bereich der experimentellen Untersuchung der chemischen Zusammensetzung der Troposphäre soll das TOR-2 (Tropospheric Ozone Research, Phase 2)-Projekt genannt werden. TOR ist ein Unterprojekt von EUROTRAC (EUREKA Project on the Transport and Chemical Transformation of Environmentally Relevant Trace Constituents in the Troposphere over Europe). Nach einer ersten achtjährigen Phase, die 1995 zu Ende ging, befindet sich dieses Programm in der zweiten Phase bis voraussichtlich Mitte 2002. Das wissenschaftliche Ziel von TOR-2 ist die Quantifizierung wichtiger Prozesse in der Atmosphäre insbesondere zur Verbesserung des wissenschaftlichen Hintergrundes für die Entwicklung wirkungsbasierter Kontrollstrategien für photochemische Oxidantien über Europa. Eine besondere Aufgabe während der ersten Phase von TOR war das Sammeln und Evaluieren von Daten mit hoher Qualität von atmosphärischen Spurenstoffen, die von besonderer Wichtigkeit für das Verständnis atmosphärischer Prozesse und Mechanismen sind. Dazu wurde am RIVM (National Institute of Public Health and Environmental Protection, Niederlande) eine Datenbank errichtet, deren Nutzung in der zweiten Phase ausgebaut werden soll. Aufgebaut werden soll dabei auf den Datenbanken von EMEP und anderen (wie z. B. dem ETC-AQ und nationalen Einrichtungen). Daten von Stationen, die im Rahmen von TOR-1 betrieben wurden und ihre Messungen auch während TOR-2 fortsetzen, werden durch weitere Stationen ergänzt. Zusätzlich sollen die Ergebnisse von Feldmeßkampagnen in die Datenbank eingehen.

Von Satelliten aus werden seit mehr als 20 Jahren Messungen von Spurenstoffen durchgeführt. Der wichtigste Beitrag der Satelliten liegt unzweifelhaft in der Überwachung der Ozonschicht. Für den Bereich der Troposphäre gibt es allerdings bisher nur wenige Daten. Dies liegt zum einen daran, daß die meisten Systeme nicht durch Wolken blicken können. Andererseits ist die nötige vertikale Auflösung für eine adäquate Wiedergabe troposphärischer Profile noch nicht erreicht und die troposphärischen Anteile zum Beispiel am gesamten Ozon liegen in der selben Größenordnung wie die Meßfehler der Instrumente. Erst in der nächsten Zukunft ist damit zu rechnen, daß Satellitendaten zum

Beispiel zur Überwachung des Sommersmogs herangezogen werden können. Wie die Ozonsonden werden sie aber in Kürze bereits für die Wettervorhersage genutzt (siehe oben). Die Abb. 15-2 und 15-3 geben Auskunft über vergangene, aktuelle und geplante Satellitenmessungen des Gesamtzongehaltes der Atmosphäre und Ozonprofilen von 1978 bis 2015. Neben Ozon werden Gesamtgehalte und Profile verschiedener anderer Spurenstoffe und Aerosole gemessen. Auch hierbei liegt der Schwerpunkt meist im Bereich der Stratosphäre. Da von den Geräten auf Satelliten nur Strahlung in unterschiedlichen Wellenlängen gemessen werden kann, müssen die Zielgrößen aus diesen Daten mittels komplizierter Algorithmen abgeleitet werden. Dabei werden häufig Zusatzinformationen wie Temperaturdaten aus Wettervorhersagemodellen oder Annahmen über die klimatologische Form von Vertikalprofilen benötigt. Aus diesem Grund ist das „Ground Truthing“, die Überprüfung der Daten anhand von bodengestützten Messungen, für Satelliten besonders wichtig. Während der gesamten Lebensdauer müssen die Satellitendaten anhand von konventionellen Messungen global geeicht und validiert werden.

Das größtenteils von der EU finanzierte Forschungsprogramm MOZAIC (Measurement of Ozone and Water Vapour by Airbus In-service Aircraft) wurde 1993 von europäischen Wissenschaftlern, Flugzeugherstellern und Fluggesellschaften ins Leben gerufen, um an Bord von Linienflugzeugen experimentelle Daten zu gewinnen. Von fünf Langstreckenflugzeugen werden regelmäßig und automatisch Ozon und Wasserdampf sowie bald auch NO_y (= Summe aller Stickoxidspezies) und CO gemessen. Dabei werden täglich Vertikalprofile in mehreren europäischen Städten und während des Reisefluges in 9 – 12 km Höhe Daten aufgezeichnet. Die Hauptaufgabe von MOZAIC ist der Aufbau großer Datenbasen zur Erzeugung von Klimatologien der gemessenen Größen. Diese dienen z. B. der Untersuchung der chemischen und physikalischen Prozesse in der Nähe der Tropopause, der Bestimmung des Einflusses von Flugzeugabgasen in der sensitiven Tropopause-region und der Evaluierung von Chemie-Transportmodellen. Ein besonderer Schwerpunkt ist die Qualitätskontrolle, um den größten wissenschaftlichen Nutzen aus diesem aufwendigen Programm ziehen zu können.

3 Die Integrierte Qualitätssicherung in der Forschung

3.1 Überblick

In den 1950er Jahren legte der amerikanische Statistiker W. Edwards Deming den Grundstein zur Entwicklung systematischer und ganzheitlicher Konzepte für die Qualitätsbestimmung, -überwachung und -kontrolle von industriellen Produkten. Der am 20. Dezember 1993 verstorbene Deming erzielte seine ursprünglichen

Erfolge in Japan, wo seit 1951 zu seinen Ehren der „Deming Prize“ für „corporate quality“ vergeben wird. Heute wird weltweit – insbesondere aber in den Vereinigten Staaten von Amerika – an ausgeklügelten Methoden zu einem umfassenden Qualitätsmanagement gearbeitet, für das sich in der Zwischenzeit die Bezeichnung „Total Quality Management, TQM“ in der englischsprachigen Literatur eingebürgert hat. Die zutreffendste deutsche Übersetzung dürfte wohl mit dem Begriff „Integriertes Qualitätsmanagement, IQM“ gegeben sein.

Auch in Europa wird intensiv an Maßnahmen zur Qualitätsverbesserung gearbeitet, und die 1987 von der Internationalen Standardisierungs-Organisation eingeführte Normenreihe ISO-9000 gilt als ein Meilenstein für diese Entwicklung. Diese ISO-Richtlinien sind eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung zur Ausnützung des vollen Potentials des integrierten Qualitätssicherungskonzeptes. Dieser Erkenntnis folgend haben 1988 europäische Konzerne eine Europäische Stiftung für Qualitätsmanagement (EFQM) in den Niederlanden gegründet, die sich ausschließlich mit diesen ganzheitlichen Konzepten und deren Anwendungen innerhalb Europas befaßt.

3.2 Qualitätssicherung in der atmosphärischen Umweltforschung

Die aus der Nutzung nationaler und internationaler Datensätze erzielten Erkenntnisse haben einen erheblichen Einfluß auf die Umwelt- bzw. Energiepolitik und über die Technikfolgenabschätzung auch auf den ökonomischen Zustand und die Entwicklung der Gesamtwirtschaft. Gerade in Anbetracht der daraus resultierenden gesellschaftspolitischen Konsequenzen ist eine rigorose Sicherung der Qualität der verwendeten Daten eine unabdingbare Voraussetzung. Generell ist davon auszugehen, daß Ergebnisse aus der lokalen, regionalen und insbesondere der globalen Umweltüberwachung in der Zukunft nur noch dann akzeptiert und für umweltpolitische Entscheidungen berücksichtigt werden, wenn die Datensätze unter strenger Einhaltung von umfassenden Qualitätssicherungsmaßnahmen erzielt wurden und zusätzlich „adequate for their intended purpose“ sind.

Die wissenschaftliche Qualitätssicherung für Forschungsprojekte besteht in der Entwicklung und Durchführung von Maßnahmen zur Gewährleistung einer für die angestrebten wissenschaftlichen Aussagen geeigneten Daten- und/oder Modellqualität. Die operationelle Strategie beruht auf den Hauptelementen einer wissenschaftlichen Qualitätssicherung, die sich zusammensetzt aus:

- a) Definition der Qualitätsziele (DQZ). Hier stellt sich als erste Aufgabe die klare Formulierung der priorisierten Forschungsziele, aus denen sich dann zwangsläufig die notwendigen Qualitätssicherungsmaßnahmen ergeben. Die DQZ beziehen sich auf die Genauigkeit, Präzision, Vollständigkeit, Vergleichbarkeit

und Repräsentativität der erforderlichen Messungen. Laut ISO 5725 beschreibt die Genauigkeit den Grad der Übereinstimmung zwischen einem Testergebnis und einem akzeptierten Referenzwert. Bezogen auf eine Reihe von Tests beinhaltet die Genauigkeit eine Kombination zufälliger Komponenten und einer systematischen Komponente. Die zufälligen Komponenten werden in der Angabe der Präzision zusammengefaßt, als Standardabweichung von unabhängigen Testergebnissen, die unter ähnlichen Bedingungen erlangt wurden. *Die **Genauigkeit** ist ein Maß dafür, wie dicht ein einzelner Meßwert oder das Mittel über verschiedene Messungen am wahren Wert liegen. Dagegen beschreibt die **Präzision** die Reproduzierbarkeit einer Messung. Üblicherweise wird als Standardabweichung die Übereinstimmung von verschiedenen Messungen derselben Größe, die unter ähnlichen Bedingungen durchgeführt werden, angegeben.*

- b) Qualitätskontrolle (QK). Diese liegt primär in der Verantwortung der einzelnen für die Messung verantwortlichen Wissenschaftler, die entsprechende Maßnahmen vor Beginn ihrer Forschungsarbeiten in einem QK-Plan definieren. Die QS-Abteilung hat dabei wiederum eine beratende Rolle, schlägt Richtlinien für die Erstellung dieser Pläne vor (Workshops) und stellt den beteiligten analytischen Labors Kalibriergase zur Verfügung. Die QK umfaßt Festlegung der Kalibrierverfahren, Instrumenten- und Methodenvergleiche und setzt voraus, daß „good laboratory praxis“ eingehalten wird. Die QK ist für verschiedene primäre Meßgrößen, u. a. Ozon, CO, Peroxide, NO_x, ausgewählte VOCs, meteorologische Parameter, unmittelbar durchführbar und zum Teil auch bereits in ISO- (weltweiten), EN- (europäischen) und DIN- (nationalen) Richtlinien festgelegt, verlangt aber bei allen primären und insbesondere bei abgeleiteten Parametern noch erhebliche Entwicklungsarbeiten.
- c) Qualitätsbeurteilung (QB). Diese liegt primär in der Verantwortung der *unabhängigen* QS-Abteilung und beinhaltet unter anderem die Durchführung unabhängiger System- und Leistungsaudits. Dabei bezieht sich die Qualitätssicherung (QS-Abteilung) auf die Angaben der von den beteiligten Wissenschaftlern erstellten DQZ und QK-Pläne. Der QS-Abteilung stehen „Ad Hoc“ Ausschüsse zur Seite, welche die QS-Abteilung bei der Entwicklung neuer QB-Methoden beraten.

3.3 Qualitätssicherung für Modellierung

In iterativen Schritten werden in Zusammenarbeit mit den verantwortlichen Wissenschaftlern folgende Arbeiten durchgeführt:

1. Wissenschaftliche Dokumentation der Modelle in einem einheitlichen Format. Dazu gehört die Ziel-

setzung und der Anwendungsbereich der einzelnen Modelle, und das Format der Eingangs- und Ausgangsdaten.

2. Diagnostische Experimente zum Testen der einzelnen Submodule. Insbesondere wird dabei die Vergleichbarkeit bzw. mögliche Harmonisierung der Module für Transportvorgänge (mittlerer horizontaler und vertikaler Transport, Austauschprozesse, z. B. insbesondere zwischen der planetarischen Grenzschicht und der freien Troposphäre), Gasphasenchemie, Photolyserate, Emission und trockene Deposition ermittelt. Die für die Durchführung dieser Experimente notwendigen, qualitätsgesicherten Datensätze müssen erstellt werden.
3. Erarbeitung der Evaluierungskriterien für Modelle. Dabei müssen unter anderem folgende Vorarbeiten geleistet werden:
 - Harmonisierung des Modellgebiets mit dem Feldexperiment unter Berücksichtigung der räumlichen und zeitlichen Vergleichbarkeit der Eingangsparameter für Emissionen, Dichte der Meßstationen, Gitterweite, Spezifikation der chemischen Parameter, usw.
 - Definition der Datenqualitätsziele für alle direkten und abgeleiteten Meßparameter, die in den vorgesehenen Feldexperimenten für die Modul- bzw. Modellevaluierung benötigt und erstellt werden müssen.
 - Entwicklung der Kriterien, mit denen die Treffsicherheit der Modellsimulation ermittelt werden.
 - Methodenentwicklung zur Durchführung und Interpretation des Vergleichs der Modellresultate mit dem Evaluierungsexperiment.

3.4 Ergebnisse der QS-Aktivitäten

Dieser kurze Überblick veranschaulicht die komplexe und aufwendige Natur eines integrierten Qualitäts-Managementsystems zur Erstellung von atmosphärisch relevanten Datensätzen. Eine Vernachlässigung oder gar Unterlassung dieser Qualitätssicherung würde zu ernsthaften Zweifeln an der Aussagekraft der Daten führen. Die Politik könnte unter diesen Umständen die Nutzung dieser Daten als Ausgangsbasis für umweltpolitische Entscheidungen ausschlagen, d. h. der „Kunde“ müßte die Annahme des „Produktes“ verweigern.

In den vergangenen Jahren hat sich die Forderung nach integrierten Qualitätssicherungsmaßnahmen für öffentlich geförderte Forschungsprojekte immer mehr durchgesetzt. Die Qualitätssicherungsabteilung (QS-Abteilung) des IFU (Fraunhofer-Institut für Atmosphärische Umweltforschung) war seit 1992 an zahlreichen nationalen und internationalen Forschungsprojekten beteiligt und für die Planung und Durchführung der wissenschaftlichen Qualitätssicherung verantwortlich. Im Folgenden werden anhand zweier Beispiele die QS-Aktivitäten beschrieben.

3.5 Beispiel: TRACT

Das EUROTRAC-Feldexperiment TRACT (siehe auch Kapitel 7) wurde 1992 begleitet von einem aufwendigen Qualitätssicherungskonzept für alle primären Daten von Bodenstationen und Meßflugzeugen durchgeführt. Die zweite Intensivmeßphase vom 16. – 17. September 1992 wurde im Rahmen des TFS (Förderschwerpunkt Troposphärenforschung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, BMBF)-Leitthemas 1 als Testfall für die Evaluierung von CT (Chemie-Transport)-Modellen ausgewählt. Unter anderem sollte das Experiment dazu beitragen, Qualitätsziele für Modelle (Model Quality Objectives, MQOs) zu definieren sowie die endgültigen Kriterien für die Validierung der Modelle im TFS zu bestimmen. Für den Prozeß der Evaluierung ist es von besonderer Wichtigkeit, nur experimentelle Daten von bekannter Qualität heranzuziehen. Die Qualitätsziele für Messungen werden üblicherweise über folgende Begriffe (siehe Abschnitt 3.2) definiert:

- Genauigkeit und Präzision,
- Vollständigkeit,
- Vergleichbarkeit,
- Repräsentativität.

Genauigkeit, Präzision und Vollständigkeit

Aus den experimentellen Ergebnissen können Genauigkeit, Präzision und Vollständigkeit üblicherweise direkt mittels Methoden der Kalibrierung, des Instrumentenvergleichs und der Durchsicht der Daten bestimmt werden. Schwieriger hingegen ist die Abschätzung der Vergleichbarkeit und noch mehr der vierdimensionalen

Repräsentativität der Daten. Die Tab. 15-2 bis 15-9 enthalten die Richtlinien, die für die verschiedenen Beobachtungsmethoden in bezug auf Genauigkeit, Präzision und Vollständigkeit vorgegeben waren.

An 3 Standorten gab es Fesselballons mit denselben Anforderungen an Genauigkeit, Präzision und Vollständigkeit wie für die Messungen der Radiosonden.

Es gab 18 meteorologische Bodenstationen in Frankreich, 136 in Deutschland und 29 in der Schweiz. Betrieben wurden diese von Météo-France, dem DWD, den Landesanstalten für Umweltschutz (LfUs von Baden-Württemberg, Hessen, Bayern und Rheinland-Pfalz), ANETZ/ENET, REKLIP, ASPA und BASF. Diese Stationen arbeiteten nach eigenen Qualitätssicherungsprotokollen. Im Prinzip ist die Datenqualität unbekannt, es wird aber angenommen, daß die Qualität derjenigen der temporären TRACT-Stationen entspricht.

20 Bodenstationen für chemische Messungen gab es in Frankreich, 131 in Deutschland und 11 in der Schweiz. Betrieben wurden diese Stationen von ASPA, LFUs, BASF und EMPA/BUWAL jeweils mit eigenen Qualitätssicherungsprogrammen. Im Prinzip ist die Datenqualität unbekannt, es wird aber angenommen, daß die Qualität der temporären TRACT-Stationen entspricht.

Vergleichbarkeit

Im Bereich der aufgezeigten Unsicherheiten sind alle qualitätsgesicherten meteorologischen TRACT-Daten vergleichbar. Dieses wurde durch das konsequente Einhalten des Qualitätssicherungsplanes erreicht, insbe-

	Genauigkeit	Präzision	Vollständigkeit
Windgeschwindigkeit	1,0 m/s	0,5 m/s	75 – 90 % der möglichen Daten
Windrichtung	5°	3°	"
Temperatur	1 °C	0,5 °C	"
Rel. Feuchte	5 %	3 %	"
Druck	1,5 hPa	1,0 hPa	"

Tab. 15-2: Messungen von Radiosonden (an 19 Standorten).

	Genauigkeit	Präzision	Vollständigkeit
Windgeschwindigkeit	0,5 m/s	0,3 m/s	> 90 % der möglichen Daten
Windrichtung	3°	3°	"
Temperatur	0,5 °C	0,5 °C	"
Rel. Feuchte	3 %	3 %	"
Druck	3 hPa	3 hPa	"

Tab. 15-3: Messungen von Fesselballons (an 7 Standorten).

	Genauigkeit	Präzision	Vollständigkeit
Windgeschwindigkeit	1 m/s	1 m/s	> 90 % (2 < u < 10 m/s)
Windrichtung	25°	25°	"
Vert. Auflösung	50 m	10 m	"

Tab. 15-4: Sodar-Messungen (an 6 Standorten).

	Genauigkeit	Präzision	Vollständigkeit
Windgeschwindigkeit	0,5 m/s	0,5 m/s	> 90 % der möglichen Daten
Windrichtung	5°	5°	"
Temperatur	0,3 °C	0,2 °C	"
Rel. Feuchte	2 %	1,5 %	"
Druck	0,5 hPa	0,5 hPa	"

Tab. 15-5: Meteorologische Messungen an Bodenstationen (16 temporäre TRACT-Stationen).

	Genauigkeit	Präzision	Vollständigkeit
Bodenozon (an 8 Stationen)	10 % oder 2 ppb	5 % oder 2 ppb	> 90 % der möglichen Daten "
NO, NO ₂ , NO _x	30 %	30 %	"
NO _y (an 1 Station)	30 % oder 2 ppb	30 % oder 2 ppb	"
CO (an 5 Stationen)	10 % oder 15 ppb	10 % oder 10 ppb	"
NMHC C ₂ -C ₇ (an 2 Stationen)	25 % > 10 ppt C	10 %	(nicht kontinuierlich) > 90 % der möglichen Daten
SO ₂ (an 3 Stationen)	10 % oder 2 ppb	10 % oder 2 ppb	"

Tab. 15-6: Chemische Messungen an Bodenstationen (9 temporäre TRACT-Stationen).

Nur 3 Stationen in Frankreich, 79 in Süddeutschland und 11 in der Schweiz haben O₃ und NO₂ so gemessen, daß daraus O_x berechnet werden konnte, eine für die Abschätzung der Vergleichbarkeit von Ozonmessungen in schwach und stark verschmutzten Gebieten wichtige Größe.

	Genauigkeit	Präzision	Vollständigkeit
Ozon	10 % oder 2 ppb	5 % oder 2 ppb	> 80 % der möglichen Daten
NO ₂ (2 Flugzeuge)	30 %	30 %	> 70 % der möglichen Daten
NO	30 %	30 %	> 80 % der möglichen Daten
NO _y (2 Flugzeuge)	30 %	30 %	"
SO ₂ (4 Flugzeuge)	25 %	20 %	"
H ₂ O ₂ (1 Flugzeug)	35 %	35 %	> 50 % der möglichen Daten
VOC (2 Flugzeuge)	25 %	20 %	> 90 % der möglichen Daten
Temperatur*	1,5 °C	1,5 °C	"
Rel. Feuchte*	5 %	5 %	"

Tab. 15-7: Messungen von Flugzeugen für das gesamte TRACT-Gebiet (5 Flugzeuge).

* Mittlere Abweichungen zwischen den Flugzeugen wurden korrigiert.
Windgeschwindigkeit und -richtung wurden nicht Qualitätsgesichert: die Datenqualität ist unbekannt. Der Schwerpunkt der Flugzeugmessungen über dem gesamten Gebiet lag auf der Chemie.

	Genauigkeit	Präzision	Vollständigkeit
Ozon	10 % oder 2 ppb	10 % oder 2 ppb	> 80 % der möglichen Daten
NO ₂ (1 Flugzeug)	20 % oder 0,5 ppb	20 % oder 0,5 ppb	"
Spezifische Feuchte**	0,5 g/kg	0,5 g/kg	> 90 % der möglichen Daten
Temperatur*	0,5 °C	0,5 °C	"
Druck*	2 hPa	2 hPa	"

Tab. 15-8: Messungen von Flugzeugen für das eingebettete Gebiet (5 Flugzeuge).

* Mittlere Abweichungen zwischen den Flugzeugen wurden korrigiert.
** Spezielles Kalibrierungsprogramm während TRACT. Windgeschwindigkeit und -richtung: die Datenqualität ist unbekannt. Der Schwerpunkt der Flugzeugmessungen über dem eingebetteten Gebiet lag auf der Meteorologie.

	Genauigkeit	Präzision	Vollständigkeit
Ozon	10 % oder 3 ppb	10 % oder 2 ppb	12 Profile pro Tag
Höhenauflösung (bis 1000 m)	10 m		

Tab. 15-9: Messungen von Ozonsonden (an 1 Station im eingebetteten Gebiet mit einem Fesselballon).

sondere durch die Kalibrierung und den Vergleich der Instrumenten- und Beobachtungssysteme. Abb. 15-4 zeigt die Ergebnisse der Ozonmessungen, die während eines Vergleichsfluges der fünf beteiligten Flugzeuge am 9. September durchgeführt wurden. Um eine netzwerkweite Vergleichbarkeit der Daten zu gewährleisten, wurden zusätzlich einige Datensätze um systematische Abweichungen der Messungen und angegebene Unsicherheiten modifiziert. Damit war TRACT die erste Feldmeßkampagne in Europa, die von einem harmonisierten und aufwendigen Qualitätssicherungsprogramm begleitet wurde.

Repräsentativität

Datensätze müssen von bekannter Qualität und auf den beabsichtigten Verwendungszweck abgestimmt sein. Die Studie zur Modellevaluierung innerhalb von TFS konzentriert sich in erster Linie auf die Meteorologie und den Transport, so daß eine adäquate Kenntnis des Strömungsfeldes am 16. und 17. September 1992 über dem TRACT-Gebiet (275 · 375 km²) erforderlich ist. Insgesamt 17 Radiosonden (siehe Tab. 15-2), 7 Fesselballons (siehe Tab. 15-3), 6 Sodars (siehe Tab. 15-4), 14 temporäre meteorologische Bodenstationen sowie alle Routinemeßstationen des DWD, der SMA und von Météo-France versprechen einen harmonisierten dreidimensionalen Datensatz mit einer räumlichen Auflösung besser als drei Stunden und einer geographischen Auflösung unter 1° für das gesamte bzw. unter 1/3° für das eingebettete Teilgebiet des Rheintals. Zusätzlich

wurde die zeitliche und räumliche Auflösung durch insgesamt 10 Flugzeuge (siehe Tab. 15-7 und 15-8) erhöht. Die eine Hälfte der flugzeuggestützten Messungen konzentrierte sich dabei hauptsächlich auf meteorologische Daten für das Rheintal während die übrigen das gesamte TRACT-Gebiet mit zusätzlichen chemischen und meteorologischen Daten abdeckt.

Daraus kann geschlossen werden, daß der harmonisierte meteorologische Datensatz über dem gesamten TRACT-Gebiet repräsentativ ist für eine Auflösung von 60 km bzw. über dem Rheintal für eine Auflösung von 20 km, ohne daß eine weitere statistische Behandlung des Datensatzes – etwa mittels Autokorrelationen oder Interpolationsmethoden – vonnöten ist. Mit dem KAMM-Modell der Universität Karlsruhe wurde bereits demonstriert, daß das am 16. September 1992 beobachtete Windfeld über dem gesamten TRACT-Gebiet simuliert werden kann. Dabei reproduziert das Modell die typischen orographischen Effekte, wie die Kanalisation der Strömung im Rheintal, die Strömung in den Kraichgau und die Umströmung des nördlichen Schwarzwaldes in Richtung Stuttgart.

Die TFS-Modellevaluierungsstudie (16./17. September 1992) macht nur eingeschränkten Gebrauch vom chemischen Datensatz, was eine detaillierte Qualitätsbewertung überflüssig macht. Trotzdem ist hier eine allgemeine Bemerkung angemessen. Ein repräsentativer Datensatz (z. B. für Ozon) für das gesamte TRACT-Gebiet würde eine statistische Behandlung der Daten

TRACT-Vergleichsflug 9. Sept. 1992

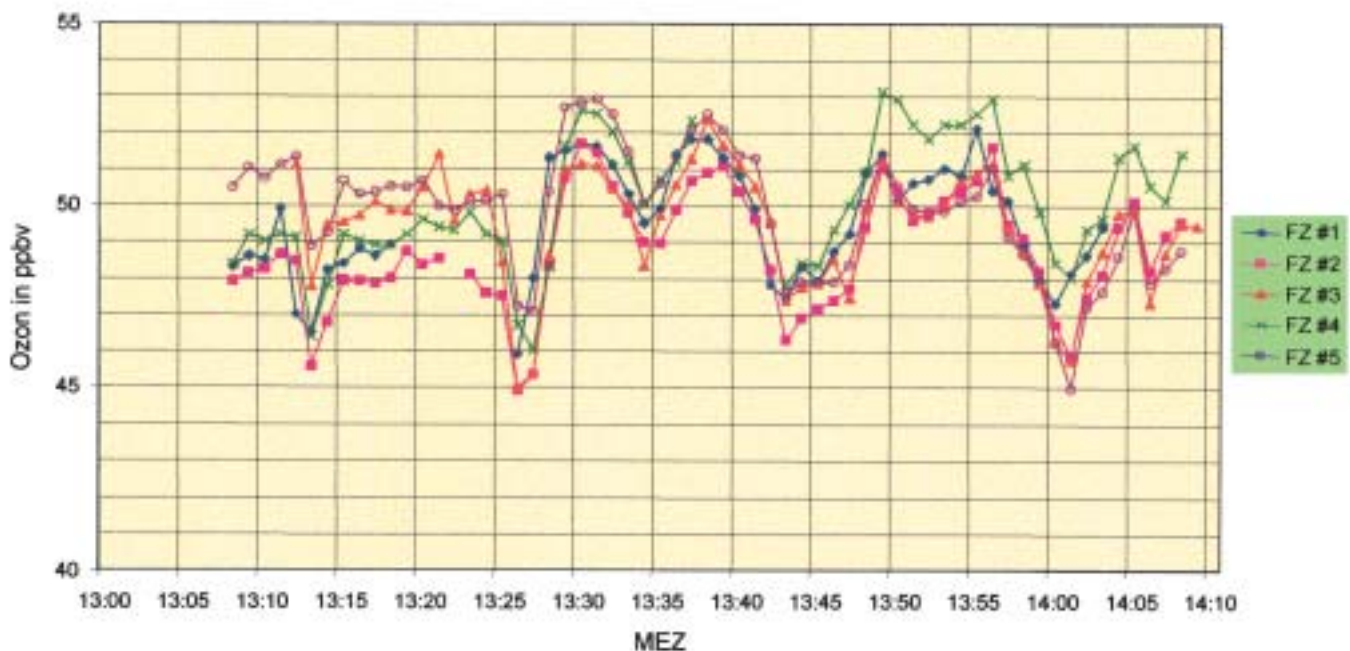


Abb. 15-4: Ergebnisse der Ozonmessungen aus einem Vergleichsflug der fünf Flugzeuge vom 9. September 1992.

erfordern. Obwohl die chemischen Daten zweifelsfrei von großem Wert für diagnostische Fallstudien über beschränkten Gebieten sind, können daraus keine „repräsentativen“ Werte der chemischen Parameter (z. B. Ozon, NO_x, CO oder VOCs) für die Meso- α - oder Meso- β -Skala abgeleitet werden. Ein beträchtlicher Aufwand müßte betrieben werden, um einen höheren Qualitätsstand zu erreichen. Somit muß die Repräsentativität der chemischen Daten zur Zeit als unbekannt angenommen werden.

3.6 Beispiel: Qualitätssicherung für das globale Meßnetz WMO-GAW

Einer der Schwerpunkte des GAW-Programmes liegt in der Sicherstellung der Datenqualität, der Verfügbarkeit und der globalen Abdeckung. Im Hinblick auf das Ziel, mit dem GAW-Netzwerk Daten hoher Qualität zu erzeugen, wurde eine dreiteilige Struktur aufgebaut, bestehend aus den GAW-Stationen, den „Quality Assurance Science Activity Centres (QA/SACs)“ und den „World Data Centres (WDCs)“. Qualitätssicherungsziele wurden für jeden GAW-Parameter (Genauigkeit, Präzision, Vollständigkeit, Vergleichbarkeit und Repräsentativität) von den „Scientific Advisory Groups (SAGs)“ eingeführt, um für alle Parameter und für alle GAW-Stationen von den GAW-Kalibrierungseinrichtungen Referenzstandards und Prozeduren für die Qualitätskontrolle zu entwickeln. Dies beinhaltet auch die Standardisierung von Betriebsverfahren. Ebenfalls wurden gezielt Partnerschaften gefördert, die dazu dienen, die in einem Land vorhandenen Expertisen Partnern zur Verfügung zu stellen, deren Technologie weniger weit entwickelt ist. Ein weiteres Beispiel ist die Organisation von Ausbildungsaktivitäten für das GAW-Stationpersonal.

Derzeit gibt es – in unterschiedlichen Entwicklungsstadien – drei QA/SACs: eines für Afrika und Europa in Deutschland, eines für Asien und den südwestpazifischen Raum in Japan und ein drittes für Nord- und Südamerika in den USA. Daneben gibt es zur Zeit zwölf „World Calibration Centres (WCCs)“ und sechs WDCs. WCCs gibt es für Treibhausgase, Ozon, Strahlung, Niederschlagschemie, reaktive Gase, Aerosole und Radioaktivität. Diese WCCs arbeiten eng mit den QA/SACs zusammen, um eine bekannte Qualität der Daten, die an die WDCs abgegeben werden, zu garantieren. WDCs wurden für Aerosole, Strahlung, atmosphärische Trübung, Ozon und UV-B, Spurengase und Niederschlagschemie eingerichtet. Eine enge Infrastruktur innerhalb der Datenzentren sowie zwischen QA/SACs und Datenzentren wurde aufgebaut und Prozeduren für gemeinsame Systeme zur Verwaltung von Datenbanken bzw. Prozeduren der Datenlieferung und -verteilung wurden definiert. Daneben wird besonders Wert darauf gelegt, daß es enge Verbindungen zu anderen wissenschaftlichen Organisationen gibt, wie zum Beispiel dem „International Global Atmospheric Chemistry Project (IGAC)“ des „International Geosphere-Biosphere

Programme (IGBP)“, dem „Network for the Detection of Stratospheric Change“ und dem „World Climate Research Programme (WCRP)“-Projekt „Stratospheric Processes and their Role in Climate“. So soll sichergestellt werden, daß die wissenschaftliche Gemeinschaft an den GAW-Aktivitäten teilnimmt.

Als konkretes Beispiel für GAW-Aktivitäten zur Qualitätssicherung soll hier der jährliche Vergleich der Laboratorien für Niederschlagschemie aufgezeigt werden. Die WMO führt diese Vergleiche seit 1978 für alle Laboratorien, die an GAW oder dem Vorläuferprogramm „Background Air Pollution Monitoring Network (BAPMoN)“ teilnehmen, durch. Seit 1996 erfolgt dies durch das QA/SAC für Nord- und Südamerika am „Atmospheric Sciences Research Center“ an der Universität von Albany, New York. Um die Qualität der Daten der verschiedenen Laboratorien bewerten zu können, werden drei geeichte Niederschlagsproben, die die für sauren Regen typischen Ionenkonzentrationen simulieren (pH, elektrische Leitfähigkeit, die Ionenkonzentrationen von Sulfat, Ammonium, Nitrat, Chlor, Fluor, Kalzium, Natrium, Kalium und Magnesium), an alle beteiligten Institutionen verschickt. Abb. 15-5 zeigt beispielhaft und zusammenfassend die Ergebnisse der Vergleiche für H⁺, Sulfat, Nitrat und Ammonium seit 1985. Dargestellt ist der mittlere Betrag der Abweichung vom wahren Wert in Prozent, ermittelt aus den Konzentrationsmessungen der einzelnen analytischen Labors (etwa 60 weltweit). Die vertikalen Balken geben die 25 %- bzw. 75 %-Perzentile der Daten an, die lineare Regression über 13 Jahre mit Angabe des 95 %-Vertrauensintervalls ist ebenfalls dargestellt. Insgesamt werden jährlich Eichproben an über 90 analytische Labors versandt. Einige Labors können allerdings die vorgegebenen strikten Datenqualitätsziele noch nicht erfüllen und sind in diesen Auswertungen automatisch ausgeschlossen (und alle von diesen Labors untersuchten Niederschlagsproben werden „geflaggt“). Die Betreuung der Labors, die die DQZ nicht erfüllen, ist eine der Prioritäten in GAW. Meist handelt es sich hier um Labors, die nicht über die nötigen instrumentellen Ressourcen verfügen.

4 Schlußbemerkung: Forderung nach einer integrierten globalen Beobachtungsstrategie

In Zukunft werden vermehrt Probleme der Umweltverschmutzung nur noch global zu lösen sein. Klimaänderung und Ozonlöcher sind aktuelle Beispiele. Probleme des Sommersmogs bekommen gegenwärtig überregionalen Charakter und die Entstehung riesiger Ballungszentren zum Beispiel in Asien werden zu den globalen Problemen der nächsten Generation beitragen. Aus dieser Situation heraus wird vom „Committee on Earth Observing Satellites (CEOS-WMO)“ eine integrierte globale Beobachtungsstrategie (IGOS, Integrated Global Observing Strategie) gefordert. Der Sinn dieser IGOS ist es, die wichtigsten satelliten- und bodengestützten Systeme für globale Umweltbeobach-

Alle Laboratorien

Mittlerer Betrag der Abweichung (%) vom wahren Wert
für Proben, die die Datenqualitätsziele erfüllt haben

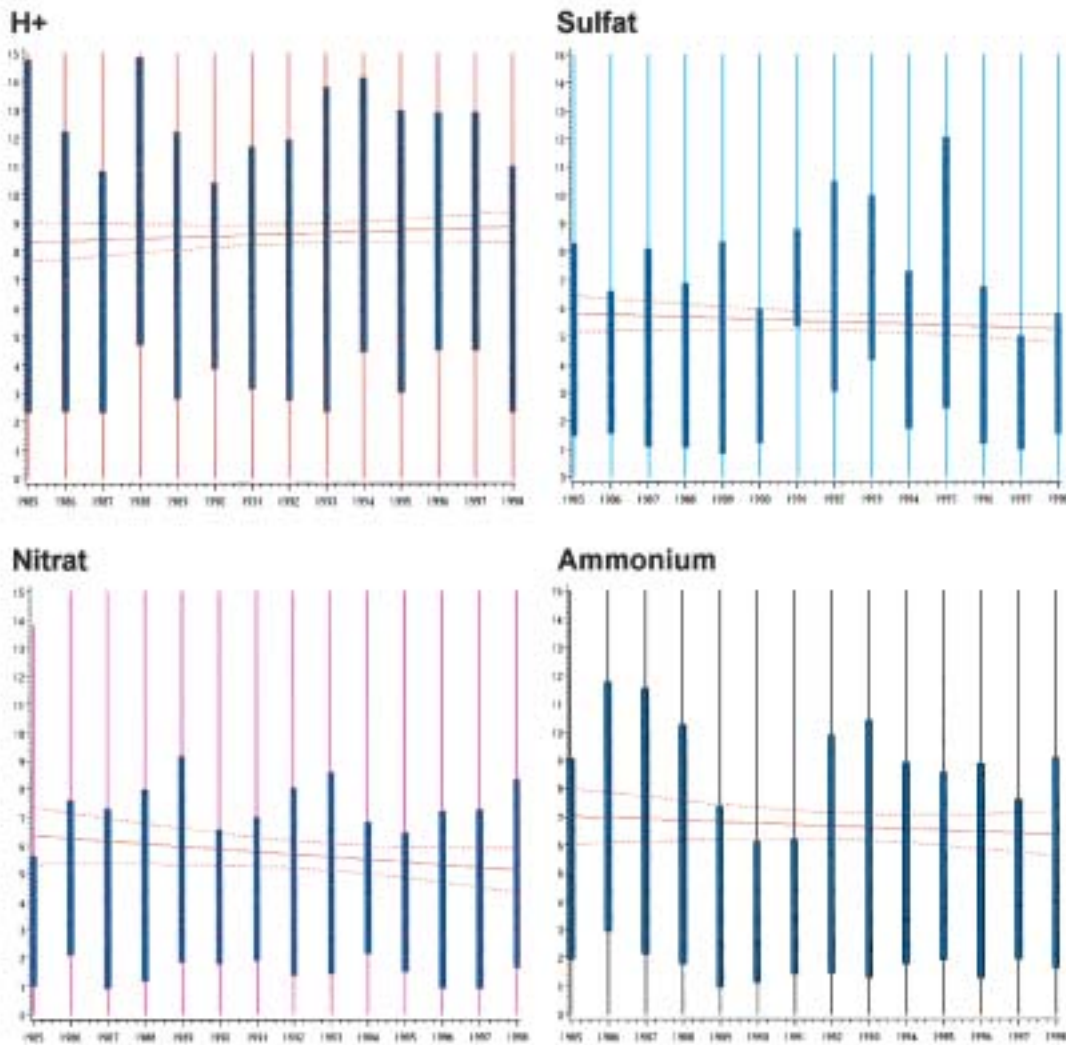


Abb. 15-5:
Ergebnisse der GAW-
Laborvergleiche für
Niederschlagschemie.

tungen der Atmosphäre, der Ozeane und der Kontinente mit maximaler Effektivität zu vereinigen. Besonders wichtig ist die Identifikation möglicher Beiträge, die nicht bereits von existierenden nationalen und internationalen Mechanismen erbracht werden können, um den zusätzlichen Gewinn durch die IGOS zu gewährleisten.

Um diesem Ziel gerecht zu werden, muß die IGOS den Rahmen für eine Zusammenstellung der Anforderungen der Nutzer bereitstellen, so daß die Datenlieferanten sich darauf beziehen können. Sie muß eine umfassende Strategie für globale Beobachtungen entwickeln, die es den Datenproduzenten durch bessere internationale Zusammenarbeit und Koordination erlaubt, ihre Beiträge zu verbessern und die Prioritäten für den Einsatz ihrer Ressourcen zu setzen.

Um den effektivsten Nutzen aus den Ressourcen für global verfügbare Beobachtungen zu ziehen, müssen

Prioritäten definiert werden, um bereits existierende Systeme aufzuwerten beziehungsweise neue Systeme einzurichten. Somit muß IGOS eine Entscheidungsplattform bieten, die es erlaubt

- eine langfristige Kontinuität und ausreichende räumliche Abdeckung der wichtigsten Beobachtungssysteme zu sichern;
- die wissenschaftliche Forschung zu garantieren, die zu einem besseren Verständnis der Prozesse nötig ist, um Daten angemessen interpretieren zu können.

Es muß auf den Strategien für bereits existierende internationale globale Beobachtungsprogramme aufgebaut werden mit dem Ziel, zusätzliche Anstrengungen in den Gebieten zu unternehmen, in denen es zur Zeit noch keine ausreichenden internationalen Vereinbarungen und Strukturen gibt. Anstatt neue zentralisierte entscheidungstreffende Organisationen aufzubauen, sollte es auf den internationalen Strukturen aufbauen,

die bereits heute erfolgreich zu globalen Beobachtungen beitragen. Eine unnötige Duplikation bestehender Beobachtungssysteme muß vermieden werden.

IGOS hilft dabei, den Regierungen ein besseres Verständnis für den Bedarf an globalem Wissen und die Beschränkungen gegenwärtiger Beobachtungssysteme zu vermitteln. Gleichgestellt mit diesen Möglichkeiten muß der Aufbau von Kapazitäten einhergehen, um Staaten die nötige Unterstützung zukommen zu lassen, um maximalen Nutzen aus dem gesamten Netz von Beobachtungen zu ziehen. Es müssen die Stellen identifiziert werden, an denen

die existierenden internationalen Arrangements bezüglich Management und Verteilung der wichtigsten globalen Beobachtungen und Produkte verbessert werden können.

Es sollte weiterhin danach getrachtet werden, die Erzeugung verbesserter hochwertiger Datenprodukte zu begünstigen, indem die Integration der vielfältigen Datensätze unterschiedlicher Stellen innerhalb nationaler und internationaler Organisationen vorangetrieben wird. Bei der Überführung wissenschaftlicher Systeme in den operationellen Betrieb muß durch verbesserte internationale Kooperationen geholfen werden.

Region	Horizontale Auflösung (km)		Vertikale Auflösung (km)		RMS Fehler (bzgl. Volumen)		Bias Fehler (bzgl. Volumen)		Zeitliche Res. (Beob.zyklus; Stunden)		Trendbestimmung (mit Kontinuität)
	Grenzwert	Ziel	Grenzwert	Ziel	Grenzwert	Ziel	Grenzwert	Ziel	Grenzwert	Ziel	% pro Jahr
Untere Troposphäre	250	< 10 ¹⁾	5	0,5	20 % oder 4 ppb	3 % oder 1 ppb	30 % oder 6 ppb	5 % oder 2 ppb	168	3	0,5 %
Obere Troposphäre	250	50	5	0,5	20 % oder 4 ppb	3 % oder 1 ppb	30 % oder 6 ppb	5 % oder 2 ppb	168	3	0,5 %
Untere Stratosphäre	250	50	3	0,5	15 % oder 100 ppb	3 % oder 20 ppb	20 % oder 150 ppb	5 % oder 40 ppb	168	3	0,3 %
Obere Stratosphäre/ Mesosphäre	250	50	6	0,5	15 % oder 75 ppb	3 % oder 20 ppb	20 % oder 100 ppb	5 % oder 30 ppb	48	3	0,1 %
Gesamte Säule	100	10	-	-	5 % oder 3 DU	1 % oder 6 DU	5 % oder 3 DU	1 % oder 3 DU	24	6	0,1 %
Gesamte Säule (Troposphäre)	100	10	-	-	15 % oder 6 DU	5 % oder 3 DU	15 % oder 6 DU	5 % oder 3 DU	24	6	0,5 %

Tabelle 15-10: Ziel- und Grenzwertforderungen für Ozon (O₃) – Treibhausgas, Schutz gegen UVB-Strahlung, Luftschadstoff

1) Untere Grenze durch Anforderungen von Nutzern/Prozeßstudien

Region	Horizontale Auflösung (km)		Vertikale Auflösung (km)		RMS Fehler (Präzision) AOD ⁶⁾		Bias Fehler (Genauigkeit) AOD ⁶⁾		Zeitliche Auflösung (Beob.zyklus; Stunden)		Trend (% pro Jahr)
	Grenzwert	Ziel	Grenzwert	Ziel	Grenzwert	Ziel	Grenzwert	Ziel	Grenzwert	Ziel	
Untere Stratosphäre ¹⁾	250	20	3	0,1	0,01	0,001	0,05	0,002	168	6	1 % oder > 20 % ⁵⁾
Obere Troposphäre ¹⁾	250	20	3	0,1	0,02	0,005	0,05	0,01	72	6	1 %
Gesamte Säule Stratosphäre ²⁾	250	20	-	-	0,15 ²⁾	0,004	0,2 ⁵⁾	0,006	168	6	1 % oder > 20 % ⁵⁾
Gesamte Säule Troposphäre ³⁾	250	20	-	-	0,2	0,01	0,3	0,02	72	6	1 %
Gesamte Säule	250	20	-	-	0,2	0,004	0,3	0,006	168	6	1 %
Untere Troposphäre ³⁾	250	10 ⁴⁾	3	0,1	0,05	0,01	0,07	0,02	72	6	1 %

Tabelle 15-11:

Ziel- und Grenzwertforderungen für Aerosol-Extinktion (Nadir und Limb – senkrechter und tangentialer Blickwinkel vom Satelliten auf die Erde) und abgeleitete Parameter (Sonnenphotometrie oder Schattenband-Radiometrie für bodengestützte Messungen) – heterogene Chemie, Klimabeeinflussung, atmosphärische Korrekturen.

- 1) Limb Messungen in definierten tangentialen Höhen
- 2) Integral über stratosphärische Limb-Profile
- 3) Kombiniert Nadir und Limb
- 4) Untere Grenze durch Anforderungen von Nutzern: Sichtweite
- 5) Größere Werte zur Erkennung wichtiger vulkanischer Aerosolbildung und Abbau in der Stratosphäre
- 6) Aerosol Optical Depth: $I/I_0 = \exp(-AOD \times \text{Luftmassenfaktor})$; Rayleigh Streuung und Gas-Absorption subtrahiert; signifikante dynamische Bereiche für die AOD gibt es in der unteren Stratosphäre für Hintergrundwerte und vulkanische Eruptionen und in der unteren und oberen Troposphäre für Hintergrundwerte und Sandstürme, besonders verschmutzte Episoden, diese finden sich in den Grenz- und Zielwerten wieder

Um diesen Grundsätzen gerecht zu werden, sollten Beiträge zu einer IGOS dazu dienen, folgendes sicherzustellen:

- die langfristige Kontinuität von Messungen zentraler Größen;
- die angemessenen Kapazitäten für Archivierung und Zugriffsmöglichkeiten für alle Datensätze;
- die Konsistenz der Datenqualität, auch im Fall einer Unterbrechung der Datenreihe, z. B. durch den Wechsel zu einer neuen Technologie;
- ausreichende Metadaten, um dem Nutzer eine Bewertung der Datenqualität zu ermöglichen.

In diesem übergreifenden Kontext hat das CEOS sechs Pilotprojekte eingerichtet, die die Realisierbarkeit der Ziele der IGOS bewerten sollen. Eines dieser Projekte

war das „Ozonprojekt“. Ein Resultat dieser Studie ist die Definition von nötigen und anzustrebenden Meßzielen zur globalen Überwachung des troposphärischen und stratosphärischen Ozons. Dies betreffen nicht nur die Beobachtungen von Ozon sondern auch wichtiger Zusatzgrößen, die zur Bewertung der Ozondaten unerlässlich sind. Als Beispiel dafür, wie zukünftige Meßsysteme den globalen Anforderungen gerecht werden könnten, dienen die Tab. 15-10 und 15-11 für Ozon und Aerosol-Extinktion. Mit diesen Ziel- und Grenzwertforderungen werden die vom wissenschaftlichen Standpunkt aus nötigen Eckdaten sowie die Mindestanforderungen für eine sinnvolle Nutzung der Daten definiert. Große Teile dieser Programme sind bereits realisiert. Allerdings fehlt es an der gemeinsamen Strategie zur Optimierung der Systeme, deren Organisation, Vollständigkeit und Qualitätsgewährleistung.

Abkürzungen

BAPMoN	Background Air Pollution Monitoring Network
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CEOS	Committee on Earth Observing Satellites
DWD	Deutscher Wetterdienst
EEA	European Environmental Agency
EMEP	Cooperative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-Range Transmission of Air Pollutants in Europe
ETC-AC	European Topic Centre on Air Quality
EUROTRAC	EUREKA Project on the Transport and Chemical Transformation of Environmentally Relevant Trace Constituents in the Troposphere over Europe
EZMW	Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage
GAW	Global Atmosphere Watch
IFU	Fraunhofer-Institut für Atmosphärische Umweltforschung
IGAC	International Global Atmospheric Chemistry Project
IGBP	International Geosphere-Biosphere Programme
IGOS	Integrated Global Observing Strategie
LRTAP	Convention on Long Range Transboundary Air Pollution
MOHp	Meteorologisches Observatorium Hohenpeißenberg
MOL	Meteorologisches Observatorium Lindenberg
MOZAIC	Measurement of Ozone and Water Vapour by Airbus Inservice Aircraft
NDSC	Network for the Detection of Stratospheric Change
NILU	Norsk institutt for luftforskning

QA/SAC	Quality Assurance Science Activity Centre
POP	persistent organic pollutants
RIVM	Rijksinstituut voor volksgezondheid en milieu (Niederlande)
SMA	Schweizer Meteorologischen Anstalt
TFS	Förderschwerpunkt Troposphärenforschung des BMBF
TOR-2	Tropospheric Ozone Research, Phase 2
TRACT	Transport of Air Pollutants over Complex Terrain
UBA	Umweltbundesamt
UN/ECE	United Nations Economic Commission for Europe
WCRP	World Climate Research Programme
WDC	World Data Centre
WMO	Weltorganisation für Meteorologie
ZMAG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (Österreich)

Literatur

- KANTER, H.-J., V. MOHNEN, U. CORSMIEIER, 1996: Airborne chemical and meteorological measurements made during the 1992 TRACT experiment: Quality control and assessment; *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 46, 710-724.
- FIEDLER, F., P. BORELL, 2000: TRACT: Transport of Air Pollutants over Complex Terrain. In: Søren Larsen, Franz Fiedler, Peter Borell (Editors). *Exchange and Transport of Air Pollutants over Complex Terrain and The Sea*. Springer, Berlin, p. 223-268.
- MOHNEN, V.; H.-J. KANTER; F. SLEMR, 2000: TRACT: Data Quality Assessment. In: Søren Larsen, Franz Fiedler, Peter Borell (Editors). *Exchange and Transport of Air Pollutants over Complex Terrain and The Sea*. Springer, Berlin, p. 279-284.

16 Einfluß bodennaher Sperrschichten auf das Ozonaufkommen in Stadtgebieten

1 Einleitung

Die Ozonkonzentration in der Atemluft, also in Bodennähe, wird im wesentlichen von den folgenden drei Einflüssen bestimmt, siehe z. B. Becker und Löbel (1985), Fabian (1989), Finnlayson-Pitts und Pitts (1986) sowie den Beitrag Poppe und Zimmermann im Kapitel 2 des Heftes Photosmog I:

- (a) der solaren Bestrahlungsstärke und der Temperatur,
- (b) dem Aufkommen von Ozonvorläufersubstanzen,
- (c) der Mischungsintensität und dem Mischungsraum in der Atmosphäre, die ganz wesentlich den An- oder Abtransport von Reaktionspartnern und damit die Verhältnisse im photostationären Gleichgewicht beeinflussen.

Dieses Kapitel soll zur Veranschaulichung der Zusammenhänge des Punktes (c) beitragen.

Der Mischungsraum für in Bodennähe oder aus Schornsteinen freigesetzten Luftverunreinigungen ergibt sich durch die Mischungsschichthöhe in der unteren Troposphäre. Diese und die Mischungsschichtintensität werden durch Sperrschichten begrenzt. Von besonderem Interesse sind bezüglich des Ozonaufkommens die bei Hochdruckwetterlagen und weitgehend klarem Himmel auftretenden Sperrschichten, also Boden- und Absinkinversionen (Baumbach 1993a). Diese Inversionen treten immer gerade dann auf, wenn typisches „Ozonwetter“ herrscht, also an klaren, strahlungsreichen Tagen.

Von der Abteilung Reinhaltung der Luft des Instituts für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart wurde ein Fesselballon-Meßsystem entwickelt, mit dem in zahlreichen Feldexperimenten die Vertikalprofile von Ozon, NO₂, Windrichtung und -geschwindigkeit, Trocken- und Feuchttemperatur sowie Luftdruck und weitere Komponenten, wie z. B. Partikelanzahlen gemessen wurden. Gleichzeitig fanden jeweils immer Messungen am Boden statt. Anhand ausgewählter Ergebnisse solcher Experimente soll der Einfluß bodennaher Sperrschichten auf das Ozonaufkommen in der Stadt und zum Vergleich auch in anderen Gebieten erklärt und veranschaulicht werden. Der Aufbau des Fesselballon-Meßsystems ist in Abb. 16-1 dargestellt. Es können kontinuierliche Vertikalprofile aller Parameter aufgenommen werden, wobei die Meßwerte alle zehn Sekunden zur Bodenstation gefunkt werden. Ein Aufstieg bis in 1000 m Höhe dauert etwa 20 min. Eine Ausnahme bei der Messung stellt die Erfassung der Konzentrationen von

flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) dar. Hier erfolgt die Probensammlung entweder integral über die ganze Aufstiegshöhe oder es wird ein weiterer Ballon eingesetzt, bei dem die Sammelgeräte am Ballonseil in drei bis vier Höhen angeordnet sind und in jeder Höhe eine Probensammlung über zwei bis drei Stunden erfolgt. Eine detaillierte Beschreibung des Fesselballon-Meßsystems kann Baumbach (1993b), Baumbach und Vogt (1995) entnommen werden. Das Meßsystem und die einzelnen Meßverfahren wurden und werden aufwendigen Qualitätssicherungsmaßnahmen, u. a. durch die erfolgreiche Teilnahme an Ringversuchen und Vergleichsmessungen, Vogt et al. (2001), Kanter et al. (2001), Glaser (2001) unterworfen.

2 Mischungsschicht und Sperrschichten

Der unterste Teil der Troposphäre, in dem sich die emittierten Luftverunreinigungen mit der umgebenden Luft vermischen und in dem die Reaktionen zur anthropogenen Ozonbildung ablaufen, wird allgemein als Mischungsschicht bezeichnet. Die Mischungsschichthöhe wird durch Sperrschichten in der Atmosphäre begrenzt. Damit wird der vertikale Luftaustausch vermindert, wenn nicht gar ganz unterbunden. Als Sperrschichten wirken stabile Luftschichtungen, insbesondere Inversionen. Bei Bodeninversionen ist die für die Verteilung

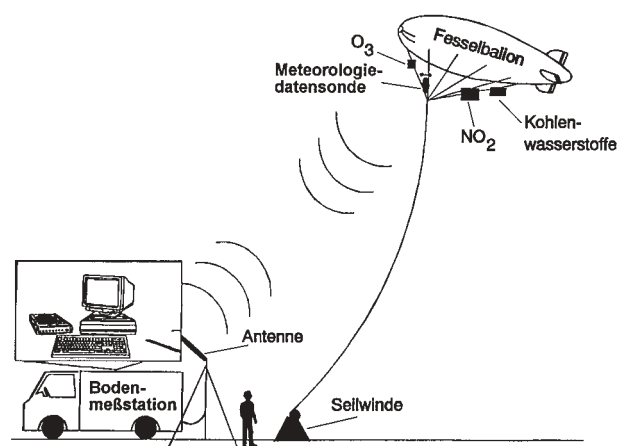


Abb. 16-1: Fesselballon-Meßsystem mit Fesselballon, Meßgeräten, Seilwinde und Bodenmeßstation. Technische Daten: Volumen: 56 m³, Füllgas: Helium, Traglast: etwa 15 kg, Aufstiegshöhe: max. 1500 m, Meßgrößen: Windrichtung und -geschwindigkeit, Trocken- und Feuchttemperatur, Luftdruck, O₃, NO₂, Kohlenwasserstoffe, Partikelanzahl mit Korngrößenverteilungen < PM10.

der Luftverunreinigungen zur Verfügung stehende Mischungsschichthöhe extrem flach. In Abb. 16-4 a ist der mittlere tageszeitliche Verlauf der Sperr- und Mischungsschichthöhen bei sommerlichem Hochdruckwetter über freiem Gelände schematisch dargestellt. Die nächtliche Bodeninversion löst sich am Morgen durch die einsetzende Sonnenstrahlung und die Erwärmung des Bodens von unten her auf. Sie hebt sich zunächst (abgehobene Bodeninversion), bis sie sich ganz auflöst. Damit steigt die Mischungsschichthöhe an. Die Mischungsschicht wird tagsüber nach oben hin meistens durch eine Höheninversion begrenzt, die durch die absinkende Luft bei Hochdruckwetter entsteht (Absinkinversion). Von Giebel (1981) wird diese, die Mischungsschicht nach oben begrenzende Sperrschicht, als Hauptsperrschicht bezeichnet. Er definiert diese dabei als Luftschicht mit der stärksten sprunghaften Abnahme der Aerosolkonzentration und der relativen Luftfeuchtigkeit. Während unter dieser Hauptsperrschicht oft mehr oder weniger starker Dunst herrscht, ist die Luft oberhalb meistens ganz klar, verbunden mit guter Fernsicht. So, wie sich bei einsetzender Sonnenstrahlung die Bodeninversion auflöst, hebt sich durch das Aufsteigen warmer Luftmassen in Bodennähe auch die Obergrenze der Mischungsschicht im Tagesverlauf bis zum Nachmittag an.

Die Mischungsschichthöhe nimmt nach Erkenntnissen von Giebel (1983), nach Inversionsstatistiken des Deutschen Wetterdienstes (1982) und nach Stull (1989) Werte zwischen 0 m (nachts und zur kalten Jahreszeit) und tagsüber in unseren Breiten bis zu 2500 m an (bei Hochdruckwetterlagen im Sommer).

Nachts befindet sich zwischen der Boden- und der Höheninversion eine schwach durchmischte Schicht. Diese nächtlichen Schicht ist durch die begrenzenden Sperrschichten von Einwirkungen von unten und oben abgekoppelt. Da deshalb in diese Schicht keine abbauenden Substanzen gelangen können, wird das vom vorgegangenen Nachmittag darin enthaltene Ozon nicht abgebaut oder abtransportiert, sondern konserviert. Paffrath et al. (1986) und andere Autoren bezeichnen u. a. aufgrund von Erkenntnissen aus Flugzeugmessungen diese Schicht als „Ozonreservoirschicht“.

Welchen Einflüssen die Ozonkonzentrationen in den verschiedenen Schichten unterliegen und wie sie sich dementsprechend entwickeln, soll im folgenden anhand von Ergebnissen aus Fesselballonsondierungen und Bodenmessungen dargestellt werden, die z. B. beim Ozonversuch Heilbronn/Neckarsulm 1994 durchgeführt wurden, Neu (1995).

3 Ozon in Bodennähe

Beim Ozonversuch in Heilbronn/Neckarsulm waren mehrere Meßgruppen im Einsatz. Die mobile Meßeinheit Essen des Deutschen Wetterdienstes führte in der Versuchszeit vom 23. bis 27. 06. 1994 im Abstand von 2 Stunden Radiosondenaufstiege durch. Ergänzt durch die Fesselballonsondierungen und die Daten von Flugzeugmessungen konnte aus den Temperaturprofilen der zeitliche Verlauf der Mischungsschichthöhe über der Stadt Heilbronn über die ganze Versuchszeit dargestellt werden, siehe Abb. 16-2 a. In Abb. 16-2 b sind die gleichzeitig in Heilbronn am Boden in einem Park nahe der Stadtmitte (Wertwiesenpark) aufgenommenen zeitlichen Verläufe der Globalstrahlung G und der Konzentrationen von O₃, NO₂ und NO dargestellt. Man sieht, daß die nächtliche Mischungsschichthöhe bedingt durch die Bodeninversion jeweils sehr niedrig war. Unter dieser Bodeninversion fand durch NO jeweils der Abbau von Ozon statt. Da für den Versuch in der Zeit vom 24. bis 26. 06. 1994 der Kraftfahrzeugverkehr stark eingeschränkt war, traten an diesen Tagen in den Morgenstunden nicht sehr hohe NO-Konzentrationen auf. Erst am Morgen des 27. 06. 1994, als der Verkehr wieder freigegeben war, konnten wieder so hohe NO-Konzentrationen beobachtet werden, daß jegliches Ozon über mehrere Stunden verschwand. In der Nacht vom 25. zum 26. 06. 1994 sorgte ein Gewitter für eine Vermischung der Luftmassen, so daß zu dieser Zeit auch nachts in Bodennähe Ozon zu messen war.

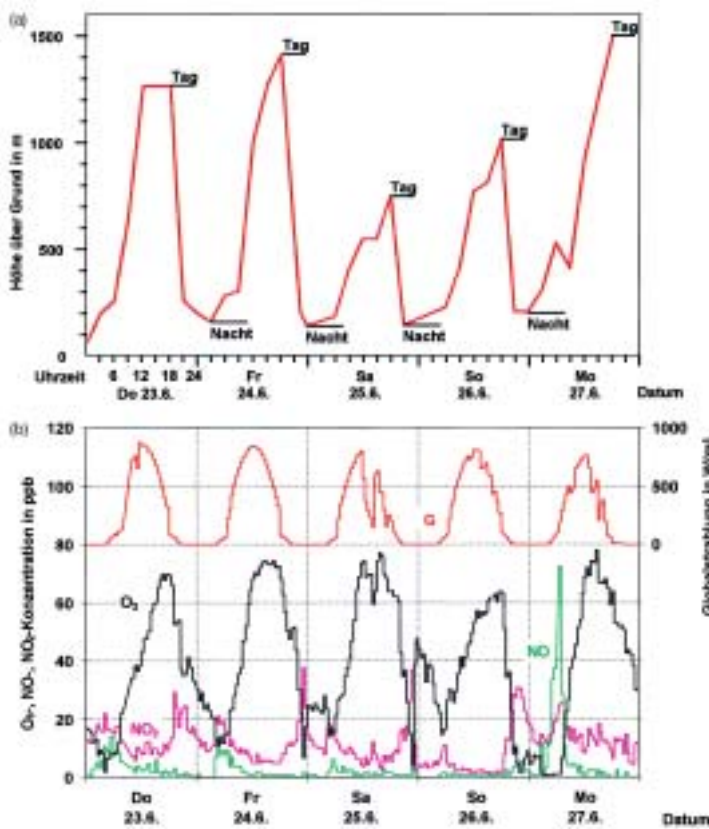


Abb. 16-2: (a) Verlauf der Mischungsschichthöhe während des Ozonversuchs Heilbronn/Neckarsulm 1994, (b) Verläufe von Globalstrahlung (G), O₃-, NO- und NO₂-Konzentrationen während des Ozonversuchs.

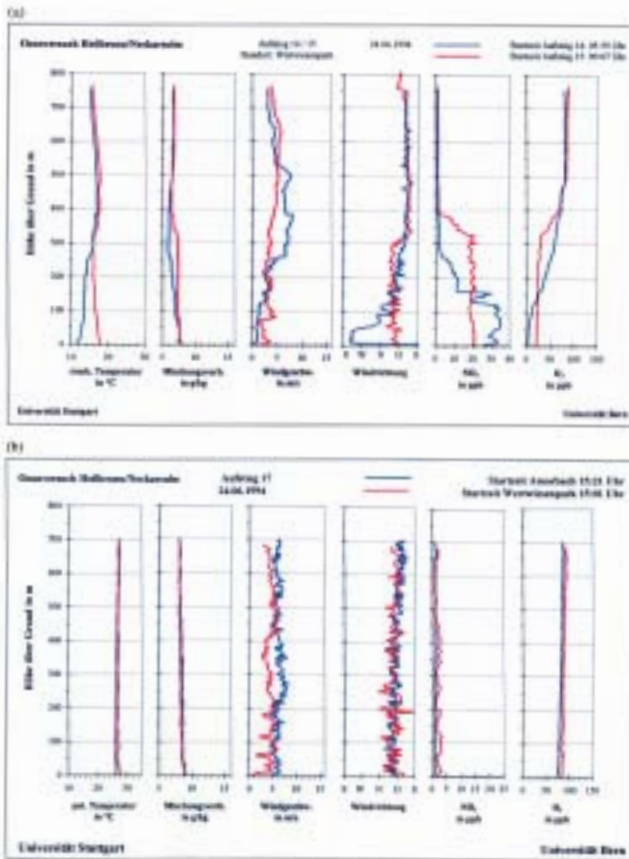
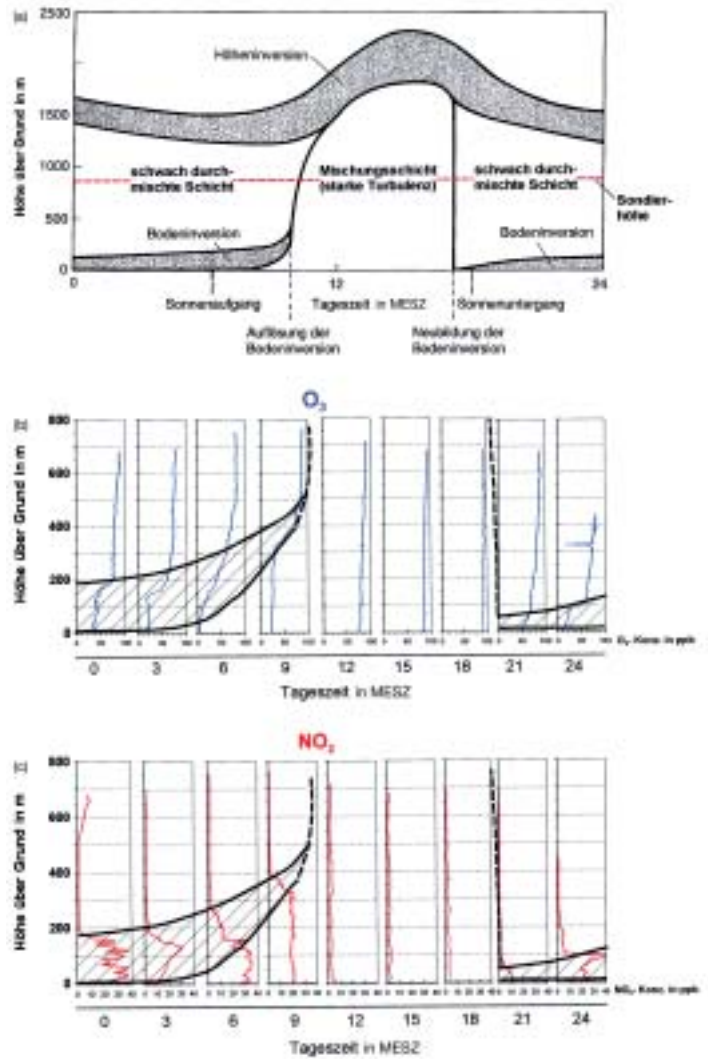


Abb. 16-3 (oben): Vertikalprofile verschiedener Parameter über dem Wertwiesepark in Heilbronn. (a) Morgenstunden mit Boden- bzw. abgehobener Bodeninversion, (b) Nachmittagsstunden bei guter Vermischung (Luv-Standort Amorbach zum Vergleich).

Abb. 16-4 (rechts): Tagesgang der Sperrschichten und der Mischungsschicht. (a) Theoretischer Verlauf nach Stull (1989), Baumbach (1993a), (b) Tagesgang aus O₃-Vertikalprofilen am 24. 06. 1994, (c) Tagesgang aus NO₂-Vertikalprofilen am 24. 06. 1994.

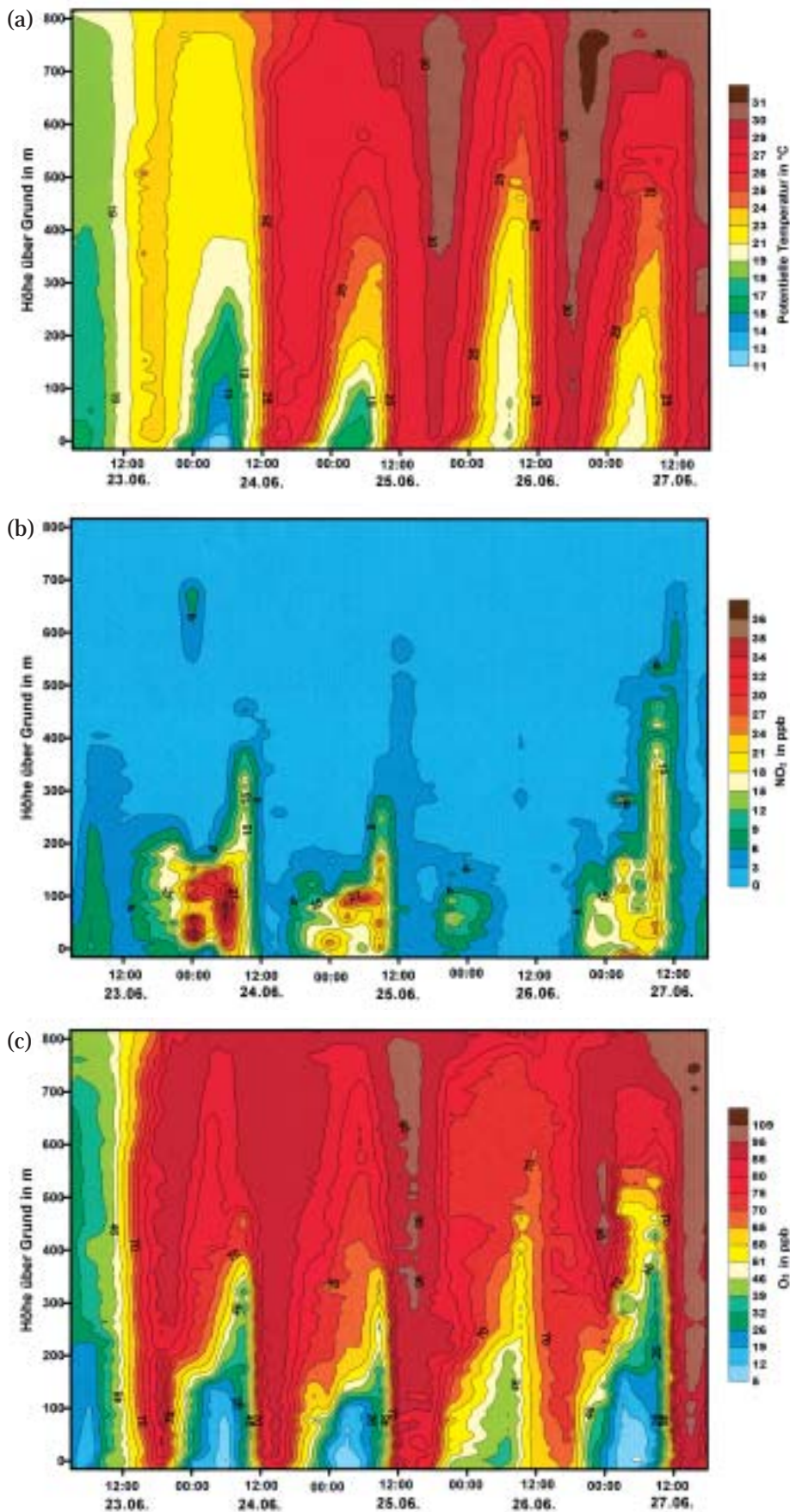


4 Stickstoffoxide und Ozon unter und über bodennahen Sperrschichten

Die in Abb. 16-2 dargestellten Ozon- und Stickstoffoxidverläufe geben die Verhältnisse am Boden wieder. Daß die Luftmassen über der nächtlichen Bodeninversionssperschicht gänzlich von den Luftmassen am Boden abgetrennt sind und dort tatsächlich das von Paffrath et al. (1986) definierte Ozonreservoir vorhanden ist, zeigen die Ergebnisse der während des Ozonversuchs in Heilbronn am selben Ort der Radiosondenaufstiege und Bodenmessungen (Wertwiesepark) durchgeführten Fesselballonmessungen.

In Abb. 16-3 a sind für zwei Zeiten, 6 MESZ und 9 MESZ, beispielhaft die Vertikalprofile der trockenen Temperatur, der Feuchte (Mischungsverhältnis), der Windgeschwindigkeit und -richtung sowie der NO₂- und Ozonkonzentrationen gezeigt. Zur Darstellung der Temperaturverläufe wurde die trockene Temperatur ge-

wählt, da hierbei die Sperrschichten besser zu erkennen sind, als bei der üblicherweise verwendeten potentiellen Temperatur. Um 6 MESZ erkennt man im Temperaturprofil eine vom Boden bis in etwa 400 m Höhe über Grund reichende Inversion mit einem auffälligen Sprung in einer Höhe von 250 m bis 280 m. Auch in 160 m Höhe tritt ein kleiner Temperatursprung auf. Am NO₂-Vertikalprofil sieht man deutlich, daß diese Temperatursprünge und die Bodeninversion als Ganzes einen enormen Einfluß auf die Ausbreitung der in der Stadt in Bodennähe freigesetzten Luftverunreinigungen haben. In 160 m und 260 m Höhe sind starke Abnahmen der NO₂-Konzentration zu verzeichnen und in Höhen über 400 m gelangen überhaupt keine Stickstoffoxide mehr, die in der Stadt in Bodennähe freigesetzt wurden. Umgekehrt proportional zum vertikalen Verlauf der NO₂-Konzentration verhält sich Ozon. In Bodennähe ist es fast vollständig abgebaut und über 400 m befindet man sich in der von unten her unbeeinflussten Ozonreservoirschicht mit einer Konzentration von etwa 80 ppb.



Um 9 MESZ hat sich die Bodeninversion von unten her aufgelöst. Als wirksame Sperrschicht ist in 320 m bis 390 m Höhe noch die abgehobene Bodeninversion vorhanden. Die NO₂- und O₃-Konzentrationsverhältnisse über dieser Inversion sind noch die gleichen wie um 6 MESZ. Aber unter der abgehobenen Bodeninversion fand durch die einsetzende Turbulenz (grob zu erkennen an der Zunahme der Windgeschwindigkeit) eine Vergleichmäßigung der NO₂- und O₃-Konzentrationen vom Boden bis in 320 m Höhe statt. Die dadurch bedingte Ozonerhöhung am Boden hat also zunächst noch nichts mit Ozonbildung durch die einwirkende Sonnenstrahlung zu tun, sondern ist rein mischungsbedingt (das Konzentrationsintegral vom Boden bis 320 m Höhe ist für 9 MESZ etwa gleich groß wie für 6 MESZ).

Zwischen 9 MESZ und 12 MESZ haben sich alle bodennahen Inversionen vollständig aufgelöst, so daß bei den Sondierungen um 12, 15 und 18 MESZ sehr gleichmäßige NO₂- und O₃-Profile vom Boden bis zur maximal zulässigen Aufstiegshöhe gemessen werden konnten (siehe Abb. 16-3 b und 16-4). Aus der Aneinanderreihung der alle drei Stunden aufgenommenen O₃- und NO₂-Vertikalprofile eines Tages (24. 06. 1994) konnten anhand der Konzentrations sprünge in den Profilen die Unter- und Obergrenzen der Bodeninversion, ihr Abheben, die Auflösung und die Neubildung am Abend schematisch dargestellt werden, siehe Abb. 16-4. Der auf diese Weise ermittelte Verlauf entspricht genau dem in der Literatur beschriebenen Verhalten der Bodeninversion (Stull 1989), das in Abb. 16-4 oben dargestellt ist. Die Untergrenze der Höheninversion, also die Höhe, die die Mischungsschicht begrenzt, bewegte sich an diesem Tag von etwa 1050 m ü.G. um 9:30 MESZ bis etwa 1400 m ü.G. um 18 MESZ, siehe Abb. 16-2. Auch dieser Verlauf entspricht sehr gut den Angaben in der Literatur (Abb. 16-4 a).

Abb. 16-5: Isoplethendiagramme zur Darstellung der Dynamik des Auf- und Abbaus der bodennahen Sperrschichten und des entsprechenden Konzentrationsverhaltens, ermittelt durch Interpolation von Fesselballon-Vertikalprofilen, die alle drei Stunden aufgenommen wurden. (a) Potentielle Temperatur, (b) NO₂-Konzentration, (c) O₃-Konzentration.

5 Dynamik des Auf- und Abbaus von Sperrschichten

Aus den Vertikalprofilen, die während der Versuchszeit vom 23. bis 27. 06. 1994 über dem Wertwiesenpark in der Stadt Heilbronn alle drei Stunden aufgenommen wurden, konnten durch Interpolation Linien gleicher Temperatur bzw. gleicher Konzentrationen, sog. Isolethendiagramme, z. B. für die potentielle Temperatur und die NO_2 - und O_3 -Konzentrationen erstellt werden: Abb. 16-5 a bis c. Sie zeigen die zeitliche Änderung der Vertikalverteilungen der jeweiligen Meßgrößen am Meßort über einen längeren Zeitraum (hier: 5 Tage).

Aus dem Isolethendiagramm der potentiellen Temperatur (Abb. 16-5 a) wird die Dynamik des Auf- und Abbaus der Bodeninversion deutlich: Eine Zunahme der potentiellen Temperatur mit der Höhe bedeutet, je nach Gradient, eine neutrale bis stabile Schichtung. Man erkennt, wie in den Abendstunden – gegen 20 MESZ – jeweils die Bildung der Kaltluft einsetzt, die sich in den Nächten vom Boden bis über 400 m, in der letzten Nacht sogar bis 700 m ü. G., ausdehnt. Eine

Besonderheit stellt die Nacht vom 25. zum 26. 06. 1994 dar. Hier wurde, bedingt durch ein Gewitter, die Kaltluft bis zu 800 m hoch verteilt. Der Temperaturgradient ist allerdings nicht so stark ausgeprägt. Bis zum Mittag löst sich die Bodeninversion jeweils auf und es herrscht dann immer eine gleichmäßigere Verteilung der potentiellen Temperatur über die ganze Höhe.

In der nächtlichen Kaltluft reichern sich die Stickstoffoxide (hier NO_2) an, und zwar i.a. bis zu der Höhe, zu der die Kaltluft jeweils reicht, siehe Abb. 16-5 b. Bis zum Mittag sind diese „ NO_2 -Nester“ jeweils wieder aufgelöst, und es herrschen über die ganze Höhe sehr niedrige NO_2 -Konzentrationen. Eine Ausnahme bildet die Gewitternacht vom 25. zum 26. 06. 1994, in der sich nicht so hohe NO_2 -Konzentrationen bilden konnten.

Aus dem Ozon-Isolethendiagramm Abb. 16-5 c, geht noch einmal anschaulich hervor, was in den einzelnen Vertikalprofilen (siehe Abb. 16-3 und 16-4) schon gezeigt wurde: In den Bodeninversionsschichten wird das Ozon durch Reaktion mit den Stickstoffoxiden jeweils

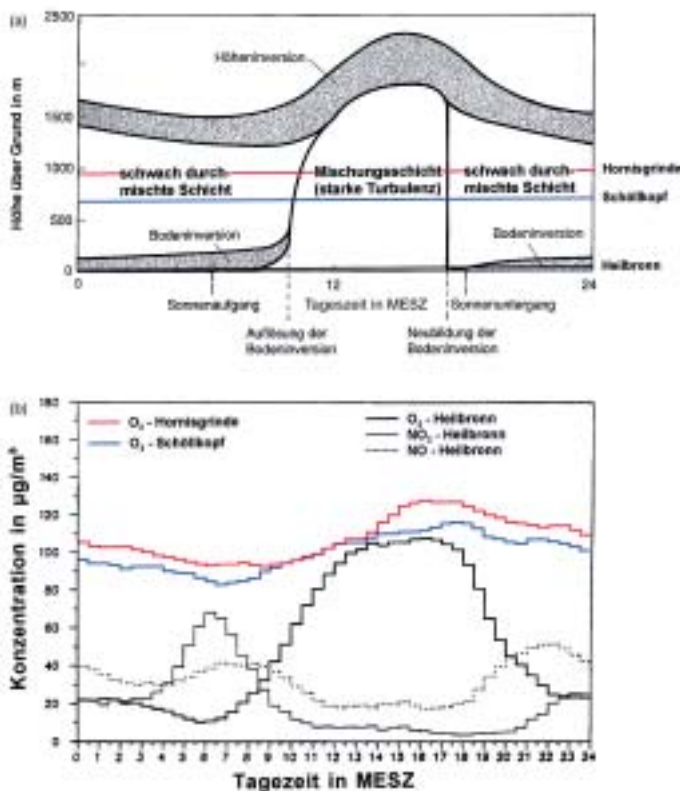


Abb. 16-6: Mittlere O_3 -, NO_2 - und NO -Tagesgänge an verschiedenen hoch gelegenen Meßorten (b) und deren Höhenzuordnung in das Sperr- bzw. Mischungsschichtsschema (a). Stationen: Stadt Heilbronn: 177 m ü. NN = 10 m ü. G., Schöllkopf (Berg im Nordschwarzwald): 862 m ü. NN = 685 m ü. G. (bezogen auf Heilbronn), Horngrinde (höchster Berg im Nordschwarzwald): 1120 m ü. NN = 953 m ü. G. (bezogen auf Heilbronn).

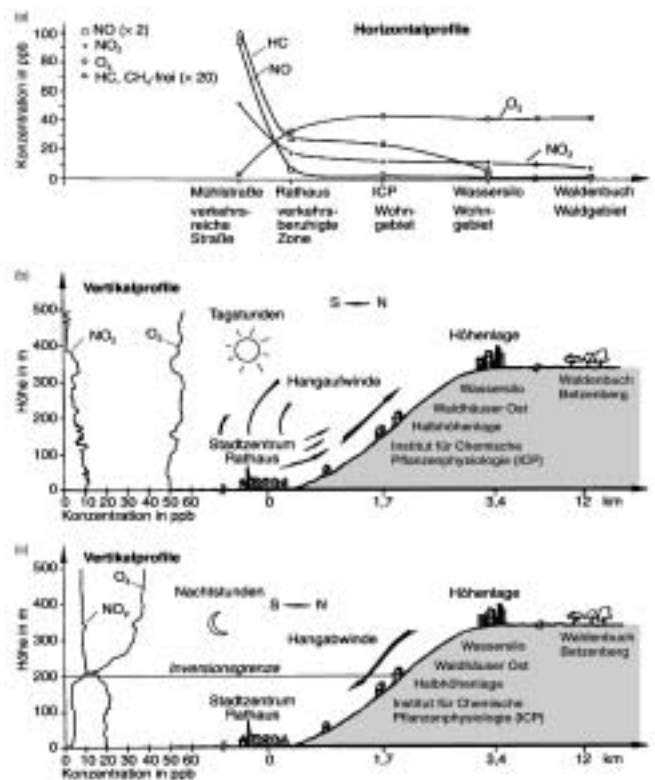


Abb. 16-7: NO_2 - und O_3 -Vertikalprofile bei Tag (b) und bei Nacht (c) über der Stadt Tübingen (bei Schönwetter) sowie Darstellung der horizontalen Verteilung (a) der an Schönettertagen von 3 Sommermonaten zeitlich (06 bis 18 MESZ) gemittelten Werte von 5 Bodenmeßstationen. (Baumbach 1993a). © Springer-Verlag, Heidelberg.



Abb. 16-8: Ausbreitung der Rauchfahne in einem Schwarzwaldtal bei Inversion. Foto: G. Baumbach, aus Baumbach (1993a). © Springer-Verlag, Heidelberg.

abgebaut. In der Gewitternacht war aufgrund der stärkeren Vermischung der bodennahen Luft bis in größere Höhen der Abbau nicht so stark. Nach der Auflösung der Bodeninversion wird jeweils aus der darüber liegenden Reservoirschicht das Ozon bis zum Boden gemischt und sorgt dort für den starken Anstieg der Ozonkonzentration am späten Vor- bzw. am frühen Nachmittag (s. a. Abb. 16-2).

Man erkennt beim Vergleich von Abb. 16-5 c mit Abb. 16-5 a, daß der nächtliche Ozonabbau etwa bis an die selben Höhen reicht wie die Abkühlung der Luftmassen, von der Gewitternacht abgesehen bis in Höhen zwischen 700 m und 800 m über Grund. Darüber ist das Ozon großräumig verteilt (bzw. wird großräumig gebildet). Die bodennahen Ozonkonzentrationen sind also in einer Stadt wie Heilbronn im wesentlichen durch lokale Abbauvorgänge unter der Bodeninversion und, nach Auflösung der Inversion, durch Lufteinmischung von oben aus der Reservoirschicht bedingt.

6 Ozon an verschieden hoch gelegenen Standorten

Aus der in Abb. 16-3, 16-4 und 16-5 dargestellten Dynamik der Bildung und Auflösung der Bodeninversion und dem entsprechenden NO_2 - und O_3 -Konzentrationsverhalten bzw. den Konzentrationsverteilungen lassen sich die an verschieden hoch gelegenen Standorten auftretenden Ozontagesgänge erklären. In der Abb. 16-6 b geben die oberen zwei Kurven die mittleren Ozontagesgänge an zwei Bergstationen im Nordschwarzwald wieder, die untere Kurve den Verlauf in der Stadt Heilbronn (177 m ü. NN = 10 m ü. G.), Baumbach (1990). Der obere mittlere Tagesgang wurde auf dem höchsten Berg des Nordschwarzwaldes, der Hornisgrinde in 1120 m ü. NN (entsprechend 953 m ü. G., bezogen auf Heilbronn) bestimmt, die zweite obere Kurve auf dem Schöllkopf, einem 862 m hohen Berg

südlich der Stadt Freudenstadt im Nordschwarzwald (entsprechend 685 m ü. G., bezogen auf Heilbronn) Baumbach und Baumann (1992). In der Abb. 16-6 a ist die Zuordnung der einzelnen Stationen in das Sperr- bzw. Mischungsschema aufgenommen.

Die NO -, NO_2 - und O_3 -Tagesgänge in der Stadt Heilbronn ergeben sich aus der vorher dargestellten Dynamik der Bodeninversion: nachts Ozonabbau, tags Ozoneinmischung aus der Reservoirschicht und gleichmäßige Verteilung in der Mischungsschicht. Die beiden Bergstationen liegen nachts über den Bodeninversionen des Flachlandes und der Täler in der Ozonreservoirschicht, das Ozon bleibt also nachts auf hohem Niveau erhalten. Die in der Nacht geringfügig abnehmenden Ozonkonzentrationen an den Bergstationen entsprechen etwa den Ozonverringerungen in den entsprechenden Höhen im Isoplethendiagramm (s. Abb. 16-5 c). Daß der Berg Schöllkopf mit 690 m über Heilbronn noch eher vom Ozonabbau von unten her tangiert wird als die knapp 1000 m über Heilbronn gelegene Station Hornisgrinde, ist an deren mittleren O_3 -Tagesgängen zu erkennen (Abb. 16-2) und wird auch deutlich, wenn man die Höhen, an denen gemessen wurde, in das Isoplethendiagramm Abb. 16-5 c einzeichnen würde. Die ozonreiche Schwarzwaldluft ergibt sich also durch die Tatsache, daß die Schwarzwaldhöhen aus den Bodeninversionen herausragen und somit kein nächtlicher Ozonabbau durch anthropogene Luftverunreinigungen (vor allem Stickstoffoxide) stattfindet. Diese nächtlichen Ozonkonzentrationen sind also demnach ein Indikator für frische, vom direkten Einfluß der Stadtluft abgekoppelte Luftmassen. Vergleichbare Unterschiede zwischen Tal- und Höhenlagen wurden z. B. von Kanter et al. (1982) in Garmisch-Partenkirchen und auf den nahegelegenen Bergen Wank und Zugspitze gemessen. Während der Berg Wank sich mit 1600 m ü. NN an Sommernachmittagen i. a. in der Mischungsschicht befindet, liegt der Gipfel

der Zugspitze mit 2964 m ü. NN meistens über der Hauptschicht und ist somit von den Ozonverhältnissen in Bodennähe gänzlich abgekoppelt. Der mittlere Tagesgang sieht dort entsprechend gleichmäßig aus, Baumbach (1993a).

7 Ozonverhalten in und über Tälern und Einfluß der Berg- und Talwinde

In den Mittel- und auch den Hochgebirgslagen hat die Ausbildung der nächtlichen Kaltluft noch einen besonderen Effekt: die kalte Luft fließt von den Hängen in die Täler. Sie bildet dort die Bodeninversion und dient gleichzeitig als Frischluftzufuhr für in Tälern gelegene Siedlungen oder Städte. Anhand von Ergebnissen aus Fesselballon-, stationären Boden- und anderen Messungen in verschiedenen Tälern konnte die Wirkung der Kaltluft- und Warmluftströme, die in Berg- und Talwinden resultieren, auf die Bildung von Sperschichten und die Verfrachtung von Luftverunreinigungen näher studiert werden, z. B. für die Stadt Freiburg (Baumbach und Vogt 1999) und in der Stadt Stuttgart (Vogt et al. 1999). Beispielhaft seien hier aus Messungen in der Stadt Tübingen die tagsüber und nachts auftretenden Verhältnisse schematisch dargestellt, siehe Abb. 16-7 (Baumbach 1993a). Im Prinzip sind die Vorgänge vergleichbar mit denen in nicht so tief eingeschnittenen Tälern: Ozonabbau in der nächtlichen Bodeninversion und tagsüber weitgehend gleichmäßige Vermischung über die Mischungsschichthöhe. Die Tallagen bedingen allerdings den Effekt, daß die Inversionsschichten seitlich an die Hänge anstoßen. Die Häuser in den unteren Bereichen des Hanges und im Tal sind nachts der schlechteren Luft unter der Bodeninversion ausgesetzt, während an den Hangbereichen über der Bodeninversion und in den seitlich angrenzenden Höhenlagen durch die Abkopplung von der Talluft deutlich höhere Ozonkonzentrationen, aber auch niedrigere Konzentrationen an primär emittierten Komponenten anzutreffen sind. Dies ist sowohl in Abb. 16-7 c an den Vertikalprofilen als auch in Abb. 16-7 a an den horizontalen Verteilungen der verschiedenen luftverunreinigenden Stoffe zu erkennen. Da die kalte Luft i. a. im Tal nicht stehen bleibt (auch wenn man von „Kaltluftseen“ spricht), sondern talabwärts abfließt, kommt dem Freihalten von Frischluftschneisen an den Hängen und einem frei gehaltenen Talausgang für die Belüftung der Stadt eine entscheidende Bedeutung zu.

Wie stark die vertikale Ausbreitung von Luftverunreinigungen in Tälern durch die bodennahe Inversion behindert wird, geht sehr anschaulich aus der fotografischen Wiedergabe der ausschließlich horizontalen Ausbreitung einer partikelhaltigen und damit gut sichtbaren Abgasfahne in einem Schwarzwaldtal hervor, siehe Abb. 16-8. Solange sich die Inversion noch nicht aufgelöst hat, ist entsprechend Abb. 16-7 unter der Sperschicht kaum Ozon anzutreffen, während darüber die Ozonkonzentration des vorangegangenen Nachmittages konserviert vorhanden ist.

8 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Es wurde gezeigt, daß das Ozonaufkommen in der Troposphäre über der atmosphärischen Hauptschicht durch großräumige Konzentrationsverteilungen geprägt ist. Die Ozonkonzentrationen am Boden werden dagegen ganz stark von der Existenz der Bodeninversion beeinflusst. Unter und in dieser Inversion, also in unserer Atemluft, wird in den Städten durch das Vorhandensein von Stickstoffoxiden und/oder anderen Komponenten Ozon fast vollständig abgebaut. Zwischen der Boden- und der Höheninversion befindet sich die „Reservoirschicht“, in der das Ozon des vorangegangenen Nachmittags konserviert ist. Die Höhenlagen der Mittelgebirge befinden sich ab dem Abend über die Nacht bis in die Vormittagsstunden i. a. in dieser Reservoirschicht. Sie sind deshalb höheren Ozonkonzentrationen, aber deutlich geringeren Konzentrationen an direkt emittierten Abgaskomponenten ausgesetzt als die Tallagen.

Für die Raumplanung, z. B. zur Besiedlung und Industrieansiedlung in Tälern, an Hängen oder auf Hochlagen, sind die Kenntnisse der Zusammenhänge zwischen dem Auftreten von atmosphärischen Sperschichten und der Atemluftqualität von großer Bedeutung. Vertikalprofile, durch Fesselballonmessungen ermittelt, können hierzu die erforderlichen Informationen bereitstellen. Auch das Feinstpartikelauftreten steht in engem Zusammenhang mit der Existenz von atmosphärischen Sperschichten. Inzwischen ist die Fesselballonmeßtechnik um die Partikelmessung einschließlich der Erfassung der Korngrößenverteilung erweitert worden, so daß auch die Verteilung der Partikel in der unteren Troposphäre als derzeit aktuelles Thema erforscht werden kann.

Literatur

- BAUMBACH, G., 1990: Lufthygienisches Gutachten für die Stadt Heilbronn. Stadt Heilbronn, Amt für Straßenverkehr und Umwelt, 104 S.
- BAUMBACH, G., 1993a: Luftreinhaltung, 3. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, 461 S.
- BAUMBACH, G., 1993b: A tethered-sonde measuring system for detection of O₃, NO₂, hydrocarbon concentrations, and meteorological parameters in the lower planetary boundary layer. Meteorologische Zeitschrift N.F. (2), 178-188.
- BAUMBACH, G., K. BAUMANN, 1992: Schadgasaufkommen und -eintrag in Waldbestände, Institut für Verfahrenstechnik und Dampfkesselwesen der Universität Stuttgart, Abteilung Reinhaltung der Luft, Bericht Nr. 25, 150 S.
- BAUMBACH, G., U. VOGT, 1995: A Tethered-Balloon Measurement System for the Determination of the Spatial and Temporal Distribution of Air pollutants such as O₃, NO₂, VOC, Particles and Meteorological Parameters, Eurotrac Newsletter 16/95, 23-29.
- BAUMBACH, G., U. VOGT, 1999: Experimental determination of the effect of mountain-valley breeze circulation on air pollution in the vicinity of Freiburg, Atmospheric Environment 33, 4019-4027.
- BECKER, K.H., J. LÖBEL, (Hrsg.) 1985: Atmosphärische Spurenstoffe und ihr physikalisch-chemisches Verhalten, Springer, Berlin, 264 S.
- DEUTSCHER WETTERDIENST, 1982: Wetteramt Stuttgart: Monatliche Darstellung der bodennahen Inversionsschichten, nicht veröffentlichte Auswertungen.
- FABIAN, P., 1989: Atmosphäre und Umwelt, 3. Auflage, Springer, Berlin, 141 S.
- FINNLAYSON-PITTS, B.J., J.N. PITTS jr., 1986: Atmospheric Chemistry, Fundamentals and Experimental Techniques, John Wiley & Sons, New York, 1098 S.
- GIEBEL, J., 1981: Verhalten atmosphärischer Sperrschichten, Landesanstalt für Immissionsschutz, Essen, LIS-Bericht Nr. 12, 42 S.
- GIEBEL, J., 1983: Untersuchungen über Zusammenhänge zwischen Sperrschichthöhen und Immissionsbelastung, Landesanstalt für Immissionsschutz, Essen, LIS-Bericht Nr. 29, 42 S.
- GLASER, K., 2001: Methoden der Qualitätssicherung bei der Messung von Luftverunreinigungen bei Feldexperimenten, Dissertation, Universität Stuttgart, 152 S.
<http://elib.uni-stuttgart.de/opus/volltexte/2001/901/pdf/alleKap.pdf>
- KANTER, H.J., R. REITER, K.-H. MUNZERT, 1982: Untersuchungen zur Frage der photochemischen Produktion von Ozon in Reinluftgebieten und ihrer vertikalen Verteilung. Forschungsbericht 104 02 800, Umweltbundesamt, Berlin, 78 S.
- KANTER, H. J., V. A. MOHNEN, A. VOLZ-TOMAS, W. JUNKERMANN, K. GLASER, H. WEITKAMP, F. SLEMR, 2001: Quality Assurance in TFS für inorganic Compounds, J. Atmos. Chem., im Druck.
- NEU, U., 1995: Schlußbericht zu den wissenschaftlichen Auswertungen des Ozonversuchs Neckarsulm/Heilbronn, Bd. II, Hrsg.: Umweltministerium Baden-Württemberg, 112 S.
- PAFFRATH, D., W. PETERS, H. STANGL, 1986: Airborne Measurements of Ozone and other Pollutants North and South of the Alps, Proc. 7th World Clean Air Congress, IUAPPA, Sydney/Australia, Bd. 3, 194-203.
- STULL, R.B. 1989: An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Atmospheric Sciences Library, Kluwer Academic Publishers, 666 S.
- VOGT, U., G. BAUMBACH, S. HANSEN, A. RÜHLING, 1999: Messungen der Kaltluftströme und Luftverunreinigungs-Vertikalprofile im Plangebiet „Stuttgart 21“, Untersuchungen zur Umwelt „Stuttgart 21“, Heft 15, Landeshauptstadt Stuttgart, Amt für Umweltschutz, 91 S.
- VOGT, U., G. BAUMBACH, P. BAUERLE, K. GLASER, U. RÜGER, H.-B. KRÖPLIN, 2001: Air pollutants mass balancing over the city of Augsburg by windward and leeward vertical and horizontal soundings, eingereicht bei Atmospheric Environment.

Zusammenhänge zwischen Meeresspiegel-Schwankungen des Kaspischen Meeres und Temperaturvariationen des tropischen Pazifiks

1 Einleitung

Das Kaspische Meer liegt in einer kontinentalen Senke mit einem Meeresspiegel von ca. 27 m unterhalb des mittleren Meeresspiegels. Es hat eine Größe von ca. 400 000 km². Der Meeresspiegel reagiert sehr empfindlich auf klimatologische Veränderungen und weist während des 20. Jahrhunderts starke Schwankungen auf (Abb. 1). Diese Meeresspiegel-Schwankungen beeinflussen in diesem Gebiet viele ökonomische und soziale Bereiche des Lebens (Dumont 1995). Die Probleme wurden in den 1930ern deutlich, als der Meeresspiegel innerhalb von sieben Jahren um 1,7 m sank. Das Klima im Einflußgebiet des Kaspischen Meeres war in diesen Jahren besonders trocken und die Flüsse führten wenig Wasser. Wegen der geringen Wassertiefe im nördlichen Kaspischen Meer reduzierte sich die Oberfläche des Meeres um 6 %. In den folgenden Jahren bis 1977 sank der Meeresspiegel um weitere 1,2 m.

Man war davon überzeugt, daß die Absenkung des Meeresspiegels durch Wasserentnahme für Bewässerungen verursacht worden war und daß sich der alte Pegel nicht von selbst wieder einstellen würde. Daher wurden Überlegungen angestellt, wie man den alten Zustand wieder herstellen könnte, z.B. durch eine Umleitung der nach Norden fließenden Flüsse. Von den vielen Projekten wurde jedoch nur eines verwirklicht, nämlich die Abdeichung des Kara-Bogaz-Gol, einer tiefreichenden Bucht im östlichen Kaspischen Meer, in der große Mengen von Wasser verdunsten. Diese Arbeiten wurden 1980 abgeschlossen.

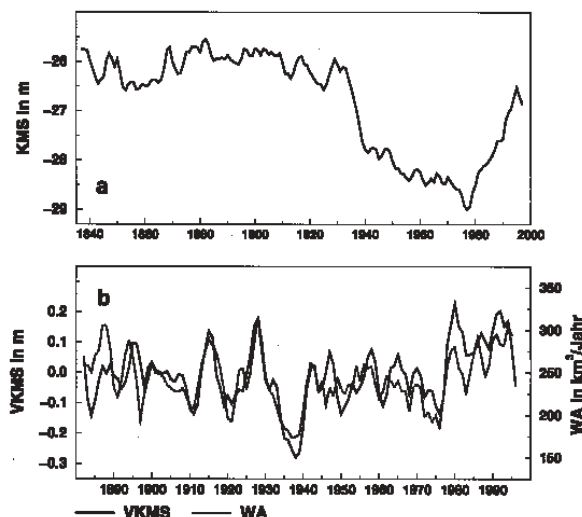


Abb. 1: a) Jahresmittel des Kaspischen Meeresspiegels (KMS) für die Periode 1837-1997; b) Jahresmittel der Variation des Kaspischen Meeresspiegel (VKMS, ausgezogene Linien) und Abflüsse der Wolga (WA, Glättung durch laufende Mittelung über 3 Jahre, gepunktete Linie). Daten von Polonskii und Gorelits (1997) und Golitsyn und Panin (1989).

Zu diesem Zeitpunkt stieg der Meeresspiegel bereits stetig an und man entschloß sich, den Damm wieder zu sprengen. Bis zum Sommer 1995 stieg der Meeresspiegel stetig weiter um 2,5 m über den Wert von 1977. Er erreichte damit aber noch nicht die Werte von vor 1930. Seit 1995 blieb der Pegel relativ stabil. Die Überwachung des Meeresspiegels erfolgt heute nicht nur mit Hilfe der Pegel in den Häfen sondern auch durch die TOPEX-POSEIDON Satelliten Beobachtungen (Cazenave et al. 1997).

Wissenschaftler beschäftigen sich schon seit langem mit der Erforschung der Ursachen für die Meeresspiegelschwankungen. Einen ausführlichen Überblick darüber gibt Rodionov (1994). Die für den Meeresspiegel verantwortlichen hydrologischen Komponenten sind die Zuflüsse der großen Ströme, insbesondere der Wolga (80 %) und die Verdunstung über dem Meer. Weitere Komponenten sind der Niederschlag über dem Meer, der Abfluß in den Kara-Bogaz-Gol, wo das Wasser anschließend verdunstet, und unterirdische Wasserflüsse. Die Summe der einzelnen Komponenten kompensiert sich nur im langzeitlichen Mittel. Es gibt daher einen Jahresgang des Meeresspiegels mit 10-20 cm höheren Pegeln im Sommer als im Winter. Die starken Störungen der Bilanzen in den 1930ern und nach 1977 hängen mit Änderungen der atmosphärischen Zirkulation zusammen, die zu verringerten Niederschlägen im Einflußgebiet des Kaspischen Meeres in den 1930ern und erhöhten Niederschlägen nach 1977 führten. Auch Veränderungen der Verdunstung über dem Kaspischen Meer trugen zu den Meeresspiegelschwankungen bei. In der gegenwärtigen Studie soll untersucht werden, inwieweit ozeanische Temperaturanomalien für die anomalen atmosphärischen Zirkulationen im Einflußbereich des Kaspischen Meeres verantwortlich sind, und wie weit atmosphärische Modelle in der Lage sind, solche Variationen zu simulieren.

Erste Versuche, atmosphärische Modelle bei der Untersuchung des Kaspischen Meeres einzubeziehen, wurden von Golitsyn et al. (1995) und Meleshko (1998) im Rahmen von AMIP (Atmospheric Model Intercomparison Project) durchgeführt. Die Zeitspanne von 10 Jahren, die bei AMIP bearbeitet wurde, reicht für viele Aspekte nicht aus. Deshalb konzentriert sich diese Studie auf Zeitspannen von 40 bis 90 Jahre.

2 Simulationen mit dem Modell

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden Simulationen mit dem atmosphärischen Modell ECHAM4 (Roeckner et al. 1996) des Max-Planck-Institutes für Meteorologie in Hamburg durchgeführt. Das Modell wurde mit beobachteten Meeresoberflächentemperaturen (SST = sea surface temperature), einschließlich Seeisgrenzen, angetrieben (Rayner et al. 1996). Dabei wurden Änderungen der Zusammensetzung

der Atmosphäre bezüglich der Treibhausgase berücksichtigt. Es wurden 4 Läufe für die Periode 1903-1994 und 2 weitere Läufe für die Periode 1951-1994 durchgeführt. Diese Läufe unterscheiden sich nur in ihren Anfangsfeldern, die zufällig aus einem Katalog gewählt wurden. Das Modell lief mit einer horizontalen Auflösung T42 (Gitternetz von ca. 2,8°). Bei dieser Auflösung wird das Kaspische Meer durch 6 Gitterpunkte und das Wolga-Einflußgebiet durch 31 Gitterpunkte repräsentiert.

Man kann davon ausgehen, daß die SST-Variabilität des Kaspischen Meeres einen großen Einfluß auf die Verdunstung des Meeres und damit auch auf dessen Meeresspiegel hat. Dieser Aspekt kann bei dieser Untersuchung nicht berücksichtigt werden, da lange Zeitreihen der SST vom Kaspischen Meer nicht zur Verfügung stehen. Daher wird mit diesen Simulationen nur der Einfluß der ozeanischen Temperaturen auf den Abfluß der Wolga untersucht, was aber weniger gravierend zu sein scheint, da Variationen des Meeresspiegels (VKMS) mit den Variationen des Wolga-Abflusses (WA) zu 82 % korreliert sind, wie Abb. 1b veranschaulicht.

In den Simulationen wird der WA aus der Differenz zwischen Niederschlag und Verdunstung im Einflußbereich der Wolga berechnet. Um Schwierigkeiten, die durch die Verzögerung zwischen Niederschlagsereignissen und dem Abfluß an der Mündung entstehen, zu vermeiden, werden nur Jahresmittelwerte betrachtet. Die Wahl der Monate für ein Jahresmittel wird weiter unten kurz angesprochen.

3 Zusammenhänge mit ozeanischen Temperaturanomalien

Mögliche Zusammenhänge zwischen den atmosphärischen Vorgängen im Gebiet des Kaspischen Meeres und den SST-Anomalien werden in Abb. 2 mit Hilfe von Korrelationsanalysen untersucht. In Abb. 2a werden die VKMS vom laufenden zum folgenden Jahr mit den SSTs (Januar bis Dezember Mittel) korreliert. Höchste Werte findet man im tropischen Pazifik, die am Äquator 0,5 überschreiten. Diese Werte sind statistisch signifikant, da der Grenzwert schon bei 0.2 (95 % Niveau) erreicht wird. Positive Werte bedeuten, daß bei warmen Temperaturen der KMS ansteigt. Das Gebiet 120°W-160°W, 15°S-15°N weist die höchsten Korrelationen aus und wird im weiteren als Referenzgebiet benutzt. Andere statistisch signifikante Werte findet man über dem indischen, dem nordpazifischen und dem nordatlantischen Ozean.

Das Verteilungsmuster der Korrelationen über dem Nordatlantik ähnelt den SST-Anomalien, die mit der nordatlantischen Oszillation (NAO) in Verbindung gebracht werden (Grötzner et al., 1998). Auch Rodionov (1994) sieht in der NAO eine wichtige Ursache für die VKMS.

Abb. 2b zeigt Korrelationen zwischen dem beobachteten WA (Daten von Polonskii und Gorelits 1997) und den SSTs. Es ergibt sich eine ähnliche geographische Verteilung wie in Abb. 2a, jedoch mit schwächeren Werten. Hierbei werden unterschiedliche Jahresmittel-Definitionen benutzt, für den WA

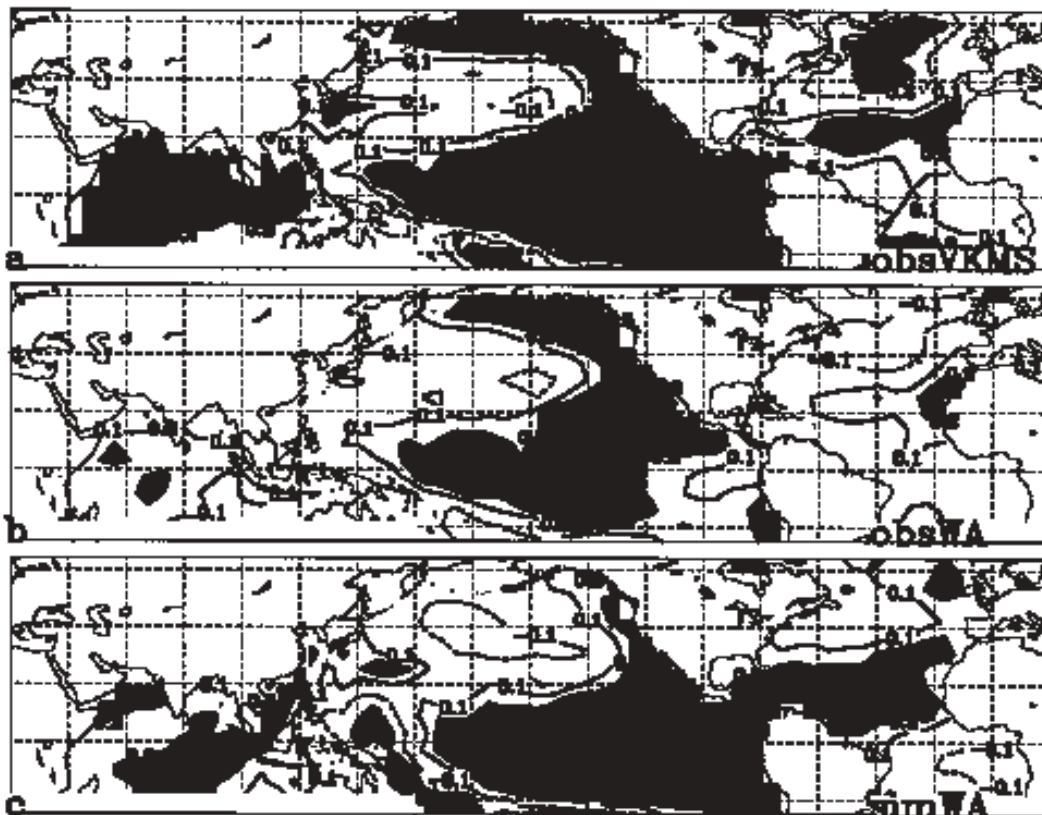


Abb. 2: Korrelationen zwischen a) der Variation des Kaspischen Meeresspiegels (VKMS, Mittel des folgenden - laufenden Jahres) und den ozeanischen Oberflächentemperaturen (SST, Mittel: Jan.-Dez. des laufenden Jahres), b) dem beobachteten Wolga-Abfluß (WA, Mittel: Jan.-Dez. des folgenden Jahres) und den SSTs (Mittel: Juli-Juni), c) wie b) aber für die Simulationen (WA = Niederschlag - Verdunstung, Mittel: Sept.-August). Statistisch signifikante Werte (95 % Niveau) sind schraffiert.

ein Januar-Dezember und für die SST ein Juli-Juni Mittel. Das SST Mittel liegt also ein halbes Jahr vor dem WA Mittel. Die Begründung für die zeitliche Versetzung der Mittelungsperiode wird im nächsten Kapitel diskutiert.

Das der Abb. 2b entsprechende Bild für Modellsimulationen zeigt Abb. 2c. Der jährliche WA wird hier als Niederschlag minus Verdunstung über dem Wolgagebiet für die Periode September bis August definiert. Die Werte von vier Simulationen sind gemittelt, wodurch zufällige Schwankungen unterdrückt und Einflüsse von SST-Anomalien verstärkt wurden, was die höheren Korrelationswerte verständlich macht. Entsprechende Verteilungen bei Nutzung einzelner Simulationen ergeben ähnliche Verteilungen aber mit Werten, die unter denen für den beobachtete WA liegen.

Die SST-Variationen im tropischen Pazifik sind eng an das El Niño/Southern Oscillation (ENSO) Phänomen gekoppelt, das mit einer Periode von 2 bis 7 Jahren auftritt und globale Einwirkungen auf viele Aspekte der atmosphärischen Zirkulation hat (Ropelewski und Halpert 1987). In einem typischen El Niño-Jahr breitet sich im Frühling (März-Mai) eine Warmwasseranomalie von der südamerikanischen Küste zum Zentralpazifik aus, die dann die größte Ausbreitung im folgenden Winter aufweist (Rasmusson und Carpenter 1982). Aus diesem Grund wurden auch bei den hier durchgeführten Korrelationen Jahresmittel der SST für die Zeit vom laufenden zum darauf folgenden Sommer durchgeführt.

4 Optimale Perioden für Jahresmittel

In den vorherigen Abschnitten wurde häufiger darauf hingewiesen, daß unterschiedliche Monate für Jahresmittelwerte genutzt werden. Dieses ergibt sich einmal aus der Definition eines ENSO Jahres und zum anderen aus der Überlegung, daß es zwischen verschiedenen Ereignissen physikalisch begründete Zeitverschiebungen geben kann. Z.B. sollte für einen Vergleich zwischen Niederschlag und Abfluß eine Mittelung des Niederschlages von einem Sommer zum nächsten Sommer erfolgen, damit der Schneefall im Herbst und die Schneeschmelze im Frühjahr in dasselbe Jahresmittel fallen. Um die für diese Untersuchung optimalen Jahresdefinitionen zu finden, haben wir Korrelationen zwischen der mittleren SST im tropischen Pazifik (siehe oben) und den verschiedenen Größen im Kaspischen Raum berechnet. Dabei wurden die Jahresmittelperioden um alle möglichen Monate und auch die Zeitverschiebungen zwischen den Zeitreihen in Monatsschritten variiert.

Die Korrelation zwischen dem Niederschlag über der Wolgaregion und der SST im tropischen Pazifik ergab die höchsten Werte, wenn die SST für Mai bis April und der Niederschlag mit 4 Monaten zeitlicher Versetzung gemittelt wurden, d.h. September bis August. Beim WA ergaben sich höchste Werte bei gleicher Mittelung für die SST und einer Versetzung von 8 Monaten für den Abfluß. Bei einer Mittelung für die SST von September bis August beträgt die optimale Verzögerung für den Abfluß nur 5 - 7 Monate, d.h. daß der WA am besten für das Kalenderjahr Januar bis Dezember gemittelt wird. Die

auf tretenden Maxima bei diesen Korrelationsberechnungen sind sehr flach und daher ist die Wahl der Monate für ein Jahresmittel nicht kritisch. Hinzu kamen noch praktische Erwägungen, wie die Verfügbarkeit von Daten und der Wunsch, die Anzahl der benutzten Mittelungsintervalle klein zu halten.

5 Interdekadische Variationen

Die Vermutung liegt nahe, daß die NAO einen großen Einfluß auf die Variabilität des Niederschlages im Wolgagebiet hat, da die NAO ein Maß für die Westströmung über Europa ist. Rodwell et al. (1999) und Latif et al. (1999) konnten zeigen, daß die SSTs in dekadischen Skalen die Variabilität der NAO beeinflussen kann, während man bei kürzeren Zeitskalen davon ausgeht, daß die atmosphärische Variabilität den dominierenden Einfluß auf die SST hat. Benutzt man z. B. bei Korrelationsberechnungen, wie sie für die Abb. 2 durchgeführt wurden, einen Bandpaßfilter, der nur Perioden mit 10 bis 25 Jahren passieren läßt, dann erhöhen sich die Korrelationskoeffizienten über dem nördlichen Atlantik tatsächlich von etwa 0,3 auf 0,4, stellenweise sogar um einen Faktor von 2, andere ozeanische Gebiete weisen dagegen keine systematischen Erhöhungen aufweisen. Die Korrelationskoeffizienten im Nordatlantik erreichen dabei gerade Werte von 0,50, die für eine statistische Signifikanz von 95 % notwendig sind. Auch Rodionov (1994) diskutiert die Möglichkeit eines Einflusses der NAO auf die Schwankungen des Kaspischen Meeresspiegels. Jedoch haben wir keine Variationen in der NAO gefunden, die nur im entferntesten den beiden dominierenden Änderungen des Kaspischen Meeresspiegels in den 1930ern und nach 1977 entsprechen.

Oben wurde bereits ein Zusammenhang zwischen den Änderungen des Kaspischen Meeresspiegels und den SST-Anomalien des tropischen Pazifiks in interannualen Zeitskalen aufgezeigt. Im folgenden soll untersucht werden, ob solch ein Zusammenhang auch für dekadische Zeitskalen zu finden ist. Als Maß für die Variabilität im tropischen Pazifik wird jetzt aber nicht deren Temperatur, sondern der Southern Oscillation Index (SOI, Daten von Ropelewski und Jones 1987) benutzt, der sich aus dem Luftdruckgegensatz zwischen Tahiti (12°S, 150°W) und Darwin (12°S, 131°E) errechnet. Der Grund hierfür liegt in der Vermutung, daß lange Zeitreihen von Druckmessungen an Land weniger fehlerbehaftet sind als unregelmäßige Temperaturmessungen über dem Meer.

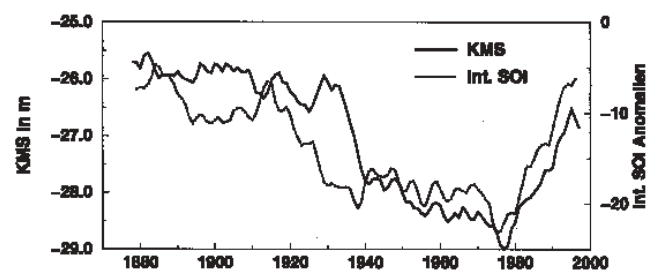


Abb. 3: Zeitserie des Kaspischen Meeresspiegels (KMS, ausgezogene Linie) und der zeitlich integrierte SOI-Anomalien (Dezember bis Februar Werte, laufende Mittelung über 3 Jahre, gepunktete Linie).

SOI-Anomaliewerte für den Nordwinter werden zeitlich integriert und dann in Abb. 3 mit den VKMS verglichen. Beide Kurven zeigen nahezu konstante Werte vor 1920 und zwischen 1940 und 1980 sowie starke Änderungen in den übrigen Zeiten. Die Übereinstimmung ist nicht perfekt aber gut genug, um einen Zusammenhang zwischen der VKMS und den SST-Anomalien des tropischen Pazifiks in interdekadischen Zeitskalen zu vermuten.

Die Zunahme nach 1977 kann mit einer stetigen Zunahme der SST im Pazifik in Verbindung gebracht werden. Zu der Zeit der starken Abnahme des Meeresspiegels im Kaspischen Meer kann man aber keine Temperaturanomalien im tropischen Pazifik in der dekadischen Skala finden. Diese Periode ist vielmehr von einer langen Reihe von Jahren ohne El Niño (warme) Ereignisse geprägt. 1932-1939 gab es kein einziges warmes aber fünf kalte Ereignisse. Auch 1905-1910 gab es eine Reihe von kalten Ereignissen, der dann mehrere warme folgten, auch in dieser Zeit findet man entsprechende Variationen beim WA (siehe Abb. 1).

Eine Untersuchung der Modellsimulationen bezüglich der Variabilität des Niederschlages über dem Wolgaeinflußgebiet und den SOI-Anomalien in dekadischen Zeitskalen zeigt keine Ähnlichkeit mit den beobachteten Werten. Unsere Vermutung ist, daß dies durch die fehlende Wechselwirkung von der Atmosphäre auf den Ozean verursacht wird. Diese Vermutung wird durch Vergleich mit Ergebnissen mit dem gekoppelten Ozean-Atmosphären-Modell unterstützt. Die Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen den Ozeanen und der Atmosphäre in beiden Richtungen bildet einen Schwerpunkt der Forschung am Max-Planck-Institut für Meteorologie in den nächsten Jahren.

Zusammenfassung

Es besteht eine robuste Verbindung zwischen der Variation des Kaspischen Meeresspiegels und den Meeresoberflächen-Temperaturanomalien des tropischen Pazifiks. Diese Verbindung konnte nicht nur für Beobachtungsdaten gezeigt werden, sondern auch anhand von Simulationen mit dem atmosphärischen Modell des Max-Planck-Institutes, das mit beobachteten Meeresoberflächen-Temperaturen angetrieben wurde. Letzteres jedoch nur für Zeitskalen von 2 bis 7 Jahren. Der Zusammenhang für längere Zeitskalen wurde mit Hilfe von zeitlich integrierten Anomalien des Southern Oscillation Indexes (SOI) demonstriert, jedoch nur für beobachtete Daten. Hier scheint die Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre in beiden Richtungen von Bedeutung zu sein, die bei den benutzten Simulationen unterdrückt wurde und nur in gekoppelten Ozean-Atmosphären-Modellen berücksichtigt werden kann.

Eine Verbindung zwischen der Nordatlantischen Oszillation (NAO) und der Variation des Kaspischen Meeresspiegels liegt zwar nahe, und es gab viele Anzeichen für einen solchen Zusammenhang, aber ein statistisch gesicherter Nachweis konnte nicht erbracht werden.

Literatur:

- CAZENAVE, A., K. BONNEFOND, K. DOMINH, P. SCHAEFFER, 1997: Caspian sea level from Topex- Poseidon altimetry: Level now falling. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 881-884.
- DUMONT, H., 1995: Ecocide in the Caspian Sea. *Nature*, **377**, 673-674.
- GOLITSYN, G.S., 1995: The Caspian Sea level as a problem of diagnosis and prognosis of the regional climate change. *Izvestiya, Atmos. Oceanic Phys.*, **31**, 366-372.
- GOLITSYN, G.S., G.N. PANIN, 1989: The water balance and modern variations of the level of the Caspian Sea. *Soviet Meteorol. Hydrol.*, **1**, 46-52.
- GOLITSYN, G.S. et al., 1995: GCM simulation of water balance over Caspian sea and its watershed. *Proceedings of The First International AMIP Scientific Conference, Monterey, California, USA, 15-19 May 1995, WMO/TD-No.732*, 113-118.
- GRÖTZNER, A., M. LATIF, T. P. BARNETT, 1998: A decadal climate cycle in the North Atlantic Ocean as simulated by the ECHO coupled GCM. *J. Climate*, **11**, 831-847.
- LATIF, M., K. ARPE, E. ROECKNER, 1999: Oceanic control of decadal north Atlantic sea level pressure variability in Winter. *Zur Veröffentlichung eingereicht.*
- MELESHKO, V.P. et al., 1998: Calculation of water balance components over the Caspian Sea watershed with a set of atmospheric general circulation models. *Izvestiya, Atmos. Oceanic Phys.*, **34**, 534-542 (in russisch).
- POLONSKII, V.F., O. V. GORELITS, 1997: Water runoff and its distribution in the delta of the Volga river. *Russian Meteorol. Hydrol.*, **4**, 84-95 (in russisch).
- RASMUSSEN, E.M., 1991: Observational aspects of ENSO cycle teleconnections. In Glantz, M.H., Katz, R.W. und Nicholls, N. (eds.), *Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies*. (Cambridge: Cambridge University Press, 309-343).
- RASMUSSEN, E.M., T. H. CARPENTER, 1982: Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon. Wea. Rev.*, **110**, 354-84.
- RAYNER, N.A., E. B. HEARTEN, D. E. PARKER, C. K. FOLLAND, R. B. HACKED, 1996: Version 2.2 of the global sea-ice and sea surface temperature data set, 1903-1994. (Climate Research Technical Note CRTN74, Bracknell/UK).
- RODIONOV, S.N., 1994: Global and regional climate interaction: the Caspian Sea experience. (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands).
- RODWELL, M.J., D. P. ROWELL, C. K. FOLLAND, 1999: Oceanic forcing of the wintertime North Atlantic Oscillation and European climate. *Nature*, **398**, 320-323.
- ROECKNER, E. et al., 1996: The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate (Report No. 218, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg).
- ROPELEWSKI, C.F., P.D. JONES, 1987: An extension of the Tahiti-Darwin Southern Oscillation Index. *Monthly Weather Review*, **115**, 2161-2165.
- ROPELEWSKI, C.F., M. S. HALPERT, 1987: Global and regional scale precipitation patterns associated with El Niño/Southern Oscillation (ENSO). *Mon. Wea. Rev.* **115**, 1606-1626.

K. Arpe*, L. Bengtsson*, G.S. Golitsyn †, I.I. Mokhov †, V.A. Semenov † und P.V. Sporyshev ‡

* Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bundesstraße 55, 20146 Hamburg

† Obukhov Institut für atmosphärische Physik, 3 Pyzhevsky, 109017 Moskau, Rußland

‡ Voeykov geophysikalisches Observatorium, 7 Karbysheva, 194021 St. Petersburg, Rußland

Kurzfristvorhersagen von Niederschlagswahrscheinlichkeit und Temperatur

1 Einleitung

Zu den wichtigen Komponenten der täglichen Wetterprognose gehören die Vorhersagen der Höchst- und Tiefsttemperaturen, sowie des Niederschlags. Diese Größen werden von den Modellen der numerischen Wettervorhersage (**numerical weather prediction**, NWP) für kurz- bis mittelfristige Vorhersagezeiträume gut vorhergesagt. Neben den deterministischen Kurzfristvorhersagen stehen aber auch Produkte von statistischen Modellen zur Verfügung; eine dritte Kategorie sind statistisch-dynamische Hybride. Statistische Modelle, wie z. B. Markov-Modelle, haben Vorteile sobald sie an die Klima-Zeitreihen von Bodenbeobachtungen einzelner Stationen angepaßt sind. Ihre Vorhersagen sind sofort nach beendeter Beobachtung verfügbar. Außerdem erfordern sie nur minimale Rechenzeit, nachdem die klimatologische Zeitreihe in geeigneter Weise einmal ausgewertet worden ist. Im Gegensatz zu diesen statistischen Ansätzen sind die numerischen Wetterprognosen deterministische Anfangswert-Vorhersagen auf der Basis von dynamischen Modellen, die nur in geringem Maß die lokale Klimatologie des Prognose-Gebietes berücksichtigen. Sie liefern Flächenmittel und nicht Stations- oder Punktvorhersagen.

So werden statistische Modelle entwickelt, die das Kurzzeitgedächtnis der Atmosphäre ausnutzen. Dazu gehören Markov-Prozesse, wie sie z.B. von Gabriel und Neumann (1962) an die Niederschlagsmenge in Tel Aviv angepaßt wurden. Fraedrich und Müller (1983) verwendeten Markov-Ketten für Bewölkungs- und Niederschlagswahrscheinlichkeiten (**Probability of Precipitation**, PoP) sowie für die Sonnenscheindauer in Berlin; Fraedrich und Dümmel (1983) benutzten autoregressive Modelle für die geopotentielle Höhe. Nach Erweiterung um zusätzliche Einflußgrößen (Miller 1984, 'Generalized Equivalent Markov' System) ist die Markov-Kettenprognose der Niederschlagswahrscheinlichkeit vom Berliner Universitätswetterdienst 1984 eingeführt worden (Müller 1986; Fraedrich und Müller 1986). Im australischen Bureau of Meteorology sind diese Ansätze für die Hauptstädte des Kontinents in den mittleren Breiten (Miller und Leslie 1985; Fraedrich und Leslie 1987b) und in den Tropen (Fraedrich und Leslie 1988) getestet und operationell übernommen worden (Hess et al. 1989). Darüber hinaus führte die fehlerminimierende Linearkombination der statistischen PoP-Vorhersagen mit den numerischen Niederschlagsprognosen in allen Klimaten zur erheblichen Verbesserung gegenüber den Einzelvorhersagen (Fraedrich und Leslie 1987a). Basierend auf diesen Ergebnissen wurde dann an der Universität Hamburg

Mitte der 90er Jahre die statistische Wettervorhersage in Projektstudien und Diplomarbeiten weitergeführt (Kirk und Fraedrich 1998; Raible et al. 1999; 2002): der Einfluß von Nachbarstationen auf die lokale Niederschlagswahrscheinlichkeit, der Temperaturverlauf, die Kombination mit NWP-Modellen und der tägliche automatische Einsatz (<http://puma.dkrz.de/wetter/prognosen>).

Im folgenden werden die zugrundeliegenden statistischen Verfahren für die Prognosen der Niederschlagswahrscheinlichkeit am Beispiel der Station Hamburg vorgestellt und die Verifikationsmethoden erläutert (Abschnitt 2). Die Temperaturvorhersage wird in Abschnitt 3 diskutiert, wobei die Verbesserung der Prognosegüte durch die fehlerminimierende Linearkombination mit NWP-Modellen sowie Fallbeispiele für Sommer und Winter im Vordergrund stehen. Als Datenbasis für die statistischen Modelle werden die Standardsynopdaten (World Meteorological Organization 1988) der Station Hamburg (1949-95) und Helgoland (1966-95) verwendet.

2 Vorhersage der Niederschlagswahrscheinlichkeit

Die Vorhersage des Niederschlags stellt eine besondere Herausforderung dar, da der Niederschlag sowohl räumlich, als auch zeitlich hoch variabel ist. Eine Vorhersage der Niederschlagswahrscheinlichkeit statt der Niederschlagsmenge trägt diesem Verhalten Rechnung und läßt sich gut mit statistischen Verfahren bestimmen. In einem ersten Schritt wird ein einfaches diskretes Markov-Modell erster Ordnung vorgestellt, das die Basis für die Erweiterung mit Hilfe einer multivariaten Regression liefert, die im zweiten Schritt diskutiert wird. Daran anschließend wird das Modell am Beispiel der Station Hamburg verifiziert und die Verbesserung durch Hinzunahme weiterer Variablen der Station Helgoland aufgezeigt.

Das Markov-Modell: Grundlage der hier eingeführten Wahrscheinlichkeitsprognose ist die Markov-Kette (siehe z.B. Gabriel und Neumann 1962; Kemeny und Snell 1976; Fraedrich und Müller 1983; Cox und Miller 1992). Allgemein gilt, daß ein Markov-Prozeß erster Ordnung die Information vom gegenwärtigen Zustand benutzt, um die zukünftige Entwicklung vorherzusagen. Mit Hilfe langer Zeitreihen von lokalen Wetterbeobachtungen ist es möglich, bedingte Wahrscheinlichkeiten (oder Übergangswahrscheinlichkeiten) von einem gegenwärtigen zu einem zukünftigen Zustand zu schätzen. Werden Gegenwart und Zukunft von mehre-

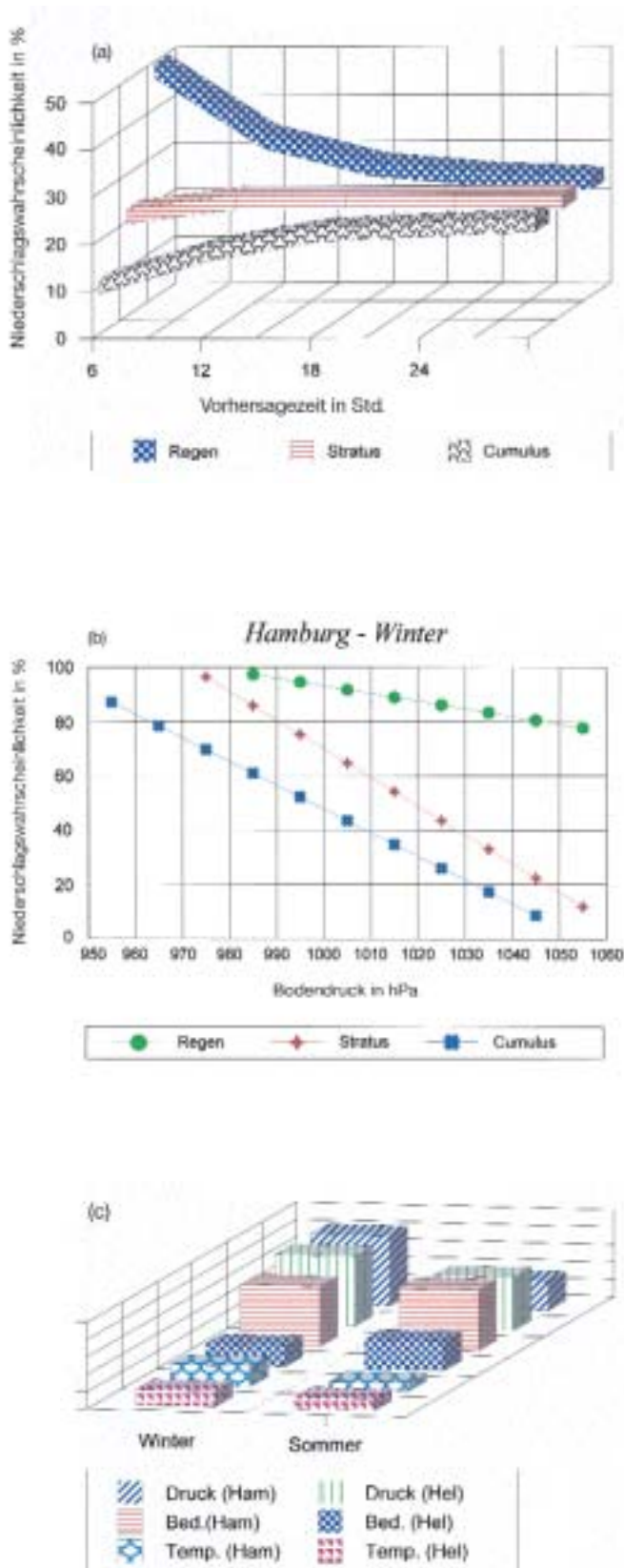


Abb. 1: (a) Vorhersagen der Niederschlagswahrscheinlichkeit (PoP) des reinen Markov-Modells mit zunehmender Vorhersagezeit für Hamburg; (b) 12-stündige PoP-Vorhersage mit dem Markov-Kovariaten Modell für die Wintersaison, wobei nur der Bodendruck in Hamburg als Kovariate verwendet wurde; (c) Einfluß der Kovariaten für das B-Modell (Hamburg - Helgoland) für die 12-stündige PoP-Vorhersage im Winter und Sommer.

ren sich gegenseitig ausschließenden Zuständen charakterisiert – als Komponenten eines stochastischen Vektors, deren Summe eins ergibt, z. B. (NR, RR) = (kein Regen, Regen) – so bilden die entsprechenden bedingten Wahrscheinlichkeiten eine Übergangsmatrix (z. B. von NR zu NR; NR zu RR; RR zu NR; RR zu RR).

Für die Kurzfristprognose des Niederschlags sind primär mesoskalige Prozesse von Bedeutung, die im Wetterschlüssel durch die unterschiedlichen Wolkentypen charakterisiert werden. Die phänomenologische Wolkeneinteilung geht auf Howard (Essay on the Modification of Clouds, 1802/03) zurück und ist von Goethe (um 1816) in einem Gedicht beschrieben worden. Es sind vor allem die Typen der niedrigen (nicht aber der hohen bzw. mittelhohen) Wolken von größter Bedeutung für die Niederschlagsprognose. So beruht das hier verwendete Markov-Modell zunächst auf drei sich gegenseitig ausschließenden Zuständen, zwei Zustände für tiefe Wolken und der W1-Niederschlag. Sie charakterisieren das mesoskalige Wetter der vergangenen sechs Stunden: (1) Cumulus-Wolken oder keine tiefen Wolken, (2) Stratus oder Stratocumulus und (3) Niederschlag. Der Niederschlagszustand (3) ist den signifikanten Wettererscheinungen der letzten sechs Stunden entnommen, die ebenfalls von Wetterbeobachtern routinemäßig verschlüsselt werden. Der W1-Niederschlag tritt nach der Klassifikation signifikanter Wettererscheinungen immer dann auf, wenn in den letzten sechs Stunden oder zum Zeitpunkt der Beobachtung mindestens einmal Niederschlag (Niesel, Regen, Schnee usw.) beobachtet worden ist. Liegt dieser Zustand nicht vor, dann werden die 6-stündlichen Beobachtungsintervalle anhand der oben angegebenen Zustände niedriger Wolken in die Zustände (1) oder (2) eingeteilt.

Die Hamburger Vorhersagen des Markov-Modells für Vorhersagezeiten von 6 bis 24 Stunden sind in Abb. 1a dargestellt. Zeigt der aktuelle Synop von Hamburg im Feld W1 Niederschlag, so ergibt sich nach diesem Modell eine Wahrscheinlichkeit von 50 %, daß es auch im nächsten 6-Stunden Zeitraum zu Niederschlägen kommt. Liegt eine niedrige Stratusbewölkung vor, ohne daß es zur Zeit Niederschläge gibt, so führt das zu einer Niederschlagswahrscheinlichkeit von 20 %. Liegt keiner der beiden erstgenannten Fälle vor, d.h. die tiefen Wolken sind cumulusartig oder nicht vorhanden, dann reduziert sich die Niederschlagswahrscheinlichkeit auf 10 %. Die Abbildung zeigt aber auch die Grenzen des Modells. Für längere Vorhersagezeiträume konvergieren die Werte der drei Zustände zur Klimawahrscheinlichkeit, so daß die Anwendung nur bis zu Zeiträumen von 12 Stunden sinnvoll erscheint.

Das Markov-Kovariaten Modell: Das mesoskalige Wetter, hier charakterisiert durch Wolken und Niederschlagszustände, ist eingebettet in die großräumige synoptische Skala. Im Markov-Kovariaten Modell werden zusätzliche Variablen, die die synoptische Skala

charakterisieren sollen, als Kovariate eingeführt (Miller und Leslie 1985). Es sind kontinuierliche Variablen, wie z. B. der Luftdruck oder die Temperatur zum Beobachtungstermin, und nicht wie bei den mesoskaligen Informationen diskrete und sich gegenseitig ausschließende Wetterzustände. Dadurch erfährt das Modell eine wesentliche Verbesserung, wie das Beispiel des Bodendrucks in Hamburg als zusätzliche Kovariate (Abb. 1b) für die 12-stündige Vorhersage in der Wintersaison veranschaulicht. Für einen Bodendruck von 1025 hPa wird im Falle von Cumulus Bewölkung 25 %, von Stratus Bewölkung 45 % und im Fall, daß Regen beobachtet wurde, 85 % Niederschlagswahrscheinlichkeit für die nächsten 12 Stunden vorhergesagt. Das Markov-Modell liefert entsprechend des aktuellen Zustands den Basiswert der Niederschlagswahrscheinlichkeit; durch ein ausgewähltes Ensemble von Kovariaten wird dieser Zustand modifiziert. Mit Hilfe einer multivariaten linearen Regression werden aus langen Zeitreihen Regressionskoeffizienten für die Kovariaten gewonnen, die dann für die Vorhersage benutzt werden. Das Regressionsverfahren liefert außerdem Informationen über den relativen Einfluß der Kovariaten auf die Prognose, so daß ihre Zahl reduziert werden kann. Dies gewährleistet gleichzeitig die Stabilität der Regression. Die Kovariaten müssen nicht notwendigerweise alle von der Station stammen, für die die Vorhersage erfolgt (Kirk und Fraedrich 1998). Abb. 1c zeigt die wichtigsten Kovariaten für die 12-stündige Vorhersage in Hamburg, wenn außerdem auch noch Beobachtungen der Station Helgoland hinzugezogen werden. Im Winter dominieren Bodendruck und Gesamtbedeckung von Hamburg neben dem Druck von Helgoland. Im Sommer ist der Druck Helgolands sogar wichtiger als der in Hamburg und auch die Helgoländer Bedeckung spielt eine wichtige Rolle. Dies hängt mit der Tatsache zusammen, daß Helgoland bei den sehr häufigen Westwinden stromaufwärts liegt und somit den advektiven Teil des Hamburger Wettergeschehens beschreiben kann.

Verifikation: Das Verifikationskonzept für Vorhersagen der Niederschlagswahrscheinlichkeit ist von Murphy und Winkler (1987; 1992) entwickelt worden. Es beurteilt die Vorhersagen nicht nur nach einfachen Maßzahlen wie den „Half-Brier-Score“ (Brier 1950) oder den „Skill-Score“, der das Modell gegen ein Referenzmodell (z.B. Klima) vergleicht, sondern es zeigt auch die „Zuverlässigkeit“ und die „Schärfe“ der Modelle. Die Bewertung der Modelle wird an zwei Beispielen gezeigt. Das A-Modell ist das Markov-Kovariaten Modell für Hamburg; das B-Modell erweitert das A-Modell um die Kovariaten von Helgoland. Alle Abbildungen beziehen sich auf die Vorhersage des Intervalls 6 bis 18 UTC ausgehend von den 6 UTC Daten und auf den vom Modellbildungszeitraum (1949–78) unabhängigen Verifikationszeitraum 1979–95.

Die Schärfe- und Zuverlässigkeitsdiagramme des A- und B-Modells (Abb. 2a, b) liefern mehr Details als

jede Maßzahl. Zusammengefaßt in zwanzig 5 % Wahrscheinlichkeitsklassen werden die bedingten Verteilungen in der Ordinate angezeigt. Der obere Teil zeigt die Schärfe, wobei hohe Schärfe durch eine U-förmige Verteilung mit einer Häufung der Prognosen bei 0 % und 100 % gekennzeichnet ist. Dabei sind jeweils die bedingten Verteilungen der PoP-Vorhersagen für trockene (○) und Regenzustände (●) des Verifikationszeitraums dargestellt. Die Aufspaltung der Verteilungen in trockene und Regenzustände ist im A-Modell nicht sehr deutlich. Das Maximum für trockene Zustände liegt bei 20 %, für Regen bei 50 %. Der Bereich über 80 % wird durch die PoP-Vorhersagen nicht abgedeckt. Dennoch haben die Vorhersagen eine Güte, da die Maxima voneinander getrennt sind. Im Vergleich dazu zeigt das B-Modell eine deutliche Verbesserung; es liefert eine U-förmige Verteilung mit maximalen relativen Häufigkeiten an den Rändern. Die Zuverlässigkeitsdiagramme, also die beobachtete relative Häufigkeit des Niederschlags für eine gegebene PoP-Vorhersage, ist für jedes Modell in der unteren Abbildung dargestellt. Dabei veranschaulicht die Diagonale das Verhalten eines perfekten Modells; die schattierte Fläche gibt den Bereich an, in dem das Modell positiven Skill gegenüber der Klimavorhersage besitzt. Das A-Modell ist im Bereich von 0 - 40 % nahe an der Diagonalen; zwischen 40 % und 80 % zeigt sich aber eine Unterschätzung des Niederschlags; die beobachtete relative Häufigkeit des Niederschlags übersteigt um etwa 20 % die PoP-Vorhersagen. Über 80 % werden, wie schon das Schärfediagramm andeutet, nur selten PoP-Vorhersagen registriert. Die Zuverlässigkeit des B-Modells zeigt dagegen ein deutliche Nähe zum perfekten Modell über den gesamten Bereich (0 - 100 %). Die maximalen Abweichungen betragen 5 %, was der Wahrscheinlichkeitsklassenbreite entspricht. Somit kann das B-Modell als sehr zuverlässig bezeichnet werden.

3 Vorhersage der Temperaturanomalie

Die Temperatur ist eine weitere häufig nachgefragte Variable bei Wettervorhersagen. Im vorliegenden Fall wird die Temperaturanomalie vorhergesagt. Diese Anomalie ist definiert als Abweichung von einem Mittelwert aller Jahre des Modellbildungszeitraums für einen Kalendertag und einen Haupttermin (00, 6, 12, 18 UTC). Man erhält somit vier Jahresgänge für die vier Haupttermine, die mit einem 7-tägigen gleitenden Mittel geglättet werden. Die Wahl der Anomalie ist entscheidend für die Güte des statistischen Modells, dessen Methode im folgenden beschrieben wird. Daran anschließend wird das Modell am Beispiel der Station Hamburg verifiziert und eine Verbesserung der Vorhersagegüte durch eine fehlerminimierende Linearkombination mit einem NWP-Modell vorgestellt (Raible et al. 1999).

Das multivariate Regressionsmodell: Ein klassisches multivariates Regressionschema (z.B. von Storch und

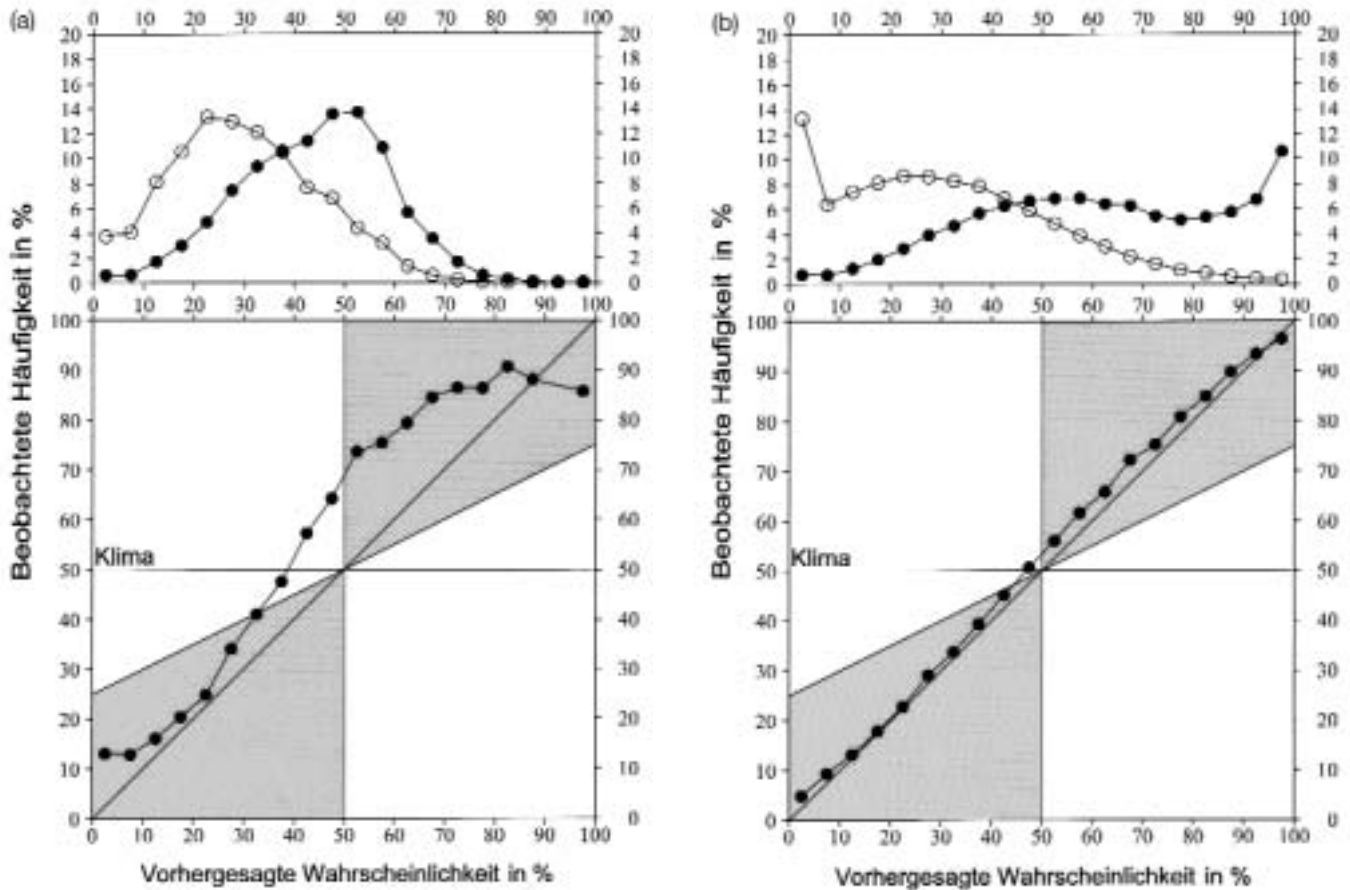


Abb. 2: Das Schärfe- (oben) und Zuverlässigkeitsdiagramm (unten) für die 12-stündige PoP-Vorhersage ausgehend vom Zeitpunkt 6 UTC: (a) A-Modell (Hamburg) und (b) B-Modell (Hamburg – Helgoland). Dabei sind die bedingten Verteilungen der PoP-Vorhersagen für trockene (○) und Regenzustände (●) dargestellt. Die Diagonale in der unteren Abbildung zeigt die Zuverlässigkeit eines perfekten Modells; schattiert ist der Bereich eingezeichnet, in dem ein Modell positiven Skill gegenüber dem Klimamodell besitzt.

Zwiers 1998) wird jeweils einzeln für die vier Temperaturanomalien entsprechend der Haupttermine angewendet. Exemplarisch wird das Schema für das gesamte Jahr vorgestellt. Eine weitere Unterscheidung in einzelne Jahreszeiten ist möglich. Der gesamte Zeitraum wird in einen Modellbildungszeitraum 1949–79 und einen Verifikationszeitraum 1980–95 unterteilt. Als Eingangsdatensatz dienen die Standardsynop- und daraus abgeleitete Daten. Somit stehen 20 Variablen als Prädiktoren zur Verfügung. Wie bei der PoP-Vorhersage wird aus Modellstabilitätsgründen die Anzahl der Prädiktoren reduziert, wobei sich letztendlich 12 Prädiktoren als ausreichend erwiesen haben (Raible et al. 1999). Die den Prädiktoren entsprechenden Regressionskoeffizienten werden im Modellbildungszeitraum geschätzt und zwar jeweils einzeln für die vier Haupttermine und die 4 Vorhersagezeiten (+6 Std., +12 Std., +18 Std. und +24 Std.).

Verifikation und Kombination mit einem NWP-Modell: Die Grundlage der Verifikation des statistischen Modells im Zeitraum 1980–95 liefert die gemeinsame Verteilung der Vorhersage und Beobachtung. Mit Hilfe dieser Verteilung lassen sich traditionelle Verifi-

kationsmaße, wie z. B. der RMS-Fehler (**root-mean-square**), ableiten (Murphy et al. 1989).

In Abb. 3a ist exemplarisch für die 12-stündige Vorhersage der Temperaturanomalie in Hamburg das bivariate Histogramm von Vorhersage und Beobachtung dargestellt. Die darunterliegende Punktwolke um die Hauptdiagonale (die das Verhalten eines perfekten Modells aufzeigt) vermittelt einen qualitativen Eindruck der Zuverlässigkeit des statistischen Modells. Dabei ist zu beachten, daß bei extrem starken Temperaturanomalien die Streuung nicht zunimmt. Die gemeinsame Verteilung, die eine Gaußsche Struktur aufweist, ist symmetrisch entlang der und um die Hauptdiagonale, wo die größten relativen Häufigkeiten auftreten. 70 % aller Vorhersagen haben eine geringere Abweichung als $\pm 2^\circ \text{C}$. Der RMS-Fehler, der ein mittleres Maß der gemeinsamen Verteilung darstellt, beträgt für die 12-stündige Vorhersage $2,2^\circ \text{C}$.

Eine zusätzliche Vorhersageverbesserung wird durch die fehlerminimierende Linearkombination der Vorhersagen des statistischen Regressionsmodells mit numerischen Wetterprognosen des Europa-Modells

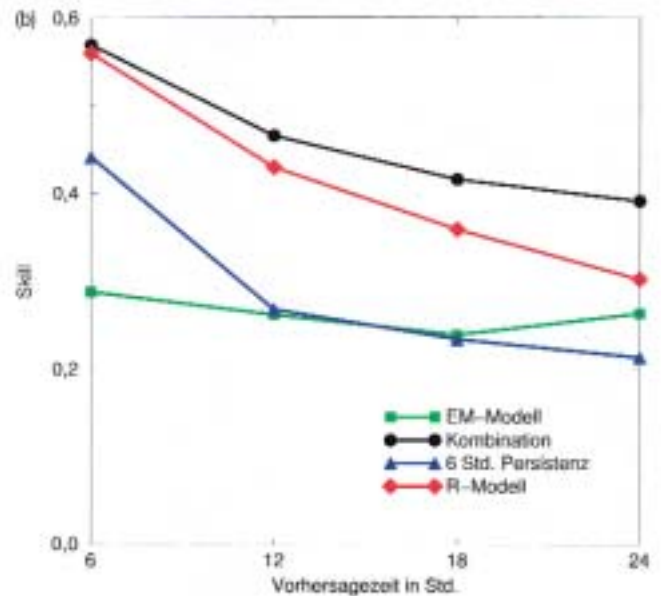
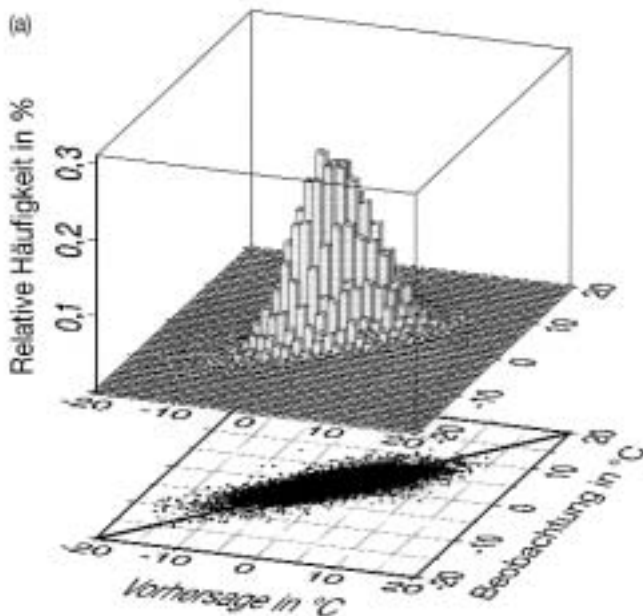


Abb. 3: (a) Bivariates Histogramm der gemeinsamen Verteilung der 12-stündigen Vorhersagen der Temperaturanomale versus Beobachtungen und zugehörige Punktwolke für Hamburg. Die Diagonale stellt das Verhalten eines perfekten Modells dar. (b) Skill-Score der Temperaturvorhersagen für vier verschiedene Modelle mit zunehmender Vorhersagezeit; als Referenzmodell dient der klimatologische Mittelwert.

(EM-Modell; Majewski 1991) erreicht. Da diese Vorhersagen Flächenmittel repräsentieren, müssen zunächst die 'optimalen' Gitterpunkte zur Vorhersage der Temperaturanomale in Hamburg identifiziert werden. Beim direkten Vergleich mit Beobachtungen an der Station Hamburg zeigt sich, daß der nächste Gitterpunkt die beste Vorhersage liefert. Die für den Zeitraum 1991–95 verwendeten Vorhersagen wurden allerdings nur alle 24 Stunden (Haupttermin 00 UTC) neu erstellt und umfassen für alle 6 Stunden-Intervalle Vorhersagen bis zu 72 Stunden. Für die Kombination wird aber eine 6-stündige zeitliche Auflösung benötigt, so daß für die weiteren Haupttermine (6, 12, 18 UTC) die Vorhersagen des 00 UTC Termins benutzt werden. So ist z.B. die 6-stündige Vorhersage, die zum Zeitpunkt 12 UTC starten soll, die 18-stündige Vorhersage des vorangegangenen 00 UTC Laufs. Die Gewichte der linearen Kombination werden durch Fehlerminimierung bestimmt (Fraedrich und Leslie 1987; Raible et al. 1999). Dafür werden die zur Verfügung stehenden Jahre 1991–95 wiederum in einen Zeitraum (1991–93), der zur Schätzung der Wichtungskoeffizienten der einzelnen Vorhersagen benutzt wird, und einen unabhängigen Verifikationszeitraum (1994–95) aufgeteilt.

Um die Güte verschiedener Modelle miteinander zu vergleichen, wird ein Skill-Score im Verifikationszeitraum 1994–95 verwendet. Dabei wird der RMS-Fehler des zu testenden Modells mit dem eines Referenzmodells (hier die Vorhersage des Klimamittels) benutzt: $SKILL = 1 - RMS / RMS_{ref}$. Positive (negative) Werte bedeuten, daß das zu testende Modell bessere (schlechtere) Vorhersagen liefert als das Referenz-

modell. In Abb. 3b ist der Skill-Score für vier verschiedene Modelle dargestellt: (i) das statistische Regressionsmodell (R-Modell), (ii) das 6-stündige Persistenzmodell, das als Vorhersage die aktuelle Temperaturanomale benutzt, (iii) numerische Wetterprognosen des EM-Modells und (iv) die fehlerminimierende Linearkombination vom EM- und R-Modell. Der Skill-Score des EM-Modells ist für alle Vorhersagezeiten nahezu konstant, was auf die spezielle Konstruktion der Zeitreihe mit 6-stündiger Auflösung zurückzuführen ist. Das Persistenzmodell zeigt nur für die 6-stündige Vorhersage deutlichen Skill; für längere Vorhersagezeiten fällt er stark ab. Das statistische Regressionsmodell allein zeigt gegenüber dem EM-Modell eine deutliche Verbesserung. Der Skill nimmt jedoch mit zunehmender Vorhersagezeit ab. Die Kombination beider Modelle (EM- und R-Modell) zeigt den besten Skill, wobei die Verbesserung gegenüber dem reinen R-Modell für die 6-stündige Vorhersage vernachlässigbar ist. Bei der 24-stündigen Vorhersage ergibt sich eine deutliche Verbesserung. Für diesen Fall gewinnt man durch die Kombination nahezu 12 Stunden an Vorhersagezeit gegenüber dem statistische Regressionsmodell.

Zusätzlich werden das R-Modell, das EM-Modell und die Kombination beider für zwei Wettersituationen getestet (Abb. 4, Raible et al. 2002). Dafür wird die 24-stündige Vorhersage (das liegt an der oberen Vorhersagbarkeitsgrenze von statistischen Kurzfristprognosen) für alle 6 Stunden einer Woche bestimmt und mit den eingetretenen Beobachtungen verglichen. Die Woche im Winter (1. bis 8. Januar 1995) stellt ein Phase extrem niedriger Temperaturen dar. Das EM-Modell

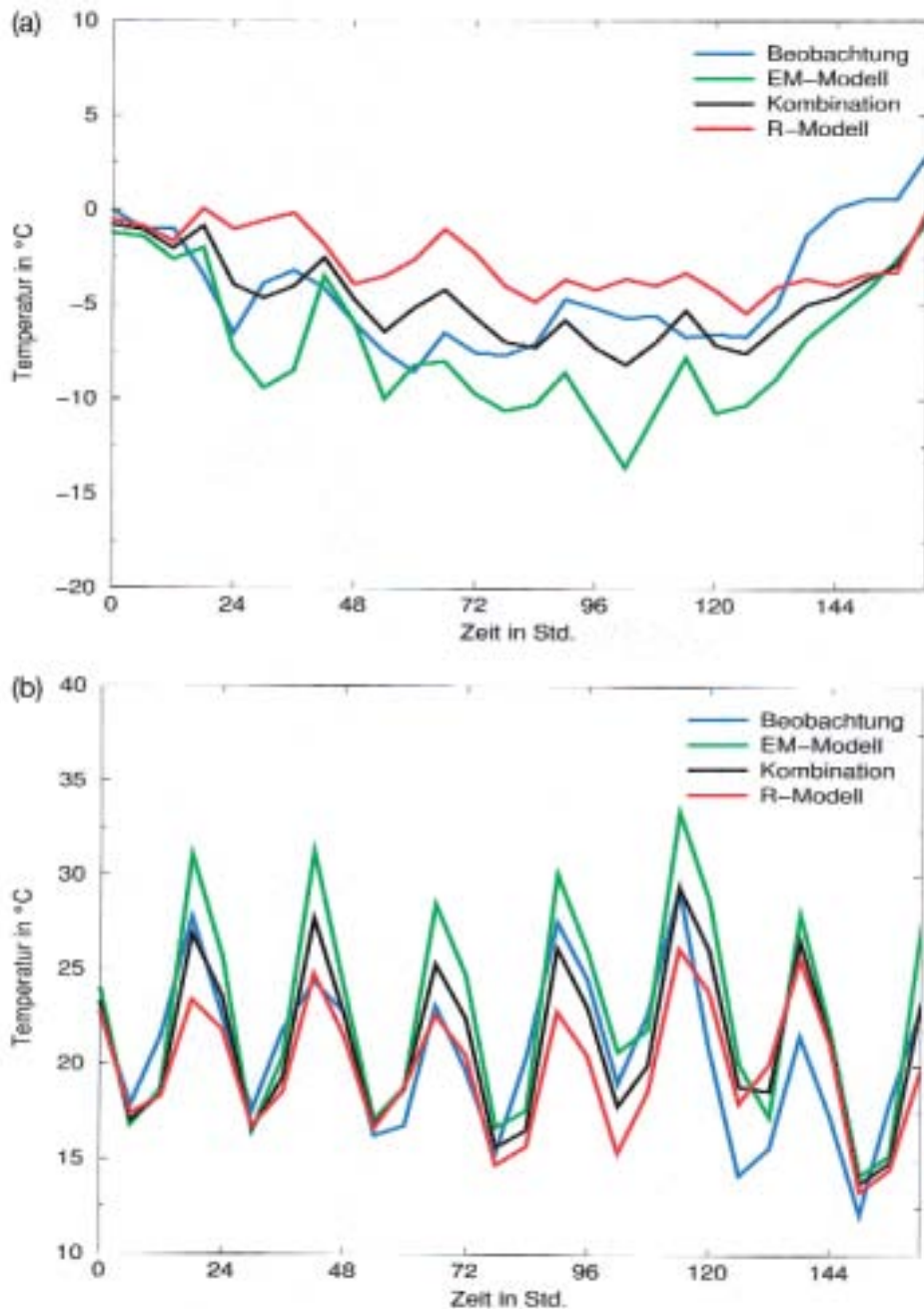


Abb. 4:

Fallbeispiel für die 24-stündige Temperaturvorhersage in Hamburg für (a) eine Woche im Winter (1.1. bis 8.1.1995) und (b) eine Woche im Sommer (1.7. bis 8.7.1995) für drei verschiedene Modelle.

sagt zu kalte, das R-Modell zu warme Temperaturen vorher; nur die Kombination beider Modelle reproduziert diese Kaltphase ausreichend gut. In der Sommerwoche vom 1. bis 8. Juli 1995 zeigen beide Modelle einen ausgeprägten Tagesgang, der wiederum am besten von der Kombination vorhergesagt wird.

4 Diskussion

Zwei statistische Modelle zur Stationsvorhersage der Variablen Niederschlagswahrscheinlichkeit (PoP) und Temperatur für einen Zeitraum bis zu 24 Stunden werden vorgestellt. Die PoP-Vorhersagen werden mit einem Markov-Kovariaten Modell erzeugt. Wenn zusätzliche Variablen einer weiteren Station (Helgoland)

hinzu genommen werden, um advektive Prozesse in das Vorhersagesystem besser zu implementieren, so ergibt sich eine deutliche Verbesserung der Vorhersagegüte. Gerade in den vorgestellten Schärfe- und Zuverlässigkeitsdiagrammen, die eine detaillierte Bewertung der Modelle zulassen, schneidet das Modell mit den zusätzlichen Kovariaten besser ab. Die Vorhersagen der Temperaturanomalie, die auf dem multivariaten Regressionsmodell basieren, zeigen bei der Betrachtung der gemeinsamen Verteilung von Beobachtungen und Vorhersagen, daß selbst bei extremen Temperaturanomalien die Streuung der Vorhersagen nicht wesentlich zunimmt. Stehen neben den statistischen Prognosen auch Vorhersagen anderer Modelle zur Verfügung, so ermöglicht die fehlerminimierende Linearkombination eine deutliche Verbesserung der Güte gegenüber

den Einzelvorhersagen (vom reinen statistischen Modell oder reinen NWP-Modell). Damit liefern die statistischen Modelle ein Potential für weitere zukünftige Anwendung in der operationellen Wettervorhersage. Aktuelle Vorhersagen, die mit den statistischen Modellen allein erzeugt wurden, können jederzeit auf der Internetseite „<http://puma.dkrz.de/wetter/prognosen>“ abgerufen werden. Empirische Vorhersagen durch statistische oder dynamisch-statistische Modelle müssen um Extremwert- und Fehlerprognosen erweitert werden. Dies erfordert die Verwendung von nichtlinearen Methoden und Ensemblevorhersagen, wie das Beispiel der Ensembleprognosen von Hurrikanzugbahnen mit einem Analog-Verfahren veranschaulicht (Fraedrich und Rückert 1998, Sievers et al. 2000, Fraedrich et al. 2000).

Literatur

- BRIER, G. W., 1950: Verification of forecasts expressed in terms of probability. *Mon. Wea. Rev.*, **78**, 1-3.
- COX, D. R., H. D. MILLER, 1992: *The Theory of Stochastic Processes*. Chapman and Hall, 398pp.
- FRAEDRICH, K., K. MÜLLER, 1983: On single station forecasting: Sunshine and rainfall Markov chains. *Contrib. Atmosph. Phys.* **56**, 108-134.
- FRAEDRICH, K., T. DÜMMEL, 1983: On single station forecasting: The geopotential height, its vertical times structures and 500mbar ARMA prediction. *Contrib. Atmosph. Phys.* **56**, 221-239.
- FRAEDRICH, K., K. MÜLLER, 1986: On single-station forecasting: Probability of precipitation in Berlin. *Contrib. Atmosph. Phys.* **59**, 427-434.
- FRAEDRICH, K., L. M. LESLIE, 1987a: Combining predictive schemes in short-term forecasting. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1640-1644.
- FRAEDRICH, K., L. M. LESLIE, 1987b: Evaluation of techniques for operational, single station, short-term forecasting of rainfall at a midlatitude station (Melbourne). *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1645-1654.
- FRAEDRICH, K., L. M. LESLIE, 1988: Real-time short-term forecasting of precipitation at an Australian tropical station. *Wea. Forecasting*, **3**, 104-114.
- FRAEDRICH, K., R. MORRISON, L. M. LESLIE, 2000: Improved tropical cyclone track predictions by error recycling. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **74**, 51-56.
- FRAEDRICH, K., B. RÜCKERT, 1998: Metric adaption for analog forecasting. *Physica A*, **253**, 379-393.
- GABRIEL, K. R., J. NEUMANN, 1962: A Markov chain model for daily rainfall occurrence at Tel Aviv. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **88**, 90-95.
- HESS, G. D., L. M. LESLIE, A. E. GUYMER, K. FRAEDRICH, 1989: Application of Markov technique to the operational, short-term forecasting of rainfall. *Aust. Meteor. Mag.*, **37**, 83-91.
- KEMENY, J. G., J. L. SNELL, 1976: *Finite Markov chains*. Springer-Verlag, 210 ff.
- KIRK, E., K. FRAEDRICH, 1998: Probability of precipitation: Short-term forecasting and verification. *Contrib. Atmos. Phys.*, **72**, 263-271.
- MAJEWSKI, D., 1991: Numerical methods in atmospheric models. Seminar Proc. *ECMWF*, **2**, 147-191.
- MILLER, R. G., 1884: GEM: A statistical weather forecasting procedure. *Short- and medium-range weather prediction research program (PSMP)*, WMO Publi. Series, **10**, 102pp.
- MILLER, A. J., L. M. LESLIE, 1985: Short-term, single-station probability of precipitation forecasting using linear and logistic models. *Contrib. Atmosph. Phys.*, **58**, 517-527.
- MÜLLER, K., 1986: Prognose von Niederschlagswahrscheinlichkeiten an einer Station (Berlin). *Meteorologische Abhandlungen, Freie Universität Berlin*, 146pp.
- MURPHY, A. H., R. L. WINKLER, 1987: A general framework for forecast verification. *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 1330-1338.
- MURPHY, A. H., B. G. BROWN, Y. S. CHEN, 1989: Diagnostic verification of temperature forecasts. *Wea. Forecasting*, **4**, 485-501.
- MURPHY, A. H., R. L. WINKLER, 1992: Diagnostic verification of probability forecasts. *Int. J. Forecasting*, **7**, 435-455.
- RAIBLE, C. C., G. BISCHOF, K. FRAEDRICH, E. KIRK, 1999: Statistical single-station short-term forecasting of temperature and probability of precipitation: Area interpolation and NWP combination. *Wea. Forecasting*, **14**, 203-214.
- RAIBLE, C. C., G. BISCHOF, K. FRAEDRICH, E. KIRK, 2002: Reply to „Statistical single-station short-term forecasting of temperature and probability of precipitation: Area interpolation and NWP combination.“ *Wea. Forecasting*, **17**, in press.
- SIEVERS, O., K. FRAEDRICH, C. C. RAIBLE, 2000: Self-adapting analog ensemble predictions of tropical cyclone tracks. *Wea. Forecasting*, **15**, 623-629.
- VON STORCH, H., F. W. ZWIERS, 1998: *Statistical Analysis in Climate Research*. Cambridge University Press, 510pp.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION, 1988: *Manual of Codes*. International Codes, **1**, No. 306.

Anschrift der Autoren:
 Meteorologisches Institut der Universität Hamburg,
 Bundesstraße 55, 20146 Hamburg

Das Satellitenbild des Monats November 2000

Auf den ersten Blick drei ungewöhnliche Satellitenbilder. Ein antizyklonal rotierender Wirbel? Bei genauerer Betrachtung erkennt man jedoch: Die Bilder wurden auf der Südhalbkugel aufgenommen. Die Landmasse am oberen Bildrand ist die Südspitze von Afrika mit dem „Kap der Guten Hoffnung“ und dem „Kap Agulhas“.

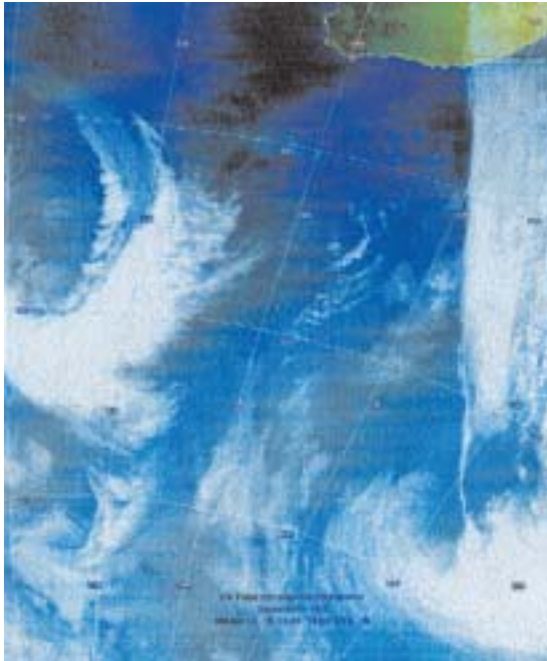


Abb. 1: IR-Bild v. 19.11.00, 15.42 UTC (NOAA 14).

beginnenden Okklusionsvorgang, die Abb. 3 die vollständig okkludierte Zyklone mit Ausbildung eines postfrontalen Troges, verbunden mit einem schweren Trogsturm an seiner Nord- und Nordwestseite. Zwischen den Abbildungen 1 und 3 liegt ein 24-stündiger Entwicklungszeitraum.

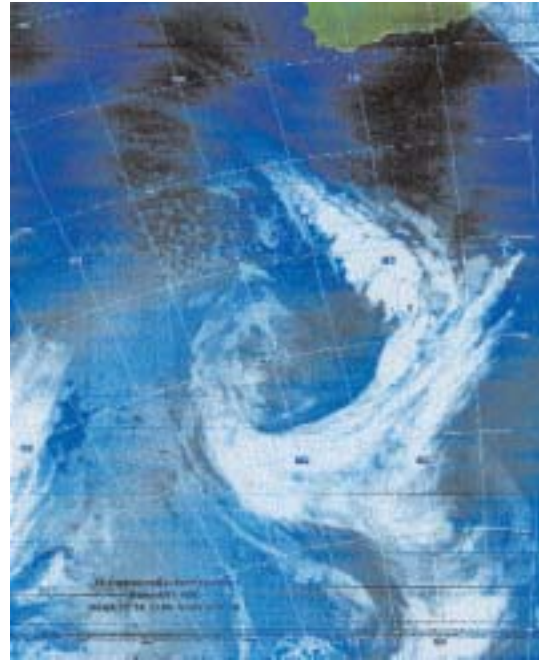


Abb. 2: IR-Bild v. 20.11.00, 03.40 UTC (NOAA 14).

Die Satellitenbilder der beiden polumlaufenden Satelliten NOAA 12 und NOAA 14 wurden am 19. und 20. November 2000 auf 48° Süd und 21° Ost an Bord des PFS „POLARSTERN“ während seiner 18. Antarktisreise aufgenommen. Der Autor war während des 2. Fahrabschnitts als Bordmeteorologe auf dem Polarforschungsschiff tätig.

Die Satellitenbildfolge im Infrarot-Kanal (10,5...12,5 μm) zeigt die rapide Entwicklung einer Sturmzyklone in der südlichen Frontalzone. Der Ausgangspunkt dieser Entwicklung lag wesentlich weiter im Westen, außerhalb des Empfangsbereichs der APT-Anlage¹ der Bordwetterwarte. Die APT-Bilder decken in dieser geographischen Breite ein „Vorfeld“ von etwa 40 Längengraden ab. Die Bilder wurden im zeitlichen Abstand von etwa 12 Stunden aufgenommen. Abb. 1 zeigt den

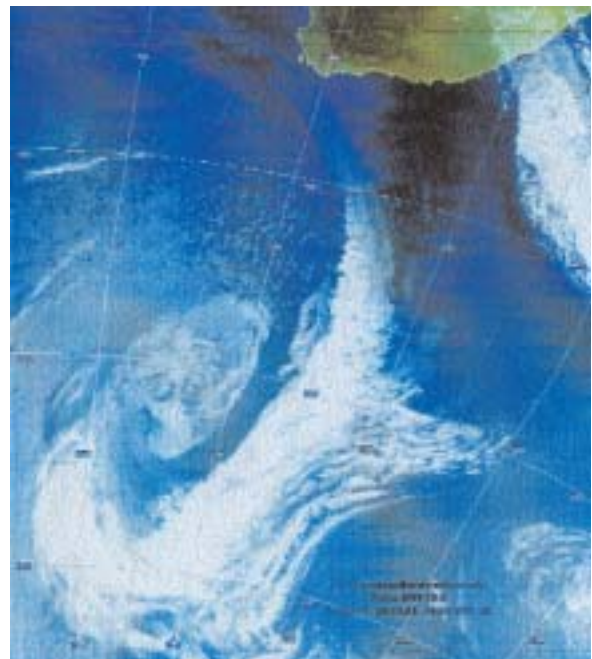


Abb. 3: IR-Bild v. 20.11.00, 15.20 UTC (NOAA 12).

1 APT: Automatic Picture Transmission, analoge Bildübertragung von polumlaufenden Satelliten während des Überfluges.

Deutlich sind die unterschiedlichen Strömungsverhältnisse in den verschiedenen Höhen zu erkennen (Jet-Bewölkung im Cirrus-Niveau, Zellularkonvektion im tiefen Niveau).

Die nachstehende, vom EZMW² berechnete Bodendruckverteilung zum Termin 20.11.2000, 00 UTC (12-stündige Vorhersage) also etwa 3 Stunden vor dem Aufnahmetermin des Bildes 2 zeigt einen intensiven Sturmwirbel mit Kern bei 50° Süd und 5° Ost und einem Kerndruck von etwas unter 970 hPa (der Pfeil markiert die Schiffposition). Die exakte Ermittlung des Kerndrucks gestaltet sich in diesem datenarmen Gebiet schwierig. Die Erfahrung zeigt, daß die Kerndrucke im allgemeinen etwas niedriger als von den numerischen Modellen berechnet liegen. Eine Abschätzung aus dem Satellitenbild ergibt einen Kerndruck von etwa 960 hPa.

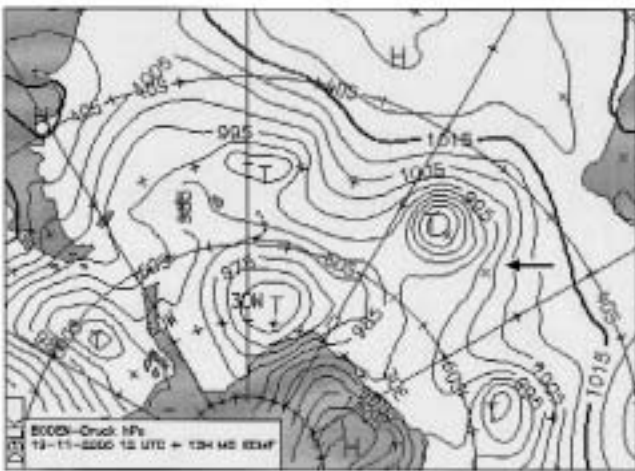


Abb. 4: Bodendruckverteilung am 20.11.00 um 00 UTC. (EZMW-Vorhersage H+12).

An der Nordwestflanke des Wirbels deutet sich bereits die Trogentwicklung an.

Auch die Satellitenbilder zeigen mit fortschreitender Vertiefung die Trogbildung durch die Streckung des Wolkenspirale nach Norden bei gleichzeitigem Einstromen der Kaltluft in den Bereich zwischen Kaltfront und Kernbereich. Während sich westlich und nördlich des Kernbereichs in der frischen Kaltluft Zellularkonvektion (offene Zellen) bildet, unterliegt die zwischen Kaltfront und Kern einschließende Kaltluftzunge einer starken mittel- und obertroposphärischen Abtrocknung, die sich in geringer Bewölkung offenbart.

Diese auch „dry intrusion“ oder „dry slot“ genannte trockene Kaltluftzunge zwischen Kaltfront und Tiefkern spiegelt sich auch im zeitlichen Verlauf der Globalstrahlung wider. Um 10.00 UTC befand sich POLARSTERN noch unter der Kaltfrontbewölkung. Obwohl die Sonne zu dieser Zeit bereits kulminierte, betrug die Globalstrahlung noch weniger als 400 W/m².

Kurz danach gelangte POLARSTERN in den wolkenarmen Bereich zwischen Kaltfront und Kernbereich und die Globalstrahlung stieg auf den – für diese Reise – bei geringer oder dünner Bewölkung typischen Wert von über 900 W/m² an (Abb. 5).

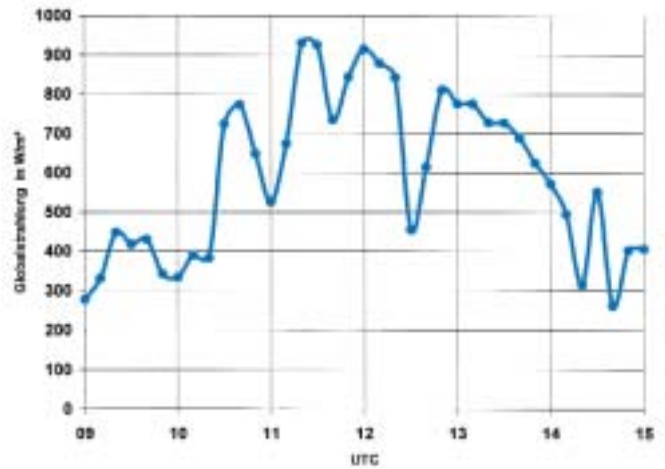


Abb. 5: Verlauf der Globalstrahlung am 20.11.2000.

Windgeschwindigkeits- und Luftdruckverlauf zeigen eindrucksvoll die Struktur der Polarfrontzyklone: Starker Druckfall vor der Kaltfront, verbunden mit einer Zunahme der Windgeschwindigkeit auf etwa 15 m/s. Nach Kaltfront-Passage ein Nachlassen des Druckfalls, verbunden mit einer Windabnahme auf 10 m/s. Drei Stunden später setzte erneut stärkerer Druckfall ein, der die Annäherung des Troges ankündigte. Parallel zum stärkeren Druckfall nahm auch die Windgeschwindigkeit wieder zu.

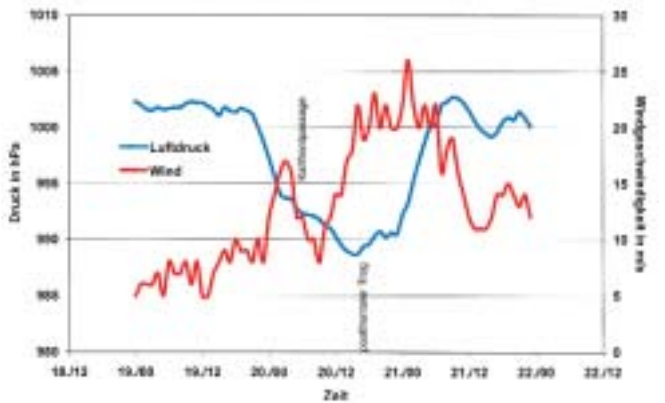


Abb. 6: Verlauf der Windgeschwindigkeit und des Luftdrucks (NN) in der Zeit 18.11.2000, 12 UTC bis 22.11.2000, 12 UTC.

Für den erfahrenen Synoptiker nicht unerwartet wurden die höchsten Windgeschwindigkeiten jedoch nicht im eigentlichen Trogbereich sondern erst später, zusammen mit dem starken Druckanstieg auf der Rückseite des Troges erreicht (Abb. 6).

² EZMW: Europäisches Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage, Reading, UK

Buchbesprechungen – Neuerscheinungen

SCHLEGEL, K.: Vom Regenbogen zum Polarlicht: Leuchterscheinungen in der Atmosphäre. Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag 1999. - 180 S., ISBN 3-8274-0530-0.

Leuchterscheinungen am Himmel werden durch verschiedene physikalische Prozesse in der Atmosphäre verursacht. Eine Klasse von Phänomenen läßt sich makroskopisch mit Hilfe der geometrischen Optik durch Reflexion und Brechung an Wassertropfen und Eiskristallen erklären. Im mikroskopischen Maßstab sind die Moleküle und Schwebstoffteilchen der Luft Anlaß für Erscheinungen, zu deren Deutung die Streuung elektromagnetischer Strahlung (Mie-Theorie) herangezogen werden muß, insbesondere für die beiden Extremfälle – im Verhältnis zur Lichtwellenlänge – sehr kleiner (Rayleigh-Streuung) bzw. sehr großer Streuzentren (Beugung). Blitze und Polarlicht schließlich lassen sich nur atomphysikalisch als Folge von Quantensprüngen der Elektronen in den Atomen und Molekülen der Atmosphäre verstehen.

Für fast jedes Gebiet der atmosphärischen Leuchterscheinungen gibt es bereits bewährte Lehrbücher und anschauliche Einführungen, die von Schlegel im Anhang nahezu lückenlos zusammengestellt und kommentiert sind. Wenn aber der Nicht-Fachmann ein Lichtphänomen am Himmel entdeckt, weiß er häufig nicht, wo er in der Spezialliteratur nachschlagen soll. Hier füllt Schlegels Buch eine Lücke: Es bietet eine Zusammenstellung aller Leuchterscheinungen in der Atmosphäre, „vom Regenbogen bis zum Polarlicht“. Darüber hinaus hat es der Autor verstanden, die Phänomene und Erklärungen in klarem, unprätentiösen Deutsch zu beschreiben, ohne eine einzige mathematische Gleichung heranziehen zu müssen und übrigens auch ohne modisches Anglizismen-Kauderwelsch. Trotzdem geht diese „Popularisierung“ des Stoffes nicht auf Kosten der wissenschaftlichen Genauigkeit und Ehrlichkeit. Das ist wohl nur durch die Verwendung der didaktisch hervorragenden, das Wesentliche heraushebenden Farbskizzen zu erreichen gewesen. Ihre Qualität ebenso wie die der wunderschönen Fotografien wird durch die Güte des

verwendeten Hochglanzpapiers nur noch verstärkt.

Alle Erscheinungen wie Himmelsfarben, Regenbögen und Halos, Kränze und Glorien, Leuchtende Nachtwolken, Blitze und sogar Meteore werden mit gleicher Sachkunde und Sorgfalt behandelt, besonders liebevoll aber das Polarlicht, mit dem sich der Autor offensichtlich besonders auskennt und dem er am Schluß seines Buches sogar ein Gedicht widmet! Der Rezensent möchte nur zwei Richtigstellungen vorschlagen: 1. Ein Aerosol ist die Gesamtheit von suspendierendem Medium (Luft) und suspendierten Schwebeteilchen (Aerosolpartikeln). Statt „Zahl der Aerosole“ (auf S. 15) sollte es also „Zahl der (Aerosol-)Partikeln“ heißen. 2. In der meteorologischen Strahlungsforschung wird definiert: Extinktion = Streuung + (gegebenenfalls) Absorption. Auf S. 12 tritt also nicht neben die Streuung des Lichts seine Extinktion, vielmehr wird die direkte Sonnenstrahlung durch (vorwiegend „blaue“) Streuung extinguiert, so daß der am Beobachter ankommende „Rest“ überwiegend rot ist. Entsprechend sollte auf S. 18 nicht von „Wechselspiel von Streuung und Extinktion“ gesprochen werden.

Diese Kleinigkeiten mindern aber nicht den Wert dieses ausgezeichneten Buches. Es stellt m. E. ein sehr gutes Beispiel für „Verständliche Wissenschaft“ dar: Wissenschaft für den Nicht-Fachmann verständlich darzustellen, ohne dabei auf Kosten der Genauigkeit zu stark zu vereinfachen. Auch die schöne Aufmachung empfiehlt das Buch als geeignetes Geschenk für den interessierten Naturbeobachter ebenso wie für den Fachmann.

F. Kasten, Hamburg

SIEGMUND A.: Das Klima der Baar – Regionalklimatische Studien einer Hochmulde zwischen Schwarzwald und Schwäbischer Alb –, Mannheimer Geographische Arbeiten 51. Mannheim: Selbstverl. d. Geogr. Inst. d. Universität Mannheim 1999, 294 S., Anhang. ISBN 3-923750-78-1. Bestellungen: Fax 0621 1811955, e-mail gimga@rumms.uni-mannheim.de.

Die bisherigen Arbeiten zum Klima des Naturraumes Baar bezogen sich meist nur auf einen klimatischen Teilaspekt. Mit der vorliegenden Dissertation ist, teils von der Privatwirtschaft großzügig unterstützt, eine mehr „ganzheitliche“ Beschreibung des Klimas der Hochmulde Baar vorgenommen worden. Sie war Bestandteil eines Projektes Umwelt- und Klimaforschung Baar.

Ziel der Dissertation war es, über statistische Modelle für möglichst viele Klimaparameter computergestützt Klimakarten im mesoskaligen Bereich zu erstellen.

Dazu standen dem Verfasser für die Region Baar die Daten des amtlichen Meßnetzes des Deutschen Wetterdienstes und die eines temporären Meßnetzes zur Verfügung. Die temporären Meßreihen erstreckten sich über zwei Jahre, von Juli 1994 bis Juni 1996. Die Meßreihen des amtlichen Netzes dienten als Vergleichs- und vieljährige Bezugswerte.

In der Dissertation werden zunächst die topographischen, morphologischen und hydrographischen Gegebenheiten sowie die Landnutzung beschrieben. Anschließend erörtert der Verfasser die bisherigen Forschungsergebnisse zum Klima des Naturraumes Baar mit den beiden Schwerpunkten der thermischen und hygrischen Gegebenheiten.

Mit der Beschreibung ‚Gewinnung und Aufbereitung der Daten‘ erhält der Leser Einblick in den Aufbau des eigens für diese Klimabestandsaufnahme eingerichteten Stationsnetzes und in die Archivierung und Analyse-Verfahren der gewonnenen Daten.

Danach werden die einzelnen Klimaelemente: im wesentlichen Großwetterlagen, Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Niederschlag und daraus abgeleitete Größen z. B. Eis-, Frost- und Sommertage, Zahl der Tage mit bestimmten Niederschlagshöhen ausführlich analysiert, sowohl der vieljährige Zeitraum als auch der temporäre zweijährige mit Bezug zum vieljährigen.

Dies geschieht in einer auch für den interessierten Laien verständlichen Weise.

Zwei weitere Kapitel befassen sich mit der thermischen und hygri-schen Kontinentalität.

Das letzte Kapitel widmet sich dem Aufbau regionaler Klimamodelle für den Naturraum der Baar und der Erstellung regionalklimatischer Karten.

Es wird aufgezeigt, wie die einzelnen Klimafaktoren (z.B. Höhe, Hangneigung, Exposition, Landnutzung) in die Regressionsrechnungen integriert wurden und die Wirkungsweise des Programms zur Kartenerstellung erläutert. Die hieraus gewonnenen Ergebnisse werden beschrieben und diskutiert.

Diese Arbeit wird nicht nur bei Einheimischen das Interesse am Landschafts- und Klimaraum Baar wecken.

B. Hänle, Offenbach/Main

AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY: Glossary of Meteorology 2nd ed. T. S. Glickman (Ed.). Boston 2000, ISBN 1-878220-34-9, 855 S.

Nach 40 Jahren erschien jetzt eine zweite Auflage des Glossary of Meteorology (1. Aufl. 1959). Sie ist völlig neu bearbeitet und trägt der Entwicklung der Meteorologie in diesem Zeitraum Rechnung. Neben der gesamten Meteorologie werden auch verwandte Gebiete wie die Ozeanographie und Hydrologie einbezogen, jedoch nur soweit die Fachwörter einen Bezug zur Meteorologie haben.

Neben den wissenschaftlichen Begriffen findet man auch populärwissenschaftliche Stichwörter mit regionalem Bezug wie Kossava, Polacke, Schlernwind oder Scharnitzer. Aus dem deutschen Sprachbereich sind die Wörter Foehn und Grosswetterlage international gebräuchlich. Man findet aber auch Graupel, Heiligenschein, Umkehr effect und Hohlraum. Weitgehend unbekannt dürften die Begriffe Dreikanter, Gestalt und Gross-Austausch sein.

Die wenigen Beispiele, zu deren Erläuterung man das Wörterbuch zur Hand nehmen möge, zeigen, daß es ein umfassendes und sorgfältig erarbeitetes Werk ist, an dem über 300 Wissenschaftler mitgearbeitet haben, die namentlich aufgeführt werden. Es dürfte auch für die Meteorologen in Deutschland ein unentbehrliches Nach-

schlagewerk sein, zumal Meyers Kleines Lexikon Meteorologie (1987) lange vergriffen ist und vermutlich nicht neu bearbeitet werden kann.

H.-D.Kirch, Offenbach/Main

KLIMAAATLAS DER SCHWEIZ; Herausgeber Meteo Schweiz; Gesamtleitung Walter Kirchhofer; Verlag des Bundesamtes für Landestopographie, Wabern-Bern 1982-2000, etwa 550,- DM.

Das Werk beschreibt auf etwa 300 Seiten (es gibt keine durchgehende Nummerierung der Seitenzahlen) die klimatologischen Verhältnisse der Schweiz. Dabei folgt auf eine farbige Doppelseite mit 1 bis 4 (in Ausnahmefällen 8) Darstellungen (im Regelfall Klimakarten) eine weitere Doppelseite mit Text, Tabellen und Diagrammen zur Erläuterung und Ergänzung der vorher oder nachher illustrierten Themen.

Der Atlas ist in einem handlichen, etwas über DIN A4 hinausgehenden Format gehalten und ermöglicht so die maßstäbliche Wiedergabe der Schweiz von 1:800 000. Der kleinste, für 4 Klimakarten pro Doppelseite verwendete Maßstab beträgt 1:1750 000. Das vorliegende Werk faßt alle bisher bereits publizierten Einzelabschnitte des **Klimaatlas der Schweiz** in einem Band zusammen.

Als einleitende Information wird eine aktualisierte **Stationskarte** der Schweiz gezeigt. Es folgt ein umfangreiches, etwa 20 % des gesamten Bandes ausmachendes Kapitel über Wetterlagen, eingeleitet von mittleren Verteilungen des Luftdrucks in Meereshöhe und des Geopotentials in 500 hPa über Europa für 4, die Jahreszeiten charakterisierenden Monate (Januar, April, Juli, Oktober).

Aus einer 10jährigen Reihe (1961-1970) täglicher Analysen (00 UTC) der Höhe der 500 hPa-Fläche wird mit Hilfe einer Clusteranalyse eine Einteilung in 24 unterschiedliche Klassen vorgenommen. Zu jeder dieser Klassen werden die normierte Druckverteilung über Europa und typische Verhaltensweisen der meteorologischen Parameter Temperatur, Niederschlag und Sonnenscheindauer an 5 Stationen präsentiert.

Im Rahmen des Kapitels **Wetterlagen** werden zusätzlich 10 ausgewählte Wetter-

situationen aus den Jahren 1978-1979 präzise dargestellt und mit ihren Auswirkungen auf das Wettergeschehen in der Schweiz beschrieben. Leider wird eine Zuordnung zu den vorher definierten 24 Wetterlagenklassen nicht mitgeteilt.

Zum Thema **Luftdruck** werden, auf einer Datenbasis aus den Jahren 1981-1990, Karten der Abweichungen in einzelnen Monaten vom Jahresmittel und 12-stündige Variationen als 90er- und 99er Perzentile geboten. Den **Windauswertungen** liegt derselbe Beobachtungszeitraum in zeitlich stündlicher Auflösung zugrunde. Für die 4 Monate Januar, April, Juli und Oktober werden sowohl Stärkewindrosen an ausgewählten Stationen als auch flächenhafte Verteilungen von Perzentilen (75, 90, 95, 99) der Windgeschwindigkeit präsentiert.

Die Karten der **Sonnenscheindauer** basieren auf Messungen aus 1931-1970 und sind sowohl für das Jahr als auch für alle Einzelmonate in dem Atlas enthalten. Die Globalstrahlung, bezogen auf den Zeitraum 1983-1994, liegt kartenmäßig für alle Monate und die Strahlungsbilanz im Jahresmittel vor.

Die **Lufttemperatur** wird als Jahresmittel über den Zeitraum 1931-1970 und für die einzelnen Monate betrachtet und in Kartenform präsentiert. Für die mittleren Extremwerte, mittleres tägliches Maximum und Minimum der Lufttemperatur, liegen jeweils Karten zu den ausgewählten Monaten Januar, April, Juli und Oktober vor. Die Farbskalierung ist dabei durchgehend einheitlich, mit 4 K-Stufen aber etwas grob gehalten.

Zur **Luftfeuchte** enthält der Atlas eine Auswahl von Karten zweier Parameter:

- die gemessene relative Feuchte aus Daten von 1931-1970,
- den mit der Magnusformel berechneten Dampfdruck.

Karten des **Wolkenbedeckungsgrades** in 10%-Stufen für die jahreszeitlich repräsentativen Monate Januar, April, Juli und Oktober (Datenbasis 1931-1970) werden ergänzt durch eine Karte der mittleren Nebelhäufigkeit im Winterhalbjahr, die aus Stationsbeobachtungen und Satellitendaten der Winterhalbjahre 1970/71 bis 1980/81 erstellt wurde. Des Weiteren enthält dieses Kapitel Karten der **Nebelhäufigkeit** für die jahreszeitlich typischen Mo-

nate aus Mittelwerten von Stationsbeobachtungen 1931-1970. Eine zusätzliche Besonderheit bilden die Karten der **wetterlagenabhängigen Nebelbedeckung** für 4 ausgewählte, typische Situationen, die mit Hilfe von Satellitenbildern erarbeitet wurden.

Die mittleren **Niederschlags**verhältnisse in der Schweiz werden auf der Datenbasis 1931-1970 in einer Jahres- und den 12 Monatskarten wiedergegeben. Aus dem Zeitraum 1901-1980 wurden extreme Tagesniederschläge ermittelt und kartenmäßig dargestellt, ebenso wie die Anzahl von **Starkniederschlägen** in diesem Zeitraum. Aus täglichen Niederschlagsmessungen der Jahre 1961-1990 wurden mittlere jährliche Überschreitungshäufigkeiten für 4 verschiedene Schwellenwerte festgestellt und in Kartenform wiedergegeben. Zusätzlich, und für die Schweiz besonders interessant, enthält der Atlas Karten der mittleren **Schneebedeckung** für die Monate Dezember bis März aus Beobachtungen von 1961-1990.

Unterschiedliche Karten der **Gewitterhäufigkeit** richten sich nach den ab 1971 geänderten Beobachtungsvorschriften, die bis dahin nur die sogenannten Nahgewitter enthielten. Karten der Gewitterhäufigkeit, die alle Gewitterwahrnehmungen nach WMO-Vorschrift enthalten, basieren auf Beobachtungen von 1971-1980; es handelt sich dabei um eine Jahresmittelkarte und 4 weitere für die Jahreszeiten.

Die mittlere jährliche **Verdunstungshöhe** wurde mit Hilfe von Tagessätzen meteorologischer Beobachtungen aus 1973-1992 in einem 1km-Gitter modelliert und als Klimakarte dargestellt. Außer an den Landoberflächen wurde die Verdunstung der Schweizer Seen berechnet und in die Karte eingetragen.

Zur **Phänologie** werden 4 Karten vorgestellt, die auf jahrzehntelange (in einem Fall wird der Zeitraum 1951-1975 konkret angegeben) Beobachtungsreihen zurückgehen.

Zum Abschluß werden die Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse im Verlauf der letzten Jahrhunderte betrachtet (1525-1980). Die Diagramme und Beschreibungen beruhen auf einer Vielzahl, sorgfältig zusammengetragener, unterschiedlichster Quellen aus der Schweiz.

Die Ergebnisse sind in größerem Rahmen als fundierter Beitrag in der aktuellen Diskussion zur regionalen und globalen **Klimaänderung** anzusehen.

Als Kritikpunkt zu dieser Publikation kann man das Fehlen einer Einleitung anführen, die die einzelnen Teile des Atlases in einen Zusammenhang stellt. Dies ist sicherlich keine einfache Aufgabe angesichts der Tatsache, daß der Atlas in einem Zeitrahmen von etwa 20 Jahren in Einzelabschnitten entstanden ist, die nacheinander publiziert wurden.

Insgesamt betrachtet, liegt mit dem 2-sprachig (deutsch und französisch) gehaltenen und mit englischen und italienischen Zusammenfassungen versehenen Klimaatlas der Schweiz ein Werk vor, das umfassende Auskunft über das Klima der Schweiz und zahlreiche Anregungen gibt, wie klimatologische Informationen aus Meßnetzen und anderen Quellen aufbereitet und dargestellt werden können.

E. Dittmann, Offenbach/Main

SIEDLER, G., CHURCH, J., GOULD, J. (Hrsg.): Ocean Circulation and Climate, Observing and Modeling the Global Ocean, Academic Press, London, 2001, 715 S., Preis: 99,95 US\$

Im Klimasystem der Erde spielt neben der Atmosphäre und der Kryosphäre der Ozean eine ganz herausragende Rolle. Während die Atmosphäre deshalb so deutlich im Vordergrund steht, weil die Menschen in ihr leben und auch Tiere und Pflanzenwelt von ihr abhängig sind, kommt dem trägeren Medium des Ozeans mit der weit höheren Wärmekapazität die Rolle einer Leitfunktion über längere Zeitskalen im physikalischen Sinne zu.

Vom dynamischen Standpunkt sind andererseits Gegensätze dadurch gegeben, daß die den atmosphärischen Wirbeln in Form der Tief- und Hochdruckgebiete mit Größenordnungen in der horizontalen Ausdehnung von 1000 km im Ozean relativ langlebige Wirbel mit einer Ausdehnung von lediglich 100 km entsprechen.

Während für die Atmosphäre ein weltweites Beobachtungssystem in allen drei Raumkoordinaten seit einigen Jahrzehnten besteht, fehlt solch ein permanentes

Beobachtungsnetz für die Ozeane. Insofern hat die ozeanische Forschung einen weitaus schwierigeren Weg zurückzulegen, um die physikalischen und chemischen Zusammenhänge der Weltmeere zu erarbeiten. Als Datengrundlage diente ihr bisher vor allem das Datenmaterial, das in vielen Schiffexpeditionen – oft in internationaler Kooperation durchgeführt – erarbeitet worden ist. Aber was sind schon die Meßpunkte aller Forschungsschiffe der Welt zusammengenommen im Vergleich zu den Weiten der Weltmeere und zur Variabilität der Strömungsvorgänge in ihnen.

Mit dem Buch „Ocean Circulation and Climate“, herausgegeben von Gerold Siedler, John Church und John Gould ist eine exzellente Synthese des gegenwärtigen Wissens über die globalen Aspekte des Ozeans gelungen, das man mit Fug und Recht jedem zum Studium empfehlen kann, der sich über den modernen Wissensstand zu dem Thema informieren möchte, der ein gutes Verständnis über die Vorgänge im Ozean und zu den Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre erreichen möchte.

Es ist den Herausgebern gelungen, ein kompetentes Konsortium von Autoren zusammenzustellen, das die folgenden Kapitel des Buches bearbeitet hat:

1. The Ocean and Climate
2. Observations and Models
3. New Ways of Observing the Ocean
4. The Global Flow Field
5. Formation and Transport of Water Masses
6. Large-Scale Ocean Transports
7. Insights for the Future

Unter den 72 international zusammengesetzten Autoren findet man aus Deutschland die Wissenschaftler C. W. Böning (Kiel), H. Graßl (Hamburg), D. Olbers (Bremerhaven), W. Roether (Bremen), G. Siedler (Kiel), J. Willebrand (Kiel) und W. Zenk (Kiel). Es ist nahezu vollständig gelungen, alle in der Welt führenden ozeanischen Forschungseinrichtungen mit ihrer speziellen Expertise in den verschiedenen Kapiteln für diese Monographie einzubinden.

Seine besondere herausragende Stellung gewinnt das vorgelegte Buch dadurch, daß es sich zu einem großen Teil auf das seit dem Beginn der achtziger Jahre durchgeführte Projekt *The World Ocean Circulation Experiment* (WOCE) stützt. Dieses welt-

weit unter den Wissenschaftlern der ozeanischen Forschungsdisziplin abgestimmte Experiment kann als das erste globale Ozean Experiment bezeichnet werden, in dem mit allen zur Verfügung stehenden Methoden (in-situ Messungen, Fernerkundungsverfahren, Modellsimulationen) ein wesentlicher Meilenstein in der Ausweitung des Wissens und des Verständnisses erreicht werden konnte.

Das Buch enthält nicht, so wie andere frühere Monographien, nur eine Zusammenstellung der Ergebnisse der einzelnen teilnehmenden Gruppen, sondern es ist vor allem, offenbar durch die starke Vorgabe der Herausgeber, gelungen, die Ergebnisse vom *World Ocean Circulation Experiment* in das bisherige Wissen zu einem modernen und hochinteressanten Gesamtbild zusammenzuführen. Wer über die Klimavariabilität etwas lernen will, der sollte sich dem Studium dieses Buches widmen. Es ist bewundernswert, in welcher Weise es der Physikalischen Ozeanographie in einer weltweiten Anstrengung gelungen ist, die Ressourcen für ein solches Meßprogramm zusammen zu bringen. Das bewährte deutsche Forschungsschiff METEOR spielte dabei eine herausragende Rolle. Der Erfolg dieser Anstrengung ist in diesem Buch nahezu auf jeder Seite sichtbar. Das gilt in gleicher Weise für die Phänomenologie der globalen Strömungsstrukturen, der Temperaturverteilung, dem Wärmetransport im Ozean wie für die Verbesserung der Ozeanmodelle, die an umfassenden und adäquaten Datensätzen überprüft werden konnten.

Für Meteorologen sind besonders jene Abschnitte des Buches von besonderem Interesse, in denen es um die Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre geht. Dazu gehören vor allem die Wärmespeicherung im Ozean, die als zeitlich verzögerte Anregung auf die Atmosphäre zurückwirkt, und alle Prozesse, die in gekoppelten Ozean-Atmosphäre-Modellen eine Rolle spielen.

Das Buch läßt kaum Wünsche offen, ob man sich über die oberflächennahen Strömungsbedingungen oder über solche in größere Tiefen informieren möchte. Erstaunlich sind auch die Details, die man für die Tropenregion oder die antarktische Region oder über die wechselseitigen Austauschvorgänge zwischen dem tropischen und außertropischen Bereich dar-

gestellt bekommt. Die zahlreichen farbigen Abbildungen unterstützen in hohem Maße die Anschaulichkeit der erarbeiteten Ergebnisse.

Das Buch bleibt darüber hinaus nicht bei der Präsentation der Ergebnisse und der Zusammenstellung der Kenntnislage stehen, sondern gibt im letzten Kapitel vor allem einen selbstkritischen Ausblick über die noch zu leistende Arbeit, um vor allem die erforderliche Genauigkeit z. B. für die horizontalen und vertikalen Wärmetransporte aufgrund von in-situ-Messungen zu erreichen.

Auch dieser Aspekt des Buches ist sehr erfrischend zu lesen, denn in der Diskussion des Klimazustands und seiner Variabilität auf Zeitskalen von Jahreszeiten, Jahren und Jahrzehnten werden sicherlich noch einige Revisionen von bisherigen Anschauungen erforderlich werden, wenn man die Verhältnisse im trägeren Medium der Ozeane besser verstehen lernt.

Das Buch – obgleich noch nicht alle Auswertungen, die man sich aus dem *World Ocean Circulation Experiment* vorstellen kann, vorliegen – liefert einen exzellenten Überblick über das Thema. Vor allem auch das angefügte umfangreiche Literaturverzeichnis kann als eine besonders gute Fundgrube für vertiefende Spezialliteratur angesehen werden.

Man möchte sich wünschen, daß dieses Buch in den Bibliotheken auch bei allen meteorologischen Instituten und Forschungsstellen, die sich mit Wettervorhersage, Klima und globalen Stoffhaushalten befassen, einen Platz findet. Darüber hinaus wird jeder, der an dem physikalischen Geschehen in den Ozeanen Interesse zeigt, dieses Buch mit großem Gewinn lesen.

F. Fiedler, Karlsruhe

Weitere Neuerscheinungen meteorologischer Fachbücher

Aerosol chemical processes in the environment, ed. by K. R. SPURNY, Boca Raton: Lewis Publ. 2000, 615 S. ISBN 0-87371-829-1.

Air-sea exchange, physics, chemistry and dynamics, ed. by G. L. GEERNAERT, Dordrecht: Kluwer 1999, 578 S. At-

mospheric and oceanographic sciences library 20, ISBN 0-7923-5937-2.

ALLABY, M.: Faszination Wetter, Schönheit und Gewalt der Natur. München: Dorling Kindersley, 2001, 64 S. ISBN 3-8310-0082-4.

Alte meteorologische Instrumente, Hrsg. METEOSCHWEIZ, Zürich: MeteoSchweiz 2000, 190 S.

Analytical chemistry of aerosols, ed. by K. R. SPURNY, Boca Raton: Lewis 1999, 486 S. Environmental chemistry, ISBN 1-56670-040-X.

ANDREWS, D. G.: An introduction to atmospheric physics, Cambridge: Univ. Press 2000, 229 S. ISBN 0-521-62051-1.

Anthropogenic climate change, ed. by H. v. STORCH. Berlin: Springer 1999, 351 S. ISBN 3-540-65033-4.

Applications of seasonal climate forecasting in agricultural and natural ecosystems, the Australian experience, ed. by G. L. HAMMER, DORDRECHT: Kluwer 2000, 469 S. Atmospheric and oceanographic sciences library 21. ISBN 0-7923-6270-5.

ATMOSPHERE: Anthropogene und biogene Emissionen, Photochemie der Troposphäre, Chemie der Stratosphäre und Ozonabbau. 2000, 424 S. Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie 1A, ISBN 3-540-66184-0.

ATMOSPHERE: Aerosol/Multiphasenchemie, Ausbreitung und Deposition von Spurenstoffen, Auswirkungen auf Strahlung und Klima. 2000, 516 S. Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie 1B, ISBN 3-540-66185-9.

Atmospheric chemistry and global change, ed. by G. P. BRASSEUR. New York: Oxford Univ. Pr. 1999, 654 S. Topics in environmental chemistry, ISBN 0-19-510521-4.

Atmospheric environmental research, critical decisions between technological progress and preservation of nature. D. MÖLLER (Ed.), Berlin: Springer 1999, 185 S. ISBN 3-540-63559-9.

- Aviation and the global atmosphere, a special report of IPCC Working Group I and III, ed. by J. E. PENNER. Cambridge: Univ. Pr. 1999, 373 S. ISBN 0-521-66300-8.
- BENNETT, A. F.: Inverse methods in physical oceanography. Cambridge: Univ. Pr. 1999, 347 S. Cambridge monographs on mechanics and applied mathematics. ISBN 0-521-38568-7.
- BEYER, H.: Die aktuelle Klimaentwicklung der Rhön, mit Vergleichen zum Thüringer Wald. Meiningen: Verl. Börner PR 2000, 146 S. ISBN 3-930675-21-8.
- BEYOND EL NIÑO: decadal and interdecadal climate variability, ed. A. NAVARRA. Berlin: Springer 1999, 374 S. ISBN 3-540-63662-5.
- BRETTLE, M.; SMITH, B.: Weather to sail, the complete guide to sailing weather. Ramsbury, Marlborough: Crowood Pr. 1999, 126 S. ISBN 1-86126-295-7.
- BROCK, F. V.; RICHARDSON, S. J.: Meteorological measurement systems. Oxford: Univ. Pr. 2001, 290 S. ISBN 0-19-513451-6.
- CHEN, D. u. a.: Preliminary analysis and statistical downscaling of monthly temperature in Sweden. Göteborg: Göteborgs Univ. 1999, 76 S. Rapport Göteborgs Universitet C 16.
- Climate change in the South Pacific, impacts and responses in Australia, New Zealand, and small islands states, ed. by A. GILLESPIE. Dordrecht: Kluwer 2000, 385 S. Advances in global change research 2, ISBN 0-7923-6077-X.
- CUBASCH, U.; KASANG, D.: Anthropogener Klimawandel. Gotha: Klett-Perthes 2000, 128 S. Perthes Geographie kompakt, ISBN 3-623-00856-7.
- Deutsche Forschungsgemeinschaft: Meeresforschung im nächsten Jahrzehnt, Denkschrift. Hrsg. Senatskommission für Ozeanographie. Redaktionskomitee: W. Balzer, U. Bleil, B. v. Bodungen, G. Graf, K. Lochte, J. Meincke, F. Schott, E. Suess, G. Wefer, J. Willebrand; Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2000, 202 S., ISBN 3-527-27216-X.
- DIJKSTRA, H. A.: Nonlinear physical oceanography, a dynamical systems approach to the large scale ocean circulation and El Niño. Boston: Kluwer 2000, 456 S. Atmospheric and oceanographic sciences library 22, ISBN 0-7923-6522-4.
- DOBROVOL'SKIJ, S. G.: Stochastic climate theory: models and applications. Berlin: Springer 2000, 82 S., ISBN 3-540-66310-X.
- The effects of UV radiation in the marine environment, ed. by St. DE MORA. Cambridge: Univ. Press 2000, 324 S. Cambridge environmental chemistry series 10, ISBN 0-521-63218-8.
- EGGER, J.: Vom Tornado zum Ozonloch: eine Einführung in Meteorologie und Klimaforschung. München: Oldenbourg Schulbuchverl. 1999, 240 S. ISBN 3-486-03504-5.
- El Niño and the Southern Oscillation, multiscale variability and global and regional impacts, ed. by H. F. DIAZ. Cambridge: Univ. Pr. 2000, 496 S. ISBN 0-521-62138-0.
- El Niño 1997 - 1998, the climate event of the century, ed. by St. A. CHANGNON. Oxford: Univ. Press 2000, 215 S. ISBN 0-19-513552-0.
- ELSNER, J. B.; KARA, A. B.: Hurricanes of the North Atlantic: climate and society. New York: Oxford Univ. Pr. 1999, 488 S. ISBN 0-19-512508-8.
- EMEIS, ST.: Meteorologie in Stichworten. Berlin: Bornträger 2000, 199 S. Hirts Stichwortbücher, ISBN 3-443-03108-0.
- Exchange and transport of air pollutants over complex terrain and the sea, field measurements and numerical modeling; ship, ocean platform and laboratory measurements, Ed. S. LARSEN u. a. 2000, 357 S. Transport and chemical transformation of pollutants in the troposphere, 9, ISBN 3-540-67438-1.
- FELLENBERG, G.: The chemistry of pollution. Chichester: Wiley 2000, 192 S. ISBN 0-471-61391-6.
- FRICKE, W.: Filterung luftchemischer Messreihen im Alpenraum zur Charakterisierung ihrer Repräsentanz, GAW-DACH-Projekt. Offenbach: DWD 2000, 139 S. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 211, ISBN 3-88148-361-6.
- FITZPATRICK, P. J.: Natural disasters: Hurricanes, a reference handbook. Santa Barbara: ABC-CLIO 1999, 286 S. Centemporary world issues, ISBN 1-57607-071-9.
- GARSTANG, M.; Fitzjarrald, D. R.: Observations of surface to atmosphere interactions in the tropics. Oxford: Univ. Pr. 1999, 405 S. ISBN 0-19-511270-9.
- GIS in Geowissenschaften und Umwelt. K. ASCH (Hrsg.). Berlin: Springer 1999, 173 S. Geowissenschaften und Umwelt, ISBN 3-540-61211-4.
- GLANTZ, M. H.: Currents of change, Impacts of El Niño and La Niña on climate and society. 2. ed. Cambridge: Univ. Pr. 2001, 252 S. ISBN 0-521-78672-X.
- Global aspects of atmospheric chemistry, ed. by H. BAUMGAERTEL, Darmstadt: Steinkopff 1999, 334 S. Topics in physical chemistry 6, ISBN 3-7985-1127-6.
- Global energy and water cycles, ed. by K. A. BROWNING, Cambridge: Univ. Pr. 1999, 292 S. ISBN 0-521-56057-8.
- GÖRSDORF, U.: Genauigkeit und Verfügbarkeit von Windprofiler/RASS-Messungen. Offenbach: DWD 2000, 171 S. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 209, ISBN 3-88148-358-6.
- GORDIN, V.: Mathematical problems and methods in hydrodynamic weather forecasting. Amsterdam: Gordon and Breach 2000, 824 S. ISBN 90-5699-164-7.
- GRAßL, H.: Wetterwende, Vision, Globaler Klimaschutz. Frankfurt a. M.: Campus 1999, 240 S. Die Buchreihe der EXPO 2000, 3. ISBN 3-593-36035-7.
- HÄCKEL, H.: Farbatlas Wetterphänomene. Stuttgart: Ulmer 1999, 336 S. ISBN

- 3-8001-3511-6.
- HÄCKEL, H.: Meteorologie. 4., völlig überarbeitete und neugestaltete Auflage, Stuttgart: Ulmer 1999, 448 S. UTB 1338. ISBN 3-8252-1338-2, ISBN 3-8001-2728-8.
- HALMANN, M. M.; STEINBERG, M.: Greenhouse gas carbon dioxide mitigation, science and technology. Boca Raton: Lewis Publ. 1999, 568 S. ISBN 1-56670-284-4.
- HARLFINGER, O.; KNEES, G.: Klimatographie. 1999, 196 S., Klimahandbuch der Österreichischen Bodenschätzung 1, ISBN 3-7030-0341-3.
- HOBBS, P.V.: Basic physical chemistry for the atmospheric sciences, a companion text to „Introduction to atmospheric chemistry“. 2. ed. Cambridge: Univ. Pr. 2000, 209 S. ISBN 0-521-78083-7.
- HOBBS, P.V.: Introduction to atmospheric chemistry, a companion text to 'Basic physical chemistry for the atmospheric sciences'. Cambridge: Univ. Pr. 2000, 262 S. ISBN 0-521-77143-9.
- HÖHNE, W.: Komponenten automatischer meteorologischer Meßsysteme. Offenbach: DWD 2000, 124 S. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 208, ISBN 3-88148-357-8.
- HÖPPE, G.: Blau, die Farbe des Himmels. Heidelberg: Spektrum Akad. Verl. 1999, 215 S. ISBN 3-8274-0485-1.
- HYDE, R.: Climate responsive design, a study of buildings in moderate and hot humid climates. London: E & FN Spon 2000, 244 S. ISBN 0-419-20970-0.
- JANSSEN, F. u. a.: A climatological data set of temperature and salinity for the Baltic Sea and the North Sea. Hamburg: Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie 1999, 245 S. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Supplement 9.
- JESSE, K.: Laser, Grundlagen und moderne Trends. Berlin: VDE 1999, 176 S. ISBN 3-8007-2347-6.
- KANTHA, L. H.; CLAYSON, C.A.: Small scale processes in geophysical fluid flows. San Diego: Academic Pr. 2000, 888 S. International geophysics series 67. ISBN 0-12-434070-9.
- Klimazeugnisse der Erdgeschichte, Perspektiven für die Zukunft, Hrsg. Monika HUCH, Berlin: Springer 2001, 252 S. ISBN 3-540-67421-7.
- Long-range persistence in geophysical time series, ed. by R. DMOWSKA. San Diego: Academic Pr. 1999, 175 S. Advances in geophysics 40.
- Reactive halogen compounds in the atmosphere, with contributions by T. DUAFALA. Berlin: Springer 1999, 227 S. Handbook of environmental chemistry 4 E. ISBN 3-540-64090-8.
- Reactive hydrocarbons in the atmosphere, ed. by C. N. HEWITT. San Diego: Academic Press 1999, 322 S. ISBN 0-12-346240-1.
- Understanding our environment: an introduction to environmental chemistry and pollution, ed. by R. M. HARRISON. 3. ed. Cambridge: The Royal Society of Chemistry 1999, 445 S. ISBN 0-85404-584-8.
- Urban air pollution: european aspects, ed. by J. FENGER. Dordrecht: Kluwer 1999, 482 S. Environmental pollution 1. ISBN 0-7923-5502-4.
- VANDAM, J. C.: Impacts of climate change and climate variability on hydrological regimes. Cambridge: Cambridge Univ. Pr. 1999, 140 S. International hydrology series, ISBN 0-521-63332-X.
- WANNER, H.: Klimawandel im Schweizer Alpenraum. Zürich: Vdf 2000, 285 S. ISBN 3-7281-2395-1.
- WEISCHET, W.; ENDLICHER, W.: Regionale Klimatologie. Bd. 1 Die neue Welt: Amerika, Neuseeland, Australien. Bd. 2. Die alte Welt: Europa, Afrika, Asien. Stuttgart: Teubner 1996 u. 2000, 468 u. 620 S. ISBN 3-519-03405-0, ISBN 3-519-03434-4.

Habilitationen, Promotionen und Diplom-Hauptprüfungen im Jahr 1997

Freie Universität Berlin

Habilitationen

GERSTENGARBE, Friedrich-Wilhelm: Definition und Beschreibung klimatologischer Extreme

Promotionen

BENNARTZ, Ralf: Fernerkundung atmosphärischer Parameter in Küstengewässern mittels passiver Mikrowellensensoren.

BERGER, Martina: Flächenmittel der Energieflüsse in einem semiariden Testgebiet.

BÖTTGER, Ute: Zur Ableitbarkeit von Aerosoleigenschaften aus Polarisationsmessungen.

FELL, Frank: Ein numerisches Modell zur Simulation des Strahlungstransportes im Ozean: Beschreibung, Validierung und Anwendung.

MARQUARDT, Christian: Die tropische QBO und dynamische Prozesse in der Stratosphäre.

REX, Markus: Der Ozonabbau in der arktischen Stratosphäre: Ergebnisse einer neuen Meßstrategie (Match).

SCHULZ, Jürgen: Systemtechnische Untersuchungen an dem abbildenden Spektrometer ROSIS-01 zur Erfassung und Interpretation der Meeresfarbe.

VOGT, Peter: Bestimmung des Blattflächenindex und der absorbierenden, photosynthetisch aktiven Strahlung der Vegetation aus bidirektionalen Reflexionsfaktoren am Oberrand der Pflanzendecke.

Diplom-Hauptprüfungen

BECKER, Ralf: Wolkenklassifikationen mit NOAA-AVHRR-Daten unter Berücksichtigung von Texturmerkmalen.

DEUTSCHLÄNDER, Thomas: Untersuchungen zur Häufigkeitsverteilung und zu den fühlbaren Temperaturen der Luftmassen in Berlin-Dahlem in den Jahren 1971-1995.

HETSCHOLD, Christian: Mittlere Häufigkeit der 3-Stunden-Spitzenböen in Berlin-Dahlem im Zeitraum 1961-1990 und deren zehnjährige Änderungen.

KREBBER, Sibylle: Der Wind in Dahlem – eine beschreibende Statistik.

KRÜGER, Kirstin: Vergleich planetarischer Wellen in zwei unabhängigen Datensätzen der mittleren Stratosphäre.

MÜLLER, Cornelia: Der Temperatur- und Niederschlagsverlauf in Spanien im Zeitraum 1951-1996.

MÜLLER, Marion: Zusammenhang der vertikalen Ozonverteilung in der Stratosphäre mit Luftmassen und Fronten in der Troposphäre.

PRECHTL, Manuel: „Kanadische“ Stratosphärenenerwärmungen: Eine Untersuchung unter Berücksichtigung mehrjähriger Klimaschwankungen.

SCHULZ-SCHÖLLHAMMER, Kathrin: Interpretation von OClO-, BrO, NO₂- und O₃-Messungen über Søndre Strømfjord (Grönland) im Januar und Februar 1990, unter Verwendung von Trajektorien.

VOSPETTE-KRÄMER, Michèle: Die 5-Tage-Welle im Berliner GCM: Eine Untersuchung mit Hilfe der Wavelet-Analyse.

Universität Bonn

Promotionen

GÖBER, Martin: Regionale Klimadiagnostik großskaliger Wirbel.

ISSIG, Christian: Ein spektrales Wolkenmodell mit integriertem Strahlungsübertragungsmodell zur Unterstützung von Niederschlagsalgorithmen aus Fernerkundungsdaten.

KÖPKEN, Christina: Assimilation von direkten Messungen und Satellitenretrievals in ein Mesoskala-Modell: Nutzen für die Analyse und Simulation polarer Mesozyklonen.

STEIN, Olaf: Statistisch-dynamische Analyse der Wettervariabilität im atlantisch-europäischen Raum anhand langer Bodendruckreihen.

TANDETZKI, Jörg: Statistisch-dynamische Untersuchungen von täglichen Analyse- und Modelldaten unter besonderer Berücksichtigung des quasi-geostrophischen Lorenz-Energiezyklus.

Diplom-Hauptprüfungen

KOPP, Eva-Maria: Eine kritisch-statistische Untersuchung von Bonner Tropfenspektren und den daraus resultierenden aktuellen Beziehungen von Regenkenngößen.

MAURER, Bernd: Wechselwirkungen zwischen atmosphärischer Grenzschicht, Vegetation und Boden: Messungen und Modellsimulationen.

MÜLLER, Gisela: Regenerkennung und Bestimmung von Regenraten aus Messungen mit dem SSM/I-Radiometer über Land durch Kalibrierung mit in situ-Regenmessungen.

STEPHAN, Klaus: Die zeitliche und räumliche Struktur einer Seewindfront. Auswertung von Flugzeugmessungen in Südastralien.

SVENSSON, Kristina: Aufbau einer Anlage für Turbulenzmessungen nach der Eddy-Korrelationsmethode.

VERBEEK, Brigitta: Untersuchungen zur Verdunstung und zum Bodenwasserhaushalt eines unbewachsenen Lysimeters im Vergleich mit einem gleichartigen, aber bewachsenen.

Universität (TH) Cottbus

Die Einrichtung des Lehrstuhls Umweltmeteorologie erfolgte im Jahr 1996. Folgendes Examen ist für das Jahr 1996 nachzutragen:

Promotionen

Ahrens, Bodo: Ein Strahlungsschema für (regionale) Vorhersagemodelle.

Für das Jahr 1997 wurden keine Examina gemeldet.

Universität Frankfurt am Main

Promotionen

GEDÜNTHER, Markus: Gleichzeitige Bestimmung aller optischer Eigenschaften atmosphärischer Partikeln durch mathematische Inversion photometrischer Messungen: Verwendung einer realitätsnah parametrisierten Phasenfunktion.

DENHARD, Michael: Zeitreihenanalyse der Dynamik komplexer Systeme und der Wirkung externer Antriebsmechanismen am Beispiel des Klimasystems.
GRIESER, Jürgen: Eine makroskopische Klimadynamik und ihre diagnostische sowie prognostische Anwendung auf globale Temperaturvariationen.
KUCHARSKI, Fred: Anwendung der Exergie auf meteorologische Modellsysteme im Hinblick auf eine Vereinheitlichung atmosphärischer Energiekonzepte.

Diplom-Hauptprüfungen

BUNDKE, Ulrich: Optische Eigenschaften atmosphärischer Teilchen: Teilchen im Stadtgebiet von Frankfurt am Main im Vergleich zwischen Frankfurt und dem Kleinen Feldberg (Taunus).

Universität Freiburg

Promotion

JAKOBI, Gert: Human-biometeorologisch relevante Strukturen von Photooxidantien – Beurteilung der Strukturen von Photooxidantien unter wirkungsspezifischen Aspekten.

Diplom-Hauptprüfungen

CALLAU BERENGER, Sonja: Wasserhaushalt eines Kiefernwaldes der Oberrheinebene.

Universität Göttingen

Institut für Bioklimatologie

Diplom-Hauptprüfungen

FALK, Matthias: Turbulente Flüsse von CO₂, H₂O und fühlbarer Wärme über und in einem Fichtenbestand im Solling.
MÖLDERS, Stephan: Vertikalprofile von Stickoxiden und Ozon in einem Fichtenbestand im Solling – Feldmessungen und Interpretationen.
RINGELER, Andre: Turbulenter vertikaler Transport von luftgetragenen Spurenstoffen über und in einem Fichtenbestand.

Universität Hamburg

Promotionen

HORNEFFER, Katja: Energie- und Feuchtehaushalt im nichthydrostatischen Mesoskalamodell GESIMA bei Nestung in das Regionalklimamodell REMO.
KNORR, Wolfgang: Satellitengestützte Fernerkundung und Modellierung des globalen CO₂-Austauschs der Landvegetation.
KORNBLÜH, Luis: Bestimmung der arktischen Oberflächenenergieflüsse durch Assimilation von Satellitendaten mit dem adjungierten Modell ADAM.
MEYWERK, Jens: Einfluß von Wolken auf den spektralen solaren Strahlungsfluß an der Meeresoberfläche.
NIEMEYER, Ulrike: Chemische Umsetzungen in einem hochauflösenden mesoskaligen Modell: Bestimmung geeigneter Randwerte und Modellanwendungen.
PERLWITZ, Jan: Zeitscheibenexperimente mit dem atmosphärischen Zirkulationsmodell T42-ECHAM3 für eine verdoppelte und verdreifachte CO₂-Konzentration unter besonderer Beachtung der Änderungen der nordhemisphärischen troposphärischen Dynamik.
SALZEN, Knuth v.: Entwicklung und Anwendung eines Modells für die Dynamik und Zusammensetzung sekundären und marinen Aerosols.
SCHNEIDER, Wolfgang: Die Nordostwasser-Polynja: Entstehung und Hydrographie.
TIMMRECK, Claudia: Simulationen zur Bildung und Entwicklung von stratosphärischem Aerosol unter besonderer Berücksichtigung der Pinatuboepisode.
WINGUTH, Arne M.E.: Assimilation von delta13C-Daten aus marinen Sedimentbohrkernen in das LSG zur Rekonstruktion der Ozeanzirkulation während des letzten glazialen Maximums.
STANDFUSS, Carsten: Synergie von Satellitendaten am Beispiel der Modellierung des Tagesganges der planetarischen Strahlungsbilanz.

Diplom-Hauptprüfungen
ANDERSSON, Sven: Simultane Niederschlagsmessungen mit vertikalen Doppeler-Radargeräten bei 10 und 24 GHz.

BISCHOF, Georg: Stochastische Kurzfristvorhersage der Niederschlagswahrscheinlichkeit: Stationsvorhersage, Flächeninterpolation und Kombination mit dem Europamodell.
BRIX, Holger: ENSO-Vorläufer: Betrachtung troposphärischer und stratosphärischer Phänomene.
DREYER, Martin: Fernerkundung der bevorzugten Teilchengröße in Eiswolken.
EIXMANN, Ronald: Multispektrale Strahlungsmessungen zwischen 0,7 und 17 mm mit einem Interferometer zur Ableitung von mikrophysikalischen Wolkeneigenschaften.
JAHN, Rainer: Fraktale Eigenschaften von Eisdriftrajektorien im Arktischen Ozean.
KÖHNLEIN, Andreas: Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Zirkulation der Atmosphäre und der Variabilität des stratosphärischen Ozons unter Verwendung von multivariaten statistischen Verfahren.
KRÖGER, Heinke: Der Einfluß des Windprofils auf die konvektiven Muster bei Kaltluftausbrüchen: numerische Simulationen.
MÜLLER, Dörthe: Untersuchung des Einflusses der nassen Deposition auf Vulkansedimente.
RAIBLE, Christoph Cornelius: Stochastische Kurzfristvorhersage der Temperatur: Stationsvorhersage, Flächeninterpolation und Kombination mit dem Europamodell.
SCHWERDTFEGGER, Renke: Form und Anteil von Eisteilchen in kalten Wolken.
SKROTZKI, Beate: Der Einfluß der Parametrisierung der nichtaufgelösten Turbulenz auf eine Grobstruktursimulation der Entwicklung der stratocumulusbedeckten Grenzschicht: Eine Fallstudie.
STEIN, Jürgen: Der Einfluß der Witterung auf die Gasabgabe der Hamburger Gaswerke.
SURA, Philip: Interdekadische Variabilität in einem vereinfachten windgetriebenen Ozeanmodell.
WALZ, Ulla: Bewertung eines mesoskaligen Modells für die Simulation arktischer Kaltluftausbrüche anhand von Flugzeugmessungen.
WEISS, Alexandra I.: Fernerkundung stratiformer Bewölkung mit einem 95 GHz Wolkenradar.
WITT, Thomas: Der Einfluß nordatlantischer Meeresoberflächentemperatur-Anomalien auf die globale atmosphärische Zirkulation.

Universität Hannover

Promotionen

- BANGE, Jens: Flugexperimente in der planetaren Grenzschicht: Numerische Simulation und erste Messungen mit der Hubschrauberschleppsonde Helipod in der nächtlichen Grenzschicht.
- SIANO, Stephan: Numerische Simulationen zur Ausbreitung von Flugzeugemissionen durch Wirbelschleppen in geschichteten Scherströmungen.
- THOMAS, Marcus: Untersuchungen zur Dynamik und Thermodynamik von Rinnen im Meereis des Weddellmeeres mittels SAR-Daten.

Diplom-Hauptprüfungen

- BRENNECKE, Frank: Laborexperimente zur Ausbildung von Wirbelphänomenen in Dichteströmungen im rotierenden System.
- HARBUSCH, Guido: Grobstruktur-Simulation der atmosphärischen Grenzschicht über partiell mit Meereis bedeckten Wasserflächen.
- KERN, Stefan: Vergleich interferometrischer VHF-Radar-Beobachtungen mit Routine-Radiosondenaufstiegen während einer Hochdrucklage.
- KÜHN, Gerald: Laborexperimente zu Plumenbildungen in Dichteströmungen auf einer β -Ebene.
- SIEBERT, Holger: Messungen höherer stochastischer Momente in der Arktis mit der Hubschrauberschleppsonde HELIPOD.
- STEPPUHN, Regina: Numerische Simulationen zum Windenergieangebot für den Raum Hannover und das Weserbergland.

Universität (TH) Karlsruhe

Promotionen

- BINDER, Hans-Jörg: Tageszeitliche und räumliche Entwicklung der konvektiven Grenzschicht über stark gegliedertem Gelände.
- KRUPA, Richard: Millimeterwellen-Radiometrie stratosphärischer Spurengase unter Anwendung balancierter Kalibrierung.
- RUTTE, Robert: Flächendeckende Bestimmung der Strahlungsbilanz in einem Gebiet mit starker orographischer Gliederung.

Diplom-Hauptprüfungen

- BRAUN, Frank J.: Tageszeitliche Variation von Temperatur und Feuchte im Oberrheingebiet.
- DI MARTINO, Lionel: Analyse der räumlichen Struktur von Turbulenzwirbeln in der atmosphärischen Grenzschicht.
- HAMMER, Max-Ulrich: Numerische Simulationen zum Einfluß lang- und kurzfristiger Änderungen der Witterungs- und Emissionsverhältnisse auf das troposphärische Ozon.
- JOVIC, Filip: Regionale Variation von Wind und Niederschlag im Oberrheingebiet.
- LI, Yunzhong: Numerische Behandlung der turbulenten Diffusion in den geländefolgenden Koordinaten.
- MEISTER, Johannes: Sensitivitätsanalysen der Grenzschichtparametrisierung in einem eindimensionalen atmosphärischen Modell.
- MOHR, Matthias: Ein Vergleich von Simulationen mit zwei mesoskaligen Modellen, dem MIUU-Modell und dem KAMM-Modell, anhand von zwei »Low-Level-Jet«-Fällen über der Ostsee.
- PFEIFLE, Angelika: Ozonverteilung in einer konvektiven Grenzschicht - Fallstudie an einem Berg-Tal-Übergang.
- RIEMER, Nicole: NO_y als Indikator für den photochemischen Zustand der Atmosphäre - Sensitivitätsuntersuchungen mittels numerischer Simulationen.
- SCHROEDTER, Marion: Nutzung von TOVS-Messungen zur Korrektur des atmosphärischen Einflusses in AVHRR-Messungen.
- WEISSHAAR, Urban: Simulation des bodennahen Windfeldes über hügeligem Gelände für die Windenergienutzung.
- WIESER, Andreas: Einfluß der Anströmrichtung auf das Meßsignal verschiedener Ultraschallanemometer.

Universität Köln

Diplom-Hauptprüfungen

- ACKERMANN, Ingmar: MADE: Entwicklung und Anwendung eines Aerosol-Dynamikmodells für dreidimensionale Chemie-Transport-Simulationen in der Troposphäre.

- BRÜCHER, Wenzel: Numerische Studien zum Mehrfachnesting mit einem nichthydrostatischen Modell.
- HÄNSCH, Rupert: Dynamisch-statistisches Verfahren zur flächendeckenden Simulation von windenergetischen Kenngrößen im strukturierten Gelände.
- HERMEL, Thomas: Verfahren und Empfindlichkeitsstudien zur mikroskaligen Strömungsmodellierung.
- KÄLICHE, Elke: Numerische Untersuchungen zur thermochemischen Konvektion in Mehrkomponenten- und Mehrphasensystemen am Beispiel erstarrender magnetischer Schmelzen.
- KHOSRAWI, Farahnaz: Vergleich zweier Verfahren zur Simulation der mittleren jährlichen Konzentrationsverteilung.
- NAWRATH, Susanne: Dynamik der Mesosphäre und der unteren Thermosphäre untersucht mit Messungen des 'High Resolution Doppler Imager' auf dem 'Upper Atmosphere Research Satellite'.
- SCHNADT, Christina: 6 - 25 Day Westward Propagating Convective Disturbances over the Northern-Hemisphere Tropical West Pacific: A Mechanism for Tropical-Extratropical Interaction.
- SCHUMACHER, Rolf: Photolyseraten für ein mesoskaliges Chemie-Transport Modell (EURAD-CTM2) - Vergleich zweier Berechnungsmethoden.
- TIPPKE, Joachim: Die Behandlung von Nebelereignissen in einem mesoskaligen Chemietransportmodell.
- WINTER, Wolfgang: Tagesgang der Aitkenkernkonzentration unter urbanen Bedingungen: eine modellgestützte Analyse.

Universität Leipzig

Promotionen

- BECKMANN, Björn-Rüdiger: Veränderungen in der Windklimatologie und in der Häufigkeit von Sturmhochwassern an der Ostküste Mecklenburg-Vorpommerns.
- POSSE, Peter: Bestimmung klimarelevanter Parameter des maritimen Aerosols unter besonderer Berücksichtigung der Nichtkugelform realer Aerosolteilchen.

Diplom-Hauptprüfung

SIMMEL, Martin: Ein spektrales Flachwassermodell mit nichtperiodischen Randbedingungen.

Universität Mainz

Habilitationen

TRAUTMANN, Thomas: The Interaction of Radiation with Cloud Microphysics in the Marine Boundary Layer.

Diplom-Hauptprüfungen

GLASOW, Roland, v.: Einfluß von hochreichender Vegetation auf die Entwicklung von Strahlungnebel. Ein numerisches Modell.

ITZSTEIN, Martina: Verifikation des Stadtklima-Modells MISKAM anhand lufthygienischer Meßdaten.

KOHL, Michael: Untersuchung mittlerer Tages- und Jahresgänge der Lufttemperatur 2 m über Grund im Deutschland-Modell des Deutschen Wetterdienstes und ein Vergleich mit Stationsbeobachtungen.

KUHLMANN, Rolf v.: Parametrisierung fahrzeuginduzierter Effekte im Stadtklimamodell MISKAM.

SCHÜTZ, Gernot: Ensemble-Vorhersage. Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der großskaligen Clusteranalyse und der Güte der Lokalvorhersage und zur Spannweite-Güte-Relation.

STRUNK, Thomas: Die numerische Behandlung von Koaleszenzprozessen in einem Stratusmodell mit Zweikomponenten-Mikrophysik.

Universität München

Promotionen

DENGLER, Klaus: Hurricane motion in a three-layer shallow-water model with parameterised convection.

DÖLLING, Igor: Modellrechnungen für polarimetrische Radarparameter im C-Band für Ensembles taumelnder und schmelzender Eispertikeln und Vergleich mit Messungen.

DÜRBECK, Tilmann: Grobstruktursimulation von Mischungsprozessen in der freien Atmosphäre.

GREWE, Volker: Der Einfluß chemischer und dynamischer Prozesse auf die Ozonverteilung der Nordhemisphäre.

KÖHLER, Ines: Auswirkungen der Flugzeugemissionen auf den atmosphärischen NO-Gehalt.

SCHMIDT, Rudolf: Empfindlichkeitsstudien mit einem Strahlungs-Konvektionsmodell zum Einfluß veränderter Spurengase, Wolken, Aerosole und Bodenbedo auf das Klima in Bayern.

WIRTH, Martin: Bestimmung der Verteilung von Aerosol, polaren stratosphärischen Wolken und Ozon in der arktischen Stratosphäre mittels eines flugzeuggetragenen Lidars.

Diplom-Hauptprüfungen

BARTENSCHLAGER, Blasius: Entstehung und Verlagerung von Gewittern in Süddeutschland.

BARKHAUSEN, Michael: Untersuchungen von Intensitäten und Auftrittswahrscheinlichkeiten außertropischer Stürme in Mittel- und Westeuropa anhand historischer Sturmfelder (1967 - 1997).

BOY, Michael: Globale Verteilung halogener Kohlenwasserstoffe in der Stratosphäre - Meßdaten im Vergleich mit einem 2-D-Modell.

GORI, Tullio: Bestimmung der NO₂-Photolysefrequenz mit Hilfe eines photoelektrischen Detektors.

HAUCK, Christian: Parameterisierung von Wellenbrechen in einem linearen Modell für stationäre planetare Wellen in der Stratosphäre: Anwendung auf verschiedene Grundzustände.

HABERHAUER, Anton: Untersuchung des Aufwindschlauchs in einem Gewitter mit einem numerischen Modell.

HAUSMANN, Rita: An assessment of a convective parameterisation scheme.

HOFFSCHILDT, Martin: Flugroutenoptimierung nach klimatischen Kriterien.

KNEFFEL, Balbina: Untersuchung des Einflusses freiwerdender latenter Wärme auf den Tagesgang der Talwinde im Langtangtal/Himalaya.

MAUSER, Franz: Bestimmung der Eigenschaften und der Häufigkeit solitärer Schwerwellen aus Beobachtungen mit einem Mikrobarographenmeßnetz.

SIMMERL, Karin: Untersuchungen zum Conditional Sampling.

SEYERLEIN, Rainer: Zur Effektivität von Schwellentests bei der Wolkenerkennung mit Satellitendaten.

SCHEIBER, Andrea: Modellierung biologisch wirksamer UV-Strahlung für realistische Ozon- und Wolkenverhältnisse an bayerischen Stationen.

STUBER, Nicola: Bestimmung der Aufenthaltszeit von Wasserdampf im ECHAM-Modell.

ZÄNGL, Günther: Dreidimensionale Simulationen zum Föhn im Raum Innsbruck.

Universität Graz

Habilitation

KIRCHENGAST, Gottfried: Travelling ionospheric disturbances caused by atmospheric gravity waves: from qualitative to quantitative insight.

Promotionen

KLEEWEIN, Peter: Spectral Analysis of Magnetospheric Radio Emissions.

BERNHARD, Germar: Die Genauigkeit von Messungen der solaren UV-Globalbestrahlungsstärke bei verschiedenen Atmosphärenbedingungen.

Diplom-Hauptprüfungen

HOCHEGGER, Gerald-Peter: Wie regional ist ein regionales Ionosphärenmodell?

HAFNER, Joachim: Refraktivitätsfeld der unteren Atmosphäre: Physikalische Grundlagen und ein globaler Überblick über den Radiofrequenzbereich.

PFISTER, Gabriele: Strahlungstransfer durch die Atmosphäre im UV-Bereich.

VOGL, Dieter F.: Die kinetische Theorie des Plasmas und Erzeugungsmechanismen der planetaren Radiostrahlung.

Universität Innsbruck

Promotionen

BAUER, Manfred: Three-dimensional numerical simulations of the influence of the horizontal aspect ratio on flow over and around a meso-scale mountain.

FLORICIOIU, Dana-Marie: Polarimetric Signatures and Classification of Alpine Terrain by Means of SIR-C/X-SAR.

Diplom-Hauptprüfungen

- ERLACHER, Georg: Das Rückstreuverhalten natürlicher Oberflächen in Island aus ERSSAR-Daten und Feldmessungen.
- GOHM, Alexander: Untersuchungen der Überströmung verschiedener Gebirgsformationen anhand eines zweidimensionalen Modells.
- MASSIMO, Marins: Eisdicke des Gepatschferners. Messungen mit dem Radio-Echolot.
- PFOSER, Andreas: Gletscherschwankungen und großräumige atmosphärische Strömung.
- SCHELLANDER, Harald: Bilanzgleichungen für die Deformation.
- VERGEINER, Johannes: Über den Einfluß eines isolierten Gebirges auf eine idealisierte Frontalzirkulation.

Universität Wien

Institut für Meteorologie und Geophysik

Promotionen

- BECK, Alexander: On the dynamics of error covariances in the atmospheric models.
- HAAS, Patrick: Nichtlinearität und Modellfehler in der Skill-Vorhersage.

Diplom-Hauptprüfungen

- BECK, Alexander: Zur Approximation von Vorhersagefehlerkovarianzen in einem barotropen Modell.
- WOSTAL, Thomas: Ein Beitrag zur objektiven Frontenanalyse.

Universität Basel

Promotion

- ROGGOVOEGELIN, Caroline: Biomassenabschätzung und Fernerkundung: Eine Untersuchung im Nordwestschweizer Jura unter Berücksichtigung ausgewählter Klimaelemente.

Diplom-Hauptprüfungen

- BOLLIGER, Martin: Verifikation von orographisch beeinflussten Südströmungen - Föhn und Möhlin-Jet - im hochauflösenden Regionalmodell (Swiss Model).
- FÖHNER, Michael: Untersuchung der Kaltluftproduktion und der damit verbundenen Durchlüftung im Raum Basel am Beispiel autochthoner Wetterlagen.
- GERMANN, Urs: Doppler radar data analysis - Wind field retrieval. Quantitative winter precipitation estimation. Radome attenuation.

ETH Zürich

Promotionen

- FEHLMANN, René: Dynamics of Seminal PV Elements.
- GRIESSER, Thomas: Multipeakanalyse von Dopplerspektren aus Windprofiler-Radar-Messungen.
- MORGENSTERN, Olaf: Alpine Southside Precipitation Events: Model Studies and Physical Concepts.
- YETERGIL, Devrim: Externe Kosten von Krebserkrankungen durch kanzerogene Luftschadstoffe: Eine Abschätzung für die Schweiz.

Examina früherer Jahre sind in folgenden Heften veröffentlicht:

Heft	Prüfungsjahrgang	
meteo 0	1968	
1/2 71	1969	
1/2 71	1970	
2 72	1971	
1 73	1972	
2 74	1973	
2 75	1974	
1 76	1975	
1 77	1976	
2/3 78	1977	
1 79	1978	
1/2 80	1979	
2/3 81	1980	
3/4 82	1981	
1/2 83	1982	
2/3 84	1983	
2/3 85	1984	
2/3 86	1985	1. Teil
4 86	1985	2. Teil
3/4 87	1986	
4 88	1987	
3/4 89	1988	
3/4 90	1989	
3/4 91	1990	1. Teil
1 92	1990	2. Teil
2/3/4 92	1991	
4 93	1992	
1/3 24	1993	
4 24	1994	
1/2 26	1995	
3/4 26	1996	

Tagungen

CM-SAF Training Workshop in Dresden

Swedish Meteorological and Hydrological Institute

Royal Netherlands Meteorological Institute

Royal Meteorological Institute of Belgium with Free University Brussels, Royal Military Academy



Finnish Meteorological Institute

Federal Maritime and Hydrographic Agency of Germany with Max-Planck-Institut für Meteorologie, University of Bremen

Deutscher Wetterdienst with GKSS Research Centre

Die Sorge der Menschheit vor einer nachhaltigen Veränderung des Klimasystems führt weltweit zu einer Reihe wissenschaftlicher, politischer und sozialökonomischer Aktivitäten. Dabei stellt sich z. Zt. insbesondere die Frage, welchen quantifizierbaren Einfluß der Mensch auf das Klimasystem ausübt und wie hoch die natürliche Variabilität unseres Klimas ist. Auch die möglichen Folgen einer Veränderung des Klimasystems gilt es genauer abzuschätzen. Als Untersuchungsmethoden gehen u.a. Klimaüberwachung, Klimavorhersage und -szenarienrechnung dabei Hand in Hand: Während Projektionen in die Zukunft auf der Grundlage hochentwickelter numerischer Modellsysteme ‚errechnet‘ werden, liefert die operationelle Überwachung des Klimasystems (Klimamonitoring) die erforderliche Daten- und Referenzgrundlage. Ebenso gestattet das Klimamonitoring eine Abschätzung des Zustands des Klimasystems zu einem gegenwärtigen oder vergangenen Zeitpunkt sowie die Nachzeichnung der Entwicklungstendenzen.

Klimamonitoring basiert größtenteils auf Meß- und Beobachtungsdaten. Satelliten spielen hier eine herausragende Rolle als großflächige Datenlieferanten, insbesondere über unbewohnten Gebieten.

Der DWD hat in diesem Zusammenhang die Aufgabe übernommen, weitere Datenquellen für die Untersuchung und die Überwachung des Klimasystems zu erschließen. Im Rahmen eines 5-jährigen multinationalen Projekts wird die Entwicklung von Auswertelgorithmen zur routinemäßigen Ableitung klimatauglicher Parameter aus den neuen EUMETSAT Satellitengenerationen in Angriff genommen. Während die Implementierung der entsprechenden Algorithmen und Prozeßketten in eine operationelle Umgebung noch Projektbestandteil ist, werden in einem nachfolgenden Schritt dezentrale Auswertezentren betrieben, die die Satellitendaten routinemäßig in meteorologische Produkte umwandeln.

Seit Beginn des Jahres 1999 läuft im DWD das Projekt SAF_CLIM (Aufbau einer Satellitenklimatologie im DWD und Beteiligung am EUMETSAT-SAF zur Klimaüberwachung). SAF steht für **S**atellite **A**pplication **F**acility und stellt einen dezentralen Teil des künftigen Bodensegments für die EUMETSAT Satelliten MSG (**M**ETEOSAT **S**econd **G**eneration) und EPS/METOP (**E**uropean **P**olar **S**ystem/**M**eteorological **O**perational Satellites) dar. Die Beteiligung des DWD am

EUMETSAT-SAF zur Klimaüberwachung (CM-SAF: **S**atellite **A**pplication **F**acility on **C**limate **M**onitoring, multinationales 5-jähriges Projekt unter Leitung des DWD) ist eine der Kernaktivitäten des Projektes SAF_CLIM (weitere Informationen sind im INTERNET unter <http://www.dwd.de/research/event.htm> verfügbar).

Im Rahmen der Projektarbeit richtete der DWD mit Unterstützung seiner europäischen Partnerinstitute sowie von EUMETSAT und der WMO vom 20.-22.11.00 einen Nutzer- und Trainingworkshop im TREFF-Hotel**** Dresden aus. Teilnehmer waren knapp 100 Klimatologen und Satellitenexperten aus ca. 30 Ländern. Ziel des Workshop war es, die potentielle Nutzergemeinschaft für die begonnenen Entwicklungen zu sensibilisieren. Namhafte Persönlichkeiten wie Prof. Dr. Hartmut Graßl, Direktor des MPI für Meteorologie in Hamburg, EUMETSAT Generaldirektor Dr. Tillmann Mohr, Dr. Mike J. Coughlan, Direktor bei der WMO, Prof. Dr. Ehrhard Raschke, Institutsleiter am GKSS Forschungszentrum Geesthacht und DWD Präsident Udo Gärtner sprachen zu den Teilnehmern. Der Workshop war von einer Pressekon-

ferenz sowie einer öffentlichen Ausstellung im Tagungshotel begleitet.

Als interessante Duplizität der Ereignisse war zudem festzuhalten, daß am Vortag des Workshops die erweiterte EUMETSAT Konvention in Kraft trat: Das Augenmerk der Organisation wird sich zukünftig auch auf die Überwachung des Klimasystems sowie die Erkennung von Klimaänderungen richten.

Unter der Leitung anerkannter Wissenschaftler wurden in Dresden die Pläne zur Ableitung von Strahlungs-, Wasserdampf- und Wolkeninformationen sowie zur Bestimmung von Ozeancharakteristika vortragen und diskutiert (siehe Hintergrundinformation). Die genannten Parametern haben eine Schlüsselrolle für das tiefere Verständnis der Variabilität unseres Klimasystems inne.

Der DWD und seine Partner fanden für das Vorhaben, die neuen meteorologischen Satellitengenerationen auch für die Überwachung des Klimas nutzbar zu ma-

chen, viel Zustimmung und eine Reihe interessanter Anregungen.

Zu den wichtigsten Ergebnissen zählen, daß

- die CM-SAF Produktliste von den potentiellen Nutzern vollständig akzeptiert wurde,
- bekräftigt wurde, daß die CM-SAF Aktivitäten grundsätzlich auf operationellen Satelliten basieren und daß die Verwendung von Daten experimenteller Satelliten für Validationszwecke geprüft wird,
- das CM-SAF auf Grundlage der z. Zt. besten Algorithmen arbeitet und dies der Nutzergemeinschaft demonstrieren wird,
- zu prüfen ist, das CM-SAF Auswertebereich – zurzeit größtenteils Europa und Randmeere – generell zu erweitern und möglichst globale Datensätze und Produkte zu generieren,
- die Einbindung des CM-SAF in internationale Projekte und Aktivitäten weiter intensiviert werden soll,

- zu prüfen ist, ob auch räumlich homogene Produkte generiert werden können, die sowohl MSG- als auch EPS/METOP Auswertebereiche überdecken.

Dresden war als Tagungsort mit Blick auf seine einzigartige Geschichte sowie seine Funktion als modernes wissenschaftliches und kulturelles Zentrum ausgewählt worden: neben der hervorragenden infrastrukturellen Anbindung symbolisiert der Tagungsort in beeindruckender Art und Weise den Brückenschlag zwischen Ost und West sowie zwischen Vergangenheit und Zukunft.

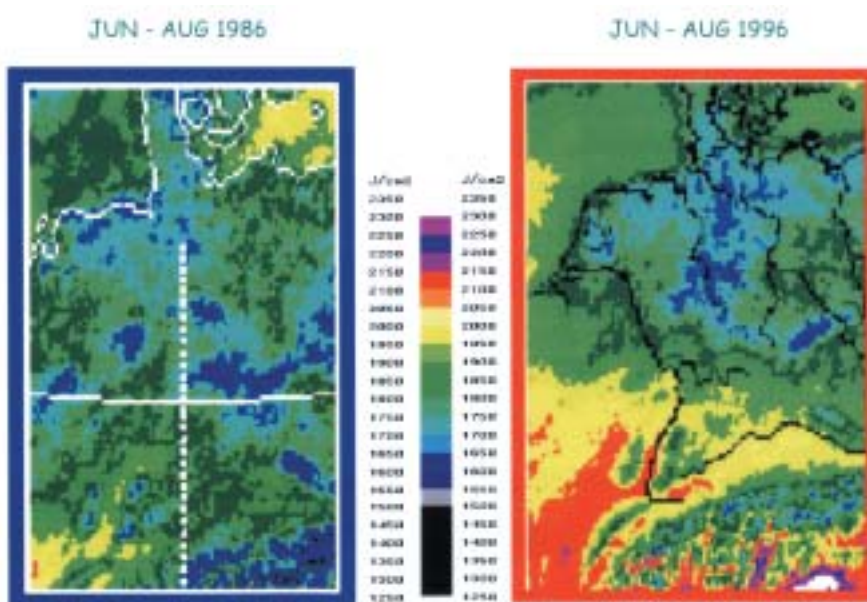
Das überwiegend in Eigenregie zusammengestellte Rahmenprogramm bot den Workshopteilnehmern reichlich Gelegenheit, sich davon zu überzeugen.

Literatur:

Woick, H. et al., 2001: The Satellite Application Facility on Climate Monitoring, Advances in Space Research (im Druck)

P. Hechler, FE21

Hintergrund: Die CM-SAF Produktgruppen

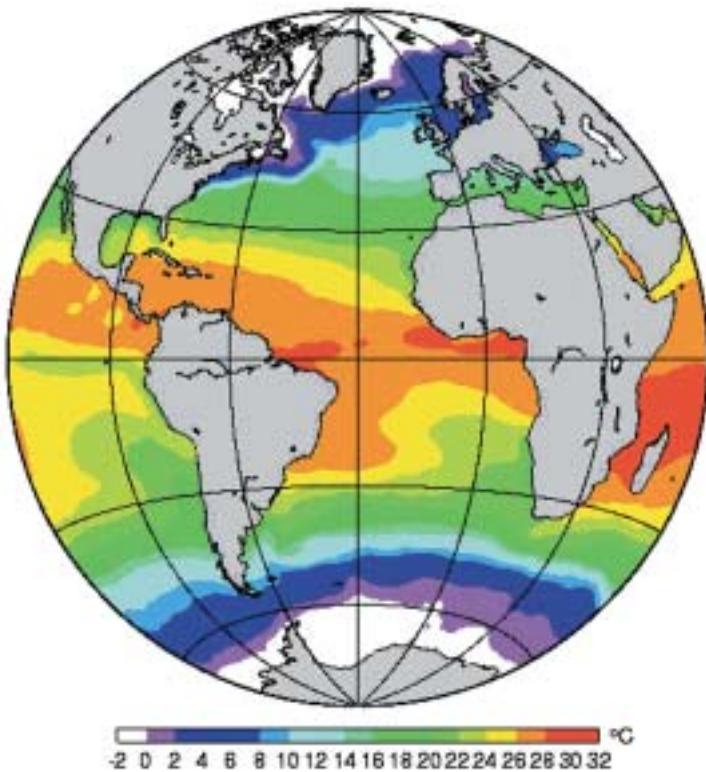


Mittel der Globalstrahlung am Erdboden aus METEOSAT Daten über Deutschland

Wolken und Strahlung:

Bestimmung konsistenter Parameter für regionale Klimaanwendungen

Das SAF on Climate Monitoring stellt konsistente Datensätze von Wolken- und Strahlungsbilanzparametern für Europa und Teile des Nordatlantiks bereit. Die räumliche Auflösung beträgt 15 km (mit Ausnahme der Strahlungsbilanzkomponenten am Oberrand der Atmosphäre, für die eine räumliche Auflösung von 50 – 70 km vorgesehen ist). Neben den Komponenten der Strahlungsbilanz an Ober- und Unterrand der Atmosphäre (einschließlich Albedo) werden verschiedene Wolkenparameter, wie bspw. Wolkenbedeckungsgrad, Wolkenart, Wolkenobergrenzen (einschließlich Temperatur) usw. abgeleitet.

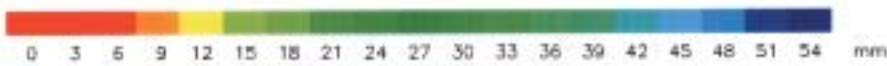
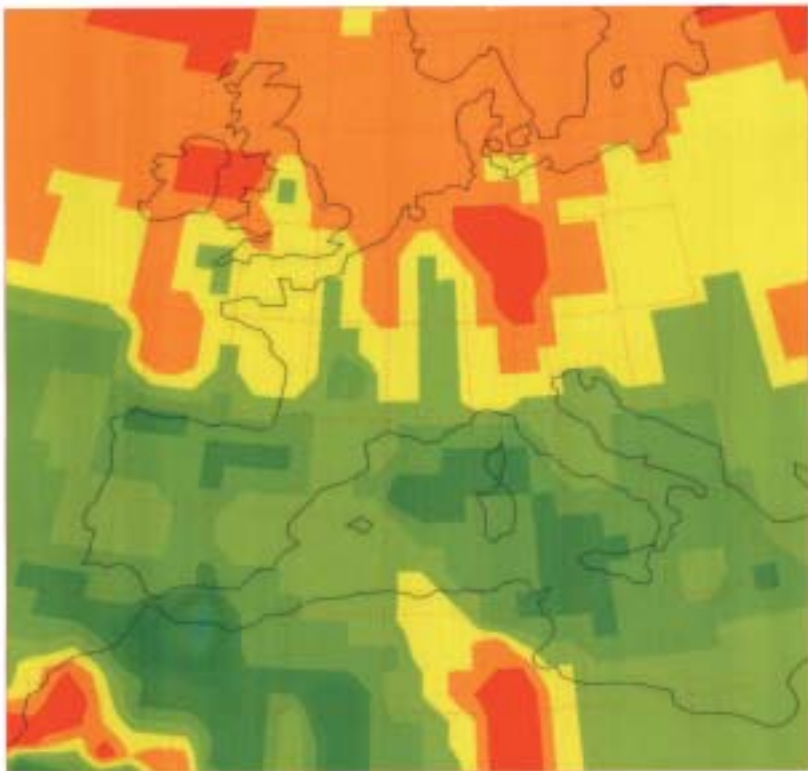


Globale Meeresoberflächentemperatur, Januar 1996

Abschätzung des globalen Meereszustands:

Dynamische Extrapolation von Meeresoberflächendaten in das Meeresinnere

Wegen ihres immensen Vermögens, Wasser, Wärme und strahlungsaktive Spurenstoffe zu speichern und umzuverteilen, haben die Ozeane eine zentrale Rolle im Klimasystem inne. Klimaüberwachungs- und Vorhersageaktivitäten erfordern daher eine kontinuierliche Abschätzung des inneren Zustands der Ozeane. Durch Kombination von Fernerkundungsdaten mit globalen Ozean-Zirkulationsmodellen generiert das SAF on Climate Monitoring eine Abschätzung des Zustands der globalen Ozeanzirkulation in monatlichen Zeitschritten. Diese Abschätzungen umfassen u.a. Seeeisbedeckungsgrad, Temperatur und Salzgehalt an der Oberfläche und im Inneren des Ozeans sowie Zirkulationsgeschwindigkeiten.



„Total precipitable water“ über Europa, 26.12.1999

Wasserdampf in der Atmosphäre:

Zusammenfügen und Validieren von Wasserdampfinformationen aus Satellitendaten

Atmosphärischer Wasserdampf ist aus verschiedenen Gründen von großem klimatologischem Interesse: als Treibhausgas, als Komponente des Wasserkreislaufs und wegen seiner Rolle als Träger latenter Wärmeenergie. Das SAF on Climate Monitoring stellt daher kombinierte tägliche Gitterdatensätze des ‚total precipitable water‘ und des ‚layer precipitable water‘ (3 Schichten) bereit. Die Datensätze basieren auf operationellen Satellitendaten und sind sowohl mit in-situ Daten als auch mit bodengestützten Fernerkundungsdaten validiert. Die räumliche Auflösung der Datensätze, die Europa und Teile des Nordatlantiks überdecken, beträgt 100 km x 100 km.

Anschriften der Autoren dieses Heftes

PROF. DR. FRANZ FIEDLER
Institut für Meteorologie und Klimaforschung,
Universität Karlsruhe / Forschungszentrum Karlsruhe
Kaiserstraße 12, 76128 Karlsruhe
f.fiedler@phys.uni-karlsruhe.de

PROF. DR.-ING. HABIL. GÜNTER BAUMBACH
Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik
und Dampfkesselwesen, Abt. Reinhaltung der Luft
Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart
Baumbach@ivd.uni-stuttgart.de

PROF. DR. ADOLF EBEL
Universität zu Köln, Institut für Geophysik und
Meteorologie/EURAD
Aachener Straße 201-209, 50931 Köln
eb@eurad.uni-koeln.de

PROF. DR.-ING. HABIL. RAINER FRIEDRICH
Universität Stuttgart, Institut für Energiewirtschaft und
Rationelle Energieanwendung
Heßbrühlstraße 49 a, 70550 Stuttgart
rf@ier.uni-stuttgart.de

DR.-ING. KONRAD GLASER
Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik
und Dampfkesselwesen, Abt. Reinhaltung der Luft
Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart
Jetzt: Robert Bosch GmbH
Robert-Bosch-Straße 2, 71701 Schwieberdingen

DR. HERMANN J. JAKOBS
Universität zu Köln, Institut für Geophysik und
Meteorologie/EURAD
Aachener Straße 201-209, 50931 Köln
hj@eurad.uni-koeln.de

DR. INGO JACOBSEN
Deutscher Wetterdienst, Abteilung Klima und Umwelt
Postfach 10 04 65, 63004 Offenbach
ingo.jacobsen@dwd.de

DR. MICHAEL MEMMESHEIMER
Universität zu Köln, Institut für Geophysik und
Meteorologie/EURAD
Aachener Straße 201-209, 50931 Köln
mm@eurad.uni-koeln.de

PROF. DR. VOLKER MOHNEN
IFU-Garmisch-Partenkirchen
Kreuzeckbahnstraße 19, 82467 Garmisch-Partenkirchen
mohnen@ifu.fhg.de

DIPL.-MET. KLAUS NESTER
Institut für Meteorologie und Klimaforschung,
Forschungszentrum Karlsruhe / Universität Karlsruhe
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1,
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
klaus.nester@imk.fzk.de

DR.-ING. ANDREAS OBERMEIER
Universität Bayreuth, Lehrstuhl f.
Technische Thermodynamik u. Transportprozesse (LTTT)
Universitätsstraße 30, 95440 Bayreuth
Andreas.Obermeier@uni-bayreuth.de

PROF. DR. EBERHARD SCHALLER
BTU Cottbus, Lehrstuhl für Umweltmeteorologie
Postfach 10 13 44, 03013 Cottbus
schaller@tu-cottbus.de

PRIV.-DOZ. DR. K. HEINKE SCHLÜNZEN
Universität Hamburg, Meteorologisches Institut
Bundesstraße 55, 20146 Hamburg
schlunzen@dkrz.de

DR. STEFAN TILMES
Deutscher Wetterdienst, Abteilung Klima und Umwelt
Postfach 10 04 65, 63004 Offenbach
jetzt: IBM-Deutschland, Lyoner Straße 13,
60528 Frankfurt am Main
stefan.tilmes@de.ibm.com

DR. BERNHARD VOGEL
Institut für Meteorologie und Klimaforschung,
Forschungszentrum Karlsruhe / Universität Karlsruhe
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1,
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
bernhard.vogel@imk.fzk.de

DR. HEIKE VOGEL
Institut für Meteorologie und Klimaforschung,
Forschungszentrum Karlsruhe / Universität Karlsruhe
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1,
76344 Eggenstein-Leopoldshafen
heike.vogel@imk.fzk.de

DIPL.-ING. ULRICH VOGT
Universität Stuttgart, Institut für Verfahrenstechnik
und Dampfkesselwesen, Abt. Reinhaltung der Luft
Pfaffenwaldring 23, 70569 Stuttgart

Das Heft 3/4, Vol. 26, „Photosmog I“ enthielt folgende Beiträge:

- 1 F. FIEDLER: Photosmog und bodennahes Ozon
- 2 D. POPPE, J. ZIMMERMANN: Chemische Ozonbildung in der planetarischen Grenzschicht
- 3 B. WICKERT, A. OBERMEIER, R. FRIEDRICH: Räumliche und zeitliche Verteilung anthropogener Quellen der Vorläufersubstanzen für Ozon
- 4 F. X. MEIXNER, J. KESSELMEIER, B. VOGEL: Räumliche und zeitliche Verteilung biogener Quellen der Vorläufersubstanzen für Ozon
- 5 H. VOGEL, M. MEMMESHEIMER, E. REIMER, P. WINKLER, F. FIEDLER: Typischer zeitlicher Verlauf von Photosmog-Episoden
- 6 P. WINKLER, W. ENKE: Langzeittrends der mittleren Konzentrationen und von Spitzenwerten von Ozon
- 7 F. FIEDLER, K. H. BECKER, D. H. EHHALT: Feldexperimente zur Untersuchung von Photosmog-Episoden (z.B. TRACT, BERLIOZ, POPCORN)
- 8 R. DIEKERSMANN, H. SANDERMANN: Wirkung von Ozon auf Menschen und Pflanzen

Druckfehlerberichtigung für das Heft 3/4, Jahrgang 26

Seite 87, linke Spalte, 3. Zeile von unten:
Ozonsäule von 3mm entspricht 300 DU.

Bezugbedingungen von *promet*

Herausgeber der Fortbildungszeitschrift *promet* ist der Deutsche Wetterdienst (DWD) mit Sitz in Offenbach am Main. Demzufolge erhalten die Mitarbeiter (Meteorologen und Wetterberater) des DWD sowie des Geophysikalischen Beratungsdienstes der Bundeswehr (GeophysBDBw) mit Sitz in Traben-Trarbach *promet* auf dem Dienstweg. Ferner gibt der DWD *promet* kostenlos ab an die fest angestellten wissenschaftlichen Mitarbeiter der meteorologischen Universitätsinstitute sowie meteorologischen Forschungseinrichtungen in Deutschland. Dabei verbindet der DWD die Hoffnung, daß auch dieser Empfängerkreis sich bereit erklärt, Themen zur Bearbeitung für *promet* zu übernehmen.

Die Verteilung der einzelnen Ausgaben von *promet* an die genannten Empfängerkreise erfolgt zentral durch die Bibliothek des DWD. Wenden Sie sich daher bei Nichterhalt von *promet* bitte direkt dorthin:

DWD/Bibliothek, Frankfurter Straße 135, 63067 Offenbach am Main.

Personen sowie Institutionen, die nicht zu dem oben genannten Empfängerkreis gehören, können *promet* wie folgt erhalten:

- durch Kauf eines Einzelheftes,
- durch Abschluß eines Belieferungsabonnements.

Ihre Bestellung richten Sie bitte an die Bibliothek des DWD, die Sie auch über die weiteren Bezugsbedingungen sowie Preise informiert.

Abschließend sei darauf hingewiesen, daß eine Übereinkunft zwischen dem DWD und der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft e.V. (DMG) Mitgliedern der DMG ermöglicht, *promet* im Rahmen ihrer Mitgliedschaft kostenfrei zu erwerben. Weitere Einzelheiten können der Internet-Seite: <http://www.dmg-ev.de> entnommen werden.

Redaktionelle Hinweise für Autoren

1 Allgemeines

Promet dient der Fortbildung von Meteorologen und Wetterberatern. Die Beiträge zum Thema des Heftes sollen den neuesten Stand des zu behandelnden Spezialgebietes auf wissenschaftlicher Basis in einer verständlichen und anschaulichen Weise darstellen.

2 Textunterlagen

2.1 Textdisketten

Erstellt im Programm Word als DOC-, RTF-, TXT-Dokument oder in einem kompatiblen Programm. Zu jeder auf Diskette erstellten Seite wird ein Ausdruck benötigt.

2.2 Gliederung

Numerierung der Haupt- und Unterabschnitte nach dem Dezimalsystem (1, 1.1, 1.2 ..., 2, 2.1, 2.2. usw.).

2.3 Abbildungen, graphische Darstellungen

Kontrastscharfe und reproduktionsfähige

Vorlagen (Fotos mit Hochglanz, Strichzeichnungen mit schwarzer Tusche und klarer Beschriftung). Legenden zu den Abbildungen auf besonderem Blatt beifügen.

2.4 Formeln, Gleichungen

Auf das Notwendige beschränken, deutlich lesbar mit fortlaufender Numerierung in runden Klammern am rechten Textrand.

2.5 Tabellen

Nur im notwendigen Umfang, klar und übersichtlich, ggf. auch als Abbildungen.

2.6 Literaturzitate

Literaturhinweise im *Text*: ... MÜLLER (1980) ... oder ... (MÜLLER 1980) ...

Literaturverzeichnis:

- Autoren in alphabetischer Reihenfolge. Herausgeber werden durch den Zusatz: „Hrsg.“ gekennzeichnet.

- Zeitschriftenaufsatz:

KURZ, M., 1982: Zum Einfluß diabatischer Prozesse auf die Frontogenese in Bodennähe. Meteorol. Rdsch., **35**, 21–30.

- Buch:

SCHÖNWIESE, C.-D., 1980: Klimaschwankungen. Berlin: Springer-Verlag, 181 S.

3 Korrekturen

Autoren, die das Thema des Heftes behandeln, erhalten Fahnenabzüge ihres Beitrages zur Korrektur. Die Umbruchkorrekturen werden von der Hauptschriftleitung durchgeführt.

4 Belegexemplar, Fortdrucke

Autoren des Hauptthemas erhalten je 5 Belegexemplare des betreffenden Heftes. Autoren von Kurzmitteilungen (3spaltige Texte) je 1 Heft. Zusätzliche Exemplare können gegen Erstattung der Fortdruckkosten bei der Rücksendung der Korrekturen bestellt werden.

Manuskriptsendungen werden erbeten:

Deutscher Wetterdienst
Hauptschriftleitung Promet
Postfach 70 04 21
22004 Hamburg
Telefon 0 40 / 66 90-18 09
Telefax 0 40 / 66 90-18 02
E-Mail: hein-dieter.behr@dwd.de