

LEIBNIZ-INSTITUT FÜR ATMOSPHÄRENPHYSIK
AN DER UNIVERSITÄT ROSTOCK
KÜHLUNGSBORN



**Arbeitsplan des IAP
für den Zeitraum
2015-2016**

F.-J. Lübken, J. Chau, E. Becker

Kühlungsborn, den 30 September 2014

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbemerkungen	3
2	Kurzdarstellung	3
3	Erforschung der Mesosphäre	5
3.1	Temperaturmessungen	5
3.1.1	Entwicklungen bei den RMR-Lidars in Kühlungsborn und auf ALOMAR	6
3.1.2	Entwicklungen beim mobilen und stationären K/Fe-Lidar	6
3.1.3	Insitu-Messungen von Temperaturen mit Raketen	7
3.1.4	Temperaturen aus Meteorechos	7
3.2	Windmessungen	7
3.2.1	Insitu-Windmessungen mit Raketen	7
3.2.2	Entwicklungen der VHF-, MF- und Meteorradare	8
3.2.3	Dynamik aus Radarbeobachtungen	8
3.2.4	Windmessungen mit Lidars	9
3.3	NLC, PMSE und PMWE	9
3.3.1	Gleichzeitige Messungen von NLC, (P)MSE, PMWE und Temperaturen .	10
3.3.2	Vergleich der PMSE-Stärke an unterschiedlichen Orten	10
3.3.3	Variabilität und Eigenschaften von NLC/PMSE auf kleinen und mittleren Skalen	11
3.3.4	Solarer Zyklus in NLC/PMSE	11
3.3.5	Eigenschaften von Eisteilchen	12
3.3.6	Winterechos: (P)MWE	12
3.3.7	Turb3D: 3D-Messungen von kleinskaligen Strukturen	13
3.3.8	Eigenschaften von Aerosolen aus Radarspektren	13
3.3.9	Eintrag meteorischen Materials in die Mesosphäre	14
3.4	Modellierung von Temperaturen und Eisteilchen mit LIMA	15
3.5	Die Photochemie der Mesosphäre unter dem Einfluss von Turbulenz, Schwere- wellen und residueller Zirkulation	15
3.6	Erweiterung des Radarmessverfahrens bis zur Thermosphäre	16
4	Kopplung der atmosphärischen Schichten	17
4.1	Kopplung durch Wellen und residuelle Zirkulation	17
4.1.1	Lidar- und Radarmessungen von Gezeiten und Schwerewellen an verschie- denen Standorten	17
4.1.2	Kopplung Stratosphäre-Mesosphäre beim Übergang vom Winter in den Sommer	18
4.1.3	IAP-eigene Zirkulationsmodelle	18
4.1.4	Makroturbulenz und Generierung von Schwerwellen	20
4.1.5	Vertikale Kopplung durch transiente Wellen; stratosphärische Erwärmun- gen	20
4.1.6	Stationäre planetare Wellen und 3-dimensionale residuelle Zirkulation . .	21
4.1.7	Thermische Gezeiten	22
4.1.8	Horizontale Sondierungen durch Luftleuchten	23
4.2	Turbulenz	23
4.2.1	Insitu-Messungen auf Ballons	23
4.2.2	Turbulenzmessungen mit Radars	24
4.2.3	Messung kleinskaliger Strukturen mit Radarinterferometrie	24
4.2.4	Turbulenzmodellierung	25

4.3	Spurengase	26
4.3.1	Wasserdampf in der Mesosphäre	26
4.3.2	Transport von Spurengasen, Wellenmischen	26
5	Langfristige Veränderungen in der mittleren Atmosphäre	26
5.1	ROMIC	26
5.2	Systematische Untersuchung der Klimavariabilität	26
5.3	Langzeittrends von Temperaturen, NLC und PMSE: Beobachtungen und Modellierung	27
5.4	Langzeitvariabilität des mesosphärischen Windes	27
6	Spezielle Forschungsthemen	28
6.1	Untere Thermosphäre	28
6.2	Metallschichten	28
6.3	Elektronendichtemessungen	28
6.4	Aerosole in der Stratosphäre	28
6.5	Radarbeobachtungen mit „Incoherent Scatter“	28
6.6	Incoherent Scatter Radarbeobachtungen	28

1 Vorbemerkungen

Das IAP hat im Mai 2014 den Jahresbericht für die Jahre 2012 und 2013 vorgelegt und diesen u. a. dem Kuratorium sowie den Mitgliedern des wissenschaftlichen Beirates zukommen lassen. Dieser Bericht enthält die wichtigsten wissenschaftlichen Ergebnisse im genannten Zeitraum und stellt den Bezug zu den im folgenden beschriebenen Arbeiten dar. Die mittelfristigen wissenschaftlichen Schwerpunkte und Methoden sind im Rahmenprogramm des IAP ausführlich dargestellt. Der vorliegende Arbeitsplan richtet sich nach dem aktuellen Rahmenplan und wurde daher nicht nach Abteilungen, sondern nach Forschungsthemen gegliedert. Damit soll die abteilungsübergreifende Bearbeitung von wissenschaftlichen Aufgaben verdeutlicht werden.

Die Darstellung der experimentellen und theoretischen Arbeiten konzentriert sich auf Aktivitäten am IAP. Selbstverständlich ist die Zusammenarbeit mit anderen Arbeitsgruppen, z. B. für die Verwendung von Satellitendaten oder für die Entwicklung von Modellen, auch in Zukunft wichtiger Bestandteil der Aktivitäten in unserem Hause.

2 Kurzdarstellung

Einer Anregung des Beirates folgend, möchten wir im folgenden die wichtigsten wissenschaftlichen Ziele und deren übergeordnete Bedeutung zusammenfassen.

- Messungen von Schwerewellen und Gezeiten

Mit den teilweise erstmals möglichen Lidar-Messungen bei Tageslicht werden die Temperaturmessungen auf Gezeiten und Schwerewellen hin untersucht. Dies betrifft die Messungen in Kühlungsborn, auf ALOMAR und in Davis. Mit DORIS stehen erstmals auch Windmessungen in der oberen Stratosphäre/unteren Mesosphäre zur Verfügung, die ebenfalls auf Schwerewellen untersucht werden sollen. Dies erlaubt u. a. eine Analyse der Aufteilung von potentieller und kinetischer Energie in Schwerewellen, was von grundsätzlicher Bedeutung für ein besseres Verständnis dieser Wellen ist. Durch die Kombination verschiedener Radar- und Lidarmethoden liegen Windmessungen im gesamten Höhenbereich von

der Troposphäre bis zur unteren Thermosphäre vor. Dies ermöglicht neue Untersuchungen zur Ausbreitung und Dissipation von Schwerewellen.

- Kopplung Stratosphäre/Mesosphäre

Unsere Messungen in Davis (68°S) haben neue Fragen zum Einfluss der stratosphärischen Zirkulation auf die saisonale Variation der Mesosphärentemperatur aufgeworfen. Durch neue Messungen auf ALOMAR (69°N) in Verbindung mit Modellrechnungen soll dieser Einfluss auch in der Nordhemisphäre untersucht werden. Es geht u. a. darum, die involvierten physikalischen Prozesse im Detail zu verstehen und vor allem die Unterschiede zwischen Süd- und Nordhemisphäre zu analysieren. Dabei spielt offensichtlich die dynamisch bedingte Umstellung der stratosphärischen Zirkulation auf Sommerbedingungen eine entscheidende Rolle. Wir wollen die Messungen in Davis weiter analysieren und neue Messungen, z. B. mit dem Fe-Lidar auf ALOMAR, durchführen. Durch die Kombination von Reanalysedaten und den Windmessungen am IAP wird ein Windprofil von der Troposphäre bis zur unteren Thermosphäre bestimmt. Damit können wir die Ausbreitungsbedingungen für verschiedene Wellen und deren Auswirkungen auf die Atmosphäre höhenabhängig untersuchen.

- Eisschichten und Radarechos in der Mesosphäre

Es gibt bezüglich NLC/PMSE/PMWE eine Reihe offener Fragen, die in den nächsten Jahren bearbeitet werden sollen. Dabei geht es im Grundsatz darum, einerseits die Physik dieser Schichten zu verstehen und daraus wichtige Aussagen über den Hintergrund abzuleiten, andererseits die Eisschichten als Tracer zu verwenden, z. B. für kleinskalige Wellen und Turbulenz. Das neue VHF-Radar MAARSY, neue Entwicklungen in der Lidartechnik und hochaufgelöste photographische Aufnahmen liefern bisher beispiellose Details über die zeitlich/räumliche Variation der Eisschichten und deren Ursachen. Der Vergleich unserer Messungen mit Satelliten-Beobachtungen von AIM eröffnet den Blick auf globale Perspektiven der involvierten Prozesse. In den nächsten Jahren sollen die physikalischen Ursachen für PMWE¹ endgültig geklärt werden. PMWE werden mit MAARSY oft beobachtet und sind daher für eine Analyse des Zustandes der mittleren Atmosphäre (Turbulenz, Staubteilchen etc.) wichtig.

- ROMIC und Trends

Das IAP beteiligt sich mit insgesamt 4 Projekten (einschl. des Koordinatorenprojektes) an dem neuen Forschungsprogramm des BMBF, genannt ROMIC². Wir werden in diesem Zusammenhang die Bedeutung von mesoskaligen Wellen für die Zirkulation und den Transport von Spurengasen in der mittleren Atmosphäre untersuchen. Außerdem werden Trends in der mittleren Atmosphäre erforscht, die teilweise um ein Vielfaches größer sind als in der Troposphäre. Am IAP werden auch weiterhin experimentelle und theoretische Untersuchungen durchgeführt, die für ROMIC von Bedeutung sind, auch wenn es dazu kein eigenes Projekt gibt. Es geht im Grundsatz darum, ein physikalisches Verständnis von Prozessen zu gewinnen, die u. a. für großskalige Klimamodelle relevant sind.

- Turbulenz

Am IAP wird seit einiger Zeit die Problematik der physikalischen Konsistenz von Parametrisierungen kleiner Skalen untersucht. Es wurden eine Reihe von Verbesserungen gegenüber konventionellen Methoden eingeführt. Die Erzeugung von Turbulenz durch brechende Schwerewellen in der MLT³-Region ist ein ideales Beispiel, um Zirkulations- und

¹Polar Mesosphere Winter Echos

²Role of the Middle Atmosphere in Climate

³Mesosphere-Lower Thermosphere

Turbulenzmodelle mit Messungen zu vergleichen und so zu neuen Erkenntnissen zu gelangen. Dieses Alleinstellungsmerkmal des IAP erhält mit den bewährten bzw. in jüngster Zeit neu etablierten experimentellen Methoden (MAARSY, DORIS, Höhenforschungsraketen, Ballons, MISI) neue Perspektiven. Gleiches gilt für die Fortschritte hinsichtlich der IAP-eigenen Zirkulationsmodelle mit sehr hoher Auflösung (ICON-IAP und KMCM) und den damit verknüpften Turbulenzmodellen. Wir wollen zukünftig die Rolle von Schwerewellen und Turbulenz sowohl für Trends in der MLT als auch grundsätzlich für die Mikrophysik von Eisteilchen studieren. Auf Basis der neuen Version von KMCM soll im Rahmen von ROMIC abgeschätzt werden, welche möglichen Konsequenzen sich aus den am IAP entwickelten Turbulenzmodellen für Klimaszenarienrechnungen ergeben. Im Rahmen des Leibniz-Projektes MATMELT soll untersucht werden, inwieweit die Schwerewellenspektren in der MLT ähnlich wie in der Troposphäre den Ähnlichkeitsgesetzen geschichteter Turbulenz unterliegen. Entsprechende Messungen sollen u. a. zur Validierung eines sich gegenwärtig in der Entwicklung befindlichen Turbulenzmodells genutzt werden. Das IAP ist weiterhin bestrebt, der Wissenschaftsgemeinschaft IAP-eigene theoretische Entwicklungen zugänglich zu machen, und folgt damit einer Anregung des Wissenschaftlichen Beirates.

- Wellenmischen

In Studien des IAP im Rahmen von ILAWO hat sich herausgestellt, dass das vertikale Mischen durch Schwerewellen wesentlich zum Transport von Spurenstoffen in der mittleren Atmosphäre beiträgt und damit die Photochemie beeinflusst. Am IAP werden zukünftig die Konsequenzen dreidimensionaler Mischungsvorgänge im Rahmen mehrerer neuer Projekte für die mittlere Atmosphäre untersucht (Leibniz-Projekt MATMELT, DFG-Projekt BEDOC, ROMIC-Projekt METROSI). Dies betrifft u. a. Abschätzungen der mittleren Transportwege, der effektiven Mischungskoeffizienten, der Energiekaskade und der Konsequenzen für die Photochemie. Neben der Anwendung verschiedener Modelle und des Konzeptes der 3D Brewer-Dobson-Zirkulation sollen hierzu Turbulenzmessungen mit Radars, Ballons und Höhenforschungsraketen durchgeführt werden. Insbesondere werden die Berechnungen von Windfeldern und Mischungskoeffizienten aus Satellitenmessungen im Rahmen von BEDOC weiterentwickelt, und die Theorie der skaleninvarianten Turbulenzmodellierung wird auf Spurenstoffe erweitert. Weiterhin wird ein neu am IAP entwickeltes theoretisches Konzept für den momentanen Massentransport, der aufgrund von Transienz und dissipativer Effekte zustande kommt, zur Diagnostik angewendet.

3 Erforschung der Mesosphäre

3.1 Temperaturmessungen

Die Temperatur-Klimatologie der mittleren Atmosphäre ist in den vergangenen Jahren durch boden- und satellitengestützte Messungen erheblich erweitert worden. Dennoch weisen die vorhandenen Beobachtungen bzgl. räumlicher und zeitlicher Abdeckung sowie Genauigkeit immer noch substantielle Lücken auf. Dies betrifft insbesondere die tageszeitliche Abdeckung einschließlich Gezeiten (siehe Kapitel 4.1.1) und die zeitliche Variation auf kleinen Skalen. Die am IAP entwickelte Methode, Temperaturen von der Troposphäre bis zur unteren Thermosphäre zu messen, ist in den letzten Jahren dazu verwendet worden, eine erste Klimatologie der thermischen Struktur über Kühlungsborn und über ALOMAR zu erstellen. Diese Messungen sollen fortgesetzt und erweitert werden. Dabei geht es auch darum, die Variabilität der Temperaturen auf allen verfügbaren Skalen zu untersuchen. Dies betrifft Wellen und Turbulenz, sowie tageszeitliche, monatliche, interannuale, dekadische und solare Variationen. Von Dezember 2010 bis Januar 2013 war unser transportables Fe-Lidar auf der australischen Station Davis (68°S) stationiert.

Damit liegt zum ersten Mal eine genaue Klimatologie in der Mesosphäre/unteren Thermosphäre (MLT) in polaren Breiten der Südhemisphäre vor. Die Messungen sollen im Hinblick auf hemisphärische Besonderheiten und interhemisphärische Unterschiede untersucht werden. Wir erwarten daraus wichtige Erkenntnisse über physikalische Prozesse, die die thermische Struktur der MLT bestimmen.

Durch Abstimmen der Laserfrequenz relativ zur Jod-Linie lässt sich mit DORIS auch die Doppler-Verbreiterung des Rayleigh-Signals vermessen und daraus Temperaturen ableiten⁴. Aus dem Vergleich mit den Temperaturprofilen aus der Dichte-Integration ergibt sich damit die Möglichkeit, den Aerosolanteil am rückgestreuten Signal zu ermitteln und somit Aerosolprofile bis in die Mesosphäre zu messen. Aerosol-freie Rückstreuung ergibt sich auch durch Raman-Streuung an N₂, was unter optimalen Bedingungen bis in die untere Mesosphäre funktionieren sollte. Dieses Verfahren soll in den nächsten Jahren erprobt werden.

3.1.1 Entwicklungen bei den RMR-Lidars in Kühlungsborn und auf ALOMAR

Die Temperaturmessungen mit dem RMR-Lidar in Kühlungsborn sollen fortgesetzt, optimiert und für die Beantwortung geophysikalischer Fragestellungen verwendet werden. Dabei eröffnet die vor kurzem entwickelte Tageslichtfähigkeit neue Perspektiven. Durch eine weitere Unterdrückung des Hintergrundsignals, z. B. durch Polarisationsfilter im Nachweiszweig werden die Messungen weiter optimiert. Schönwetterperioden erlauben mehrtägige durchgängige Messungen und damit die gleichzeitige Untersuchung von Schwerewellen, Gezeiten und planetaren Wellen, sowie den Vergleich mit anderen Messungen von Radars und MISI⁵. Durch eine weitere Verbesserung der Systemkontrolle soll die Flexibilität des Gesamtsystems erhöht und der Betrieb so gut wie möglich automatisiert werden. Die für das RMR-Lidar in ALOMAR entwickelte Technik zur Windmessung (DORIS) soll in Kühlungsborn implementiert werden, und zwar zunächst für vertikale Winde, und später auch für horizontale Winde (durch den Bau neuer Teleskope). In Zusammenarbeit mit dem ILT⁶ wird z. Zt. die Möglichkeit untersucht, Dioden-gepumpte Nd:YAG-Laser zu entwickeln. Dies könnte u. a. die Leistungsfähigkeit unserer Lidars erheblich steigern und damit neue geophysikalische Möglichkeiten erschließen.

Die Bestimmung von Temperaturprofilen aus den regulären RMR-Lidarmessungen bei ALOMAR ist weiterhin ein zentraler Bestandteil der experimentellen Tätigkeiten am IAP. Zusammen mit den Windmessungen mit Lidars ist es erstmals möglich, den kinetischen und potentiellen Anteil der Schwerewellenenergie aus einer Messung zu bestimmen. Der Schwerpunkt der technischen Arbeiten besteht darin, die Stabilität des Systems weiter zu erhöhen, um auch kompliziertere Messzyklen im operationellen Betrieb zu ermöglichen. Hierdurch wird die Messhäufigkeit erhöht und eine bessere Beschreibung der thermischen und dynamischen Struktur der Atmosphäre erreicht. Insbesondere können transiente Phänomene besser untersucht werden. Hierzu gehört die weltweit erste Möglichkeit, permanente Temperatur- und Windmessungen in mesosphärischen Inversionsschichten oder während stratosphärischer Erwärmungen durchzuführen.

3.1.2 Entwicklungen beim mobilen und stationären K/Fe-Lidar

Die mit dem mobilen Fe-Lidar in Davis gewonnenen Messungen sollen analysiert, interpretiert und veröffentlicht werden. Dies betrifft auch den Vergleich mit weiteren Messungen auf Davis, wie z. B. mit dem VHF-Radar des AAD⁷. Das Lidar wurde nach seinem Einsatz in der Antarktis wieder zum IAP verbracht, dort überholt und im Sommer 2014 nach ALOMAR transportiert.

⁴Das funktioniert allerdings nur bei vertikaler Strahlrichtung, d. h. in diesem Mode sind keine Messungen horizontaler Winde möglich.

⁵Microwave Spectrometer at IAP zur Messung von Wasserdampfprofilen

⁶Fraunhofer-Institut für Lasertechnik, Aachen

⁷Australian Antarctic Division

Auf ALOMAR sollen mit diesem Lidar u. a. erstmals Gezeiten in Temperaturen und Fe-Schichten untersucht werden.

Ebenfalls in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut in Aachen (ILT) wird z. Zt. ein Dioden-gepumpter Laser für unsere Resonanz-Lidars entwickelt, der im Vergleich zum jetzigen System bessere Eigenschaften verspricht und neuartige Messmöglichkeiten erschließen soll. Die ersten Laborexperimente am ILT sind erfolgreich abgeschlossen worden. Wir rechnen mit dem ersten Test eines vollständigen Lidarsystems im Laufe der nächsten 2 Jahre. Der Betrieb des stationären Fe-Lidars in Kühlungsborn wurde zu Gunsten des mobilen Systems stark eingeschränkt und soll mit der Fertigstellung des neuen Lidars wieder aufgenommen werden.

3.1.3 In situ-Messungen von Temperaturen mit Raketen

Das in situ-Verfahren für Dichte- und Temperaturmessungen, welches am IAP seit vielen Jahren etabliert ist, besteht aus einer Messung mit Ionisationsröhren. Diese Methode soll in Zukunft so weiterentwickelt werden, dass 3D-Messungen von Temperatur und Turbulenz möglich sind. Dabei wird die bereits sehr gute Höhenauflösung (~ 100 m) noch weiter verbessert (einige Meter).

Darüber hinaus wird derzeit als drittes in situ-Verfahren mit dem Lehrstuhl für Allgemeine Elektrotechnik der Universität Rostock und einem mittelständischen Unternehmen in Rostock die sogenannte „aktive fallende Kugel“ entwickelt. Dieser Sensor soll es in Zukunft ermöglichen, sowohl Dichte als auch Temperatur gleichzeitig und mit hoher vertikaler Auflösung (~ 100 m) zu messen. Ein Prototyp wurde bereits unter Laborbedingungen getestet und soll im Rahmen des laufenden Hfr-Projektes⁸ WADIS unter realen Bedingungen erprobt werden.

3.1.4 Temperaturen aus Meteorechos

Die Bestimmung von Mesopausentemperaturen aus der Abklingzeit von Meteoren wurde in den vergangenen Jahren immer weiter entwickelt und verbessert. Dabei wurde das erforderliche empirische Temperaturgradientenmodell durch den Vergleich mit Satellitendaten über die mittlerweile sehr langen Zeitreihen immer weiter modifiziert und ist mittlerweile sehr robust. Die Meteorradartemperaturen werden zur Untersuchung von Kopplungsprozessen und der planetaren Wellenaktivität eingesetzt. Der Vorteil dieser Methode liegt in der Kontinuität der Zeitreihen im Vergleich zu anderen Fernerkundungsverfahren.

Ein anderer Aspekt der Beobachtung der Meteorabklingzeiten ist die Bestimmung des ambipolaren Diffusionskoeffizienten. Während der Sommermonate ist deutlich zu erkennen, dass durch die Gegenwart von NLC Eisteilchen die Diffusion schneller stattfindet und die Meteorschweife in diesem Höhenbereich schneller abklingen. Wir planen diese Messungen mit Simulationen zu ergänzen, um die Methode der Meteoratemperaturmessungen aus der Abklingzeit noch weiter zu verbessern. Ziel ist es aus der Messung der Abklingzeit auf die Gegenwart von Eisteilchen schließen zu können.

3.2 Windmessungen

3.2.1 In situ-Windmessungen mit Raketen

Das im Abschnitt 3.1.3 erwähnte in-situ Verfahren wird auch für Messungen der Hintergrundatmosphäre, bzw. des Windfeldes verwendet. Der Vorteil dieser Methode im Vergleich zu den bodengebundenen Techniken besteht darin, dass die Messungen unabhängig von den Wetterbedingungen und den Höhenbereich von ca. 90 km bis zur Troposphäre abdecken.

⁸Hfr=Höhenforschungsraketen

3.2.2 Entwicklungen der VHF-, MF- und Meteorradare

Um die Qualität und Kontinuität der Radarmessungen am IAP aufrecht zu erhalten und zu verbessern sind regelmäßig Modernisierungen an der Hard- und Firmware der Radarsysteme notwendig. Bei den neuen Entwicklungen wird auf Synergien zwischen den verschiedenen Radars geachtet, so dass erfolgreiche Entwicklungen auch schnell auf andere Systeme übertragen werden können.

Die MF-Radars in Andenes und Juliusruh sind seit mehr als 10 Jahren im kontinuierlichen Betrieb. In den nächsten Jahren ist daher eine technische Modernisierung der Radarsteuerung und der Datenerfassungssysteme geplant. Ziel dieser Maßnahmen ist die Verbesserung der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Messungen, die Verbesserung der Signalqualität und damit der Empfindlichkeit der Systeme durch den Einsatz moderner Empfangstechnik sowie die Möglichkeit des simultanen Schwenk- und Mehrkanalbetriebs zur interferometrischen Korrektur des Radarstrahls und gleichzeitigen und hochaufgelösten Bestimmung von Wind, Turbulenz und Elektronendichten.

Desweiteren entwickelt das IAP ein neues Vorwärtsstreumeteorradar zur Messung horizontal aufgelöster Windfelder in der MLT. Dieses Meteorradarkonzept führt den Namen MMARIA (**M**ulti-Frequency **M**ulti-Station **A**gile **R**adar for the **I**nvestigation of the **A**tmosphere). Dazu wurde versuchsweise ein Testsystem zwischen Juliusruh und Kühlungsborn installiert. Die Station in Kühlungsborn nutzt die von Juliusruh ausgesendeten Radarimpulse und detektiert die Meteore in Vorwärtsstreuung. Beide Systeme sind synchronisiert, so daß es möglich ist, die Position von Meteoren sowie die radiale Geschwindigkeit auch an der passiven Station eindeutig zu bestimmen. Die Kombination beider Datensätze ermöglicht es, aus zwei verschiedenen Blickwinkeln das selbe Volumen abzutasten. Es ist beabsichtigt, dieses Verfahren zu einem Netzwerk zu erweitern und weitere Stationen hinzuzufügen. Das IAP ist weltweit die einzige Einrichtung, die technisch in der Lage ist, ein vollständig synchronisiertes Meteorradar Netzwerk zu installieren und daraus horizontal aufgelöste Windfelder abzuleiten.

3.2.3 Dynamik aus Radarbeobachtungen

Bei den Windmessungen mit Radars liegt zum einen der Schwerpunkt auf der Kontinuität der Messungen aber auch auf der Innovation durch neue Experimente. Dadurch ist es möglich, die langen Messzeitreihen der MF- und Meteorradare in ihren Eigenschaften zu erhalten, aber auch neue Verfahren der Wind und Wellenanalyse mit den erweiterten Fähigkeiten der VHF-Radare zu erproben.

Ein Schwerpunkt in den Windmessungen der Meteor- und MF-Radars liegt auf der Untersuchung planetarer Wellen und Gezeiten in Kombination mit Reanalysedaten zum besseren Verständnis von Kopplungsprozessen (siehe auch Kap. 4.1). Das IAP beabsichtigt für diese Arbeiten die Installation weiterer Meteorradare um auch die Längenabhängigkeit genauer untersuchen zu können.

Darüber hinaus werden die Windmessungen mit Meteor-, MF- und VHF-Radars auch genutzt, um Schwerewellen generell detaillierter zu untersuchen. Die kontinuierlichen Messungen der Meteor- und MF-Radars sollen dabei weiter genutzt werden um eine Klimatologie der Schwerewellenaktivität fortzuführen. Desweiteren werden die Systeme zur Unterstützung von Raketenkampagnen oder zu Fallstudien herangezogen um einzelne Schwerewellenereignisse detailliert zu untersuchen und die Wellen in ihren Eigenschaften zu klassifizieren.

Eine besondere Rolle in der Beobachtung hochaufgelöster Schwerewellen spielt MAARSY. In den vergangenen Jahren wurden verschiedene komplexere Windanalysealgorithmen entwickelt, die es erlauben kurzperiodische Schwerewellen zu untersuchen. So konnte ein Softwarepaket für ein sogenanntes „Velocity Azimuth Display“ (VAD) und das „Volume Velocity Processing“ (VVP) entwickelt werden. Beide Methoden ermöglichen es, die horizontale Variabilität des Windfeldes

und somit dessen Divergenz, sowie die Streckungs- und Scherungsdeformation abzuschätzen. Dieses Softwarepaket beinhaltet auch ein Modul zur Bestimmung der tatsächlichen Strahlposition (siehe auch Kap. 4.2.3).

Diese Windanalyse bildet die Grundlage für die Charakterisierung von kurzperiodischen Schwerewellen. So wurde ein Verfahren entwickelt, wie aus den horizontal aufgelöst gemessenen Radialwindresiduen die horizontale Wellenlänge und Phasengeschwindigkeit von monochromatischen Schwerewellen abgeschätzt werden kann. Aus den ersten Messungen konnte eine Klimatologie von kurzperiodischen Schwerewellen und ihren Eigenschaften ermittelt werden. Auch in Zukunft werden die Mehrstrahlexperimente mit dieser Methode hinsichtlich des Auftretens von Schwerewellen untersucht werden, um eine umfangreiche Klimatologie von Schwerewellen über Andenes zu erhalten. Insbesondere sollen Ereignisse von brechenden Schwerewellen und die Wechselwirkung mit dem Grundstrom und den Gezeiten abgeschätzt werden.

Die mit MAARSY begonnenen Arbeiten in der Anwendung komplexerer Messverfahren werden in Zukunft auch auf die Meteorradare übertragen. Das MMARIA-Konzept ermöglicht es, erstmals horizontal aufgelöst das Windfeld zu messen, ohne dass weitere Annahmen erforderlich sind. Die Methode soll in Zukunft noch weiter entwickelt werden, wozu Regularisierungsmethoden (z.B. Tikonov-Regularisierung) zur Bestimmung des Windfeldes angewendet werden sollen. Zusätzlich wird der Höhenbereich der Radarwindmessungen bis in die untere Thermosphäre erweitert, was es uns ermöglicht, die Kopplung zwischen Mesosphäre und unterer Thermosphäre präzise zu untersuchen (Kap. 3.2.2). Desweiteren werden die begonnenen Arbeiten zur gleichzeitigen Analyse von Windbeobachtungen mit Radars und Temperaturbeobachtungen mit Lidars weitergeführt. Dabei soll etwa geklärt werden, wie sich Schwerewellenenergien im Mittel auf kinetische und potentielle Energie aufteilen und wie repräsentativ Messungen nur einer der beiden Größen sind.

3.2.4 Windmessungen mit Lidars

Inzwischen werden mit DoRIS⁹ Winde in der mittleren Atmosphäre, d. h. von ca. 15 bis 80 km, gemessen. Damit stehen in Kombination mit anderen Methoden zum ersten Mal durchgehende und regelmäßige Windmessungen von der Troposphäre (Ballons) bis zur unteren Thermosphäre (Radars) zur Verfügung. Hierdurch kann z. B. die Ausbreitung von Wellen in der Atmosphäre besser untersucht werden. Vor kurzem wurden erstmals mit DORIS Schwerewellen in Winden gemessen, was in Kombination mit den Temperaturmessungen erstmals die Möglichkeit eröffnet, die Aufteilung von potentieller und kinetischer Energie zu untersuchen. In den nächsten Jahren soll DORIS in den operationellen Betrieb überführt werden, um routinemäßige Beobachtungen zu ermöglichen. Die Lidardaten sollen auch im neuen EU-Projekt ARISE¹⁰ verwendet werden, wo es u. a. um die Ausbreitung von Infraschall in der Atmosphäre geht. Vergleichsmöglichkeiten ergeben sich u. a. mit MAARSY, sofern die Rückstreuung groß genug ist, z. B. in PMWE.

3.3 NLC, PMSE und PMWE

Die offenen wissenschaftlichen Fragen bzgl. NLC, PMSE und PMWE sind im wissenschaftlichen Rahmenprogramm ausführlich dargestellt. Dort ist auch erläutert, bei welchen Fragestellungen sich eine Zusammenarbeit mit satellitengestützten Messmethoden anbietet. Im folgenden werden nur einige Aspekte der zukünftigen Aufgaben aufgeführt.

⁹Doppler Rayleigh Iodine System

¹⁰Atmospheric dynamics Research InfraStructure in Europe

3.3.1 Gleichzeitige Messungen von NLC, (P)MSE, PMWE und Temperaturen

Der gemeinsame Datensatz von NLC, MSE und Temperaturen über Kühlungsborn ist weiterhin sehr begrenzt, da die wechselseitigen Einschränkungen der Messtechnik gleichzeitige Messungen bisher verhinderten: MSE treten nur bei Tageslicht auf und Lidars konnten bisher nur nachts messen. Durch die Entwicklung der Tageslichtfähigkeit des RMR-Lidars hat sich diese Situation erheblich verbessert. Beim Übergang Tag/Nacht, bzw. umgekehrt, kann man jetzt z. B. den Einfluss der Elektronendichte auf die MSE-Stärke systematisch untersuchen. Unter Zuhilfenahme der Radarwinde läßt sich damit die thermische und dynamische Struktur der Mesopausenregion mit (bzw. ohne) dem Vorhandensein von Eisteilchen deutlich besser charakterisieren. Es geht dabei z. B. um die Frage, welche Bedeutung die lokale Hintergrundatmosphäre für die Existenz von NLC und MSE in mittleren Breiten hat und welche Rolle die Advektion von Eisteilchen aus polaren Breiten spielt. Aus den NLC-Messungen in Kühlungsborn wissen wir inzwischen, dass hierbei Gezeitenwinde entscheidend sind, wohingegen Temperaturen von sekundärer Bedeutung zu sein scheinen. Die Modellierung von Trajektorien von Eisteilchen mit LIMA wird die Interpretation unterstützen.

Mit den Möglichkeiten des MAARSY-Radars werden die Vergleiche von PMSE und NLC erheblich verbessert, weil a) die PMSE-Messungen jetzt ebenfalls im sehr kleinem Volumen möglich sind, und b) weil MAARSY einen Einblick in die horizontale Verteilung von PMSE ermöglicht. Zudem erlaubt die höhere Empfindlichkeit von MAARSY, PMWE neuerdings mit relativ großer Häufigkeit zu detektieren. Damit kann erstmals die Physik dieser Echos systematisch untersucht werden. In diesem Zusammenhang ist die Möglichkeit, Aerosole mit Lidars bis in die Mesosphäre zu vermessen, von großer Bedeutung, weil damit deren Anteil an der turbulenten Rückstreuung quantifiziert werden kann (siehe Kapitel 3.3.6).

Bei den Messungen auf Davis hat sich gezeigt, dass PMSE nicht unbedingt dort auftreten, wo dies aufgrund niedriger Temperaturen zu erwarten wäre. Insbesondere verschwindet die PMSE gelegentlich bei extrem niedrigen Temperaturen. Dieser Sachverhalt soll durch theoretische Studien aufgeklärt werden. Außerdem soll die Frage geklärt werden, ob es ähnliche Zusammenhänge auch über ALOMAR gibt.

Ferner legen die vom IAP in Spitzbergen durchgeführten Temperaturmessungen im Höhenbereich von NLC und PMSE nahe, dass die Eisteilchennukleation sowohl durch klein- als auch großskalige Temperaturfluktuationen maßgeblich beeinflusst wird. Über den quantitativen Einfluss dieser Wellenstörungen auf die Eismikrophysik ist aber derzeit so gut wie nichts bekannt. Um diese Lücke zu schließen, sollen in den nächsten Jahren weltweit erstmalig horizontal hochaufgelöste Messungen der Eigenschaften dieser Wolken sowie von Temperaturen und Winden durchgeführt werden. Dazu werden horizontal aufgelöste Messungen von PMSE mit dem frei schwenkbaren Strahl des MAARSY sowie den schwenkbaren Teleskopen des ALOMAR RMR-Lidars durchgeführt werden. Diese Messungen sollen durch kombinierte mikrophysikalische/dynamische Rechnungen mit Hilfe einer Kombination des CARMA¹¹-Modells mit KMCM komplementiert werden. So kann eine möglichst konsistente Beschreibung der Wechselwirkung von Mikrophysik mit Turbulenz, Schwerewellen und großräumiger Dynamik erreicht werden. Die Resultate dieser Untersuchungen sollen dann mit Hilfe von LIMA im Hinblick auf ihre globale Relevanz untersucht werden.

3.3.2 Vergleich der PMSE-Stärke an unterschiedlichen Orten

Mit der Entwicklung einer Methode zur Absolutkalibrierung von VHF-Radars hat das IAP die Grundlage gelegt, um Messungen in verschiedenen geographischen Breiten und Längen erstmalig systematisch und quantitativ vergleichen zu können. Damit ist es gelungen, Unterschiede von

¹¹Community Aerosol and Radiation Model for Atmospheres

PMSE in der Arktis und der Antarktis zweifelsfrei nachzuweisen. So treten PMSE in der Antarktis deutlich seltener auf als in der Arktis und sind gleichzeitig auch schwächer. Diese Vergleiche werden auch in Zukunft weiter geführt. Aufgrund der langjährigen guten Zusammenarbeit mit den australischen Kollegen der Davisstation (68°S, 78°E) konnte das dortige VHF-Radar absolut kalibriert werden und es wurde auch der weitere Datenzugriff ermöglicht, um diese Arbeiten fortzuführen. Desweiteren plant das IAP ein mobiles VHF-Radar mit einer kleinen Antenne um auch an anderen Standorten zum einen die Längenabhängigkeit als auch Breitenabhängigkeit weiter erforschen zu können. Als erster möglicher Standort des mobilen VHF-Radars ist Sondrestrom (67°N, 51°W) in Grönland geplant. Als weiterer Standort wird Poker Flat in Alaska (65°N, 147°W) diskutiert, wo gemeinsame Messungen mit dem Poker Flat Incoherent Scatter Radar (PFISR) auf verschiedenen Frequenzen möglich wären. Sondrestrom und Poker Flat liegen ebenso wie Andenes im Polarlichtoval, und es kann angenommen werden, dass man hier auch mit einer deutlich kleineren Antenne gute PMSE-Beobachtungen durchführen kann.

3.3.3 Variabilität und Eigenschaften von NLC/PMSE auf kleinen und mittleren Skalen

In den nächsten Jahren soll es verstärkt darum gehen, die beobachteten Variabilitäten von NLC/PMSE zu analysieren und daraus geophysikalische Aussagen abzuleiten, z. B. bezüglich Schwerewellen und Turbulenz. Dies gilt für NLC und PMSE alleine, aber auch für die Korrelation zwischen beiden Messgrößen. Inzwischen werden NLC mit Lidars schon in jedem einzelnen Puls nachgewiesen, womit die zeitliche Auflösung auf wenige Sekunden verbessert wird. Hinzu kommen Kamera-Aufnahmen aus niedrigeren Breiten, die eine horizontale (bzw. zeitliche) Auflösung von ca. 10 m (bzw. 0,5 sec) ermöglichen. Damit erschließt sich ein Bereich zeitlicher und räumlicher Variationen, die mit keiner anderen Technik erreichbar ist. Die noch zu verifizierende Möglichkeit von Lidars, NLC unter leicht verschiedenen Blickwinkeln zu detektieren (ohne das Teleskop zu bewegen) wird hierbei von Nutzen sein (Stichwort: Tomographie von NLC). Die Interpretation der Messungen soll mit Modellrechnungen von NLC auf der Basis von CARMA (angetrieben mit dynamischen Feldern von KMCM) sowie durch direkte numerische Simulationen des Brechens von Schwerewellen unterstützt werden.

Neben Schwerewellen und Turbulenz sind auch thermische Gezeiten von großer Bedeutung für NLC. Der ALOMAR-Datensatz wird in diesem Zusammenhang bereits jetzt intensiv genutzt und zukünftig durch die seit kurzem verfügbare Tageslichtfähigkeit des RMR-Lidars in Kühlungsborn kann dies nun auch in den mittleren Breiten untersucht werden.

Gewisse Eigenschaften von Eisschichten (z. B. deren Helligkeit) zeigen sowohl in Beobachtungen mit Lidars und Satelliten, als auch in Modellrechnungen mit LIMA einheitliche statistische Eigenschaften. Es sollen die zu Grunde liegenden physikalischen Ursachen für dieses Verhalten untersucht werden.

3.3.4 Solarer Zyklus in NLC/PMSE

NLC-Messungen von ALOMAR liegen seit 1997 vor und stellen diesbezüglich den weltweit umfangreichsten Datensatz dar. Die Messungen sollen fortgeführt werden, um langfristige Veränderungen zu studieren, insbesondere bzgl. des solaren Einflusses auf NLC. Die NLC-Messungen in Kühlungsborn ergänzen den vorhandenen Datensatz. Leider zeigt sich bzgl. des Einflusses des solaren Zyklus auf NLC kein einheitliches Bild: für einige Jahre zeigt sich die erwartete Anti-Korrelation, in anderen Perioden dagegen eine positive Korrelation. Mit Hilfe von LIMA soll geklärt werden, was die Ursache für die inter-annuale Variabilität von Eisschichten ist und welche Rolle dabei der solare Einfluss auf die Temperaturen und den Wasserdampf spielt. Dies ist u. a. für die Frage wichtig, ob NLC als Indikator für Trends in der Mesopausenregion verwendet werden können. In diesem Zusammenhang sollen auch Wasserdampfmessungen vom Boden

(WASPAM, MISI) als auch von Satelliten (ODIN, SOFIE, MLS) verwendet werden. Generell sollen die NLC-Messungen und die Modellrechnungen von LIMA mit Satellitenmessungen verglichen werden. Hierzu besteht bereits eine Kooperation mit den Teams von AIM und MIPAS.

3.3.5 **Eigenschaften von Eisteilchen**

Mit dem RMR-Lidar auf ALOMAR wird die Größe und Anzahldichte von NLC-Teilchen untersucht, und zwar inzwischen zeitlich aufgelöst. Diese Parameter sind von besonderem Interesse, da sich hieraus unter anderem die in den Wolken gebundene Wassermenge bestimmen lässt. Durch die Erweiterung des bestehenden Datensatzes sollen interannuale Veränderungen der Teilcheneigenschaften untersucht werden. Dabei wird der Lidardatensatz mit Satellitenbeobachtungen ergänzt und mit den Wasserdampf-Messungen auf ALOMAR und in Kühlungsborn verglichen.

Die Resultate von ALOMAR bezüglich des Zusammenhangs von Teilchenradius r und Verteilungsbreite, $s(r)$, spielen eine große Rolle für die Satellitenmessungen von AIM. Aus der Messung von $s(r)$ lässt sich auf die Existenz von Turbulenz schließen. In Zukunft soll untersucht werden, ob die Verteilungsbreite mit weiteren NLC-Größen, wie z. B. mit der vertikalen Ausdehnung der Schicht, korreliert.

Durch die hohe spektrale Auflösung des Eisenlidars sollte es grundsätzlich möglich sein, die Masse der Eisteilchen aus der spektralen Breite zu bestimmen. Da gleichzeitig das Volumen der Teilchen mit dem ALOMAR RMR-Lidar gemessen wird (aus der rückgestreuten Intensität), kann man erstmals die Massendichte der Eisteilchen bestimmen.

3.3.6 **Winterechos: (P)MWE**

Die physikalische Ursache für das Auftreten mesosphärischer Winterechos in polaren (PMWE) und in mittleren (MWE) Breiten wurde in den vergangenen Jahren ausführlich am IAP untersucht, und es wurden erhebliche Fortschritte erzielt. Es sind allerdings Fragen zu wichtigen Details noch ungeklärt, wie z. B. die Rolle von Turbulenz und Aerosolen.

MAARSY erlaubt die Erforschung der dreidimensionalen Morphologie dieser Echos. Erste 3D-Messungen mit MAARSY haben gezeigt, dass die zeitliche und räumliche Entwicklung der PMWE mit dem Phasenverlauf einer sich gegen den Grundstrom bewegenden und brechenden Schwerewelle beschrieben werden kann. Das bedeutet, dass innerhalb dieses Echos erhöhte Turbulenz zu erwarten ist. Indirekt wurde dies mit den inkohärenten Messungen des EISCAT-VHF-Radars (224 MHz) bestätigt, aber noch nicht quantifiziert.

Die mit MAARSY gewonnenen Statistiken zeigen, dass die Winterechos wesentlich häufiger und in einem größeren Höhenbereich auftreten können, als es bisher mit anderen Radars beobachtet wurde. Ihr Auftreten ist auch nicht allein auf die Wintermonate beschränkt, wie bisher angenommen wurde. Damit werden nun nahezu kontinuierliche VHF-Radar-Beobachtungen in der gesamten Mesosphäre möglich. Winde und Turbulenz können somit auch im Höhenbereich von etwa 45 bis 80 km bestimmt werden, der bisher unter winterlichen Bedingungen nur mit MF-Radars und einer wesentlich schlechteren Höhen- und Zeitauflösung zugänglich war.

Die physikalischen Prozesse, die mit dem Auftreten von mesosphärischen Winterechos verbunden sind, können in polaren Breiten mit den erwähnten bodengebundenen Radar-Geräten gründlicher als bisher möglich untersucht werden. Die Verbindung zwischen den Hochleistungsradars mit extrem schmalen Radarstrahl (EISCAT, Tromsø) und dem neuen MAARSY-Radar mit der Möglichkeit, mit dem Radarstrahl das Untersuchungsobjekt von Puls zu Puls horizontal zu scannen, erlaubt es, die physikalischen Eigenschaften der PMWE auf verschiedenen Frequenzen und unter Ausnutzung der Vorteile der jeweiligen Instrumente im Detail zu untersuchen und die offenen Fragen zu beantworten. Unter Einbeziehung weiterer Messungen, z.B. Winde und Wellen, die mit dem Saura-MF-Radar seit 2003 kontinuierlich gemessen werden, kann man den Einfluss von Neutralgasdynamik auf das Auftreten dieser Echos in Zusammenhang bringen.

Da MAARSY eine weltweit einmalige Leistungsfähigkeit besitzt und um etwa eine Größenordnung empfindlicher ist als andere VHF-Radars, ist es überhaupt zum ersten Mal möglich, eine Raketenkampagne zur Untersuchung von PMWE in dieser Qualität zu unterstützen. Die Messungen mit dem vom IAP entwickelten neuen MAARSY-Radar werden herangezogen, um PMWE zu identifizieren und somit die Startbedingungen für die instrumentierten Raketen zu definieren. Die Schwenkbarkeit des Radarstrahls von MAARSY erlaubt dabei zum ersten Mal nicht nur eine vertikale, sondern auch eine horizontale Vermessung von PMWE. Dies ermöglicht u. a. einen beispiellosen Vergleich von Radarmessungen mit insitu-Sondierungen entlang der Flugbahn der Höhenforschungsrakete. Die raketengetragenen Instrumente werden präzise Messungen der turbulenten Strukturen, der Neutralgasdichten und -temperaturen sowie von Meteorstaub und kleinskaligen Strukturen im Plasma liefern. Aus den daraus gewonnenen Daten lässt sich die Bedeutung von turbulenten Strukturen, Meteorstaub, Ionen und Elektronen für die Bildung von PMWE ableiten. Nach den bisherigen Messungen ist das Auftreten von PMWE offensichtlich mit einer erhöhten Elektronendichte verbunden, die z. B. durch den Einfall von solaren Teilchen oder geomagnetischen Störungen hervorgerufen sein kann. Klar ist aber auch, dass eine erhöhte Elektronendichte nur eine von mehreren Voraussetzungen für PMWE ist.

Zusammenfassend besteht das Ziel dieses Projektes darin, die Physik von PMWE zu ergründen. Dies dient u. a. dazu, die Rolle von PMWE als Monitor für dynamische Prozesse und für Meteorstaub in der Erdatmosphäre zu klären.

3.3.7 Turb3D: 3D-Messungen von kleinskaligen Strukturen

In Zukunft soll mit Hilfe von Höhenforschungsraketen erstmalig auch die dreidimensionale Verteilung von Turbulenz direkt bestimmt werden. Dazu wird im Rahmen des Technologieprojektes Turb3D ein Experiment entwickelt, in dem durch Auswurf zusätzlicher Sonden aus der Mutternutzlast sowohl die horizontale Struktur turbulenter Felder als auch Plasmastrukturen auf Skalen von einigen wenigen Metern bis Kilometern direkt vermessen werden sollen.

3.3.8 Eigenschaften von Aerosolen aus Radarspektren

Am IAP wurden in den letzten Jahren zwei Methoden zur Bestimmung der mikrophysikalischen Eigenschaften von geladenen Aerosolen aus Radarmessungen entwickelt und durch internationale Zusammenarbeit mit Kollegen etabliert.

Die erste Methode basiert auf Analysen von inkohärenten Spektren und lässt sich für Teilchen mit einem Radius zwischen ca. 0,5 bis 5 nm anwenden. Die zweite Methode basiert auf dem Verhältnis von Volumenreflektivitäten, die bei zwei verschiedenen Frequenzen in PMSE-Schichten (Polar Mesospheric Summer Echoes) gemessen werden. Aus der PMSE-Theorie ist der Zusammenhang zwischen Volumenreflektivität, Radarparametern, Turbulenzstärke, Elektronendichte und Teilchengröße bekannt. Sind beide Messfrequenzen genügend unterschiedlich, so hängt das Verhältnis der Volumenreflektivitäten hauptsächlich von der Teilchengröße ab. In einem ersten Schritt konnten mittlere Eisteilchenradien aus Datensätzen des EISCAT Svalbard Radars (ESR) und SOUSY Svalbard Radars (SSR) bzw. des EISCAT VHF und UHF Radars abgeleitet und die Methode durch Vergleiche mit Ergebnissen anderer unabhängiger Messungen bestätigt werden. In Zukunft ist geplant, diese Methode auch mit MAARSY (53,5 MHz) in Kombination mit dem ebenfalls am Standort ALOMAR vorhandenen Meteorradar (32,55 MHz) sowie mit dem geplanten mobilen VHF-Radar (53,5 MHz) und einem mobilen Meteorradar (32,55 MHz) an verschiedenen Standorten in polaren Breiten durchzuführen. Diese Kombination von Radarfrequenzen sollte auf den kleinsten erwarteten Größenbereich von Eisteilchen empfindlich sein (d.h. Radien im Bereich weniger Nanometer) und damit einen Einblick in die frühe Wachstumsphase der Eisteilchen erlauben. In Zukunft ist auch geplant aus der Kombination von gemessenen

PMSE-Volumenreflektivitäten mit MAARSY (53,5 MHz) und gemessenen Elektronendichten mit dem Saura-MF-Radar (3,17 MHz) Teilchendichten und Radien zu bestimmen.

Die Zerfallszeit eines Meteorschweifes ist ein Maß der ambipolaren Diffusion mit der ihn umgebenden Atmosphäre und lässt sich leicht aus den Radarmessungen ableiten. Dabei gibt es Höhenbereiche in denen diese Zerfallszeit sehr gut mit den theoretisch zu erwarteten Werten übereinstimmt. Abweichungen werden jedoch zu Zeiten mit NLC Teilchen beobachtet, zudem gibt es das Phänomen von sehr langlebigen Meteorschweifeln, die meist in Verbindung mit recht großen Meteoriten stehen. Eine mögliche Erklärung für die veränderten Lebenszeiten der Schweife ist durch die Gegenwart und dem Ladungszustand von Aerosolen gegeben. Neutrale und positiv geladene Teilchen beschleunigen den Diffusionsprozess, negative verlangsamen diesen. Eine mögliche Quelle mesosphärischen Aerosols sind die Meteorite selbst, da das verdampfte Material wieder kondensieren kann und sich zu nano-meter großen Staubteilchen, sogenannten „Meteoric Smoke Particle“, akkumuliert.

3.3.9 Eintrag meteorischen Materials in die Mesosphäre

Es wird allgemein angenommen, dass mesosphärische Eisteilchen an Meteorstaubpartikeln nukleieren. Als Quelle dieser Nukleationskeime wird der Masseneintrag in die MLT durch Mikrometeoroiden angenommen. Um die Variabilität der Nukleationskeime und ihren Einfluss auf die Mikrophysik mesosphärischer Eiswolken quantifizieren zu können, ist eine genaue Kenntnis des Masseneintrages unbedingt erforderlich und sollte im Idealfall kontinuierlich gemeinsam mit allen anderen mikrophysikalisch relevanten Größen gemessen werden. Entsprechende Messungen haben sich allerdings in der Vergangenheit als extrem schwierig herausgestellt und die veröffentlichten Ergebnisse weichen um bis zu einer Größenordnung voneinander ab. Neben satellitengestützten insitu-Verfahren bieten sich zur Messung des Massenflusses vor allem Radarmethoden an, wobei bei bekannter Anfangsgeschwindigkeit aus der Abbremsung der Meteorite ihre Masse und die Ablation bestimmt werden kann.

Bisher wurden solche Messungen vor allem mit sogenannten HPLA-Radars wie EISCAT, Arecibo und PFISR durchgeführt (HPLA = High Power Large Aperture), die alle über einen sehr schmalen Radarstrahl verfügen und somit auch nur eine sehr geringe Statistik sogenannter Kopfechoeobachtungen aufweisen. Zu dieser Klasse von Anlagen gehört nun ebenfalls MAARSY. Der Vorteil dieses neuen Systems besteht in der interferometrischen Möglichkeiten, die es erlauben, die Flugbahn der Meteoroiden durch den 3.6° schmalen Radarstrahl zu bestimmen. Diese verbesserte Auswertung der Daten erlaubt eine genaue Bestimmung des Orbits, sowie eine wesentlich genauere Abschätzung der Masse der extraterrestrischen Teilchen. Erstmals liegen damit kontinuierliche Messungen mit einem HPLA-Radar vor, und die Meteorflüsse können über längere Zeiträume bestimmt werden. Eine weitere Automatisierung dieser Beobachtungen ist geplant. Konventionellen Meteorradaranlagen, wie sie vom IAP an den Standorten in Juliusruh und Andenes betrieben werden, sind für einen anderen Massenbereich des Meteorflusses sensitiv und ermöglichen somit eine weitere Methode, aus Radar gestützten Beobachtungen Meteorflüsse abzuleiten. Diese Radars detektieren Meteorite, die im Vergleich zu den HPLA Systemen um etwa 1-2 Größenordnungen größer sind. Der kontinuierliche Betrieb dieser Anlagen erlaubt es, den saisonalen Verlauf des Meteorflusses und des daraus resultierenden Masseneintrags in die Mesosphäre/unterer Thermosphäre abzuschätzen. Zusätzlich ist das IAP in der Lage, mit dem neuen MAARSY Meteorkopfechos zu beobachten und somit auch für diesen Massenbereich absolute Flüsse abzuleiten. Damit sollte das IAP als derzeit weltweit einzige Einrichtung in der Lage sein, Massenflüsse über den gesamten relevanten Massenbereich zu bestimmen und die Ergebnisse für detaillierte Untersuchungen der Mikrophysik mesosphärischer Eisteilchen zur Verfügung zu stellen.

In diesem Zusammenhang sollen auch die neuen Möglichkeiten, Aerosole in der Mesosphäre

mit Hilfe von Lidars nachzuweisen, zum Einsatz kommen. Dies betrifft zunächst den Vergleich von Temperaturprofilen, die mit bzw. ohne Aerosolanteil ermittelt wurden (siehe Kapitel 3.1). Aerosole in der Mesosphäre können mit Hilfe des schmalbandigen Cabannes-Etalons ($\Delta\nu=120$ MHz) aber auch direkt nachgewiesen werden. Diese Messungen sind wichtig, um den nicht-turbulenten Anteil am PMWE-Signal ermitteln zu können. Erst damit ist die Interpretation von PMWE als klimatologisches Indiz für Turbulenz in der Mesosphäre quantitativ möglich.

Diese Untersuchungen sollen durch insitu Raketenmessungen der Ausbreitung von Schwerewellen von den Quellen in der Troposphäre bis zur Dissipation in der unteren Thermosphäre unterstützt werden, um so den Beitrag dieser Wellen zum Energiebudget der Mesosphäre und unteren Thermosphäre zu quantifizieren. Ferner soll gleichzeitig die Konzentration atomaren Sauerstoffs in der MLT erstmalig hochpräzise vermessen werden, was eine Quantifizierung der Strahlungs- und Chemiebeiträge zum Energiebudget erlaubt. Dazu werden im Rahmen des Raketenprojektes WADIS zwei Kampagnen durchgeführt, in denen unter stark unterschiedlichen geophysikalischen Bedingungen je eine Salve von 12 meteorologischen Raketen in Kombination mit je einer instrumentierten Höhenforschungsrakete gestartet werden. Die meteorologischen Raketen geben Aufschluss über die zeitliche Entwicklung des Windfeldes. Die Raketenmessungen werden von gleichzeitigen Lidar- und Radarmessungen ergänzt. Dabei erlaubt der Einsatz von MAARSY weltweit erstmalig, das Windfeld nicht nur vertikal zu vermessen, sondern auch die horizontale Variabilität des Windfeldes abzuschätzen. Diese instrumentierten Raketen werden mit Sensoren zur Vermessung der turbulenten Energiedissipationsrate, der Neutralgasdichte und der Temperatur sowie der Konzentration von atomarem Sauerstoff ausgerüstet sein. Durch redundante Instrumentenpakete auf der vorderen und hinteren Nutzlastebene wird es erstmalig möglich sein, die beobachteten Strukturen über eine horizontale Entfernung von etwa 30 - 50 km hin zu vermessen und somit die horizontale Struktur zu ermitteln.

3.4 Modellierung von Temperaturen und Eisteilchen mit LIMA

LIMA ist ein dreidimensionales globales Modell der Atmosphäre, das sich auf die Schwerpunkte thermische Struktur, Strahlung und Eisschichten konzentriert. LIMA wird seit einigen Jahren dazu verwendet, die räumliche und zeitliche Variabilität von PMSE und NLC zu untersuchen. Einige Fragestellungen wurden bereits erfolgreich bearbeitet und publiziert, z. B. bezüglich der Entwicklung von Eisschichten. Es bleibt aber noch eine Reihe von Fragen zu klären, wie z. B. zur Umverteilung von Wasserdampf ('freeze drying'). Außerdem ist noch nicht ausreichend verstanden, wie der Nukleationsprozess abläuft und welche Rolle dabei geladene Aerosole spielen. Die Modellergebnisse werden anhand von Lidar-, Radar-, und Satellitenmessungen validiert. Neben unseren eigenen Messungen sollen dazu auch verstärkt Beobachtungen von Satelliten, wie z. B. AIM, ODIN, MLS etc. hinzugezogen werden. Wir erwarten Aussagen zum Verständnis des Verhaltens der Wolken auf unterschiedlichen Zeitskalen, zur Wechselwirkung von Eisteilchen und der Hintergrundatmosphäre, bis hin zur Entwicklungsgeschichte der mit den Lidars und Radars gemessenen NLC- bzw. PMSE-Schichten (siehe auch Kapitel 5.3).

3.5 Die Photochemie der Mesosphäre unter dem Einfluss von Turbulenz, Schwerewellen und residueller Zirkulation

Mit dem IAP-eigenen Chemie-Transport-Modell MECTM¹² wurde untersucht, wie unterschiedliche dynamische Skalen die photochemischen Prozesse in der MLT beeinflussen. Unter Verwendung der mit KMCM berechneten dynamischen Felder wurde der direkte Einfluss von Schwerewellen auf die Mischung von Spurenstoffen aufgezeigt. In jüngster Zeit wurde das MECTM so erweitert, dass auch die Schichtenbildung von angeregtem Hydroxyl (OH*) berechnet wird. Es

¹²Mesospheric Chemistry Transport Model

stellt sich heraus, dass die Höhen und Intensitäten der OH*-Emissionsschichten großen Schwankungen unterliegen. Die jahreszeitlichen und breitenabhängigen Variationen hängen vor allem mit dem großräumigen Transport der beteiligten Spurenstoffe (wie etwa atomarer Sauerstoff) zusammen. In diesem Zusammenhang spielt auch die Mischung durch Schwerewellen eine wichtige Rolle. Insbesondere führt nach unseren Modellrechnungen die Annahme einer festen Emissionshöhe bei der Ableitung von kurzperiodischen Temperaturvariationen aus Emissionsmessungen zu signifikanten Fehlern.

Auf Basis eines neuen, auf der Spektralmethode basierenden Transportschemas für das KMCM soll die Kopplung von MECTM und KMCM zukünftig weiter verbessert werden. Dabei werden die prognostischen Konstituenten des MECTM als Tracer des KMCM implementiert und mit derselben Auflösung und turbulenten Diffusion wie die Dynamik behandelt. Erst durch diesen Schritt wird eine einheitliche Skalenwechselwirkung von Photochemie und Dynamik in einem hoch aufgelösten globalen Modell realisiert. In diesem Zusammenhang ist auch die Weiterentwicklung des Turbulenzmodells für Tracer wesentlich (siehe Abschnitt 4.1.4). Mit Hilfe von Sensitivitätsexperimenten sollen die Untersuchungen zum Einfluss von Schwerewellen und Turbulenz auf die Photochemie fortgesetzt werden. Zur Abschätzung von photochemischen Rückkopplungen auf die Dynamik sollen die im Strahlungsschema benötigten Konstituenten nach Möglichkeit rückgekoppelt mit dem MECTM berechnet werden. Weitere Schwerpunkte sind der Jahresgang der Wasserdampfverteilung sowie eine umfassende Analyse der 3D Mischungseffekte durch Wellen (siehe Abschnitt 4.3).

Die Wasserdampfmessungen mit MISI und mit anderen vergleichbaren Spektrometern sollen verwendet werden, um den Einfluss der oben genannten Prozesse auf die Verteilung von Spurengasen zu untersuchen.

3.6 Erweiterung des Radarmessverfahrens bis zur Thermosphäre

Das IAP erweitert die Untersuchung der Mesosphäre bis in die untere Thermosphäre, was besondere Anforderungen an die experimentellen Verfahren darstellt. Bereits jetzt sind die Höhenforschungsraketen und Lidars am IAP in der Lage im Höhenbereich zwischen 90-120 km Messungen durchzuführen. Schwerewellen, Gezeiten und planetare Wellen koppeln diesen Höhenbereich direkt an die Mesosphäre, in dem sie ihre Energie zwischen 80 und 150 km Höhe dissipieren. Vor allem mit Modellen ist es schwierig, die neutrale Dynamik im Bereich der unteren Thermosphäre (oberhalb von 100 km) adäquat zu beschreiben.

Das IAP beabsichtigt, die notwendigen experimentellen und theoretischen Kompetenzen zu entwickeln um diese Kopplungsprozesse besser untersuchen zu können. Einen essentiellen Beitrag zum besseren Verständnis kommt dabei der Beobachtung der neutralen Dynamik in diesem Höhenbereich zu. Dazu werden die bereits vorhandenen Lidars und Höhenforschungsraketen zukünftig auch durch erweiterte Windmessungen mit den Radars ergänzt werden. So ist es mit MMARIA möglich, die Meteorwindbeobachtungen bis zu einer Höhe von 110 km zu erweitern. Desweiteren wird MAARSY in der Lage sein, auch inkohärente Streuexperimente durchzuführen und somit den Bereich der E-Region diagnostisch zu erfassen (siehe auch Kap. 6.6). Zusätzlich plant das IAP ein neues E-Region Radar in Juliusruh zur Untersuchung von Plasmairregularitäten zu bauen. Zudem ist beabsichtigt, sich im Rahmen der SWARM Satellitenmission mit den thermosphärischen und ionosphärischen Kopplungsprozessen zu befassen und insbesondere die Wellenausbreitung durch die Mesosphäre bis hin zur Orbithöhe der Satelliten zu untersuchen.

4 Kopplung der atmosphärischen Schichten

Die Untersuchung der Kopplung atmosphärischer Schichten von der Troposphäre bis zur unteren Thermosphäre bildet einen der wissenschaftlichen Schwerpunkte am IAP. In den folgenden Abschnitten sind die wichtigsten geplanten Arbeiten zu diesem Themenbereich dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass seit 2008 am IAP in Kooperation mit drei weiteren Instituten in Mecklenburg-Vorpommern die „International Leibniz Graduate School for Gravity Waves and Turbulence in the Atmosphere and Ocean“ (ILWAO) existiert. ILWAO wurde durch einen weiteren Paktantrag bei der Leibniz-Gemeinschaft bis Ende 2015 verlängert. Bezüglich der Untersuchung zur Kopplung durch Schwerewellen und Gezeiten ist das IAP erfreulicherweise bei einer Reihe von neuen Drittmittel-Projekten beteiligt, und zwar mit dem PACOG¹³-Projekt im Rahmen der DFG-Forschergruppe MS-GWaves¹⁴ und im Verbund GW-LCYCLE¹⁵ im Rahmen des neuen BMBF-Forschungsschwerpunktes ROMIC. In mehreren Doktorarbeiten wird in den nächsten Jahren u. a. die Bedeutung von Wellen und Turbulenz für die Kopplung atmosphärischer Schichten untersucht.

4.1 Kopplung durch Wellen und residuelle Zirkulation

4.1.1 Lidar- und Radarmessungen von Gezeiten und Schwerewellen an verschiedenen Standorten

Der Temperatur- und Schwerewellendatensatz soll erweitert und im Zusammenhang mit anderen Messungen (z. B. Radarwinden) analysiert werden. Änderungen der Zirkulation durch stratosphärische Erwärmungen ergeben ständig wechselnde Ausbreitungsbedingungen für Wellen, die sich auch in den Lidar Daten niederschlagen. Die Lage von Kühlungsborn am Rand bzw. außerhalb des Polarwirbels ermöglicht Studien unter verschiedenen stratosphärischen Bedingungen. Zur weiteren Auswertung der Schwerewellenmessungen ist die Einführung von „ray-tracing“-Methoden und eine intensivere Verknüpfung mit den Radar-Windmessungen geplant.

Aufgrund der erhöhten Empfindlichkeit des RMR-Lidars auf ALOMAR ist die zeitliche und räumliche Auflösung soweit fortgeschritten, dass auch kurzperiodische Schwerewellen erfasst werden können. In Zukunft soll das Dichtesignal zur Analyse von kleinstmöglichen Skalen herangezogen werden, und zwar aus der Einzelpuls-Zählung mit einer Auflösung von wenigen Sekunden. Darüber hinaus sollen die mit diesem Lidar durchgeführten Windmessungen zur besseren Charakterisierung von Schwerewellen beitragen und somit die Interpretation der Beobachtungen verbessern. Vor kurzem ist es zum ersten Mal gelungen, Schwerewellen in den mesosphärischen Windmessungen des RMR-Lidars nachzuweisen. Damit kann man gleichzeitig die kinetische und potentielle Energie der Schwerewellen in diesem Höhenbereich studieren. Mit dem RMR-Lidar in Kühlungsborn haben wir inzwischen erste Ergebnisse zur Gezeitenstruktur vorliegen und veröffentlicht. In den nächsten Jahren geht es um die Intermittenz des Gezeitensignals und um die Abtrennung von Schwerewellen und deren zeitliche und räumliche Variation.

Die kontinuierlich arbeitenden Radaranlagen in Andenes und Kühlungsborn werden auch zum Nachweis von Schwerewellen in der unteren und mittleren Atmosphäre eingesetzt. Ziel dieser Untersuchungen sind u. a. die Bestimmung der charakteristischen Parameter von Schwerewellen, die Ableitung vertikaler Impulsflüsse und die Auswirkungen der Schwerewellen auf die Struktur der PMSE.

Mit dem VHF-Radar MAARSY am Standort Andenes sollen die durch den Einfluss von Schwerewellen hervorgerufenen horizontalen Strukturen im dreidimensionalen Windfeld detektiert und im Detail untersucht werden. Zudem sollen die turbulenten Energiedissipationsraten

¹³Processes And Climatology Of Gravity waves

¹⁴Multi-Scale Dynamics of Gravity Waves

¹⁵Investigation of the life cycle of gravity waves

aus sogenannten „Nested Beam Experimenten“ bestimmt und die aus dem Radar ermittelten turbulenten Parameter mit den Ballon-getragenen Messungen verglichen werden. Es ist weiterhin geplant, diese experimentellen Resultate mit Hilfe des KMCM Models nachzuvollziehen, um ein besseres Verständnis der Energiekaskade von großen zu kleinen Skalen zu erzielen.

Schwerewelleneigenschaften wie Phasengeschwindigkeit, Periode und Wellenlänge sollen in mittleren Breiten auch mit dem neuen Radarsystem MMARIA untersucht werden. Diese Ergebnisse sollen anschließend mit Simulationen von ICON-IAP verglichen werden.

Auf der Basis langfristiger MF- und Meteorradar-Windmessungen in mittleren und hohen Breiten wird die jahreszeitliche Variation von Schwerewellen, Gezeiten und auch planetaren Wellen für unterschiedliche Periodendauern bestimmt. Zur Abschätzung der Welleneigenschaften von Gezeiten und planetaren Wellen werden komplementär globale Satellitenmessungen verwendet.

4.1.2 Kopplung Stratosphäre-Mesosphäre beim Übergang vom Winter in den Sommer

In den letzten Jahren ist der Einfluss der Zirkulation in der Stratosphäre auf die Temperaturen in die Mesosphäre beim Übergang von Winter- zu Sommerbedingungen in den Vordergrund des wissenschaftlichen Interesses gerückt. In diesem Zusammenhang haben unsere Messungen in Davis überraschende Tatbestände gezeigt. Es stellt sich z. B. heraus, dass der Jahresgang der solaren Strahlung nicht ausreicht, um den Wechsel von Winter- zu Sommerbedingungen zu erklären. Vielmehr führt eine von der Troposphäre ausgehende nichtlineare Wechselwirkung zwischen Schwerewellen und Grundstrom zu einem vertikal alternierenden Muster in Winden und Temperaturen. Diese Kopplung ist zudem von Jahr zu Jahr unterschiedlich. Die SH¹⁶ bietet damit ein einzigartiges Experimentierfeld, um mit Messungen und Modellrechnungen die relative Bedeutung der Erzeugung und Brechung von Schwerewellen für die thermische und dynamische Struktur der Mesopausenregion zu untersuchen. Die Analysen sollen fortgesetzt und durch entsprechende Messungen mit Lidars und Radars auf ALOMAR in der Nordhemisphäre erweitert werden. Die Interpretation der Messungen erfolgt im Wesentlichen durch Modellrechnungen mit KMCM.

In der Literatur wird das Auftreten von Eisschichten gerne als Hinweis auf niedrige Temperaturen und damit als Zeitpunkt des Winter/Sommer-Übergangs herangezogen. Allerdings ändern sich beim Winter/Sommer-Übergang nicht nur die Temperaturen, sondern auch die Konzentration von H₂O. Mit Hilfe unserer gleichzeitigen Messungen von Temperaturen, Winden und Wasserdampf (mit WASPAM) wollen wir zeigen, ob Eisschichten tatsächlich geeignet sind, den Winter/Sommer-Übergang zu charakterisieren.

4.1.3 IAP-eigene Zirkulationsmodelle

Die Simulation der globalen Zirkulation von der Grenzschicht bis zur unteren Thermosphäre bei expliziter Beschreibung bzw. Parametrisierung aller relevanten dynamischen Prozesse ist zentraler Bestandteil der IAP-eigenen Modellentwicklung. Mit der früheren Version von KMCM wird bei hohen Auflösungen sowohl die dynamische Generierung als auch die turbulente Dämpfung von Schwerewellen selbstkonsistent beschrieben. Dieses Konzept wird zukünftig in der neuen Version des KMCM als Klimamodell realisiert (einschließlich Strahlungstransfer, Tracertransport, Feuchtigkeitszyklus und vollständiger Oberflächenbilanz unter Einbeziehung eines Schichtozeanmodells). Bislang wird die neue Version mit konventioneller Auflösung und Parametrisierung von Schwerewellen betrieben. Damit werden Langzeitsimulationen z. B. zur saisonalen Entwicklung der Sommermesopause oder zur QBO durchgeführt.

¹⁶Südhemispäre

Aufgrund der Konsistenz aller im Modell berücksichtigten Energietransformationen wird eine ausgeglichene Strahlungsbilanz am oberen Rand der Atmosphäre sowie eine ausgeglichene Oberflächenbilanz erreicht. In komplexen Klimamodellen wird dies i. a. durch Parameteranpassungen sichergestellt. Wesentlich für die energetische Konsistenz im KMCM ist neben der Berücksichtigung aller thermischen Effekte aufgrund subskaliger Impulsflüsse vor allem die Formulierung der Massenkorrektur im neuen Transportschema, welche die physikalischen Quellen und Senken explizit einbezieht, z. B. für den Wasserdampf in der Troposphäre. Mit dieser Modellversion konnte gezeigt werden, dass eine natürliche Abkühlung der global gemittelten Oberflächentemperatur (verbunden mit Wärmespeicherung im Ozean) eine positive Strahlungsbilanz impliziert.¹⁷ Dieses Ergebnis ist von Bedeutung, da die seit mehr als 10 Jahren gemessene positive Strahlungsbilanz den rapide steigenden anthropogenen Emissionen zugeordnet wird, wohingegen die gleichzeitige Stagnation der globalen Erwärmung, vermutlich hervorgerufen durch natürliche Variabilität und verbunden mit verstärkter Wärmespeicherung im tiefen Ozean, hiermit im Widerspruch zu sein scheint. Die Implikation, dass die positive Strahlungsbilanz zumindest teilweise eine zwingende Folge der Stagnationsperiode ist, zeigt beispielhaft, wie die am IAP für die MLT entwickelten Modellkonzepte auch für solche Untersuchungen genutzt werden können, die an anderen Einrichtungen im Vordergrund stehen.

Bei den gegenwärtigen und zukünftigen Anwendungen der neuen KMCM-Version geht es vornehmlich um die Projekte LOCHMES, MATMELT und METROSI. Die darin zu bearbeitenden inhaltlichen Fragen betreffen die Rolle von QBO und solarem Zyklus für die Langzeitvariabilität sowie die Bedeutung des Mischens von Spurenstoffen für die globale Zirkulation und Photochemie in der mittleren Atmosphäre. Insbesondere wird die mesoskalige Makroturbulenz für die gesamte Atmosphäre weiter erforscht, wobei der Frage nach der Parametrisierung der im Modell nicht aufgelösten (makroturbulenten) Skalen eine zentrale Rolle zukommt. Entsprechende theoretische Ergebnisse fließen auch in andere Projekte ein, an denen das IAP beteiligt ist (z. B. die DFG-Forschergruppe MSGWaves). Weitere Themen betreffen die Wechselwirkung von Schwerewellen mit Rossby-Wellen und thermischen Gezeiten im Hinblick auf die globale Zirkulation in der MLT sowie während stratosphärischer Erwärmungen. Für weitergehende Echtzeitvergleiche mit Messungen ist geplant, KMCM mit einem Nudging-Verfahren für planetare und synoptische Skalen in der Troposphäre zu ergänzen.

Als neues Werkzeug wurde das nichthydrostatische Zirkulationsmodell ICON-IAP etabliert. Es handelt sich dabei um eine eigene, mechanistische Variante des auch an anderen Einrichtungen betriebenen ICON-Modells. Die IAP-Version beinhaltet ein hexagonales C-Gitter sowie neue Diskretisierungen für Dynamik und Subskalparametrisierung, womit korrekte Energietransformationen durch aufgelöste und parametrisierte Skalen sichergestellt werden. Auch enthält das Modell ein konsistentes Transportschema. Mittelfristig wird ICON-IAP mit der Strahlungsparmetrisierung des KMCM ergänzt. In den kommenden Jahren wird ICON-IAP vor allem als Regionalmodell mit sehr hoher räumlicher Auflösung bis über 100 km Höhe verwendet. Angestrebt sind direkte Vergleiche der simulierten Schwerewelldynamik und Turbulenz mit entsprechenden Messungen (MAARSY, LITOS, Hfr und ggf. DORIS), um Phänomene wie z.B. mesosphärische Inversionsschichten und Wellenbrechen oder makroturbulente Schwerewellenspektren zu interpretieren. Eine grundlegende Thematik für die Anwendung von ICON-IAP die Quantifizierung von mechanischer und thermischer Dissipation dar. Durch die Kombination von Modell und Messung soll eine grundlegende Verbesserung der theoretischen Beschreibung der thermischen Dissipation in der mittleren Atmosphäre erarbeitet werden, da diese in konventionellen Modellen dem Zweiten Hauptsatz widerspricht.

¹⁷Bei ausgeprägten, z. B. anthropogenen Störungen gilt dagegen, dass eine positive Strahlungsbilanz eine Erwärmung der Oberfläche impliziert.

4.1.4 Makroturbulenz und Generierung von Schwerwellen

Ausgangspunkt für die dynamische Kontrolle der MLT durch Schwerwellen ist der mesoskalige Bereich der sogenannten Makroturbulenz in der oberen Troposphäre. Mit Makroturbulenz bezeichnet man die globalen Spektren von horizontaler kinetischer Energie und verfügbarer potentieller Energie, sowie die zugrunde liegenden Skalenwechselwirkungen. Das in KMCM diagnostizierte spektrale Energiebudget ist konsistent mit der Ähnlichkeitstheorie für geschichtete Turbulenz, sofern eine sehr hohe horizontale Auflösung mit einem entsprechend feinen vertikalen Gitterabstand von wenigen hundert Metern kombiniert wird. In der MLT wird ebenfalls ein makroturbulenter Inertialbereich geschichteter Turbulenz vermutet, da die Schwerwellenspektren bzgl. der vertikalen Wellenzahl dem dafür erwarteten exponentiellen Abfall entsprechen. Die Makroturbulenz geht hier vermutlich von den primären, brechenden Schwerwellen aus. Im Rahmen von MATMELT soll künftig die Makroturbulenz in der MLT anhand von hochaufgelösten Simulationen mit ICON-IAP und KMCM in Kombination mit 3D MAARSY-Messungen studiert werden. Um ein möglichst vollständiges Verständnis zu erzielen, soll in den Modellen zusätzlich zum spektralen Budget der kinetischen Energie das Budget der verfügbaren potentiellen Energie diagnostiziert werden.

Anknüpfend an die Vorarbeiten zur Schwerwellenanregung aus Strahlströmen wird das Konzept der spontanen Imbalanz im Rahmen der im Mai 2014 positiv begutachteten DFG-Forschergruppe „Multiscale Dynamics of Gravity Waves - MSGWaves“ weiter verfolgt. Die Theorie wird von geraden auf gekrümmte Strömungen erweitert und die abgeleiteten Wellenamplituden um entsprechende Wellenzahlen ergänzt. Die theoretischen Arbeiten bilden den Rahmen für geplante Simulationsexperimente mit dem mesoskaligen Regionalmodell WRF¹⁸. Zum Ende der ersten 3 Jahre des Projektes soll eine Parametrisierung der entsprechenden Schwerwellenquellen vorliegen, die dann in Schwerwellenparametrisierungen für globale Zirkulationsmodelle verwendet werden kann.

4.1.5 Vertikale Kopplung durch transiente Wellen; stratosphärische Erwärmungen

Zusammen mit den Simulationen mit KMCM bilden zeitlich und vertikal hochaufgelöste Messungen mit Lidars und Radars in Kühlungsborn und Andenes eine geeignete Basis zur Untersuchung vertikaler Kopplungsprozesse durch Schwerwellen und planetarer Wellen.

Der wohl berühmteste vertikale Kopplungsprozess in der mittleren Atmosphäre, verursacht durch das Wechselwirken von planetaren Wellen mit dem Grundstrom, zeigt sich bei stratosphärischen Erwärmungen (SSW). In den vergangenen zwei Jahren wurde mit Hilfe einer Kombination aus hochaufgelösten Radarmessungen, globalen Satellitenbeobachtungen und Reanalysedaten sowohl das mittlere Verhalten von planetaren Wellen während SSW als auch ihre Breitenabhängigkeit betrachtet. Zur Untersuchung der Längenabhängigkeit während der SSW sollen Messungen aus verschiedenen Radarstationen unter Berücksichtigung der Entwicklung der Phase von planetaren Wellen aus Satellitendaten verglichen werden. Dabei werden mögliche Unterschiede zwischen Vortex-verschiebenden und -spaltenden SSW betrachtet. Die Höhe, bis zu der planetare Wellen bei SSW auftreten, ist von der Stärke der SSW abhängig. Welche Bedingungen herrschen müssen damit man eine planetare Welle auch in der oberen Mesosphäre beobachten kann, soll unter anderem mit verschiedenen Simulationen von KMCM untersucht werden.

Schwerwellen tragen zur vertikalen Kopplung bei, indem sie beim Brechen ihren Impuls auf den Hintergrundwind übertragen und das mesosphärische Windfeld vor allem im Sommer maßgeblich beeinflussen. Die Wechselwirkungen zwischen Schwerwellen und dem Grundstrom

¹⁸Weather Research and Forecast

wurden bereits vergleichend mit dem Saura-MF-Radar und dem Andenes-Meteorradar über mehrere Jahre für polare Breiten untersucht. Dabei variieren die Wind- und Impulsflussmuster im Jahresverlauf und von Jahr zu Jahr, u. a. in Abhängigkeit vom Auftreten stratosphärischer Erwärmungen. Von großer Bedeutung ist hierbei auch, welcher Teil des Schwerewellenspektrums am stärksten zum gesamten Impulsfluss beiträgt. Dies soll mittels einer Spektralanalyse der Schwerewellen-Impulsflüsse untersucht werden. Zudem sollen Messungen mit weiteren Radars in mittleren Breiten detaillierte Aufschlüsse über die Breitenabhängigkeit der Impulsflüsse bzw. der Welle-Grundstrom-Wechselwirkung geben. KMCM-Simulationen bieten außerdem die Möglichkeit, Abhängigkeiten von der geographischen Länge näher zu betrachten. Basierend auf VHF-Radarmessungen sollen Schwerewellen und Impulsflüsse zusätzlich in der Tropopausenregion untersucht werden. Außerdem soll die langfristige Klimatologie der Winde und der Schwerewellenaktivität in verschiedenen Breiten genauer erforscht werden, da sie die Ausbreitungsbedingungen für Wellen und die globale Zirkulation beeinflussen. Besonders Untersuchungen von Schwerewellentrends in der Mesosphäre sind bisher völlig unzureichend studiert worden (siehe auch Abschnitt 5.4.).

Die theoretischen Untersuchungen zu nichtlinearen Wechselwirkungen von Schwerewellen, planetaren Rossby-Wellen und thermischen Gezeiten in der MLT werden fortgesetzt. Diese Thematik ist generell für ein Verständnis der mittleren dynamischen und thermischen Struktur in der MLT von Bedeutung. Es interessiert z. B. die Frage nach der in-situ-Generierung planetarer Wellen aufgrund dynamischer Instabilität in Relation zur vertikalen Ausbreitung bzw. zu der aus der Stratosphäre aufgeprägten geographischen Verteilung der Impulsdeposition durch Schwerewellen in der Winter-MLT. Auch wollen wir die bislang kaum untersuchte Problematik der Energiebilanz in der oberen Wintermesosphäre nachgehen: Inwieweit sind die in Modellen nach unten gerichteten subskaligen Wärmeflüsse (durch Turbulenz) konsistent und welche Bedeutung hat ggf. eine Umkehr der Impulsdeposition durch Schwerewellen in der Mesospausenhöhe und eine damit einhergehende Winter-Sommerpol-Zirkulation in der unteren Thermosphäre?

Besonderes Interesse besteht weiterhin hinsichtlich der Dynamik der MLT während stratosphärischer Erwärmungen. Wir wollen u. a. Aufschluss darüber erhalten, wie ein lokalisiertes Einsetzen der Zonalwindumkehr in der oberen Mesosphäre im Einklang mit dem zonal gemittelten Bild, wo sich i. a. keine mesosphärischen „Vorboten“ stratosphärischer Erwärmungen zeigen, zu verstehen ist. Um zu einer verbesserten Interpretation von lokalen und globalen Phänomenen während stratosphärischer Erwärmungen zu gelangen, wird ein aus Reanalysen und Satellitenmessungen (ERA-Interim und Aura-MLS) gewonnener Datensatz mit Hinblick auf planetare Wellen und Schwerewellen in der MLT statistisch analysiert, und die Ergebnisse werden mit verschiedenen Modellen (KMCM, HAMMONIA und WACCM) verglichen. Im Rahmen des Leibniz-Projektes LOCHMES wird außerdem untersucht, wie der Holton-Mechanismus (d.h. der Zusammenhang von stratosphärischen Erwärmungen mit der QBO) vom solaren Zyklus abhängt.

In diesem Zusammenhang konzentrieren sich die experimentellen Untersuchungen auf die vertikale Kopplung durch Schwerewellen während spezieller Messkampagnen aus Radar-, Lidar- und Radiosondenmessungen über einen möglichst großen Höhenbereich. Von besonderem Interesse ist hier das Problem der mesosphärischen Windumstellung und die Frage, wann sich die Wirkung der SSW in der oberen Troposphäre zeigt. Hierbei soll im Detail geklärt werden, wie sich die veränderte Dynamik während einer SSW auf die thermische Struktur bis in die untere Thermosphäre auswirkt.

4.1.6 Stationäre planetare Wellen und 3-dimensionale residuelle Zirkulation

Eine verbesserte Kenntnis der Rolle der stationären planetaren Wellen ist elementar für ein Gesamtverständnis der von der Troposphäre ausgehenden dynamischen Kopplung und resul-

tierender Rückkopplungsmechanismen. Zu dieser Thematik wurden in den letzten Jahren eine Vielzahl von Untersuchungen durchgeführt, z.B. im Rahmen von CAWSES bzgl. der Rückkopplung der Ozon- und Wasserdampfverteilungen in der mittleren Atmosphäre auf die Ausbreitung planetarer Wellen.

Beim Verständnis der stationären Wellen kommt der drei-dimensionalen (3D) residuellen Zirkulation und dem damit zusammenhängenden Spurenstofftransport eine Schlüsselrolle zu. Neuere Untersuchungen zur langfristigen Veränderung der zonal gemittelten residuellen Zirkulation (Brewer-Dobson-Zirkulation) zeigen erhebliche Differenzen zwischen Modellen und assimilierten Daten, insbesondere bzgl. der Wellenantriebe. Daher ist eine Diagnose der 3-dimensionalen residuellen Zirkulation ausgehend von Satellitendaten geboten. So haben wir bereits auf Basis der Aura/MLS-Temperatur- und Wasserdampfmessungen die planetaren Wellen im Tagesmittel diagnostiziert (über quasi-geostrophische Balance und Inversion der Transportgleichung) und den 3-dimensionalen residuellen Transport für ausgewählte Jahre quantifiziert. Im Vergleich mit entsprechenden Analysen des Zirkulations- und Chemiemodells HAMMONIA zeigt sich, dass im Modell die stationären planetaren Wellen in der mittleren Atmosphäre unterschätzt werden, während der Transport durch transiente Prozesse überschätzt wird. Auch werden in Assimilations- und Zirkulationsmodellen lokale Effekte des residuellen „downwelling“ im Vergleich zur Analyse der Satellitendaten unzureichend erfasst. Zukünftig sollen die Wechselwirkungen der stationären planetaren Wellen mit transienten dynamischen Prozessen bis in das Höhengebiet der unteren Thermosphäre im Detail quantifiziert werden, und zwar unter Einbeziehung der Mischungsprozesse durch transiente synoptische Wellen und Schwerewellen. Wir wollen so u.a. zu einer verbesserten Darstellung der stationären Wellen in Klimamodellen beitragen. Besonderes Augenmerk soll auf die langfristigen Entwicklungen der 3-dimensionalen residuellen Zirkulation und der stationären Wellen in den aktuellen Klimasimulationen im Rahmen des Climate Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5, bis 80km) sowie auf die Interpretation der beobachteten lokalen Trends der letzten Dekaden gelegt werden. Diese Arbeiten finden insbesondere im Rahmen des DFG-Projektes BEDOC¹⁹ statt.

4.1.7 Thermische Gezeiten

Thermische Gezeiten sind planetare Wellen, die durch die Tagesgänge der stratosphärischen UV-Absorption und der tropischen Wasserdampfabsorption bzw. Feuchtekonvektion angeregt werden. Generell unzureichend untersucht sind die aus der Gezeiten-Schwerewellenwechselwirkung resultierenden Konsequenzen für die globale Zirkulation der MLT. Auch wird diese Wechselwirkung in konventionellen Klimamodellen wegen den Einschränkungen der Schwerewellenparametrisierungen fehlerhaft beschrieben. Wir haben die hochaufgelöste Version des KMCM mit einer einfachen thermischen Anregung der Gezeiten ergänzt und so die volle dynamische Wechselwirkung zwischen Gezeiten und Schwerewellen in einem globalen Modell realisiert. Es stellt sich heraus, dass thermische Gezeiten die Brechungshöhen von Schwerewellen in der MLT signifikant nach unten verschieben. In der unteren Thermosphäre zeigte sich außerdem eine substantielle Energiedeposition (Aufheizung) durch Gezeiten. Dieser Effekt wird in anderen Modellen aufgrund von fehlerhafter Turbulenzmodellierung ignoriert.

Zukünftig soll die Wechselwirkung von Gezeiten und Schwerewellen auf Basis der neuen Version des KMCM sowohl mit aufgelösten als auch mit parametrisierten Schwerewellen weiter untersucht werden. In diesem Zusammenhang soll u. a. die Methode des drei-dimensionalen Eliassen-Palm-Flusses eingesetzt werden, um ein Bild des mittleren Tagesgangs der drei-dimensionalen Schwerewellenausbreitung und -wirkung zu diagnostizieren. Im Vordergrund steht dabei die Erklärung der großen Gezeitenamplituden in hohen Breiten, wie sie vom IAP gemessen werden, sowie der genaue Mechanismus der oben erwähnten Modulation der Schwerewellenbrechung in

¹⁹Brewer-Dobson Circulation

der Sommer-MLT. Auch soll untersucht werden, inwiefern Rossby-Wellen in der Winter-MLT mit thermischen Gezeiten wechselwirken. Weiterhin wird das KMCM bis weit in die Thermosphäre ausgedehnt. Damit sollen grundlegende Untersuchungen zur Welle-Grundstromwechselwirkung und zur globalen Zirkulation in der Thermosphäre durchgeführt werden. Von besonderem Interesse sind die Veränderung der Schwerewellenskalen mit zunehmender Höhe und die Generierung sekundärer Schwerewellen sowie Mischungseffekte durch Gezeiten in der unteren Thermosphäre.

Die am IAP vorhandenen Lidars ermöglichen zeitlich und vertikal hoch-aufgelöste Messungen von der unteren Stratosphäre bis zur unteren Thermosphäre, die auch zur Untersuchung von Gezeiten und planetaren Wellen über einen großen Höhenbereich verwendet werden. Durch die vor kurzem entwickelte Tageslichtfähigkeit des RMR-Lidars in Kühlungsborn werden die Beobachtungen vervollständigt, insbesondere bezüglich Gezeiten. Die Klimatologie von Gezeiten soll vervollständigt werden und bei der Analyse von Schwerewellen Berücksichtigung finden. Außerdem sollen Gezeitensignale in Temperaturen (Lidars) mit denen in Winden (Radars) verglichen werden. Temperaturmessungen mit dem Fe-Lidar auf ALOMAR und in der Antarktis haben gezeigt, dass das Temperatursignal im Sommer deutlich größer ist als theoretisch erwartet. Die Analysen sollen erweitert und mit Hilfe von theoretischen Modellen interpretiert werden. Im ROMIC-Projekt METROSI²⁰ wird die Dissipation von Wellen und dessen Einfluss auf die Hintergrundatmosphäre im Detail untersucht.

Basierend auf den Messungen der MF-Radars und der Meteorradars in Andenes und Juliusruh wurden in den vergangenen Jahren die Gezeiten in mittleren und hohen Breiten kontinuierlich abgeleitet. Hinzu kommen weitere Messungen eines internationalen Radarnetzwerkes, die dem IAP im Rahmen von etablierten Kooperationen zur Verfügung stehen. Die Kombination aus Radar- und Satellitenbeobachtungen mit den am IAP durchgeführten Modellierungsarbeiten soll zu einem besseren Verständnis der Wechselwirkung zwischen Schwerewellen, Gezeiten und planetaren Wellen beitragen. Diese Arbeiten sind im Rahmen eines internationalen ISSI-Projektes²¹ zum Prozessverständnis zur Beeinflussung der Mesosphäre und unteren Thermosphäre in unterschiedlichen Breiten während stratosphärischer Erwärmungen eingebunden.

4.1.8 Horizontale Sondierungen durch Luftleuchten

Durch Kooperation mit verschiedenen Einrichtungen werden sporadisch am IAP in Kühlungsborn und auf ALOMAR mit Hilfe von Kameras und Filtern Wellenstrukturen im Luftleuchten, d. h. in den Emissionen der OH-Schicht bei ca. 85 km, identifiziert. Eine spektrale Analyse dieser Emissionen erlaubt außerdem die Messung von Temperaturen in dieser Schicht. Für Lidar- und Radar Sondierungen, die quasi Punktmessungen darstellen, können Informationen über horizontale Strukturen wichtig sein. Deswegen sollen die OH-Messungen gemeinsam mit den Lidar- und Radarmessungen analysiert werden.

4.2 Turbulenz

Einige Aspekte dieses Themas wurden bereits in den vorangegangenen Abschnitten behandelt, so z. B. die insitu-Messungen mit Höhenforschungsraketen auf Seite 15.

4.2.1 Insitu-Messungen auf Ballons

Wir haben in den vergangenen Jahren den Sensor LITOS²² für insitu-Wind- und Temperaturmessungen von Turbulenz in der Troposphäre und Stratosphäre entwickelt. Mit diesem In-

²⁰Mesoskalige Prozesse in der Wechselwirkung von Tropo- und Stratosphäre

²¹ISSI = International Space Science Institute

²²Leibniz-Institute Turbulence Observations in the Stratosphere

strument werden erstmals Messungen in der Stratosphäre mit einer vertikalen Auflösung von wenigen Millimetern durchgeführt, was die Qualität der abgeleiteten turbulenten Parameter erheblich verbessert. Zum ersten Mal überhaupt wurde Turbulenz gleichzeitig im Temperatur- und Windfeld nachgewiesen. Die Messungen werden z. Zt. ausgewertet und veröffentlicht. Neben der geophysikalischen Bedeutung von Turbulenz in der Stratosphäre, z. B. für den Transport von Spurengasen, ergeben sich grundsätzliche Fragestellungen zur Turbulenztheorie, wie z. B. zum Zusammenhang von Thorpe-Skala und Energiedissipationsraten. In Zukunft soll LITOS optimiert werden und routinemäßig zum Einsatz kommen, so dass sich allmählich eine Klimatologie der Turbulenz in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre herauskristallisiert. Aus den Daten werden Aussagen über die Stärke, Ausdehnung und Häufigkeit turbulenter Zellen in der Troposphäre und unteren Stratosphäre abgeleitet. Daraus soll u. a. die Modifikation der Schwerewellenspektren bei deren Ausbreitung von der Erzeugung bis zu Dissipation untersucht werden. Die Ergebnisse sollen mit Messungen des MAARSY-Radars auf ALOMAR verglichen werden. Außerdem bietet sich ein Vergleich mit den Wasserdampfmessungen von WASPAM und MISI an, um die Diffusion von Spurengasen zu studieren. Die Messungen sollen mit Hilfe von KMCM und ICON-IAP theoretisch interpretiert werden.

4.2.2 Turbulenzmessungen mit Radars

Aus Messungen mit Radargeräten werden auch Aussagen zur Turbulenz abgeleitet. Aus der gemessenen spektralen Breite wird die Energiedissipationsrate bestimmt. Dabei sind unterschiedliche Radarsysteme unterschiedlich empfindlich. Außerdem ist die zeitliche und vertikale Auflösung sehr verschieden. Der Vorteil des IAP liegt darin, dass die Messergebnisse von einer Vielzahl von Radarinstrumenten miteinander verglichen und kombiniert werden können.

Der Nachteil von Radarverfahren liegt im sogenannten „Beambroadening“-Effekt, d.h., die gemessene spektrale Breite ist nicht nur eine Funktion der Turbulenzstärke, sondern wird auch vom Wind und den Wellen in der Atmosphäre beeinflusst. Der Einfluss ist umso stärker, je breiter der Radarstrahl ist. Um diesen Effekt eliminieren zu können, wollen wir durch aktives Strahlformen, sogenannte „Nested Beam“-Experimente durchführen, bei denen unterschiedliche Radarstrahlbreiten genutzt werden.

4.2.3 Messung kleinskaliger Strukturen mit Radarinterferometrie

Die Breite des Radarstrahls und die Länge eines Sendeimpulses bestimmen das Radarmessvolumen, in welchem eine Einzelmessung durchgeführt wird. Um die Auflösung zu verbessern, werden interferometrische und andere bildgebende Verfahren genutzt. Am IAP sind die Meteorradare sowie die beiden VHF-Systeme zurzeit in der Lage, diese Verfahren anzuwenden. Mit Hilfe von räumlich getrennten Empfangsfeldern lässt sich die Winkelauflösung durch Anwendung von kohärentem Radar-Imaging verbessern. Das MAARSY-System bietet hierfür besonders gute Eigenschaften durch die flexible Wahl der Empfangsfelder; so können unterschiedlich große Subgruppen von Antennen bzw. auch verschiedene Abstände zwischen den Empfangsgruppen realisiert werden. Die größte Herausforderung bei der Anwendung von kohärentem Radar-Imaging ist der Invertierungsalgorithmus. Für die bisherigen Anwendungen ist die Capon-Methode implementiert worden. In Zukunft ist beabsichtigt, auch andere Verfahren zu verwenden, wie z.B. „MaxEnt“. Hiermit lässt sich das Auflösungsvermögen innerhalb des Radarstrahls noch weiter verbessern. Ein Problem in der Anwendung der Imaging-Methoden ist das Radarstrahldiagramm. Je schmaler der Radarstrahl ist, desto schwieriger wird es, dieses aus dem erzeugten Bild herauszurechnen. Aus diesem Grund ist geplant, den Radarstrahl aufzuweiten und somit ein größeres Gebiet möglichst homogen auszuleuchten. Ein solches Experiment erlaubt es, die radiale Geschwindigkeit und die spektrale Breite innerhalb des Radarstrahls aufzulösen. Die Vorteile bestehen in einer besseren Abdeckung und einer verkürzten Messzeit. Darüber hinaus

soll die Turbulenz in PMSE auf verschiedenen Skalenlängen quantifiziert werden und kleinskalige Strukturen der Turbulenz, aber auch im Windfeld (z.B. Schwerewellen), untersucht werden. Diese Verfahren lassen sich auch in der Tropo-/Stratosphäre anwenden. Durch die Lokalisierung der Rückstreucentren innerhalb des Radarstrahls können mögliche Abweichungen der mittleren Strahlposition in herkömmlichen Mehrstrahlexperimenten korrigiert und die Windmessungen damit verbessert werden. Mit den Modifizierungen des Saura-Radars wird es auch möglich sein, diese Verfahren im MF-Bereich anzuwenden.

4.2.4 Turbulenzmodellierung

Der verallgemeinerte Mischungswegansatz von Smagorinsky kann zwar als anisotropes Turbulenzmodell, das mit den Erhaltungssätzen im Einklang steht, in Zirkulationsmodellen der Atmosphäre angewendet werden. Diese Entwicklung wurde am IAP in den vergangenen Jahren maßgeblich befördert. Es bestehen dennoch grundlegende Defizite. Zum einen verletzt der Mischungswegansatz a priori die elementare Bedingung der Skaleninvarianz für einen turbulenten Trägheitsbereich. Diese Bedingung trifft sowohl auf das mesoskalige Nastrom-Gage-Spektrum in der Troposphäre wie auch vermutlich für brechende Schwerewellen in der mittleren Atmosphäre zu, da nach gegenwärtigem Kenntnisstand die Mesoskalen den Ähnlichkeitsgesetzen von geschichteter Turbulenz unterliegen.²³ Zum anderen konvergieren die Simulationsergebnisse von Zirkulationsmodellen generell nicht mit zunehmender Auflösung. Beide Aspekte, nämlich Verletzung von Skaleninvarianz und Konvergenz, sind für numerische Rechnungen von kleinskaligen Prozessen in der MLT von Bedeutung. Unsere theoretischen Arbeiten richten sich daher darauf, diese grundlegenden Unzulänglichkeiten durch weitere Verbesserungen der Turbulenzmodellierung zu beseitigen.

Dazu wird der Smagorinsky-Ansatz dahingehend erweitert, dass die resultierenden Modellgleichungen die Bedingung der Skaleninvarianz erfüllen (sogenanntes dynamisches Smagorinsky-Modell, DSM). Eine entsprechende skaleninvariante Formulierung der horizontalen Impulsdiffusion wurde erstmals am IAP entwickelt und erfolgreich ins KMCM implementiert. Wesentlich dabei ist, dass wir die sogenannte Germano-Identität nur bezüglich der Tensornorm erfüllen, so dass der Diffusionskoeffizient positiv definit ist, was wiederum durch den Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik gefordert wird. Diese Theorie für ein DSM wird zukünftig mit der vertikalen Impulsdiffusion erweitert und zudem auf die Enthalpie sowie auf Tracer angewendet. Ganz wesentlich ist hierbei, dass die Ähnlichkeitsgesetzte geschichteter Turbulenz von vornherein in das DSM einfließen.

Ein entsprechendes DSM soll zunächst in einem kleinskaligen Boussinesq-Modell beim Brechen von Schwerewellen entwickelt und validiert werden. Mittelfristig soll ein entsprechendes Turbulenzmodell dann in KMCM und ICON-IAP für Simulationen bei sehr hoher Auflösung verwendet werden. Besonderes Augenmerk bei der Weiterentwicklung der Turbulenzmodellierung liegt auf der Beschreibung der thermischen Dissipation in der MLT, die in konventionellen Zirkulationsmodellen dem Zweiten Hauptsatz widerspricht. Auch sollen in diesem Zusammenhang die in den Auswertungen der Turbulenzmessungen (Raketen und Ballons) verwendeten Annahmen zum Zusammenhang von thermischer und mechanischer Dissipation überprüft werden. Schließlich soll geklärt werden, inwieweit ein vollständig skaleninvariantes, anisotropes Turbulenzmodell die Konvergenz von Zirkulationsmodellen bezüglich der räumlichen Auflösung gewährleistet.

²³Damit ist gemeint, dass im Mittel eine Energiekaskade bezüglich der horizontalen Skala vorliegt und dass die vertikale Skala aufgrund von Auftriebskräften an die horizontale Skala gekoppelt ist.

4.3 Spurengase

4.3.1 Wasserdampf in der Mesosphäre

Die MISI-Wasserdampfmessungen umfassen inzwischen 4 Winter (2009 bis 2013). Diese Messreihe soll u. a. im Vergleich mit MERRA-Daten weitergehend analysiert werden.

4.3.2 Transport von Spurengasen, Wellenmischen

Der Transport von Spurengasen wird als wissenschaftliches Themengebiet am IAP in den nächsten Jahren an Bedeutung gewinnen. Transportprozesse sind z. B. für die Verteilung von Wasserdampf, Kohlendioxid oder atomarem Sauerstoff wichtig. Am IAP liegen permanente Messungen von Wasserdampf mit MISI sowie Beobachtungen von Metallichten mit den Resonanzlidars vor¹. Außerdem sollen im Rahmen der Raketenprojekte am IAP Messungen von atomarem Sauerstoff in der unteren Thermosphäre durchgeführt werden, was für zahlreiche Prozesse in der oberen Mesosphäre von grundlegender Bedeutung ist. Die Vermessung von Aerosolen in der Stratosphäre und von NLC bietet ebenfalls die Möglichkeit, den Transport von Spurenstoffen zu studieren.

Das vertikale Mischen durch Schwerewellen wirkt sich in der MLT deutlich auf die Photochemie aus. Generell besitzt das Mischen durch Wellen auch horizontale Komponenten, was etwa in der Stratosphäre von großer Bedeutung ist. Darüber hinaus ergibt sich ein Mischen durch Wirbelbewegungen auf den Isoflächen der mittleren Konzentrationen. Im Rahmen der Projekte METROSI und MATMELT soll die Theorie zu dieser Thematik weiter ausgearbeitet und eine entsprechende Diagnostik entwickelt werden. Wir wollen insbesondere untersuchen, wie durch die verschiedenen Wellenbewegungen in der gesamten mittleren Atmosphäre die Spurenstoffe gemischt werden, welche Konsequenzen sich daraus für die Photochemie ergeben und wie die Effekte von den angenommenen Turbulenzparametern abhängen. Dies dient insgesamt der Validierung von Klimasimulationen der mittleren Atmosphäre. Die Arbeiten stehen auch in Zusammenhang mit dem Projekt BEDOC (siehe auch Kap. 4.1.6.).

5 Langfristige Veränderungen in der mittleren Atmosphäre

5.1 ROMIC

Das BMBF hat ein neues Forschungsprogramm mit der Bezeichnung ROMIC („Role Of Middle atmosphere In Climate“) ausgeschrieben. Das IAP ist mit insgesamt 4 Projekten (einschließlich des Koordinatorenprojektes) beteiligt, wobei es schwerpunktmäßig um langfristige Veränderungen in der mittleren Atmosphäre geht. Die IAP-Projekte beginnen im Sommer 2014.

5.2 Systematische Untersuchung der Klimavariabilität

Die neue KMCM-Version mit Strahlungstransfer und Feuchtezyklus ist inzwischen konsolidiert und wird zur Untersuchung der Langzeitvariabilität der mittleren Atmosphäre angewendet. Ziel ist es, die Einflüsse von solarem Zyklus und QBO auf die wesentlichen internen Variabilitätsmechanismen, die ausgehend von der Arktischen bzw. Antarktischen Oszillation zur Interhemisphärischen Kopplung führen, im Zusammenhang zu verstehen. Dabei ist auch die Intrahemisphärische Kopplung von Bedeutung. Die Interpretation der Simulationsergebnisse erfolgt im Vergleich mit IAP-Messungen hinsichtlich von Langzeitvariationen in den mittleren Winden und Temperaturen sowie in Schwerewellenparametern. Auch soll insgesamt die Abhängigkeit der simulierten Klimaänderung bei CO₂-Erhöhung von den Details der Subskalenskalenparametrisierungen

¹Letztere haben allerdings den Nachteil, dass sie photochemisch aktiv sind und somit keinen inerten Tracer darstellen

abgeschätzt werden (z. B. Bedeutung der Reibungswärme in Klimaszenarien). Die KMCM-Simulationen werden außerdem verwendet, um mithilfe von MECTM (siehe 3.5) Abschätzungen über die Veränderung von Spurengasen in der MLT zum einen durch interne Langzeitvariabilität und zum anderen durch externe Parameter wie Sonnenaktivität und CO₂-Konzentration zu gewinnen.

5.3 Langzeitrends von Temperaturen, NLC und PMSE: Beobachtungen und Modellierung

Phasenhöhen

Für weiterführende statistische Auswertungen wurde die Phasenhöhen-Zeitreihe einer Überarbeitung unterzogen und eine 50-jährige homogene Zeitreihe täglicher Messwerte aufgebaut. Auf dieser Basis werden die Phasenhöhenmessungen hinsichtlich Trends und natürlich bedingter Schwankungen wie QBO, ENSO und solarem Zyklus analysiert. Diese Arbeiten sollen fortgesetzt werden und die homogene Zeitreihe soll mit den Messungen seit 2009 ergänzt werden. Die Ergebnisse fließen ein in entsprechende Berechnungen auf der Basis globaler Zirkulationsmodelle, mit deren Hilfe die natürlichen Variationen der Phasenhöhen interpretiert werden sollen.

5.4 Langzeitvariabilität des mesosphärischen Windes

Seit 1994 werden kontinuierlich mesosphärische Winde in Andenes gemessen. Dieser Datensatz umfasst mehr als einen Sonnenzyklus. Somit lassen sich der Einfluß der Sonne aber auch andere langfristige Einflüsse auf den Wind untersuchen. Um eventuelle Breitenunterschiede in den langfristigen Windänderungen zu betrachten, sollen die seit Jahren erfolgreichen Messreihen sowohl in Andenes als auch in Juliusruh weitergeführt werden. Mit einer Änderung des Windes ändern sich auch die Ausbreitungsbedingungen für Wellen. Daher sollen auch langfristige Veränderungen in Schwerewellen untersucht werden. Zukünftig sollen die beobachteten Unterschiede im langfristigen Verhalten von Winden und Schwerewellen in hohen und mittleren Breiten in Zusammenarbeit mit den am IAP betriebenen Modellierungsarbeiten interpretiert werden (siehe auch Kap. 5.2.). Desweiteren ist beabsichtigt die mittleren Winde hinsichtlich der mittleren Tageslänge über einen solaren Zyklus näher zu betrachten.

Mit LIMA werden auch langfristige Temperaturänderungen untersucht, und zwar auch außerhalb der polaren Mesosphäre. So ist es erstmals gelungen, das beobachtete Absinken der Reflexionshöhen aus den Phasenhöhenmessungen zu simulieren und die verantwortlichen Mechanismen zu analysieren. Diese Untersuchungen sollen fortgeführt und auf einen Zeitraum von mehr als 100 Jahren ausgedehnt werden. Auf der Basis von GCM-Rechnungen in anderen Instituten (ECHAM) soll auch die zukünftige Entwicklung untersucht werden. Diese Aktivitäten finden im Rahmen des ROMIC-Projektes TIMA² statt.

Die vorhandenen NLC- und PMSE-Beobachtungen werden inzwischen über mehr als eine Dekade durchgeführt und im Hinblick auf Trends untersucht. Von besonderer Bedeutung sind dabei mögliche langfristige Variationen des Wasserdampfes und/oder der Temperatur. Neueste Untersuchungen mit LIMA haben gezeigt, dass der Trend in den letzten Jahrzehnten nicht gleichmäßig gewesen ist, was wesentlich auf die Veränderungen im stratosphärischen Ozon zurückzuführen ist. Es sollen die verschiedenen Einflüsse auf Temperatur- und NLC-Trends untersucht werden.

²Trends in the middle atmosphere

6 Spezielle Forschungsthemen

6.1 Untere Thermosphäre

6.2 Metallschichten

Die Messungen des Kalium- bzw. Eisenlidars beinhalten automatisch eine Messung der Anzahldichten der Metallatome. Obwohl die Prozesse, die zur Bildung der Metallatom-Schichten führen, nicht zu den wissenschaftlichen Schwerpunkten des IAP gehören, sollen die Messergebnisse wegen ihrer Einzigartigkeit auch in Zukunft analysiert und publiziert werden. Es sind in den nächsten Jahren einzigartige Messungen zu erwarten, z. B. zur saisonalen Variation der Eisenschicht über Kühlungsborn und ALOMAR. Eine detaillierte Interpretation soll in Kooperation mit der Arbeitsgruppe von Prof. Plane (Univ. of Leeds) erreicht werden. Die Analyse soll sich explizit auch auf die untere Thermosphäre erstrecken.

6.3 Elektronendichtemessungen

Mit dem Saura MF-Radar werden auch Elektronendichten in der unteren Ionosphäre (D-Schicht) im Höhenbereich von etwa 55 km bis 90 km gemessen. Die Kenntnis der Elektronendichte ist für das Verständnis der Mesosphäre sowie für eine quantitative Interpretation von Radarmessungen insgesamt außerordentlich wichtig. Die MF-Radarmessungen in Andenes und später möglichst auch in Juliusruh erlauben sowohl die Untersuchung von tages- und jahreszeitlichen Variationen der mesosphärischen Elektronendichte, als auch den Einfluss der solaren Aktivität. Die Elektronendichtemessungen mit dem Saura-MF-Radar erweitern die noch geringe Datenbasis für hohe Breiten in Höhen unterhalb von 85 km und bis zu Elektronendichten von etwa $1 \cdot 10^8 \text{ m}^{-3}$ im Vergleich zum EISCAT UHF-Radar mit einer unteren Grenze von etwa $2 \cdot 10^9 \text{ m}^{-3}$. Dabei werden sowohl ungestörte Bedingungen als auch durch solare/geomagnetische Ereignisse insbesondere in polaren Breiten verursachte Störungen analysiert. Die in Abhängigkeit von Jahreszeit, Tageszeit und Sonnenaktivität bestimmten mittleren Profile können in Verbindung mit Absorptionsbeobachtungen sowohl mit dem Riometer AIRIS als auch mit dem MAARSY VHF Radar in Andenes zur Validierung empirischer Modelle der Elektronendichte und von Referenzionosphären genutzt werden. Auf der Grundlage der ermittelten Elektronendichteprofile sind wir ferner in der Lage, Zeiträume mit geringer ionosphärischer Aktivität zu identifizieren. Diese Zeiten werden genutzt, um die VHF-Radare am IAP durch den Vergleich mit der kosmischen Radiostrahlung zu kalibrieren und dabei weitere Eigenschaften des Antennensystems abzuleiten.

6.4 Aerosole in der Stratosphäre

Unsere Lidarmessungen liefern u. a. wertvolle und teilweise einzigartige Informationen über Aerosole in der Stratosphäre. Dies betrifft sowohl das Hintergrundaerosol als auch z. B. PSC³. Diese Daten sollen in Zusammenarbeit mit anderen Instituten, die sich auf dieses Themengebiet spezialisiert haben, ausgewertet und wissenschaftlich interpretiert werden.

6.5 Radarbeobachtungen mit „Incoherent Scatter“

6.6 Incoherent Scatter Radarbeobachtungen

Die von MAARSY abgestrahlte Leistung von etwa 800 kW erlaubt in Kombination mit einer zirkular polarisierenden Antenne sogenannte „incoherent scatter“ Radarbeobachtungen. Die Abstrahlung zirkular polarisierter Wellen gibt die Möglichkeit, weitere ionosphärische Parameter wie die Elektronendichte in der E- und F-Schicht, Elektronen-/Iontemperaturen und die

³polar stratospheric clouds

Plasmadriftgeschwindigkeit zu bestimmen. Die Entwicklung der MAARSY-Antenne berücksichtigte von vornherein die Möglichkeit einer diesbezüglichen Erweiterung. Die Installation der 433 Yagi-Antennen der sogenannten „zweiten Antennenebene“ und der zur Kombination notwendigen Polarisationschalter wurde im September 2013 abgeschlossen.

Erste Experimente zur Sondierung der F-Schicht zeigten, dass die dafür notwendigen langen Pulse mit MAARSY derzeit nicht in ausreichender Qualität generiert werden können. Es wird daher eine entsprechende Aufbereitung der notwendigen Komponenten angestrebt, um diese Radarbeobachtungen erfolgreich und in guter Qualität durchführen zu können. Durch eine geplante Verbesserung der MAARSY-Datenerfassung zur Verbesserung des Datendurchsatzes und der Pulsfunktionalität soll in Zukunft die Beobachtung der E-Schicht zusammen mit PMSE routinemässig erfolgen.