

Struktur und Dynamik der Troposphäre, Stratosphäre und Mesosphäre

Forschungs-Info (1/99)

Aufbau der Erdatmosphäre

Troposphäre, Stratosphäre und Mesosphäre stellen die drei untersten 'Stockwerke' der Erdatmosphäre dar. Die Einteilung erfolgt nach dem Temperaturverlauf (Abb. 1).

Im untersten Stockwerk, der Troposphäre, spielen sich alle Wettervorgänge ab. Sie reicht vom Erdboden bis in etwa 10 km Höhe. Die genaue Lage der Obergrenze, die Tropopause, hängt von der geografischen Breite ab, an den Polen liegt sie bei 9 km, am Äquator bei 17 km Höhe. Die Temperatur nimmt in der Troposphäre nach oben hin ab.

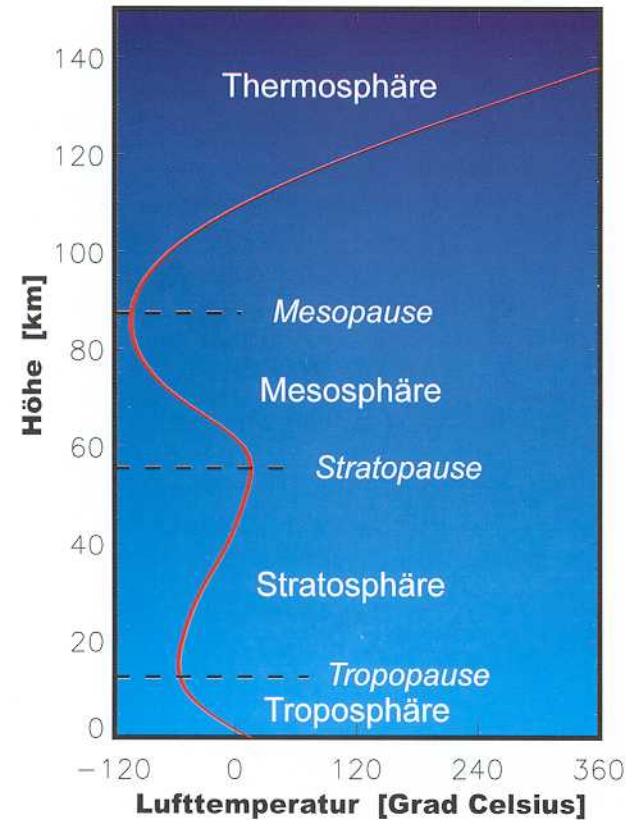


Abb. 1 Einteilung der Erdatmosphäre in verschiedene Sphären, die rote Kurve kennzeichnet die Lufttemperatur.

An die Troposphäre schließt sich die Stratosphäre an. Hier steigt die Temperatur wieder an, weil durch das dort vorhandene Ozon ultraviolette Strahlung der Sonne absorbiert und in Wärme umgewandelt wird. Die Stratosphäre endet mit der Stratopause in etwa 55 km Höhe.

In der anschließenden Mesosphäre gibt es nur noch wenig Ozon, so daß kaum Sonnen-

energie absorbiert werden kann. Deswegen und weil bestimmte atmosphärische Gase (z.B. Kohlendioxid) viel Wärme in den Weltraum abstrahlen, sinkt die Temperatur mit zunehmender Höhe. Sie erreicht in Mesopausenhöhe bei etwa 90 km ihren niedrigsten Wert, dort ist die Erdatmosphäre am kältesten.

Oberhalb der Mesopause steigt die Temperatur wieder an, weil durch Absorption solarer Strahlung - vor allem der extrem kurzwelligigen Ultraviolettstrahlung und der Röntgenstrahlung - wiederum Energie zugeführt wird. In der Thermosphäre steigt deshalb die Temperatur oberhalb 500 km Höhe bis auf Werte von über 1000 Grad an.

Winde

In allen drei Schichten gibt es komplizierte Windsysteme, die letztlich alle von der Sonne angetrieben werden. Auf der von der Sonne beschienenen Seite der Erde wird die Luft erwärmt, wobei diese Erwärmung am Äquator wegen des steileren Einfalls der Sonnenstrahlen größer ist als an den Polen. Die unterschiedliche Erwärmung, auch gegenüber der kalten Nachtseite der Erde, führt zu globalen Druckunterschieden, die die Winde auslösen. Die Richtung der Winde wird dabei auch stark von der Erddrehung beeinflusst. In Bodennähe stellen die Passatwinde ein bekanntes Windsystem dar, im Bereich der Tropopause die in unseren Breiten nach Osten gerichteten Strahlströme (Abb. 2), die z.B. die Flugzeiten in westliche Richtungen verlängern und in östliche Richtungen verkürzen. Auch in größeren Höhen gibt es derartige Windsysteme. Sie können ihre Stärke und Richtung mit der Höhe ändern, wobei es zu Windscherungen kommt.

Der Wind weht nicht nur horizontal, er hat generell auch eine Vertikalkomponente. In der Troposphäre gibt es Zirkulationsströme, bei denen Luft über dem Äquatorgürtel aufsteigt und jeweils auf der Nord- und der Südhalbkugel zu den Polen hin wieder absinkt. Im Bereich der Mesosphäre gibt es die sog. interhemisphärische Zirkulation, bei der Luft von der Sommerhalbkugel über den Äquator zur Winterhalbkugel transportiert wird.

Vergleich SOUSY-Radar / Radiosonde
26. Okt. - 7. Nov. 1992

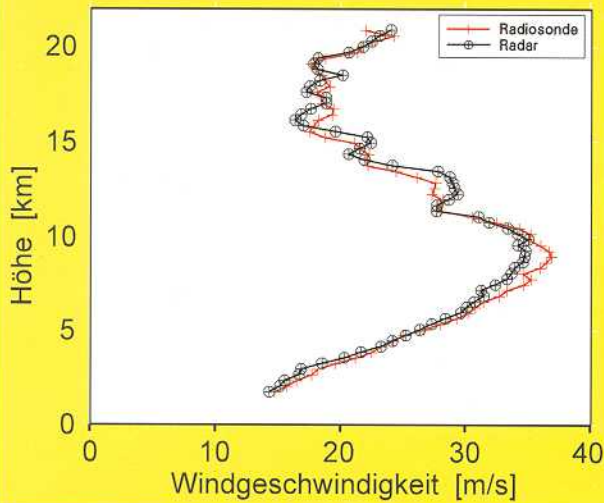


Abb. 2 Mittleres Windprofil in der Troposphäre und unteren Stratosphäre, gemessen mit dem SOUSY-Radar des MPAe und gleichzeitig durch 36 Radiosondenaufstiege. Die ausgezeichnete Übereinstimmung spricht für die Zuverlässigkeit beider Verfahren. Die hohe Windgeschwindigkeit zwischen 5 und 12 km Höhe kennzeichnet den Strahlstrom.

Atmosphärische Wellen

Neben den Winden tragen atmosphärische Wellen erheblich zur Dynamik der Atmosphärenschichten bei. Hier sind zunächst die **Schwerewellen** zu nennen. Sie entstehen immer dann, wenn Luftmassen aus ihrer Ruhelage gebracht werden und zu schwingen anfangen. So werden z.B. Schwerewellen ausgelöst, wenn ein Luftstrom über ein Gebirge weht, wobei die Luftmassen angehoben werden (auch Leewellen genannt).

Andere Entstehungsmechanismen sind z. B. Gewitter, Vulkanausbrüche und Erdbeben. Schwerewellen besitzen Schwingungsperioden von etwa 10 Minuten bis zu einigen Stunden und weisen Wellenlängen bis zu mehreren 100 km auf. Schwerewellen spielen besonders in der Mesosphäre eine große Rolle.

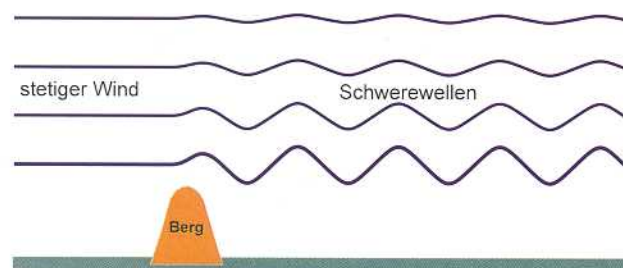


Abb. 3 Zur Entstehung von Schwerewellen (Leewellen)

Von der Wellenperiode her folgen auf die Schwerewellen die **Gezeiten**. Man benutzt

hier die gleiche Bezeichnung wie bei Ebbe und Flut im Ozean, obwohl die Ursache eine andere ist. Während die Meeresgezeiten durch die Anziehungskraft von Mond und Sonne ausgelöst werden, ist es die lokale Erwärmung durch die Sonne auf der Tagseite am subsolaren Punkt (Abb. 4), die die thermischen Gezeiten in der Atmosphäre verursacht.

Man kann sich diesen Vorgang wie den Anschlag einer Glocke vorstellen: Die gesamte Erdatmosphäre wird durch die lokale Erwärmung in Schwingungen versetzt. Die Grundschwingung ist dabei die 24-stündige Gezeitenwelle, die erste Oberwelle die 12-stündige Gezeitenwelle. Auch die 2. und 3. Oberwelle (Perioden von 8 bzw. 6 Stunden) kann man beobachten. Die genaue mathematische Beschreibung der Gezeiten ist sehr kompliziert. Sie verändern sich mit der Höhe und auch mit der geografischen Breite.

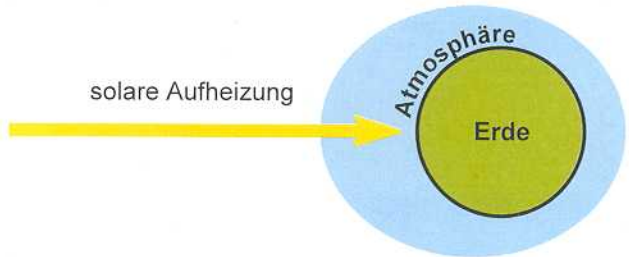


Abb. 4 Zur Entstehung von thermischen Gezeiten. Am subsolaren Punkt wird die Atmosphäre stark erwärmt und dehnt sich aus. Da dies wegen der Erddrehung jeden Tag an den gleichen Stellen passiert, stellt diese Störung die Gezeitenwelle mit einer Periode von 24 Stunden dar.

Eine noch größere Schwingungsdauer als einen Tag haben schließlich die **planetaren Wellen**. Der Name rührt von den extremen Wellenlängen her, die vergleichbar sind mit den Abmessungen des ganzen Planeten Erde: etwa 10000 km. Man hat Perioden von 2, 5 und 16 Tagen gefunden. Es gibt aber auch Wellen mit Perioden von mehr als einem Jahr. Diese Wellen können durch globale Windsysteme angetrieben werden, aber auch z.B. durch die Wechselwirkung von Meereszirkulationen und der Atmosphäre. Das für ungewöhnliche Wetterlagen verantwortliche El-Nino-Phänomen ist ein Beispiel dafür. Generell zählen auch Hoch- und Tiefdrucksysteme zu den planetaren Wellen.

In der Stratosphäre stellt die sog. Stratosphären-Erwärmung eine planetare Welle dar. In der Mesosphäre finden häufig Wechselwirkungen von planetaren Wellen mit Gezeiten oder Schwerewellen statt, wodurch sehr komplizierte Strömungen entstehen.

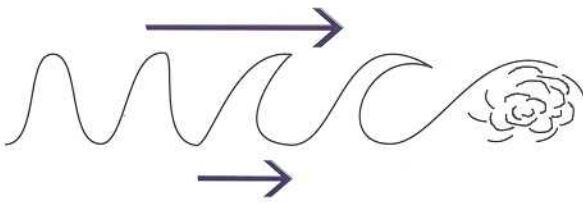


Abb. 5 Das Brechen einer Schwerewelle in einer Windscherung. Oberhalb der Welle herrscht eine höhere Windgeschwindigkeit (längerer Windpfeil) als darunter (kürzerer Pfeil). Dadurch steilt sich die Welle auf und bricht schließlich. - Es entsteht Turbulenz.

Turbulenz

Turbulenz, d.h. unregelmäßige Schwankungen der Dichte, Geschwindigkeit und Temperatur, spielt in der gesamten Erdatmosphäre eine große Rolle. Charakterisiert werden turbulente Strömungen durch eine mittlere statistische Geschwindigkeit und durch eine Skalenlänge. Letztere gibt den Durchmesser einer sog. Turbulenzzelle an (diese kann man sich vereinfacht auch als Wirbel vorstellen). Das Spektrum dieser Skalenlängen reicht von etwa einem Kilometer bis herunter zu Metern und Zentimetern. Bewegungsenergie wird dabei von großen Turbulenzzellen auf immer kleinere übertragen und bei kleinen Skalenlängen schließlich in Wärme überführt. Turbulenz entsteht durch viele verschiedene Prozesse, vor allem in Windscherungen. Im Bereich der Mesosphäre führt besonders das Brechen von Schwerewellen zu Turbulenz. Man kann sich diesen Vorgang wie das Wellenbrechen am Strand vorstellen. (Abb. 5). Die geordnete Wellenbewegung wird in eine ungeordnete, turbulente Bewegung überführt.

Meßverfahren

Man kennt zwei grundsätzlich verschiedene Verfahren zur Messung atmosphärischer Parameter, die für die Beschreibung der Struktur und Dynamik wichtig sind: Die **in-situ-** und die **Fernerkundungsverfahren**. Bei den in-situ-Messungen wird der Meßwert direkt in der Atmosphäre registriert, z. B. mit Sonden, die an Flugzeugen oder Ballongondeln (Radiosonden, vgl. Abb. 2) montiert sind. Mit diesen Verfahren werden viele Daten in der Troposphäre und Stratosphäre gewonnen. Für die Mesosphäre kommt diese Meßmethode nicht in Frage, weil weder Flugzeuge noch Ballone Höhen oberhalb 40 km erreichen. Hier werden daher außer gelegentlichen Flügen mit Forschungsraketen hauptsächlich Fernerkundungsmethoden eingesetzt. Dabei werden z.B. Radiowellen (RADAR) oder Lichtwellen (LIDAR) in die Atmo-

sphäre gestrahlt und die zurückgestreuten Echos registriert. Aus diesen Rückstreusignalen lassen sich viele Informationen über Aufbau und Dynamik der Atmosphäre gewinnen.

Das MST Radar des MPAE

Ein Sondierungsgerät, das vom Max-Planck-Institut für Aeronomie (MPAe) seit vielen Jahren erfolgreich zum Studium der Atmosphäre eingesetzt wird, ist das SOUSY (Sounding System)-Radar. Hierbei werden die mit einer Frequenz von 53 MHz abgestrahlten Radiowellen von Unregelmäßigkeiten im Brechungsindex der Atmosphäre zurückgestreut (Abb. 6). Da die rückgestreuten Signale schwach sind, müssen hohe Sendeleistungen (Spitzenleistung 600 kW) und große Antennenanlagen benutzt werden (Abb. 7).

Die Unregelmäßigkeiten im Brechungsindex entstehen unter anderem in turbulenten Luftschichten, die Radarechos können also Auskunft über die Turbulenzstruktur geben. Da die Turbulenzzellen von den umgebenden Winden mitgeführt werden, läßt sich über den Dopplereffekt auch die Windgeschwindigkeit bestimmen. Deshalb ist diese Radarmethode geeignet, Windsysteme, atmosphärische Wellen, sowie die sog. 'clear air turbulence' zu studieren. Letztere tritt in Abwesenheit von Wolken auf und kann vor allem Flugzeuge gefährden.

Diese Radarmethode wird im Bereich der Mesosphäre, der Stratosphäre und der Troposphäre angewendet, daher werden die entsprechenden Radaranlagen auch MST-Radars genannt. Weltweit sind viele derartige Anlagen eingesetzt, SOUSY war eine der ersten, mehrere wurden nach diesem Vorbild gebaut.

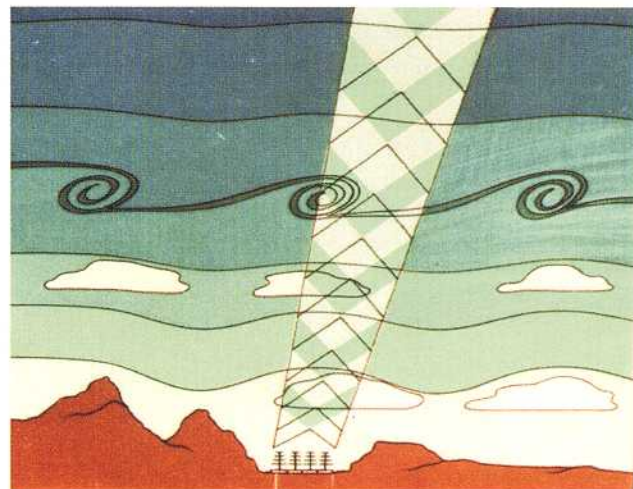


Abb. 6 Prinzip eines Atmosphärenradars: Radiosignale werden in die Atmosphäre abgestrahlt und die zurückgestreuten Echos wieder empfangen.

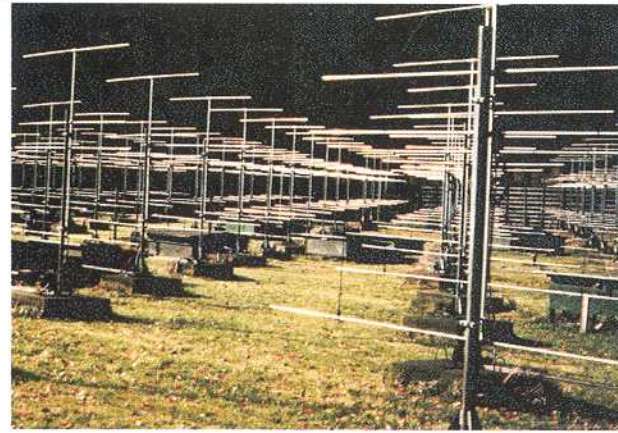


Abb. 7 Antennenfeld des SOUSY-Radars im Harz. Die Gesamtanlage besteht aus 196 Einzelantennen, den sog. Yagis.

Forschungsgebiete

Mit MST-Radars können viele verschiedene Aspekte der Atmosphärenforschung untersucht werden. Folgende Fragen werden am MPae bearbeitet:

- Welche Strukturen weisen Hoch- und Tiefdruckgebiete auf, mit welcher Geschwindigkeit und in welche Richtung ziehen sie, wie verändern sie sich während des Zuges?
- Welche Konvektionsbewegungen finden in Wolken, besonders in Gewitterwolken statt?
- Wie lassen sich Radarechos von Blitzen deuten?
- Wie ändert sich die Form und die Höhe der Tropopause während des Jahres?

- Durch welche physikalischen Prozesse werden atmosphärische Wellen ausgelöst, und wie breiten sie sich durch die verschiedenen Atmosphärenschichten aus? Welche Wechselwirkung findet mit Winden statt?
- Durch welche Mechanismen wird Turbulenz erzeugt, und wie entwickelt sie sich?
- Welche physikalischen Vorgänge laufen bei Meteoriteneinfällen ab?

Ein besonders aktuelles Forschungsgebiet ist das "staubige Plasma" der Mesosphäre. Man versteht darunter ein Gemisch aus elektrisch geladenen und neutralen Gasmolekülen sowie Staub und mikroskopischen Eisteilchen. In der polaren Mesosphäre führt das staubige Plasma zu extrem starken Radarechos (sog. Sommerechos der polaren Mesosphäre, siehe Abb. 8).

- Wie kommen diese Echostrukturen zustande und wie verändern sie sich?
- Welchen Einfluß hat die vom Menschen verursachte Methanzunahme auf das staubige Plasma?

Internet-Seiten zu obigen Themen:
<http://www.iap-kborn.de>
<http://strat-www.met.fu-berlin.de/>
<http://www.mpimet.mpg.de/Depts/Physik/>
<http://www.al.noaa.gov>

P. Czechowsky, J. Klostermeyer, J. Röttger,
R. Rüster, K. Schlegel, G. Schmidt

ALOMAR-SOUSY-RADAR Andenes 25. Juli 1994

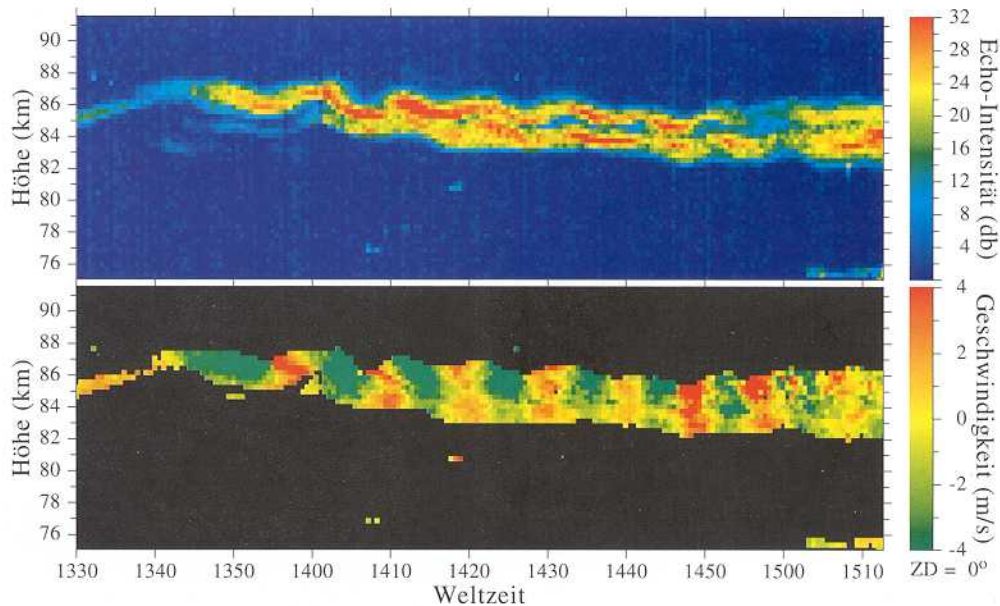


Abb. 8 Sog. Sommerechos der polaren Mesosphäre, aufgenommen in Nordskandinavien. Sie stellen eine dünne Schicht dar, die zufällig durch eine Schwerewelle moduliert wurde. Im oberen Bild erkennt man die wellenartige Form der Echostruktur, im unteren den periodischen Wechsel der Geschwindigkeit von positiven zu negativen Werten.