

Mesoskalige numerische Simulation von Wolken- und Niederschlagsprozessen über strukturiertem Gelände

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTORS DER NATURWISSENSCHAFTEN

von der Fakultät für Physik der Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.–Met. Nikolai Dotzek
aus Bad Hersfeld

Tag der mündlichen Prüfung:

18. Juni 1999

Referent:

Prof. Dr. Klaus D. Beheng

Korreferent:

Prof. Dr. Franz Fiedler

*Wer das Lernen übt, vermehrt täglich.
Wer den SINN übt, vermindert täglich.*

(Lao-tse)

Zusammenfassung

Die vorliegende Doktorarbeit behandelt die numerische Simulation von Wolken- und Niederschlagsprozessen über stark strukturierter Topographie. Bei typischen Gebietsabmessungen von 50 bis 400 km in horizontaler Richtung fallen die behandelten Phänomene in die Mesoskala, die zwischen den großräumigen, synoptischen Wettersituationen und den sehr kleinräumigen, lokalen Vorgängen einzuordnen ist. In diesem Skalenbereich die Wolken und Niederschlagsgebiete direkt mit dem numerischen Modell KAMM¹ aufzulösen und die Wechselwirkung der atmosphärischen Vorgänge mit einer komplexen Mittelgebirgslandschaft unterschiedlichster Gelände- und Bodenbedeckungsarten realistisch zu beschreiben, macht eine umfangreiche Erweiterung des Modellgleichungssystems notwendig. Es handelt sich daher nicht um eine rein wolkenmikrophysikalische Fragestellung, sondern es müssen auch hydrologische, klimatologische, radarmeteorologische und nicht zuletzt numerische Belange berücksichtigt werden.

Die Arbeit fußt auf der schrittweisen Modifikation des KAMM-Modells hin zu einem Entwicklungsstand, der die Beschreibung hochreichender Feuchtkonvektion unter Berücksichtigung der Eisphase ermöglicht. Neben dem Aufbau des Wolkenmoduls werden auch die notwendigen Änderungen an den mittelbar beteiligten Teilmodulen beschrieben, die z. B. die Wechselwirkung zwischen Boden, Vegetation und atmosphärischer Grenzschicht betreffen. Ein weiterer vorbereitender Schwerpunkt ist die Berechnung typischer Radarprodukte und -bilder, die den Vergleich mit den am Institut für Meteorologie und Klimaforschung gewonnenen Erkenntnissen erleichtern und eine Gesamtbeurteilung des Wolkenmodells ermöglichen soll.

Das so modifizierte Modell wird dann anhand exemplarischer Fälle mit idealisierter Topographie getestet, bevor für das Gebiet des Oberrheingrabens mit einer realen Topographie gerechnet wird. Die für eine typische Wetterlage erhaltenen Ergebnisse werden mit experimentellen Befunden des Karlsruher C-Band Doppler Niederschlagsradars verglichen. Dieser Vergleich ermöglicht eine Beurteilung der Güte des Modells und eine Wertung der erzielten Ergebnisse. Die Zusammenschau von Modellergebnissen und Radarbeobachtungen ermöglicht es, geländebedingte Häufungszonen starker Konvektion im Oberrheingebiet durch Identifizierung ihrer Entstehungsmechanismen zu erklären.

Abstract

This dissertation thesis deals with numerical simulation of cloud- and precipitation processes over highly structured terrain. For typical domain sizes of 50 to 400 km horizontally, these phenomena group into the mesoscale being the intermediate range between the large-scale synoptic weather situations and very small-range local processes. To directly simulate clouds and precipitation complexes with the model KAMM² in this range of scales and to realistically describe the interaction of atmospheric processes with complex mountainous terrain of highly variable orography and land-use requires an extensive revision and development of the model equations. Therefore not only are purely cloud-microphysical questions addressed, but hydrological as well as climatological and radar-meteorological aspects have to be considered. Last but not least the amount of numerical work is also quite substantial.

This work is based on the step-by-step modification of the mesoscale model KAMM up to a state allowing for the description of deep moist convection including the ice phase. In addition to the cloud model development also the necessary changes in other parts of the model are being described, such as the interaction of soil, vegetation and atmospheric boundary layer. Another major point in setting up the model was the generation of typical radar products and -images which facilitate comparison of the model output to the experimental findings at the Institute for Meteorology and Climate Research and allow for an easier general evaluation of the cloud model.

The modified version of the model is then tested using exemplary cases with idealized topography, before simulations are being performed for the Upper Rhine valley area with its real topography. The results obtained for a typical synoptic situation are being compared to experimental data from the Karlsruhe C-band Doppler precipitation radar. This kind of comparison allows for an evaluation of the model's skill and the quality of the simulation data. The synopsis of both model results and radar observations enables to explain orogenic maxima of strong convection in the Upper Rhine valley region by identification of their generation mechanisms.

¹Karlsruher Atmosphärisches Mesoskaliges Modell

²Karlsruhe Atmospheric Mesoscale Model

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
2	Atmosphärische Konvektion	5
2.1	Erscheinungsformen	6
2.2	Modellierung	9
2.3	Problemstellung	12
3	Das Modell KAMM	15
3.1	Gleichungssystem für flache Feuchtkonvektion ohne Wolken	15
3.1.1	Grundzustand	16
3.1.2	Kontinuitätsgleichung	17
3.1.3	Impulsgleichung	17
3.1.4	Wärmegleichung	18
3.1.5	Feuchtegleichung	19
3.1.6	Boden- und Vegetationsmodell	19
3.2	Schritte zur Beschreibung von Wolken und Niederschlag	19
4	Das Modell KAMM mit Wolkenmodul	21
4.1	Gleichungssystem für hochreichende Feuchtkonvektion	21
4.1.1	Grundzustand	22
4.1.2	Gasgleichung	24

4.1.3	Kontinuitätsgleichung	24
4.1.4	Anelastizitätsbedingung	24
4.1.5	Impulsgleichung	26
4.1.6	Wärmegleichung	26
4.1.7	Feuchte- und Hydrometeorgleichungen	27
4.1.8	Austauschterme	27
4.1.9	Boden- und Vegetationsmodell	28
4.1.10	Grenzschichtparameter	30
4.1.11	Wolkenmodell	33
4.2	Numerische Lösung der Gleichungen	45
4.2.1	Diskretisierung	45
4.2.2	Randbedingungen	46
4.3	Anwendungsgebiete der neuen Modellversion	48
5	Modellergebnisse	51
5.1	Rechnungen mit idealisierter Topographie	51
5.1.1	Test des Wolkenmodells	51
5.1.2	Radarmeteorologie	58
5.1.3	Ebenes Gelände	64
5.1.4	Einzelberg	67
5.1.5	Böenfronten	70
5.2	Rechnungen für die Oberrheinregion	78
5.2.1	Eine exemplarische Wetterlage	79
5.2.2	Berücksichtigung von Radardaten	88
5.3	Schwere Unwetter in der Oberrheinregion	90

6 Zusammenfassung	95
A Synthetische Radarbilder	99
A.1 MAX_CAPPI	101
A.2 CAPPI	101
B Berechnung des Radarreflektivitätsfaktors	105
B.1 Wolkenmikrophysik	105
B.1.1 Hydrometeorspektren	105
B.1.2 Momente	106
B.1.3 Mediandurchmesser	107
B.1.4 Fallgeschwindigkeiten	108
B.2 Radarreflektivitätsfaktoren	108
B.2.1 Die Ansätze von Smith und Kessler	108
B.2.2 Der verallgemeinerte Spektralansatz	109
C Eigenschaften der Γ-Funktion	113
Literaturverzeichnis	115
Symbolverzeichnis	123

