

---

# ANHANG

## Aspekte der numerischen Atmosphären-Modellierung

### A.1 Wie rechnet ein Atmosphärenmodell?

Allgemein haben Atmosphärenmodelle die Aufgabe, möglichst exakte Aussagen über das Verhalten der Atmosphäre zu liefern. Je nach Grad ihrer Komplexität kann man die Gruppe der Atmosphärenmodelle in Wettervorhersage-, Klima- oder Zirkulationsmodelle unterteilen. Numerische Klimamodelle haben die spezielle Aufgabe, Szenarien zu simulieren, in denen der Einfluss von sich ändernden Spurengaskonzentrationen auf das Klima der Atmosphäre untersucht werden kann. Die Mehrzahl der aktuellen Klimamodelle berechnet Klimaänderungen nur im Bereich der unteren Atmosphäre (Tropo- und Stratosphäre). Typischerweise endet die vertikale Abdeckung dieser Modelle im Bereich der oberen Stratosphäre zwischen 35 und 50 km Höhe. Da aber gerade im Höhenbereich zwischen 50 bis 80 km die stärksten Temperaturtrends der gesamten Atmosphäre beobachtet werden, wurden in den letzten Jahren einige wenige Klimamodelle weiter entwickelt, die eine Höhe bis zu 400 km erreichen. Hierzu zählen die beiden deutschen Modelle HAMMONIA (*Hamburg Model of the Neutral and Ionized Atmosphere*, MPI für Meteorologie, Hamburg) und LIMA (*Leibniz Middle Atmosphere Model*, Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik, Kühlungsborn) und die amerikanischen Modelle WACCM (*Whole Atmosphere Community Climate Model*, NCAR) und SLMTM (*Spectral Mesosphere/Lower Thermosphere Model*, University of Colorado, Boulder, CO, USA).

Das am IAP in Kühlungsborn entwickelte LIMA Modell ist eines dieser neuen Klimamodelle der unteren und oberen Atmosphäre, mit dem sowohl Aussagen über Änderungen des Klimas als auch der Zirkulation möglich sind. Zudem ist es das erste Modell, welches auch langfristige Änderungen im Auftreten von NLC berechnen kann (Berger, 2008). Wir diskutieren also hier Ergebnisse dieses Modells und verwenden weiterhin Resultate des amerikanischen Modells SMLTM, weil letzteres u.a. einen größeren Bereich der Thermosphäre als LIMA abdeckt.

Grundsätzlich haben alle diese verschiedenen Atmosphärenmodelle gemeinsam, dass allgemeine physikalische Gesetze auf der Basis hydro- und thermodynamischer Gleichungen benutzt werden, insbesondere die hydrodynamische Bewegungsgleichung für eine rotierende Atmosphäre, der erste

---

Hauptsatz der Thermodynamik, Bilanzgleichungen für chemische Konstituenten (z.B. Wasserdampf) und die Kontinuitätsgleichung. Die Beschreibung dieses nichtlinearen Differentialgleichungssystems und seiner Randbedingungen basiert im Allgemeinen auf Approximationen, die von Modell zu Modell verschieden ausfallen können. Unter dem Begriff ›Beschreibung‹ hat man sich eine sehr umfangreiche Computersoftware vorzustellen, die nicht selten eine Größenordnung von 100.000 Programmierzeilen erreicht, und sich natürlich auch hier von Modell zu Modell in ihrer Komplexität unterscheidet.

Eine Software dieses Umfangs kann nur auf Großrechnern betrieben werden. Im Falle von LIMA ist dies ein Rechnersystem, das sich aus einer Kombination eines »Massiv Parallel Processing Computers« (Altix UV 1000) und eines »Cluster Computers« besteht (Altix XE1300) zusammensetzt. Das System besteht aus 812 CPUs (Sechskernprozessor Intel Nehalem-EX 2,66 GHz) mit 4 TB Hauptspeicher. Aus den LIMA-Simulationen wird dann ein Datenarchiv erstellt, aus dem die Daten für Simulationen zu leuchtenden Nachtwolken an LIMA/ice weiter gereicht werden. Deshalb besteht die Anforderung an LIMA, den Bereich der sommerlichen Mesopausenregion (80-95 km), wo die Eisbildung stattfindet, möglichst genau an die beobachteten thermischen and dynamischen Zustände anzupassen.

### *A.2 Wie beschreibt ein Atmosphärenmodell die räumliche Welt?*

Klima- und Wettervorhersagemodelle lösen die reale Atmosphäre global bzw. lokal mit einem räumlichen Gitternetz auf. LIMA als Beispiel löst in horizontaler Richtung global die als näherungsweise angenommene Kugeloberfläche der Erde mit einer Quasi-Dreiecksgitterstruktur auf. Das horizontale Gitter aus LIMA beschreibt also die Oberfläche einer Sphäre mit einer Anzahl diskreter Punkte, die in einer Weise angeordnet sind, dass jeweils drei benachbarte Punkte ein Dreieck mit ähnlicher Kantenlänge aufspannen. LIMA besitzt in dem Sinne keine exakte Ikosaeder-Struktur sondern folgt stattdessen einem sogenannten reduzierten Gauss'schen Gitter, das in einer ähnlichen Weise auch in den operationellen Wettervorhersagemodellen des ECMWF verwendet wird. Im Falle von LIMA existieren auf der globalen Kugeloberfläche 41804 Eckpunkte, die die Erdoberfläche in sphärische Dreiecke mit Kantenlängen von cirka 110 km zerlegen.

Im nächsten Schritt vervielfachen wir unser horizontales Gitternetz in vertikaler Richtung, und erreichen somit Schichtungen in Form von Zwiebelschalen, die sich bis zu einer gewissen Höhe erstrecken. Im Falle von LIMA ist jede dieser 118 Schichten etwa 1,3 km dick, die erste Schicht liegt also direkt über