

LEIBNIZ-INSTITUT FÜR ATMOSPHÄRENPHYSIK
AN DER UNIVERSITÄT ROSTOCK
KÜHLUNGSBORN



**Arbeitsplan des IAP
für den Zeitraum
2019-2020**

F.-J. Lübken, J. Chau, E. Becker

Kühlungsborn, den 31. August 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Vorbemerkungen	3
2	Kurzdarstellung	3
3	Erforschung der Mesosphäre	5
3.1	Temperatur- und Windmessungen	5
3.1.1	Entwicklungen bei den RMR-Lidars in Kühlungsborn und auf ALOMAR	5
3.1.2	Entwicklungen beim mobilen und stationären K/Fe-Lidar	6
3.1.3	Entwicklungen diodengepumpter Alexandrit Ringlaser	6
3.1.4	VAHCOLI: ein neues Lidar-Konzept	7
3.1.5	Temperaturen aus Meteorechos	8
3.1.6	Entwicklungen der VHF-, MF- und Meteorradare	8
3.1.7	Dynamik aus Radarbeobachtungen	9
3.1.8	Windmessungen mit Lidars	10
3.2	NLC, PMSE und PMWE	11
3.2.1	Gleichzeitige Messungen von NLC, (P)MSE, PMWE und Hintergrundbedingungen	11
3.2.2	Vergleich der PMSE-Stärke an unterschiedlichen Orten	11
3.2.3	Kleinskalige Strukturen und Eigenschaften von Eisteilchen in NLC/PMSE	12
3.2.4	Winterechos: (P)MWE	12
3.2.5	Eintrag meteorischen Materials in die Mesosphäre	14
3.3	Modellierung von Temperaturen und Eisteilchen mit LIMA/MIMAS	14
3.4	Photochemie unter dem Einfluss von Schwerewellen und Turbulenz	15
3.5	Erweiterung des Radarmessverfahrens bis zur Thermosphäre	15
3.6	Neue Instrumente für Höhenforschungsraketen	15
4	Kopplung der atmosphärischen Schichten	16
4.1	Kopplung durch Wellen und residuelle Zirkulation	16
4.1.1	Gezeiten und Schwerewellen: Messungen und Modellierungen	16
4.1.2	Kopplung Stratosphäre-Mesosphäre beim Übergang vom Winter in den Sommer	19
4.1.3	IAP-eigene Zirkulationsmodelle	20
4.1.4	Makroturbulenz und Generierung von Schwerewellen	21
4.1.5	Vertikale Kopplung durch transiente Wellen; stratosphärische Erwärmungen; Mesosphärische Dynamik und Auswirkungen in der D-Schicht	22
4.1.6	Stationäre planetare Wellen und 3-dimensionale residuelle Zirkulation	23
4.1.7	Horizontale Sondierungen durch Nachthimmelsleuchten	24
4.2	Turbulenz	24
4.2.1	Insitu-Messungen auf Raketen	24
4.2.2	Insitu-Messungen auf Ballons	24
4.2.3	Turbulenzmessungen mit Radars	25
4.2.4	Messung kleinskaliger Strukturen mit Radarinterferometrie	25
4.2.5	Turbulenzmodellierung	26
4.3	Spurengase	27
4.3.1	Transport von Spurengasen, Wellenmischen	27

5	Langfristige Veränderungen in der mittleren Atmosphäre	27
5.1	ROMIC	27
5.2	Langzeittrends von Temperaturen, Schwerewellen, NLC und PMSE: Beobachtungen und Modellierung	27
5.3	Langzeitvariabilität des mesosphärischen Windes, der horizontalen Divergenz und relativen Vortizität in hohen Breiten	28
6	Spezielle Forschungsthemen	28
6.1	Metallschichten	28
6.2	Elektronendichtemessungen	29
6.3	Aerosole in der Stratosphäre	29

1 Vorbemerkungen

Das IAP hat im Juni 2018 den Jahresbericht für die Jahre 2016 und 2017 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 Schwerpunkte und Methoden sind im wissenschaftlichen 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 hervorgehoben 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 im IAP. Es liegt in der Natur der Sache, dass nicht alle Punkte aus dem letzten Arbeitsplan abgearbeitet worden sind, d. h. der vorliegende Arbeitsplan enthält auch Arbeitspakete aus dem vorigen Plan für 2017/2018.

2 Kurzdarstellung

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

- Schwerewellen und Gezeiten

Die ganztägigen Lidar-Messungen von Temperaturen und Winden werden im Hinblick auf Gezeiten und Schwerewellen untersucht. Dies betrifft in erster Linie die Messungen in Kühlungsborn und auf ALOMAR. Mit DoRIS stehen auch Windmessungen in der oberen Stratosphäre/unteren Mesosphäre zur Verfügung, die ebenfalls auf Schwerewellen untersucht werden. Dies erlaubt z. B. eine eindeutige Klärung der Frage, wie groß der Anteil der nach unten propagierenden Schwerewellen am gesamten Wellenfeld ist. Modellrechnungen des IAP legen nahe, dass in der Strato- und Mesosphäre generierte (sekundäre) Schwerewellen eine größere Bedeutung für die Gesamtzirkulation haben als bisher vermutet wurde. Durch die Kombination verschiedener Radar- und Lidarmethoden liegen Windmessungen im gesamten Höhenbereich von der Troposphäre bis zur unteren Thermosphäre vor, sodass die Ausbreitungsbedingungen für Schwerewellen sehr gut bestimmt werden können. Mit VAHCOLI¹ wird z. Zt. ein neues Lidarkonzept entwickelt, mit dem 4-dimensionale (also

¹VAHOCLI = Vertical And Horizontal COverage by Lidar

auch horizontale) Messungen ermöglicht werden. Weiterhin werden die Modellentwicklungen am IAP hinsichtlich hoher Auflösung und konsistenter Turbulenzparametrisierung vorangetrieben. Auch wird ein Modul zur Berechnung der in Strahlströmen generierten Schwerewellen entwickelt. Die neuen experimentellen und theoretischen Entwicklungen ermöglichen neue Untersuchungen zur Ausbreitung und Dissipation von Schwerewellen sowie zur Wechselwirkung von Schwerewellen und Gezeiten.

- Kopplung Stratosphäre/Mesosphäre

Die Frage, wie genau die stratosphärische Zirkulation die saisonale Variation der Mesopausentemperatur beeinflusst, hat durch unsere Messungen in Davis (68°S) neue Aktualität gewonnen (Stichwort: „mesopause jumps“). Durch neue Messungen und Modellrechnungen sollen die noch offenen Fragen geklärt 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 spielen die Ausbreitungsbedingungen für Wellen und deren Auswirkungen auf die Atmosphäre die entscheidende Rolle. Jüngste Studien mit Beteiligung des IAP belegen die fundamentale Bedeutung von sekundären Schwerewellen in der südlichen Wintermesosphäre. Künftig wird dieser Aspekt auch bei unseren Untersuchungen in der Nordhemisphäre eine bedeutende Rolle spielen, sowie in dem sogenannten Schwerewellen-Hotspot in Südargentinien.

- Eisschichten und Radarechos in der Mesosphäre

Bezüglich der Erforschung von NLC/PMSE/PMWE geht es einerseits darum, die Physik dieser Schichten zu verstehen und daraus wichtige Aussagen über den Hintergrund abzuleiten. Andererseits werden diese Eisschichten zusehends als Tracer für dynamische Prozesse verwendet, die ansonsten mit keiner Messtechnik zugänglich sind. Neue Entwicklungen in der Lidar- und Radartechnik, sowie hochaufgelöste photographische Aufnahmen liefern 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 dieses Forschungsbereichs. In den nächsten Jahren sollen die physikalischen Ursachen für PMWE² endgültig geklärt werden. PMWE werden mit MAARSY oft beobachtet und sind daher wichtig für eine Analyse des Zustandes der mittleren Atmosphäre (Turbulenz, Staubteilchen etc.).

- ROMIC und Trends

Das IAP hat auch für die zweite Phase von ROMIC³ (2019-2022) eine Reihe von Projektanträgen gestellt. Mit einer Entscheidung ist im Herbst 2018 zu rechnen. Es sollen Trends in der mittleren Atmosphäre erforscht werden. Außerdem wird die Bedeutung von mesoskaligen Wellen für die Zirkulation und den Transport von Spurengasen in der mittleren Atmosphäre untersucht. 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 die Weiterentwicklung globaler Klima-Chemie Modelle der mittleren Atmosphäre relevant sind.

- Turbulenz

Wie Prozesse auf kleinen Skalen physikalisch konsistent beschrieben und parametrisiert werden können, ist eine der zentralen Fragestellungen am IAP. Bei der theoretischen Beschreibung wurden im Vergleich zu konventionellen Methoden eine Reihe von Verbesserungen erreicht. Die Erzeugung von Turbulenz durch brechende Schwerewellen in der MLT⁴-

²Polar Mesosphere Winter Echos

³Role of the Middle Atmosphere in Climate

⁴Mesosphere-Lower Thermosphere

Region ist ein ideales Beispiel, um Zirkulations- und Turbulenzmodelle mit Messungen zu vergleichen und so zu neuen Erkenntnissen zu gelangen. Das IAP besitzt hier in einigen Bereichen Alleinstellungsmerkmale, die mit bewährten bzw. neu etablierten experimentellen Methoden (MAARSY, DoRIS, Höhenforschungsraketen, LITOS, MISI, MMARIA) gestärkt und ausgebaut werden sollen. Gleiches gilt für theoretische Arbeiten und Entwicklungen von IAP-eigenen Zirkulationsmodellen mit sehr hoher Auflösung (ICON-IAP und KMCM). In Zukunft wird die Frage nach der dreidimensionalen Struktur der Turbulenz in den Vordergrund rücken („geschichtete Turbulenz“, Turb3D). Auf Basis der neuen Version von KMCM soll abgeschätzt werden, welche möglichen Konsequenzen sich aus den am IAP entwickelten Turbulenzmodellen für Klimaszenarienrechnungen ergeben. Außerdem soll untersucht werden, inwieweit die Schwerwellenspektren in der MLT ähnlich wie in der Troposphäre den Ähnlichkeitsgesetzen geschichteter Turbulenz unterliegen. Entsprechende Messungen sollen u. a. zur Validierung einer sich gegenwärtig in der Entwicklung befindlichen verbesserten Turbulenzparametrisierung für Zirkulationsmodelle genutzt werden. Das IAP beteiligt sich hinsichtlich dieser Thematik mit mehreren Teilprojekten zu Turbulenz und Schwerwellen in mehreren Forschungsprogrammen, wie z. B. dem SFB/Transregio-Projekt der Universität Hamburg mit dem Titel „Energy transfers in the Atmosphere and Ocean“.

Kopplung der Mesosphäre mit der Thermosphäre/Ionosphäre

Die erweiterten experimentellen Möglichkeiten bei den Radars (MMARIA) sowie die besonderen Fähigkeiten des Fe-Lidars erlauben zukünftig auch Untersuchungen von Kopplungsprozessen zwischen der Mesosphäre und Thermosphäre/Ionosphäre. Insbesondere die Ausbreitung von Wellen (Gezeiten, Schwerwellen) durch die Mesosphäre bis in die Thermosphäre ist unzureichend erforscht. Ziel ist es, die physikalischen Prozesse durch Beobachtungen und durch Modellrechnungen genauer zu untersuchen. Dazu soll zum einen das KMCM mit aufgelösten Schwerwellen bis weit in die Thermosphäre/Ionosphäre erweitert werden, und es sollen ebenso externe Modelle, wie z. B. das WACCM-X, genutzt werden. In diesem Zusammenhang findet eine Kooperation in der Modellentwicklung mit dem NCAR (Boulder, USA) statt. Die Kopplung der Mesosphäre mit der Thermosphäre/Ionosphäre ist Schwerpunkt der Arbeiten im Rahmen des DFG-Projekts DYNAMITE die im Nachfolgeprojekt DYNAMITE2 weitergeführt werden. Erste Ergebnisse aus Modellrechnungen zu Gezeiten und Schwerwellen in der unteren Thermosphäre auf Basis von KMCM liegen vor und sollen zukünftig weiter analysiert werden.

3 Erforschung der Mesosphäre

3.1 Temperatur- und Windmessungen

Aus den Temperaturmessungen des IAP von der Troposphäre bis zur unteren Thermosphäre ist in den letzten Jahren eine Klimatologie der thermischen Struktur über Kühlungsborn und über ALOMAR erstellt worden. Diese Messungen sollen fortgesetzt und erweitert werden. Es geht in Zukunft vermehrt darum, die Variabilität der Temperaturen und Winde auf allen verfügbaren Skalen zu untersuchen. Dies betrifft Wellen und Turbulenz, sowie tageszeitliche, monatliche, interannuale, dekadische und solare Variationen (siehe Kapitel 4.1.1). Unter Einsatz neuer Laser- und Radartechniken werden neue Bereiche von zeitlichen und räumlichen (regionalen) Skalen erfasst (Stichworte: VAHCOLI, MMARIA).

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

Die Temperaturmessungen mit den RMR-Lidars in Kühlungsborn und ALOMAR sollen fortge-

setzt, optimiert und für die Beantwortung geophysikalischer Fragestellungen verwendet werden. Aufgrund der Tageslichtfähigkeit beider Systeme können Schönwetterperioden für mehrtägige ununterbrochene Messungen und Vergleiche mit Messungen von Radars und MISI⁵ sowie mit meteorologischen Analysen (ECMWF, MERRA-2) genutzt werden. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Wechselwirkung von Schwerewellen mit Gezeiten und planetaren Wellen. Um den Personalaufwand für die Messungen weiter zu reduzieren, soll der Betrieb der Lidars weiter automatisiert werden. Dazu wurden 2018 an beiden Standorten umfangreiche Schutzmechanismen installiert, die durch elektronische Überwachung und Regelung einen sicheren Betrieb der Hochleistungslaser ohne menschliche Überwachung gewährleisten.

Kürzlich wurden drei Dioden-gepumpte Nd:YAG-Laser für die RMR-Lidars in Kühlungsborn und ALOMAR beschafft. Sie werden die aktuell benutzten Blitzlampen-gepumpten Laser ersetzen. Im Vergleich zu den bisherigen Lasern emittieren die neuen Laser auf der hauptsächlich genutzten Wellenlänge (532 nm) eine dreifach höhere mittlere Leistung. Dadurch wird der Bereich der Atmosphärensondierungen zu größeren Höhen erweitert sowie die Zeitauflösung der Messungen verbessert. Davon werden nicht nur die Temperaturmessungen profitieren, sondern ebenfalls Windmessungen, NLC-Messungen und Aerosol-Messungen in der Stratosphäre (siehe Kapitel 3.1.8, 3.2.3 und 6.3). Es wird z. Zt. eine neue Methode entwickelt, um eine schnelle Abstimmung der Sendewellenlänge zu ermöglichen. In Verbindung mit einem neu zu entwickelnden Etalonbasierten Spektrometer ergeben sich neue Möglichkeiten für die quasi-gleichzeitige Bestimmung grundlegender atmosphärischer Parameter. Durch gezielte Änderung der Wellenlänge der gesendeten Laserpulse bezüglich eines spektralen Empfangsfilters (DoRIS) können Dopplerverbreiterung (Temperatur), Dopplerverschiebung (Wind) und Aerosolbeladung bestimmt werden. Der dafür notwendige Einzelschuss-Zähler ist bereits im Einsatz und wird zukünftig auf noch mehr Kanäle erweitert und optimiert. Die neuen Laser erlauben außerdem eine Veränderung der Ausgangsleistung bezüglich der drei Sendewellenlängen (1064, 532, 355 nm) während des Betriebes. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, innerhalb von Minuten vom 3-Wellenlängenbetrieb (z. B. für Teilchengrößenmessungen von NLC, siehe Kapitel 3.2.3) auf maximale Ausgangsleistung bei 532 nm umzuschalten, um möglichst genau kleinskalige Strukturen bzw. Dopplerverschiebung und -verbreiterung zu messen. Weitere neue Möglichkeiten ergeben sich durch die Motorisierung der Primärspiegelhalterungen der Strahlaufweiterteleskope. Damit ist der Fokus des Laserstrahls in der Atmosphäre gezielt einstellbar, was zu einer Verringerung des Gesichtsfeldes und somit einer Erhöhung der Signalqualität führen soll. Diese neuen Entwicklungen werden sowohl auf ALOMAR als auch in Kühlungsborn zum Einsatz kommen.

3.1.2 Entwicklungen beim mobilen und stationären K/Fe-Lidar

Das mobile Fe-Lidar des IAP wurde nach seinem Einsatz 2010-2012 in der Antarktis wieder zum IAP verbracht, dort überholt und im Sommer 2014 nach ALOMAR transportiert. Auf ALOMAR sollen mit diesem Lidar u. a. erstmals Gezeiten in Temperaturen und Fe-Schichten untersucht werden. Ein weiterer Schwerpunkt ist die genaue Erfassung des Jahresgangs der Temperaturen und Fe-Schicht, was mehrjährige Messungen voraussetzt. Es wurde bereits ein beachtlicher Datensatz gewonnen. Allerdings verbleiben aufgrund relativ schlechter Wetterbedingungen im Frühjahr der letzten Jahre noch einige Lücken im Jahresgang. Diese sollen durch weitere Messungen geschlossen werden. Das Fe-Lidar soll noch für einen längeren Zeitraum auf ALOMAR verbleiben, u. a. als Ersatz für das dortige Na-Lidar, welches zurzeit abgebaut wird.

3.1.3 Entwicklungen diodengepumpter Alexandrit Ringlaser

In den letzten Jahren wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut in Aachen (ILT)

⁵Microwave Spectrometer at IAP ; Messung von Wasserdampfprofilen

ein erster diodengepumpter Alexandrit Ringlaser entwickelt, der im Labor und bei Messungen in der Atmosphäre getestet wurde. Gegenüber anderen gepulsten Lasern besitzt dieser Laser eine deutlich geringere spektrale Linienbreite bei gleichzeitig idealen Strahlparametern. Aufgrund seiner Durchstimmbbarkeit, hohen Effizienz und kompakten Bauform ist dieser Laser grundsätzlich für Doppler-Messungen aller Art geeignet, was im Rahmen von VAHCOLI umgesetzt werden soll. Zur präzisen Frequenzsteuerung wurde am IAP für diesen Laser ein neuartiges System namens „advanced ramp and fire“ entwickelt. Dadurch kann der technologische Aufwand für spektrale Messungen stark reduziert werden. Eine Messung der Frequenz jedes einzelnen Laserpulses, wie noch beim aktuellen Fe-Lidar erforderlich, kann zukünftig entfallen.

Im vom BMWi geförderten Verbundprojekt Alise wird in weiterer Zusammenarbeit mit dem ILT ein noch leistungsfähigerer Laser entwickelt. Dabei soll die grundsätzliche Eignung für zukünftige Satelliten-Missionen auf der Basis bodengebundener Testmessungen demonstriert werden. Das IAP steuert dazu seine Expertise in der Lidar-Entwicklung bei und führt entsprechende Messungen in der Atmosphäre durch.

Die Entwicklungen innerhalb von Alise dienen gleichzeitig als Grundlage für eine dritte, leistungsfähigere und kompaktere Generation dieser Lasertechnologie, die innerhalb von VAHCOLI zum Einsatz kommen wird. Mit dieser Entwicklung wurde am 1.1.2018 begonnen. Ein erster Laser soll bis Ende des Jahres aufgebaut und in ein VAHCOLI-Lidar integriert werden. Anschließend wird sowohl die Lasertechnik als auch das Gesamtsystem ausführlicher getestet werden.

3.1.4 VAHCOLI: ein neues Lidar-Konzept

VAHCOLI ist ein neues Lidarkonzept, das am IAP seit einigen Jahren entwickelt wird. Im Prinzip geht es darum, alle Komponenten eines Lidars soweit zu miniaturisieren, dass man ein mobiles, schwenkbares und tageslichtfähiges System erhält, von denen z. B. mehrere an verschiedenen Standorten platziert werden können. Neben der technischen Machbarkeit steht dabei auch eine starke Reduktion des Personalaufwandes für den Bau und Betrieb im Vordergrund. Hierzu kommen eine Reihe neuer Technologien zum Einsatz, die in den letzten Jahren am IAP entwickelt wurden.

Der Beirat hat diese Entwicklung vorbehaltlos unterstützt, und auch im Bericht zur Evaluierung wird VAHCOLI nachdrücklich befürwortet. Im August 2016 haben wir einen Antrag auf einen Sondertatbestand gestellt, der ab 1.1.2018 realisiert wird.

In Vorbereitung für VAHCOLI wurde in den letzten Jahren eine erste Version eines Systems aufgebaut. Neben dem gepulsten Laser ist eine Grundvoraussetzung für VAHCOLI ein geeignetes Gehäuse samt der dafür notwendigen Infrastruktur, wie Strom, Kühlung, Dichtigkeit gegen Staub und Integration eines Teleskops. Viele wichtige Systeme eines Doppler-Lidars, wie Frequenzkontrolle, Tageslichtfilter, Strahlstabilisierung etc. wurden innerhalb dieses Systems entwickelt. Aufgrund der technologischen Fortschritte bei der Lasertechnologie als auch bei den optischen, elektronischen und mechanischen Komponenten eines Lidar sollen zukünftige Versionen von VAHCOLI weiter verkleinert und vereinfacht werden.

Wir haben mit einem ersten Alexandrit-Ringlaser erfolgreich Testmessungen an der Atmosphäre durchgeführt. Die im Vergleich zu etablierten Verfahren um Größenordnung höhere spektrale Auflösung erlaubt dabei erstmals effektive spektrale Messungen der Mie-Streuung, wodurch theoretisch je nach Höhenbereich Teilchengröße, Wellen, oder auch Turbulenz und die mittlere Zirkulation der Atmosphäre bestimmt werden können. Aufgrund neuartiger spektraler Filter hoher Effizienz kann zukünftig die Nachweisgrenze für Eisteilchen und Aerosole aller Art stark verbessert werden. Weitere Entwicklungen und der Bau von weiteren VAHCOLIs sollen in den Jahren 2018 bis 2020 erfolgen, zum größten Teil finanziert aus dem o. g. Sondertatbestand.

3.1.5 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 weiter modifiziert und optimiert. Die Meteorradartemperaturen werden zur Untersuchung von Kopplungsprozessen und der planetaren Wellenaktivität eingesetzt. Der Vorteil dieser Methode im Vergleich zu anderen Fernerkundungsverfahren liegt in der Kontinuität der Zeitreihen.

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 Eisteilchen (NLC) die Diffusion schneller stattfindet und die Meteorschweife in diesem Höhenbereich schneller abklingen. Wir planen diese Messungen mit Simulationen zu ergänzen, um die Methode der Temperaturmessungen aus der Abklingzeit von Meteorechos noch weiter zu verbessern. Zusätzlich kann das Verfahren anhand der Temperaturmessungen des Fe-Lidars auf ALOMAR verifiziert werden. Das Ziel besteht darin, aus der Messung der Abklingzeit auf die Gegenwart von Eisteilchen schließen zu können.

3.1.6 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 Software 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 15 Jahren im kontinuierlichen Messbetrieb. Während der letzten Jahre wurden beide MF-Radare bzgl. der Datenerfassung (digitale Mehrkanalempfänger) und Radarsteuerung modernisiert, was die zeitliche Auflösung und die Signalqualität der Messungen beider Systeme deutlich verbessert hat. Da die Radare jetzt über erweiterte interferometrische sowie experimentelle Möglichkeiten bzgl. der Entfernungsauflösung, Strahlsteuerung und Polarisierung des Sendesignals verfügen, liegt das Hauptaugenmerk der kommenden Jahre in der Aktualisierung bzw. Ergänzung der Echtzeit-Analysesoftware.

Das MAARSY wurde durch eine flexiblere Pulserzeugung ergänzt, die es ermöglicht während eines Meßzyklus zwei aufeinander folgende Pulse auszusenden. Diese Pulse können dabei verschiedene Längen sowie Kodierung beinhalten, was eine optimale Anpassung an die jeweiligen Radarziele ermöglicht. So ist es nun möglich, für Schichten mit einem typisch hohen Rückstreuungskoeffizienten wie der unteren Troposphäre einen kurzen Puls, und für die rückstreuärmere, obere Troposphäre als auch die untere Stratosphäre und die Mesosphäre einen langen kodierten Puls mit höherer mittlerer Leistung auszusenden. Zur Verbesserung der interferometrischen Fähigkeiten, u.a. um bildgebende Verfahren noch effektiver anwenden zu können, wurden bereits weitere abgesetzte Antennenfelder um das eigentliche Kernsystem gebaut.

Eine weitere Methode zur Verbesserung der räumlichen Auflösung der Messungen innerhalb des beleuchteten Volumens ist die Anwendung des kohärenten MIMO⁶-Verfahrens. Hierbei werden vorhandene, separate Antennengruppen des MAARSY-Antennenfeldes zum Senden unabhängiger, individueller Wellenformen und ebenfalls mehrere, separate Antennengruppen für den Empfang der Signale genutzt wodurch sich virtuelle Empfangselemente mit einer vergrößerten virtuellen Apertur ergeben, die wiederum eine höhere räumliche Auflösung gegenüber der Standardkonfiguration ermöglicht. Das Konzept wurde bereits erfolgreich getestet und wird nun in den operationellen Betrieb für spezielle Meßkampagnen überführt.

⁶Multiple Input Multiple Output

Ebenfalls in den kommenden zwei Jahren wird eine Empfangsstationen im Abstand von bis zu 100 Kilometern von MAARSY entfernt installiert, welche die Grundlage für MAARSY-3D bildet. Die dafür genutzte Empfangstechnik wird auf erprobter Hardware, wie sie in LOFAR-Stationen zur Anwendung kommt, basieren. Nach erfolgreicher Inbetriebnahme der abgesetzten Empfangsstation ist eine weitere gleichartige Installation geplant.

In den vergangenen Jahren wurde das am IAP entwickelte Konzept des Vorwärtsstrometeorradars MMARIA⁷ zur Bestimmung horizontal aufgelöster Windfelder erfolgreich getestet. Dazu wurde auf dem Gelände des IAP eine Zweikanalempfangsstation für den Empfang der Signale der Meteorradare in Juliusruh und am Collm installiert. Diese Empfangsstation wurde ebenfalls zur Erprobung des MMARIA-CW⁸-Verfahrens und für die Erprobung des klassischen Pulsbetriebs mit mehreren Frequenzen (spread spectrum) genutzt. In den kommenden Jahren wird nun mit dem Ausbau des MMARIA-Netzwerkes in Deutschland und dem Aufbau eines entsprechen Netzwerkes in Norwegen begonnen. Eine erste passive Empfangsstation wurde bereits in Neustrelitz installiert und getestet, an einer weiteren Station bei Bornim wird bereits gearbeitet. Der Plan der kommenden Jahre sieht für Deutschland die operationelle Inbetriebnahme der neuen Stationen bzw. die Errichtung weiter passiver Empfangsstationen sowie den Bau sechs aktiver Sendestationen im Umkreis von 60 bis 180 Kilometer um Kühlungsborn vor. In Nordnorwegen wurde ein Standort für eine erste zusätzlicher Empfangsstation ca. 200 km südlich von Andenes gefunden und die entsprechende Infrastruktur vorbereitet. Die Installation der Antennen und der Empfangstechnik soll im Herbst erfolgen, so dass diese Station des MMARIA-Netzwerkes Nordnorwegen noch in diesem Jahr in Betrieb genommen werden kann. Die Erkundung weiterer Standorte südöstlich von Andenes ist für die kommenden Jahre vorgesehen.

Im Rahmen der Zusammenarbeit zwischen dem IAP und dem Project WASCLIM (ROMIC-II), einer ehrgeizigen Kampagne zur Untersuchung des Einflusses von Schwerewellen auf die stratosphärische Zirkulation in der südlichen Hemisphäre und deren Auswirkungen auf den Klimawandel, wird das MMARIA-Konzept in Südargentinien installiert um die Kopplung der Mesosphäre mit den darüberliegenden Schichten, speziell den Einfluss von Schwerewellen und thermischen Gezeiten auf die südliche Mesosphäre und die untere Thermosphäre zu untersuchen. Drei Standorte im sogenannten Schwerewellen-Hotspot in Tierra del Fuego (53.8°S, 67.8°W) wurden bereits erkundet. Es ist geplant, das System Anfang 2019 für zunächst für zwei Jahre in Betrieb zu nehmen.

3.1.7 Dynamik aus Radarbeobachtungen

Bei den Windmessungen mit Radars liegt der Schwerpunkt zum einen auf der Kontinuität der Messungen, aber auch auf der Innovation durch neue Experimente und Konzepte. Dadurch ist es möglich, die langen Messzeitreihen der MF- und Meteorradare in ihren Eigenschaften zu erhalten, sowie neue Verfahren der Wind- und Wellenanalyse mit den erweiterten Fähigkeiten der VHF-Radare und dem Konzept des MMARIA 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 Kapitel 4.1). Darüber hinaus werden die Windmessungen mit Meteor-, MF- und VHF-Radars auch genutzt, um Schwerewellen detaillierter zu untersuchen. Die kontinuierlichen Messungen der Meteor- und MF-Radare sollen dabei weiter genutzt werden, um eine Klimatologie der Schwerewellenaktivität fortzuführen. Des Weiteren 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.

⁷Multi-Frequency Multi-Station Agile Radar for the Investigation of the Atmosphere

⁸continues wave

Der weitere Ausbau des MMARIA-Netzwerkes in Deutschland und Norwegen steht für die nächsten Jahre im Fokus. Nachdem bisher vor allem die Entwicklung der Methode selbst, insbesondere des Wind Retrievals im Vordergrund stand, werden nun auch mehr die geophysikalischen Aspekte betrachtet. Durch den weiteren Aufbau von Stationen wird es möglich sein die Ausbreitung und Wechselwirkung von Schwerewellen mit dem Hintergrundwind während sogenannter Body-Forces anzuschauen und quantitativ zu untersuchen. Zudem können die horizontal aufgelösten Windfelder zur Bestimmung des horizontal aufgelösten mittleren Impulsübertrags herangezogen werden. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Auswertung der horizontalen Wellenspektren zur Abschätzung des spektralen Verlaufs (Nastrom und Gage Spektrum). Dabei wird versucht die Strukturgröße des Übergangs von Vortexstrukturen (k^{-3}) zu divergenten Wellen ($k^{-5/3}$) zu bestimmen.

Im Zuge der technischen Entwicklungen aller Radarsysteme werden auch die Windanalysealgorithmen überarbeitet. Durch die Verwendung von Regularisierungen konnte die Qualität der Meteorradarwinde nochmals gesteigert werden. Zusammen mit den verbesserten interferometrischen Möglichkeiten soll dieser Ansatz auch auf die MF- und VHF- Radare übertragen werden.

Eine besondere Rolle in der Beobachtung von Schwerewellen spielt MAARSY. Aufgrund der technischen Erweiterungen des Radars (MAARSY-3D) wird zukünftig das Augenmerk noch mehr auf der Anwendung von bildgebenden Verfahren liegen. Diese Methoden erlauben es dynamische Prozesse (Wind, Turbulenz) auf kleinskaligen Strukturen innerhalb des Strahlvolumens näher zu betrachten.

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. 3.1.6). Des Weiteren 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.

3.1.8 Windmessungen mit Lidars

Mit DoRIS⁹ werden regelmäßig Winde in der mittleren Atmosphäre, d. h. von ca. 15 bis 80 km, gemessen. Durch die Kombination mit anderen Methoden stehen zum ersten Mal durchgehende und regelmäßige Windmessungen von der Troposphäre (Radars, Ballons) bis zur unteren Thermosphäre (Radars) zur Verfügung. Dies erlaubt eine detaillierte Untersuchung zur Ausbreitung von Wellen in der gesamten Atmosphäre. DoRIS ist mittlerweile in den operationellen Betrieb integriert und erlaubt regelmäßig Messungen des Grundwindes sowie der Windstörungen mit einer zeitlichen Auflösung von ca. 30 Minuten. In Zukunft soll die Auswertung der Daten soweit automatisiert werden, dass die Messungen zeitnah analysiert werden können. Die Lidardaten werden bereits im EU-Projekt ARISE¹⁰ verwendet, wo es u. a. um die Ausbreitung von Infraschall in der Atmosphäre geht. Vergleichsmöglichkeiten ergeben sich u. a. mit MAARSY. Beim RMR-Lidar in Kühlungsborn wurde die DoRIS-Technik zunächst für vertikale Winde implementiert. In nächster Zeit soll sie mittels gekippter Laserstrahlen und Teleskope auf horizontale Winde erweitert werden. Die dafür notwendigen Personalmittel werden zurzeit bei der DFG beantragt, während die Investitionen durch das IAP getragen werden. Außerdem steht mit VAHCOLI in absehbarer Zeit ein flexibles und leistungsfähiges Lidar zur Verfügung, welches ebenfalls Winde messen soll.

⁹Doppler Rayleigh Iodine System

¹⁰Atmospheric dynamics Research InfraStructure in Europe

3.2 NLC, PMSE und PMWE

3.2.1 Gleichzeitige Messungen von NLC, (P)MSE, PMWE und Hintergrundbedingungen

Für mittlere Breiten (Kühlungsborn) wurde kürzlich die erste statistische Studie zu gemeinsamen Messungen von NLC und MSE veröffentlicht, die erneut die Bedeutung der Advektion von Eisteilchen aus höheren Breiten heraushebt. Gleichzeitig zeigt SOFIE¹¹ eine Abhängigkeit der NLC-Häufigkeit von der geographischen Länge mit einem Minimum über Kühlungsborn. Daher soll die Bedeutung der Hintergrundatmosphäre für die Existenz von Eisteilchen anhand gleichzeitiger Messungen von NLC (Radien größer 10 nm) und MSE (Radien kleiner 10 nm), Temperaturen, Gezeiten und Schwerwellen weiter untersucht werden. Dies ist auch für die Interpretation von Trends in Eisschichten von großer Bedeutung. Die Modellierung der Trajektorien von Eisteilchen mit MIMAS wird die Analyse der Messdaten unterstützen.

Mit den Möglichkeiten des MAARSY-Radars werden die Vergleiche von PMSE und NLC erheblich verbessert, weil a) die PMSE-Messungen jetzt ebenfalls in einem sehr kleinen Volumen möglich sind, und b) weil MAARSY einen Einblick in die horizontale Verteilung von PMSE ermöglicht. Letzteres konnte durch die Anwendung von Radarinterferometrie in Kombination mit bildgebenden Verfahren (Imaging) bedeutend verbessert werden. Durch den zukünftigen Einsatz des kohärenten MIMO-Verfahrens wird sich die horizontale und zeitliche Auflösung der MAARSY-Messungen noch einmal verbessern und somit einen detaillierteren Einblick in die räumlichen Strukturen der PMSE ermöglichen. 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 3.2.4).

Gelegentlich zeigen unsere Messungen, 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 hierbei einen Unterschied zwischen Davis und ALOMAR gibt.

Die vom IAP durchgeführten Messungen im Höhenbereich von NLC und PMSE legen nahe, dass die Eisteilchennukleation maßgeblich durch klein- und großskalige Temperaturfluktuationen beeinflusst wird. Über den quantitativen Einfluss dieser Wellenstörungen auf die Mikrophysik der Eisteilchen ist aber derzeit nur sehr wenig bekannt. Um diese Lücke zu schließen, sollen in den nächsten Jahren horizontal aufgelöste Messungen dieser Wolken, sowie von Winden und Temperaturen durchgeführt werden. Dies wird ermöglicht durch die Übertragung des MMARIA-Konzepts auf Norwegen und durch die Nutzung von MAARSY, sowie durch Einsatz der schwenkbaren Teleskope des ALOMAR RMR-Lidars. Außerdem werden die neuen Lidars von VAHCOLI und die Realisierung des MAARSY-3D-Konzeptes hierbei von großem Nutzen sein. Diese Messungen sollen durch kombinierte mikrophysikalische/dynamische Rechnungen mit Hilfe einer Kombination von MIMAS und KCMC komplementiert werden. Die Resultate dieser Untersuchungen sollen dann im Hinblick auf ihre globale Relevanz untersucht werden.

3.2.2 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 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

¹¹Solar Occultation or Ice Experiment; Instrument auf dem AIM Satelliten

werden auch in Zukunft weiter geführt, z. B. anhand der Messungen mit den VHF-Radars in Davis (68°S, 78°E) und PANSY¹² in Syowa (69°S, 39°E).

3.2.3 Kleinskalige Strukturen und Eigenschaften von Eisteilchen in NLC/PMSE

Die horizontale Struktur von NLC und PMSE erlaubt es, Rückschlüsse auf die zugrundeliegenden Mechanismen, wie z. B. Vertikalbewegung durch Schwerewellen oder Instabilitäten, zu untersuchen. In den nächsten Jahren sollen die vorhandenen Mess- und Analysemethoden so erweitert werden, dass simultane Beobachtungen von vertikaler und horizontaler Struktur sowie deren zeitliche Entwicklung untersucht werden können. Hierbei werden Lidar- und Kamerabeobachtungen von NLC, aber auch Radarbeobachtungen von PMSE kombiniert. Die Anwendung des kohärenten MIMO-Verfahrens mit dem MAARSY in Zusammenhang mit bildgebenden Analyseverfahren (Imaging) sowie die Installation entfernter Empfangsstationen (MAARSY-3D) werden dazu räumlich und zeitlich hochaufgelöste mesosphärischen Messungen in neuer Qualität liefern. Außerdem sollen neuartige Projektionsalgorithmen (Triangulation, Lidar Entfernungsmessung, Affine Transformation), welche in den letzten Jahren entwickelt wurden, eingesetzt werden.

Um die dynamischen Vorgänge besser zu verstehen, werden die Messungen der Teilcheneigenschaften neuerdings mit einer sehr hohen zeitlichen Auflösung von ca. 5 Minuten ausgewertet und mit den kleinskaligen Strukturen in der NLC verglichen. Dabei ist zu beachten, dass das Auftreten von Instabilitäten zu einer Verbreiterung der Teilchengrößenverteilung führen kann. Die vorhandenen Struktur- sowie Teilchengrößenmessungen werden zunächst auf eine Korrelation der Parameter hin untersucht. Durch den Einsatz neuer Laser soll schließlich die zeitliche Auflösung der Messungen weiter reduziert werden. Damit soll die Form der Verteilungsfunktion und damit die Bedeutung der kleinskaligen Prozesse für die Mikrophysik der Eispartikel untersucht werden.

Weiterhin ist geplant, den Einfluss von Turbulenz auf die Morphologie von Eisteilchen zu untersuchen. Dazu sollen in Zukunft neue, regional begrenzte Hintergrundfelder in MIMAS verwendet werden, z. B. von ICON-DWD¹³, die mit einer hohen zeitlichen (5 Min) und räumlichen Auflösung (2 km x 2 km) kurzperiodische Schwerewellenstrukturen beschreiben. Wir erwarten damit Aussagen zum Verständnis des Verhaltens von Eiswolken auf unterschiedlichen Zeitskalen und zur Wechselwirkung von Eisteilchen mit der Hintergrundatmosphäre (siehe auch Kapitel 5.2).

3.2.4 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. zur 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 von 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 durch die modernisierte Pulssteuerung des MAARSY verbesserte räumliche und zeitliche Auflösung der Messungen wird es ermöglichen, aus den spektralen Parametern der Empfangssignale direkte Erkenntnisse über die turbulenten Eigenschaften der Echos zu erhalten.

¹²Program of the Antarctic Syowa MST/IS Radar

¹³Deutscher Wetterdienst

Die mit MAARSY gewonnenen Statistiken zeigen, dass diese Winterechos wesentlich häufiger und in einem größeren Höhenbereich auftreten können, als es bisher mit anderen Radaren beobachtet wurde. Ihr Auftreten ist auch nicht allein auf die Wintermonate beschränkt, wie bisher angenommen wurde. In den kommenden beiden Jahren werden wir untersuchen, inwieweit sich PMWE nutzen lassen, um kontinuierliche VHF-Radar-Beobachtungen der Neutraldynamik in der gesamten Mesosphäre durchführen zu können. Somit wäre es möglich, unter den besonderen Bedingungen von PMWE auch Windmessungen im Höhenbereich von etwa 45 bis 80 km mit VHF-Radaren durchzuführen.

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 untersucht werden. Die Verbindung zwischen den Hochleistungsradars mit extrem schmalen Radarstrahl (EISCAT, Tromsø) und der Möglichkeit von MAARSY, mit dem Radarstrahl das Untersuchungsobjekt von Puls zu Puls horizontal zu scannen, erlaubt es, die physikalischen Eigenschaften der PMWE im Detail zu untersuchen. 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 studieren.

Da MAARSY um etwa eine Größenordnung empfindlicher ist als die vorher auf Andoya betriebenen VHF-Radare, können neue Statistiken der Häufigkeit der PMWE zur Grundlage der Planung von Raketenkampagnen zur Untersuchung dieser Echos genutzt werden. Die Messungen des MAARSY werden herangezogen, um PMWE zu identifizieren und somit die Startbedingungen für die instrumentierten Raketen zu definieren. Die Schwenkbarkeit des Radarstrahls von MAARSY ermöglicht es dabei, Bereiche entlang der Flugbahn der Raketen zu erfassen, so dass erstmalig zeitgleiche Messungen im selben Volumen durch Raketensensoren und Radar durchgeführt werden könnten. Die zeitgleichen Messungen des Hintergrundwindes und der Elektronendichte durch das Saura-MF-Radar lassen zudem Rückschlüsse auf notwendige Bedingungen zur Bildung von PMWE zu. Die Auswertung der Daten der raketenge tragenen Instrumente werden präzise Messungen der turbulenten Strukturen, der Neutralgasdichten und -temperaturen sowie von Meteorstaub und kleinskaligen Strukturen im Plasma liefern. Die entsprechenden Radardaten werden Rückschlüsse über deren zeitlichen Verlauf und räumliche Struktur zulassen. Aus den daraus gewonnenen Daten lässt sich die Bedeutung von turbulenten Strukturen, Meteorstaub, Ionen und Elektronen für die Bildung von PMWE ableiten. Die Interpretation wird durch die Messung von Elektronendichten durch das MF-Radar bei Saura verbessert. 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.

Im April 2018 wurde die erste von zwei PMWE-Raketenkampagnen, PMWE-1, erfolgreich durchgeführt. Die hierbei gewonnenen Daten von zwei Raketenflügen und von MAARSY werden in den nächsten Monaten ausgewertet. Anschließend erfolgt die Verifizierung der verschiedenen Theorien zur Entstehung von PMWE, die mangels direkter Messung aller relevanten Parameter bislang ausstand. Auf Grundlage der ersten Messungen werden neu entwickelte Instrumente (siehe Kapitel 3.6) für den Einsatz in der zweiten Kampagne weiter optimiert. Die zweite Raketenkampagne ist für Oktober 2019 geplant. Neben den insitu-Messungen auf Höhenforschungsraketen sollen verschiedene Radar-Messungen (EISCAT, Saura) zur Validierung von Elektronendichtemessungen herangezogen werden. Damit lässt sich dann die räumlich und zeitliche Entwicklung von Elektronendichten quantifizieren. Dies spielt für die Dynamik von PMWE vermutlich eine maßgebliche Rolle. Des Weiteren wird eine Verbesserung der Turbulenzmessungen des Saura MF-Radars angestrebt. Diese sollen mit den etablierten Turbulenz-Messungen auf Höhenforschungsraketen validiert werden. Kontinuierliche Messungen der Turbulenz in Kombi-

nation mit PMWE-Messungen soll unser Verständnis von PMWE vervollständigen.

3.2.5 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.

Bisher wurden solche Messungen vor allem mit sogenannten HPLA¹⁴-Radars wie EISCAT, Arecibo, PFISR und vor allem mit dem MU Radar in Japan durchgeführt, die alle über einen sehr schmalen Radarstrahl verfügen und somit auch nur eine sehr geringe Statistik bzgl. sogenannter Meteorkopfechos aufweisen. Zu dieser Klasse von Anlagen gehört nun ebenfalls MAARSY, dessen interferometrische Möglichkeiten es erlauben, die Flugbahn der Meteoroiden durch den Radarstrahl zu bestimmen. Somit ist eine genaue Bestimmung des Orbits, sowie eine wesentlich genauere Abschätzung der Masse der extraterrestrischen Teilchen möglich. Erstmals liegen damit kontinuierliche Messungen mit einem HPLA-Radar vor. Da diese Messungen weitestgehend parallel zu den anderen Beobachtungen mit MAARSY durchgeführt werden, konnte bis jetzt schon eine Meteordatenbasis von über 1.000.000 Meteoren gesammelt werden. In den letzten Jahren wurde die MAARSY Beobachtungen durch optische Kameras ergänzt.

Aus den radar-optischen Beobachtungen konnte ein großer Datensatz an gemeinsam beobachteten Meteoren gewonnen werden. Zudem war es möglich, während einer Kampagne zusätzlich das EISCAT Radar in Tromsø zu betreiben. Auf Grundlage dieser mehrfrequenz-radio-optischen Daten werden nun Rückschlüsse auf die Plasmabildung um den Meteoroiden selbst und dessen Radius möglich. Zusammen mit einer theoretischen Lösung der Maxwell'schen Gleichungen durch FDTD-Verfahren, kann die Radarrückstreuung direkt in eine Elektronenliniendichte umgerechnet werden. Die systematische Auswertung dieses Datensatzes, mit den externen Partnern, soll in den nächsten Jahren schwerpunktmäßig bearbeitet werden. Dazu wurde das Meteorablationsmodell am IAP noch weiter verfeinert und durch eine neue Implementierung der Verdampfungsphysik erweitert.

Zudem wurde ein spezielles Experiment zur Beobachtung von Meteor-Schweif-Echos mit MAARSY durchgeführt. Dieses Experiment ermöglicht eine wesentlich größere Sensitivität zur Detektion von Meteoren. Die so gewonnenen Daten erlauben Rückschlüsse über die Ionisation von Meteoren mit geringen Geschwindigkeiten nahe am sogenannten Mikro-Meteor-Limit. Ergänzt durch die Modellierungsergebnisse, soll aus diesen Messungen in den nächsten Jahren, eine absolute Geschwindigkeitsverteilung für den Bereich von 13-14 km/s bis zu 50 km/s abgeleitet werden. Dadurch wird auch der absolute Meteorfluss in die Atmosphäre viel genauer abzuschätzen sein.

3.3 Modellierung von Temperaturen und Eisteilchen mit LIMA/MIMAS

LIMA ist ein dreidimensionales globales Modell der Atmosphäre, das sich auf die Schwerpunkte thermische Struktur, Strahlung und Eisschichten konzentriert. Der eigenständige Teil des Modells, mit dem die Eisschichten berechnet werden, heißt MIMAS (Mesospheric Ice Microphysics And transport model). LIMA/MIMAS wird seit einigen Jahren dazu verwendet, die räumliche und zeitliche Variabilität von Eisschichten zu untersuchen. Einige Fragestellungen wurden bereits erfolgreich bearbeitet und publiziert, z. B. bezüglich der zeitlichen Entwicklung

¹⁴High Power Large Aperture

von Eisschichten, der statistischen Häufigkeitsverteilung verschiedener Eisparameter, der Lokalzeitabhängigkeit der Helligkeit, Größe und Anzahl der Eispartikel, etc. Zur Zeit werden diese Simulationen mit den Messungen auf dem AIM-Satelliten verglichen. Es bleiben 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. Hierzu sollen neueste Laborergebnisse, z. B. zur Nukleation von geladenen Eisteilchen, berücksichtigt werden. Die Modellergebnisse sollen anhand von Lidar-, Radar-, und Satellitenmessungen validiert werden.

3.4 Photochemie unter dem Einfluss von Schwerewellen und Turbulenz

Mit dem IAP-eigenen Chemie-Transport-Modell MECTM¹⁵ wird untersucht, wie unterschiedliche dynamische Skalen die photochemischen Prozesse in der MLT beeinflussen. In jüngster Zeit wurde das MECTM so erweitert, dass auch die Schichtenbildung von angeregtem Hydroxyl (OH*) berechnet wird. Damit soll der Einfluss von Schwerewellen und turbulenter Diffusion auf diese Schichtenbildung untersucht werden. Mit Hilfe von Sensitivitätsexperimenten sollen die Untersuchungen zum Einfluss von Schwerewellen und Turbulenz auf die gesamte Photochemie fortgesetzt werden. Schwerpunkte sind der Jahresgang der Wasserdampfverteilung, eine Analyse der Mischungseffekte durch Schwerewellen, und eine mögliche photochemische Relation zwischen Wasserdampf und atomarem Sauerstoff in der Mesopausenregion.

3.5 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 durch erweiterte Windmessungen mit den Radars ergänzt. So ist es mit MMARIA möglich, die Meteorwindbeobachtungen bis zu einer Höhe von 110 km zu erweitern.

3.6 Neue Instrumente für Höhenforschungsraketen

In den letzten Jahren hat sich das IAP mit der grundlegenden Physik von Schichten in der MLT, wie z. B. PMSE und PMWE, befasst. Um diese Phänomene besser verstehen zu können, ist die insitu-Messung der relevanten Parameter unumgänglich. Zu diesem Zweck wurden in den letzten Jahren eine Reihe von elektrostatischen Sonden entwickelt. Diese Proben messen z. B. die Anzahldichten von positiven Ionen und Elektronen mit hoher zeitlicher (und somit räumlicher) Auflösung. Des Weiteren wurden neue Detektoren für den Nachweis von Meteorstaubpartikeln (MSP) für die PMWE-Kampagnen entwickelt und im April 2018 erfolgreich erprobt. Die aerodynamischen Eigenschaften, die gerade in Höhen der PMWE einen kritischen Einfluss auf die Messungen haben, wurden soweit optimiert, dass beispiellose Messungen ultrakleiner MSPs (≤ 1 nm) möglich sind. Die Effekte von hochenergetischen Photonen auf diesbzgl. Messungen

¹⁵Mesospheric Chemistry Transport Model

am Tag wurden in Zusammenarbeit mit der KTH in Stockholm eingehend untersucht. Für die Erforschung von MSP kooperiert das IAP außerdem mit dem Institut für Atmosphärenphysik (IPA) des DLR in Oberpfaffenhofen. Unter anderem wird ein hochwertiges Instrument, genannt ECOMA, für MSP-Messungen während der PMWE-Kampagnen eingesetzt.

Das IAP übernimmt in nächster Zeit eine einzigartige Technologie zur präzisen Messung von Elektronendichten in der Ionosphäre von Prof. Martin Friedrich (TU Graz). Das sogenannte Wellenausbreitungsexperiment ist unabhängig von Nebeneffekten, wie z. B. Nutzlastaufladung, und ist deshalb für Plasmamessungen unersetzlich. Da das Verständnis von ionosphärischen Phänomenen nur mit möglichst exakter Kenntnis der Spurengaskonzentrationen möglich ist, kooperiert das IAP mit anderen Forschungseinrichtungen, die über entsprechende technische Expertisen verfügen. So sind z. B. die FIPEX-Sensoren zur Messung atomaren Sauerstoffs am Institut für Raumfahrtssysteme (IRS Universität Stuttgart) entwickelt worden. Die geophysikalische Interpretation liegt maßgeblich in der Verantwortung des IAP.

Das IAP entwickelt zusammen mit der Firma vH&S eine neues System zur drei-dimensionalen Messung von Turbulenz in der Mesosphäre. Das neue System, genannt Turb3D, besteht aus einem Basismodul und drei Tochnutzlasten. Die Tochnutzlasten werden während des Fluges aus der Hauptnutzlast ausgeworfen und sollen zum ersten Mal präzise Messungen der dreidimensionalen Struktur von kleinskaligen Fluktuationen im Neutralgas und im Plasma liefern. Die Tochnutzlasten basieren auf dem Messprinzip von CONE, wobei eine systematische Neuentwicklung der Hardware zu einer drastischen Miniaturisierung des Sensors geführt hat. Ein erster Test des neuen Sensors während der PMWE-Kampagne im April 2018 ist erfolgreich verlaufen.

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 soll nach Beendigung der zweiten Phase (Ende 2016) mit eigenen Mitteln fortgesetzt werden. Bezüglich der Untersuchungen zur Kopplung durch Schwerewellen und durch großskalige Wellen (insbesondere Gezeiten) ist das IAP erfreulicherweise bei einer Reihe von neuen Drittmittel-Projekten beteiligt, und zwar insbesondere mit dem PACOG¹⁶-Projekt im Rahmen der DFG-Forschergruppe MS-Gwaves¹⁷ und im Verbund GW-LCYCLE¹⁸ im Rahmen des BMBF-Forschungsschwerpunktes ROMIC. Grundsätzlich ist diese Thematik auch Gegenstand der meisten anderen gegenwärtigen Projekte am IAP. Das gilt insbesondere für das bereits erwähnte DFG/Transregio-Projekt „Energy Transfers in the Atmosphere and Ocean“, aus dem insgesamt fünf Doktorandenstellen am IAP finanziert werden.

4.1 Kopplung durch Wellen und residuelle Zirkulation

4.1.1 Gezeiten und Schwerewellen: Messungen und Modellierungen

Thermische Gezeiten sind planetare Wellen, die durch die Tagesgänge der stratosphärischen UV-Absorption und der tropischen Wasserdampfabsorption bzw. Feuchtekonvektion angeregt werden. Diese Wellen bestimmen zusammen mit den sehr viel kleinskaligen Schwerewellen im

¹⁶Processes And Climatology Of Gravity waves

¹⁷Multi-Scale Dynamics of Gravity Waves

¹⁸Investigation of the life cycle of gravity waves

Wesentlichen die dynamische Kopplung zwischen der Mesosphäre und Thermosphäre. Generell unzureichend untersucht sind die aus der Wechselwirkung von Gezeiten und Schwerewellen resultierenden Konsequenzen für die globale Zirkulation in diesem Höhengebiet. Auch unterliegt diese Wechselwirkung in konventionellen Klimamodellen den Einschränkungen durch Schwerewellenparametrisierungen.

Wir haben mithilfe von KMCM die Bedeutung von Gezeiten für die globale Zirkulation in der unteren Thermosphäre erstmals systematisch abgeschätzt. Danach induzieren die Gezeiten in jeder Hemisphäre eine Äquator-Polzirkulation sowie eine substantielle Energiedeposition (Aufheizung). Diese Untersuchungen sollen künftig mit aufgelösten Schwerewellen bis zu einer Höhe von ca. 200 km fortgesetzt werden. Nach unseren bisherigen Erfahrungen mit hochgelösten KMCM-Simulationen sind die Schwerewellen in der Thermosphäre in mittleren und hohen Breiten grundsätzlich sekundäre oder sogar tertiäre Schwerewellen. Das heißt, sie werden nicht in der Troposphäre, sondern vorwiegend in der Strato-, Meso- und Thermosphäre aufgrund der Impulsdeposition primärer oder sogar sekundärer Wellen generiert.¹⁹ Dieser mehrstufige Kopplungsprozess ist in konventionellen Modellen (z.B. WACCM) grundsätzlich ausgeschlossen. Künftig soll die Wechselwirkung von Gezeiten und Schwerewellen und die Konsequenzen für die globale Zirkulation auf Basis des hochaufgelösten KMCM eingehend untersucht werden.

Mit den vielfältigen, bodengebundenen Instrumenten ist das IAP in der Lage, kleinskalige Fluktuationen in Winden, Temperaturen und Dichten mit hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung zu messen. Daraus werden atmosphärische Wellen, wie Schwerewellen und Gezeiten, mit Perioden von wenigen Minuten bis Stunden und vertikalen Wellenlängen von wenigen bis zu mehreren 10 Kilometern abgeleitet. Diese Art von Messungen sind nur mit Lidars und Radars möglich.

Durch die in den letzten Jahren entwickelte Tageslichtfähigkeit der Lidars in Kühlungsborn und ALOMAR lassen sich auch Gezeiten detektieren. Das kann man z. B. auch die Wechselwirkung von Schwerewellen und Gezeiten untersuchen. Erste Messungen über einen Zeitraum von über 200 h zeigen eine überraschende Intermitenz und Variabilität des Gezeitensignals. Zukünftig sollen diese vertikalen Informationen auch in Kombination mit den horizontalen Informationen aus Daten von z. B. OH-Messungen und Satelliten analysiert werden.

Aus den bisher erzielten Temperaturdaten wurde eine Klimatologie der potentiellen Energiedichte von Schwerewellen und Gezeiten für Kühlungsborn erstellt. Diese Ergebnisse bestätigen grundsätzlich die theoretisch erwartete niedrige Wellenaktivität für langperiodische Schwerewellen und Gezeiten im Sommer. Für den Standort ALOMAR soll ein vergleichbarer Datensatz erstellt werden, um eventuelle Unterschiede im Wellenspektrum zu analysieren. Die entsprechenden Lidar-Messungen sollen weitergeführt werden, um Jahr-zu-Jahr-Unterschiede zu bestimmen und um besondere Situationen mit vermehrter oder reduzierter Wellenaktivität zu identifizieren. Aufgrund der langjährigen Messungen und der damit verbundenen hohen Statistik ist es erstmals möglich, die Gezeiten in einen lunaren und solaren Anteil zu zerlegen. Erste Studien dazu wurden für ALOMAR bereits veröffentlicht. Des Weiteren sollen Gezeitensignale in Temperaturen (Lidars) mit denen in Winden (Radars und Lidars) verglichen werden, um so die Stabilität der Phasenlage der Gezeiten zu charakterisieren. Bezüglich der Gezeitenaktivität wurde anhand der Temperaturmessungen des mobilen Fe-Lidars auf ALOMAR und in der Antarktis gezeigt, dass Gezeiten im Sommer deutlich stärker sind als theoretisch erwartet. Diese Analysen sollen erweitert und mit Hilfe von theoretischen Modellen interpretiert werden.

In Zukunft sollen die detaillierten Analysen von Fallbeispielen weitergeführt werden, um grundlegende Fragen zu Quellen von Schwerewellen, deren Ausbreitungsrichtungen und Wechselwirkung mit dem Hintergrund, mit Gezeiten und mit planetaren Wellen zu untersuchen. Dafür ist ein direkter Vergleich mit unterschiedlichen Modellen wie KMCM, ECMWF und ICON ge-

¹⁹In den Tropen kann sich konvektiv erzeugt hochfrequente Schwerewellen bis weit in die Thermosphäre ausbreiten.

plant. In der Troposphäre und Stratosphäre werden Schwerewellen zusätzlich durch die Auswertung von Radiosonden untersucht. Dies ermöglicht eine in-situ Beobachtung von Winden und Temperaturen mit hoher räumlicher Auflösung. Zudem wird das dissipative Brechen dieser Wellen mit dem am IAP entwickelten Turbulenzsensor LITOS²⁰ vermessen. Außerdem sollen „ray-tracing“-Methoden eingesetzt werden, um auf mögliche Quellen der Wellen zu schließen.

Vor kurzem wurde eine neue Auswertemethode für die kombinierten Wind- und Temperaturmessungen des RMR-Lidars entwickelt. Neben einer Hodographenanalyse der Windfluktuationen wird die Korrelation zwischen Winden und Temperaturen verwendet. Der Vorteil dieser Methode liegt daran, dass keine zeitliche Mittelung über mehrere Stunden notwendig ist und dass die Ausbreitungsrichtung der Wellen eindeutig bestimmt ist. Es werden wichtige Wellenparameter, wie z. B. vertikale und horizontale Wellenlänge, Ausbreitungsrichtung und Phasengeschwindigkeit abgeleitet. Neuere Modellrechnungen sagen vorher, dass in der Atmosphäre sekundäre Schwerewellen erzeugt werden, die sowohl nach oben als auch nach unten propagieren. Mithilfe der Hodographen-Methode können wir gezielt nach solchen Strukturen suchen, deren Morphologie charakterisieren und mit Modellrechnungen vergleichen.

Die kontinuierlich arbeitenden Radaranlagen in Andenes und Kühlungsborn werden auch zum Nachweis von Schwerewellen in der unteren und mittleren Atmosphäre eingesetzt. Ziele 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 aus den Radardaten turbulente Energiedissipationsraten bestimmt werden. Die modernisierte Experimentsteuerung des MAARSY ermöglicht dazu zeitlich hochaufgelöste Beobachtung der mesosphärischen Echos in neuer Qualität. Durch den Einsatz bildgebender Verfahren (Imaging) in Kombination mit virtuellen Empfänger (MIMO) können Radarparameter wie Reflektivität, Geschwindigkeit und spektrale Breite zudem örtlich verbessert aufgelöst werden.

Schwerewelleneigenschaften wie Phasengeschwindigkeit, Periode und Wellenlänge sollen in mittleren Breiten auch mit dem neuen Radarsystem MMARIA untersucht werden. In Kooperation mit externen Partner ist es zudem möglich, das MMARIA-Konzept (MMARIA-Norwegen) auf Nord-Norwegen (Skandinavien) zu übertragen. Diese Ergebnisse sollen anschließend mit Simulationen von ICON-IAP verglichen werden. Seit kurzem werden Schwerewellenparameter auch aus photographischen Aufnahmen von NLC ermittelt und mit Modellrechnungen (DNS²¹) einer amerikanischen Arbeitsgruppe verglichen.

Basierend auf den langfristigen Messungen der MF-Radars und der Meteorradars in Andenes und Juliusruh wurden in den vergangenen Jahren die jahreszeitliche Variation von Schwerewellen, Gezeiten und auch planetarer Wellen für unterschiedliche Periodendauern in mittleren und hohen Breiten bestimmt. 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.

Die Arbeiten beinhalten auch Untersuchungen zur Gezeitenvariabilität, speziell der halbtägigen Gezeit. Aus den langjährigen Radarbeobachtungen konnte bereits ein Zusammenhang zwischen der Gezeitenamplitude und der QBO-Phase gefunden werden. Diese Untersuchungen sollen systematisch erweitert und mit Hilfe von Modellen der zugrunde liegende physikalische Prozess erforscht werden.

²⁰Leibniz-Institute Turbulence Observations in the Stratosphere

²¹direct numerical simulations

Die IAP-Messungen sind auch im Rahmen eines internationalen ISSI-Projektes²² zum Prozessverständnis zur Beeinflussung der Mesosphäre und unteren Thermosphäre in unterschiedlichen Breiten während stratosphärischer Erwärmungen eingebunden.

Mehrjährige Datensätze von Meteorradaren und MF-Radaren aus Juliusruh und Andenes werden für die Validierung von MLT-Wellen und Gezeitenklimatologien, die von den vom IAP entwickelten Zirkulationsmodellen (KMCM) reproduziert werden, sowie für die globalen Zirkulationsmodelle der Gemeinschaft (WACCM-X) verwendet. Diese Arbeit wird in Zusammenarbeit zwischen den Abteilungen Radar und Theorie des IAP und mit der WACCM-X-Entwicklungsgruppe des NCAR durchgeführt. Die Klimatologien der Schwerewellen, die aus MF- und Meteorradardaten nach der Entfernung der Beiträge von Gezeiten- und Planetenwellen gewonnen werden, können als Analysewerkzeug zur Interpretation hochauflösender numerischer Simulationen (Gravitationswellenaufösung) verwendet werden. Dies wird unser Verständnis über die Interaktion von Gravitationswellen, Gezeiten und mittlerer Strömungswechselwirkung voranbringen.

Anhand unserer Meteorradarmessungen in Kombination mit HAMMONIA-Modellsimulationen konnten wir zeigen, dass der ausgeprägte Rückgang der semidiurnalen Sonnengezeit (S2) während des Herbstübergangs in der nördlichen Hemisphäre auf unterschiedliche Verhaltensweisen der sonnensynchronen, semidiurnalen (SW2) und der nicht sonnensynchronen, sich westwärts ausbreitenden, semidiurnalen (SW1) Gezeitenkomponenten zurückzuführen ist. Die Auswirkungen dieses Gezeitenverhalten auf die Ionosphäre/Thermosphäre (I/T) wird unter anderem im DYNAMITE-2-Projekt untersucht. Dazu werden wir unsere Beobachtungen mit neuen WACCM-X-Simulationen ergänzen, die von Mitarbeitern am NCAR bereitgestellt werden. Die beispielsweise Untersuchung der Auswirkungen der Gezeiten auf den Transport verschiedener chemischer Komponenten wie N/O wird es ermöglichen weitere Erkenntnisse zur Kopplung zwischen der Mesosphäre und der unteren Thermosphäre (MLT) und der I/T-Region zu gewinnen.

Darüber hinaus sollen die Auswirkungen der semidiurnalen solaren (S2) Gezeit auf die Thermosphäre/Ionosphäre während des Herbstübergangs in der nördlichen Hemisphäre weiter untersucht werden. Die Meteorradarmessungen des IAP zeigen während dieser Jahreszeit einen ausgeprägten und plötzlichen Abfall von S2, der sehr wahrscheinlich die obere Atmosphäre beeinflusst, indem beispielsweise die Verteilung chemischer Bestandteile wie Sauerstoff und Stickstoff modifiziert wird. Darüber hinaus ist es wichtig zu untersuchen, wie sich mesosphärische Winde und Gezeiten in Verbindung mit starken Temperaturschwankungen verhalten, die im Winter stattfinden und allgemein als Polar Night Jet Oscillations (PJOs) bekannt sind. Vorläufige Ergebnisse, die auf unseren Meteorradarbeobachtungen basieren, zeigen starke und lang anhaltende Verbesserungen der Winde und Gezeiten nach Beginn dieser Art von Ereignissen. Diese Studien werden derzeit im Rahmen des DFG-Projekts DYNAMITE durchgeführt und werden im Rahmen des DYNAMITE-2-Projekts mithilfe von Satellitendaten und Modellsimulationen fortgeführt.

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

Unsere Messungen in Davis haben bzgl. der thermischen Struktur der mittleren Atmosphäre beim Übergang vom Winter zum Sommer einige überraschende Ergebnisse gezeigt (Stichwort „mesopause jumps“). Dadurch ist die Frage nach dem Einfluss der Zirkulation in der Stratosphäre auf die dynamische und thermische Struktur der Mesosphäre beim Übergang von Winter zu Sommerbedingungen (wieder) zu einem interessanten Thema geworden. Die hierbei relevanten grundlegenden Prozesse scheinen durch Kombination von Messungen und Modellrechnungen am IAP aufgeklärt zu sein. Es gibt allerdings noch eine Reihe von offenen Fragen, z. B. wie genau der zeitliche Verlauf der Wechselwirkung zwischen Schwerewellen und Grundstrom zu verstehen ist.

²²ISSI = International Space Science Institute

Wir möchten diese Fragen anhand weiterer experimenteller Untersuchungen und Simulationen klären. Dabei sollen auch externe Messungen und Modellrechnungen verwendet werden. Mittelfristig ist auch denkbar, erneut Lidarmessungen in der Antarktis durchzuführen. Im Vergleich zur vorherigen Kampagne (2010-2012) fällt der logistische Aufwand aufgrund der Möglichkeiten von VAHCOLI allerdings erheblich geringer aus.

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.

In den vergangenen Jahren hat das IAP mit KMCM ein mechanistisches Klimamodell (d.h., überschaubar und nach den speziellen Erfordernissen des IAP formuliert) entwickelt, das die wesentlichen Komponenten des Klimasystems explizit enthält (einschließlich eines einfachen Ozeanmodells). Aufgrund der Konsistenz aller im Modell berücksichtigten Energietransformationen wird eine ausgeglichene Strahlungsbilanz am oberen Rand der Atmosphäre sowie eine ausgeglichene Bilanz an der Erdoberfläche simuliert (in komplexen Modellen ist dies nur mithilfe von Fehlerkompensation unterschiedlicher Komponenten durch Parameteranpassung möglich).

Diese neue Version des KMCM wird für Langzeitsimulationen mit konventioneller Auflösung und Schwerewellenparametrisierungen betrieben. Um hier grundlegende Verbesserungen zu erzielen, wird im Rahmen des SFB/Transregio-Projektes in Kooperation mit der Universität Hamburg an einem völlig neuen Konzept einer Schwerewellenparametrisierung für Atmosphärenmodelle gearbeitet, das auf der aus der Ozeanographie bekannten IDEMIX²³-Parametrisierung beruht. Wesentlich hierbei ist, dass zum ersten Mal zeitlich und räumlich kontinuierliche Schwerewellenquellen und Schwerewellenpakete, einschließlich sekundärer Schwerewellen konsistent berücksichtigt werden können. Wir wollen zukünftig diese neue Parametrisierung im KMCM als Standardparametrisierung für Langzeitsimulationen verwenden. Wir erwarten, dass das für die Atmosphärenmodellierung grundlegend neue Konzept auch in komplexen Klimamodellen der mittleren Atmosphäre verwendet werden wird.

Bei den weiteren gegenwärtigen und zukünftigen Anwendungen von KMCM geht es vornehmlich um die Projekte innerhalb des neuen SFB/Transregio-Projektes. Die darin zu bearbeitenden Themen betreffen u. a. die durch brechende Schwerewellen ausgelöste makroturbulente Energiekaskade (Stichwort: geschichtete Turbulenz) und deren Parametrisierung, die Bedeutung von sekundären Schwerewellen in der Mesosphäre und Thermosphäre, sowie die Verwendung des IDEMIX-Konzeptes als Schwerewellenparametrisierung. Weitere Themen sind die Wechselwirkung von Schwerewellen mit Gezeiten und Rossby-Wellen, die Änderung der Schwerewellenaktivität bei globaler Erwärmung, großskalige Variabilitätsmuster in der mittleren Atmosphäre, wie etwa die QBO und SAO²⁴, stratosphärische Erwärmungen, sowie die interhemisphärische und intrahemisphärische Kopplung. Entsprechende Ergebnisse fließen auch in andere Projekte ein, an denen das IAP beteiligt ist (z. B. die DFG-Forschergruppe MS-Gwaves). Für Echtzeitvergleiche mit Messungen ist geplant, das KMCM mit einem Nudging-Verfahren für planetare und synoptische Skalen in der Troposphäre zu ergänzen. KMCM-Simulationen mit aufgelösten Schwerewellen sind zudem für Kooperationen mit anderen Instituten von Bedeutung.

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 Subskalenparametrisierung, womit korrekte Energietransformationen durch aufgelöste und parametrisierte Skalen sichergestellt werden. Das Modell

²³IDEMIX = Internal wave Dissipation, Energetics and MIXing

²⁴quasi zweijährige und halbjährige Oszillationen in den Tropen

enthält auch ein konsistentes Transportschema.

Kürzlich ist eine grundlegende Verbesserung der theoretischen Beschreibung der thermischen Dissipation in nichthydrostatischen Modellen gelungen, die nun im Einklang mit dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik ist, was beim konventionellen Ansatz nicht der Fall ist. Damit beschreibt das ICON-IAP Modell die scharfen Temperaturmaxima an der Obergrenze mesosphärischer Inversionsschichten (MILs). Das Phänomen der MILs kann damit neu interpretiert werden. Zur Zeit wird ICON-IAP vor allem als Regionalmodell mit sehr hoher räumlicher Auflösung bis über 100 km Höhe verwendet. Für die Zukunft sind weitere direkte Vergleiche der simulierten Schwerewelldynamik und Turbulenz mit entsprechenden Messungen (MMARIA, MAARSY, LITOS, Hfr, VAHCOLI und ggf. DoRIS) geplant, insbesondere im Hinblick auf den Brechungsvorgang und die daraus resultierenden makroturbulenten Schwerwellenspektren.

Die neue Parametrisierung der thermischen Dissipation unterscheidet sich bei stabiler Schichtung vom konventionellen Ansatz, ist also vor allem für die mittlere Atmosphäre relevant. Auch in der numerischen Wettervorhersage ist die Behandlung des sensiblen Wärmeflusses bei stabiler Schichtung ein lange bekanntes und ungelöstes Problem. Der im Rahmen der Schwerwellenbrechung entwickelte und erprobte neue Ansatz kann der Modellierungscommunity allgemein zugute kommen. Weiterhin liegt es nahe, den neuen Ansatz auch für das turbulente Mischen von Tracern zu verwenden. Zukünftig soll diese Möglichkeit näher untersucht werden, insbesondere in Zusammenhang mit dem Konzept des Dynamischen Smagorinsky Modells (DSM) für die turbulente Diffusion bei geschichteter Makroturbulenz.

Für das ICON-IAP Modell wurde im letzten Jahr ein neuer Ansatz für den nichtlinearen Impulstransport entwickelt, der einer zusätzlichen numerischen Nebenbedingung des hexagonalen C-Gitters Rechnung trägt, nämlich der linearen Abhängigkeit der drei (statt zwei) horizontalen Windkomponenten. Diese Bedingung kann nur im hexagonalen C-Gitter (ICON-IAP) und nicht im triangulären C-Gitter (ICON-DWD) erfüllt werden. Unsere Innovation führt zusätzlich zu einer erheblich verbesserten numerischen Konsistenz des Coriolisterms. Insbesondere ist nun die völlige numerische Äquivalenz zu einem quadrilateralen C-Gittermodell erreicht, was das eigentliche Ziel hinsichtlich der numerischen Aspekte der nationalen ICON-Entwicklung war. Unsere Neuentwicklung kommt schon jetzt außer dem ICON-IAP Modell verschiedenen anderen in der internationalen Community entwickelten Modellen mit hexagonaler C-Gitterstruktur zugute.

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. Man geht heutzutage davon aus, dass die Mesoskalen der Troposphäre sich gemäß der Ähnlichkeitstheorie geschichteter Turbulenz verhalten. In der MLT vermuten wir ebenfalls einen makroturbulenten Inertialbereich geschichteter Turbulenz, da die Schwerwellenspektren bzgl. der vertikalen Wellenzahl und bzgl. der Frequenz dem dafür erwarteten exponentiellen Abfall entsprechen. Die Makroturbulenz geht hier vermutlich von den primären, brechenden Schwerwellen aus. Im Rahmen des neuen SFB/Transregio-Projektes „Energy Transfers in the Atmosphere and Ocean“ soll die Makroturbulenz in der MLT anhand von hochaufgelösten Simulationen mit ICON-IAP und KMCM in Kombination mit dreidimensionalen Lidar- und Radar-Messungen (VAHCOLI, MAARSY, MMARIA) studiert werden. Um ein möglichst vollständiges Verständnis zu erzielen, sollen in den Modellen die spektralen Budgets von kinetischer und verfügbarer potentieller Energie diagnostiziert werden.

Die bisherigen Arbeiten zur Schwerewellenanregung aus Strahlströmen („spontane Abstrahlung“) werden im Rahmen von MS-GWAVES weitergeführt. Die Theorie wird dabei von geraden auf gekrümmte Strömungen erweitert und die abgeleiteten Wellenamplituden werden um entsprechende Wellenzahlen ergänzt. Die theoretischen Arbeiten bilden den Rahmen für geplante Simulationsexperimente mit dem mesoskaligen Regionalmodell WRF²⁵. Zum Ende des Projektes soll eine Parametrisierung der entsprechenden Schwerewellenquellen vorliegen, die dann in Schwerewellenparametrisierungen für globale Zirkulationsmodelle verwendet werden kann. Zudem wurde eine neue Methode (UWaDI = Unified Wave Diagnostics) zur lokalen Diagnose von Welleneigenschaften wie Amplitude und Wellenzahl entwickelt. Damit soll u. a. ein KMCM-Datensatz daraufhin untersucht werden, ob die im Polarwirbel der Südhemisphäre generierten Schwerewellen mit spontaner Abstrahlung erklärbar sind, oder ob vielmehr eine induzierte Schwerewellenabstrahlung vorliegt, die mit der Impulsdeposition orographischer Schwerewellen im Zusammenhang steht.

4.1.5 Vertikale Kopplung durch transiente Wellen; stratosphärische Erwärmungen; Mesosphärische Dynamik und Auswirkungen in der D-Schicht

Zeitlich und räumlich hochaufgelöste Modellsimulationen sowie Messungen mit Lidars und Radars in Kühlungsborn und Andenes bilden die Basis für Untersuchungen zeitlich veränderlicher (transienter) Kopplungsprozesse in der mittleren Atmosphäre. Das wohl berühmteste Phänomen als Folge in diesem Zusammenhang sind plötzliche stratosphärische Erwärmungen (SSWs). Quasi stehende planetare Rossby-Wellen und orographisch angeregte Schwerewellen sind die wesentlichen Wellentypen, die eine SSW hervorrufen. Als Folge ändern sich während einer SSW auch die Effekte durch nicht-orographische Schwerewellen, Gezeiten und in-situ generierte planetare Wellen in der Mesosphäre und Thermosphäre. Weitere wichtige Zirkulationsmuster, die durch transiente Wellen hervorgerufen werden sind die QBO and SAO (quasi zweijährige und halbjährige Oszillation) in der tropischen mittleren Atmosphäre. Die Mechanismen dieser Oszillationen und ihr Zusammenhang mit der Variabilität in mittleren und hohen Breiten soll zukünftig verstärkt untersucht werden.

Die genauen Mechanismen, die für die planetaren Wellen in der nördlichen Wintermesosphäre verantwortlich sind (vertikale Ausbreitung, geographisch unterschiedliche Impulsdeposition durch Schwerewellen, barokline Instabilität der polaren Mesosphäre, Wechselwirkung mit Gezeiten) sollen unter anderem mit Modell-Simulationen untersucht werden. Hierbei sollen Phasen mit SSWs mit Phasen eines starken und kalten Polarwirbels verglichen werden. In diesem Zusammenhang soll auch geklärt werden, ob eine intensive Schwerewellenaktivität, wie sie in der winterlichen Mesopausenregion über der Antarktis beobachtet wird, auch in hohen Breiten der Nordhemisphäre während der Wintermonate zu finden ist, und welches ggf. die Ursachen dafür sind.

Ein weiterer Aspekt der vertikalen Kopplung betrifft die Zirkulation in der unteren Thermosphäre. Hier interessieren zum Beispiel sekundäre Schwerewellen, die durch Impulsdeposition primärer Schwerewellen in der mittleren Atmosphäre ausgelöst werden, oder aber die Energie-deposition durch Wellen (vor allem Schwerewellen und Gezeiten) in der Mesopausenregion und darüber. Die Fortsetzung der vertikalen Kopplung in die Thermosphäre wird generell als potentiell wichtige Thematik für die zukünftige Entwicklung des IAP betrachtet. In diesem Zusammenhang soll KMCM als mechanistisches Klimamodell mit weiteren Parametrisierungen der in der Thermosphäre vorherrschenden photochemischen und magneto-hydrodynamischen Prozesse ergänzt werden.

Schwerewellen 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 Schwerewellen und dem Grundstrom wur-

²⁵Weather Research and Forecast

den 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. 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 Kapitel 5.3.).

Es wurde beobachtet, dass die Gezeitenamplituden in der Mesosphäre und die VLF-Radiosignalabsorption in der D-Region korreliert sind, beide haben im Oktober ein Minimum. Die relative Bedeutung von Wellendynamik und chemischen Prozessen wurde untersucht, um solche korrelierten Variabilitäten mithilfe von Datensätzen aus Radaren, VLF-Messungen und Modellen (WACCM, WACCM-X, WACCM-D) zu erklären. Radarmessungen an räumlich getrennten Orten, z. B. auf unterschiedlicher Längengraden, erlauben es, räumliche und zeitliche Variabilitäten zu unterscheiden und Mehrdeutigkeiten in den Messungen zu beseitigen. Die am IAP entwickelte Phasendifferenzierungstechnik (PDT) beseitigt die räumlichen Mehrdeutigkeiten und ermöglicht es, MLT-Wellen durch Analyse der Kohärenz zwischen den Spektren der an räumlich getrennten MF- oder Meteorradaren gewonnen Daten zu untersuchen. Diese Technik erlaubt dann die Untersuchung der Entwicklung der räumlichen und zeitlichen Eigenschaften (Wellenzahlen und Phasengeschwindigkeiten) verschiedener Arten von planetaren Wellen und Gezeiten während plötzlichen Stratosphärenenerwärmungsereignissen (SSW). Dabei werden die Daten von Meteorradaren auf ähnlichen geografischen Breiten z.B. Juliusruh in Deutschland und Mohe in China aber auch Radare an anderen Orten verwendet. Diese Studien werden es ermöglichen, die Rolle verschiedener Planetenwellenmoden während der SSW-Entwicklung zu beurteilen und die Verstärkung von Gezeiten in Verbindung mit möglichen Gezeiteneffekten auf Thermosphäre/Ionosphäre während SSW zu untersuchen.

4.1.6 Stationäre planetare Wellen und 3-dimensionale residuelle Zirkulation

Eine verbesserte Kenntnis der Rolle von stationären planetaren Wellen ist elementar für ein Gesamtverständnis der von der Troposphäre ausgehenden dynamischen Kopplung und resultierender Rückkopplungsmechanismen. Dabei kommt der 3-dimensionalen residuellen Zirkulation und dem damit zusammenhängenden Spurenstofftransport eine besondere Rolle zu. Neuere Untersuchungen zur langfristigen Veränderung der 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 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 Höhegebiet 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.

4.1.7 Horizontale Sondierungen durch Nachthimmelsleuchten

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, z. B. zur Analyse von Schwerewellen. Deswegen werden die OH-Messungen gemeinsam mit den Lidar- und Radarmessungen analysiert. Neben den Messungen von anderen Arbeitsgruppen, wie z. B. des ‘temperature mappers’ der Utah State University oder der OH-Kameras der Aichi University (Japan) in Juliusruh und Kühlungsborn, gibt es seit kurzem zum ersten Mal Beobachtungen mit einem IAP-eigenen System am Standort in Kühlungsborn.

4.2 Turbulenz

Einige Aspekte dieses Themas wurden bereits in den vorangegangenen Abschnitten behandelt, so z. B. die insitu-Messungen mit Höhenforschungsraketen auf Seite 24.

4.2.1 Insitu-Messungen auf Raketen

Die im Rahmen des Raketenprojektes WADIS durchgeführten kombinierten Turbulenzmessungen haben gezeigt, dass Turbulenz in der MLT-Region sehr variabel ist. Die bisher verwendeten experimentellen Techniken können die zeitliche Entwicklung von turbulenten Strukturen nur unzureichend oder gar nicht erfassen. Das liegt u. a. daran, dass die turbulenten Strukturen sich mit der Hintergrundströmung bewegen und aus dem Sichtfeld des Beobachters weg driften. Wir wollen die Analyse der vorhandenen Messungen mit Hilfe von DNS-Simulationen²⁶ erweitern, um damit die Zeitabhängigkeit der Turbulenzentwicklung zu erfassen. Das wiederum ermöglicht eine genauere Charakterisierung des turbulenten Feldes.

Im Rahmen des WADIS-Projektes wurden zum ersten Mal Energiespektren von geschichteter Turbulenz vermessen und charakterisiert. Es stellte sich u. a. heraus, dass dieses Phänomen in der MLT wohl des Öfteren auftritt. Dies eröffnet eine neue Perspektive für die Erforschung von geschichteter Turbulenz, die noch wenig erforscht ist. Hierbei sollen Messungen auf Raketen und am Boden (MAARSY, SAURA, EISCAT) sowie Simulationen von KMCM eingesetzt werden.

4.2.2 Insitu-Messungen auf Ballons

Wir haben in den vergangenen Jahren das Instrument LITOS für insitu-Windmessungen von Turbulenz in der Troposphäre und Stratosphäre entwickelt. Hierbei werden mit einem CTA-Sensor²⁷ Windfluktuationen auf Skalen bis zu Millimetern gemessen. Dabei ist es gelungen, dieses Instrument so weiter zu entwickeln, dass es mit verhältnismäßig geringem personellem und finanziellem Aufwand von jeder Radiosondenstation aus eingesetzt werden kann. Im Gegensatz

²⁶Direkte Numerische Simulationen

²⁷Constant Temperature Anemometer

zu bisherigen Messmethoden wird durch die hohe räumliche Auflösung eine Beeinflussung der Messung durch Eigenbewegungen des Ballons vermieden. Durch detaillierte Analyse der vorhandenen Daten haben wir jedoch festgestellt, dass unser Sensor unter bestimmten Umständen von der Wirbelschleppe des Ballons und der Halteleinen der Gondel beeinflusst wird. Als Konsequenz daraus werden wir in Zukunft alle Turbulenzmessungen im Abstieg des Ballons durchführen, sodass die Sensoren in Flugrichtung ausgerichtet sind. Erste Sondierungen zeigen, dass diese Maßnahme zum gewünschten Erfolg führt.

Um verschiedene in-situ Messprinzipien direkt miteinander vergleichen zu können, werden wir in naher Zukunft in Kühlungsborn eine gemeinsame Messkampagne mit der University of Colorado (Boulder, USA) durchführen. Dabei sollen die idealen Einsatzbereiche der jeweiligen Verfahren und Instrumente untersucht werden. Außerdem werden wir in diesem Zusammenhang numerische Simulationen nutzen, um den Einfluss von geringen Drücken auf den CTA-Sensor zu analysieren. Darüber hinaus sind Labormessungen von Turbulenz im Strömungskanal geplant. Die begonnene Entwicklung eines Sensors für turbulente Temperaturfluktuationen wurde zunächst zurückgestellt.

Unsere geophysikalischen Fragestellungen werden sich zunächst auf Fallstudien fokussieren. Ein Routineeinsatz von LITOS zur Erstellung einer Turbulenz-Klimatologie ist (noch) nicht geplant. Im Rahmen eines neuen Projektes (WIROC) planen wir eine Messkampagne zur Untersuchung von brechenden Schwerewellen in Skandinavien. Dafür wollen wir LITOS-Turbulenzmessungen mit assimilierten und idealisierten Modellen vergleichen. Außerdem ist eine Untersuchung von Turbulenz in großräumigen Windscherungen vorgesehen.

4.2.3 Turbulenzmessungen mit Radars

Aus Messungen mit Radargeräten werden u. a. 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. Am IAP besteht die besondere Möglichkeit, Messergebnisse von einer Reihe von Radarinstrumenten miteinander vergleichen und kombinieren zu können.

Der Nachteil von Radarverfahren liegt im sogenannten „beam-broadening“-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. Der Einsatz bildgebender Analyseverfahren in Kombination mit kohärentem MIMO mit MAARSY erzeugt virtuelle Radarstrahlen mit einer bis zu sechsfach schmalere Strahlbreite, was den Einfluß des „beam-broadening“-Effekts drastisch reduziert.

4.2.4 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.

Nach den umfangreichen technischen Modernisierungen der MF-Radare verfügen alle Radare des IAP über Mehrkanalempfänger. Somit können interferometrische Verfahren mit allen Radaren eingesetzt werden. 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 flexible Antennensteuerung des MAARSY kann aber auch zum simultanen Senden unabhängiger, individueller Wellenformen bei gleichzeitigem Empfang mit mehreren Kanälen genutzt werden (MIMO). Die dadurch entstehende vergrößerte virtuelle Apertur resultiert in einer verbesserten räumlichen Auflösung der Radarmessungen im Vergleich zur klassischen Konfiguration für interferometrische Verfahren als auch zur schnellen Strahlsteuerung. Das bereits erfolgreich

getestete Konzept wird nun in den operationellen Betrieb umgesetzt, um es für spezielle Meßkampagnen anwenden zu können.

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 sind Experimente mit aufgeweiteten Radarstrahl durchgeführt worden, um damit 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, allerdings wird durch den breiteren Radarstrahl die Sensitivität des Systems reduziert.

Darüber hinaus soll die Turbulenz in PMSE auf verschiedenen Skalen quantifiziert und auch das Windfeld (z. B. bzgl. Schwerewellen) untersucht werden. Die hierbei eingesetzten Verfahren lassen sich auch in der Tropo-/Stratosphäre anwenden. Durch die Lokalisierung der Rückstreuungszentren innerhalb des Radarstrahls können mögliche Abweichungen der mittleren Strahlposition in herkömmlichen Mehrstrahlexperimenten korrigiert und die Windmessungen damit verbessert werden.

4.2.5 Turbulenzmodellierung

In den IAP-eigenen Zirkulationsmodelle KMCM und ICON-IAP wird als Turbulenzparametrisierung das sogenannte klassische Smagorinsky-Modell (CSM²⁸) verwendet. Damit können die Horizontal- und Vertikaldiffusion im Einklang mit den hydrodynamischen Erhaltungssätzen beschrieben werden. Jedoch verletzt das CSM die elementare Bedingung der Skaleninvarianz für einen turbulenten Trägheitsbereich. Die Skaleninvarianz muss für Turbulenzparametrisierungen (auch Turbulenzmodelle genannt) in Zirkulationsmodellen gefordert werden, da die Mesoskalen mit horizontalen Wellenlängen kürzer als ~ 500 km, einschließlich der Schwerewellenspektren in der mittleren Atmosphäre, einen makroturbulenten Trägheitsbereich darstellen. Es wird vermutet, dass dieser Trägheitsbereich den Ähnlichkeitsgesetzen von geschichteter Turbulenz unterliegt.²⁹

Im Gegensatz zum CSM erfüllt das Dynamische Smagorinsky-Modell (DSM) die Bedingung der Skaleninvarianz. Am IAP wurde dieser Ansatz zum ersten Mal für die horizontale Impulsdiffusion für Atmosphärenmodelle formuliert und validiert. Außerdem wurde ein allgemeines mathematisches Kriterium für die Skaleninvarianz von Parametrisierungen hergeleitet. Auf dieser Basis und in Verbindung mit den Ähnlichkeitsgesetzen für geschichtete Turbulenz wurde das DSM auf die vertikale Impulsdiffusion erweitert, wobei die vertikale Mischungslänge dynamisch in Abhängigkeit von der horizontalen Mischungslänge berechnet wird. Wir haben außerdem ein Verfahren entwickelt, um Probleme des DSM an der Auflösungsgrenze zu vermeiden. Mit dem neuen Turbulenzmodell wurde das Nastrom-Gage-Spektrum in der oberen Troposphäre zum ersten Mal ohne künstliche Methoden wie Hyperdiffusion oder numerischer Filter erfolgreich simuliert.

Im Rahmen des SFB/Transregio-Projektes (siehe auch Abschnitt 4.1.4) wird nun an der konsistenten Einbindung der thermischen Diffusion und der Diffusion von Spurenstoffen in das DSM gearbeitet. All diese Terme lassen sich im Rahmen des DSM selbstkonsistent berechnen. Insbesondere sind die Prandtl-Zahl und die Schmidtzahlen dynamisch bestimmt. Unsere Weiterentwicklungen der Turbulenzparametrisierung dienen vor allem dazu, die explizite Simulation

²⁸CSM = Classical Smagorinsky Model

²⁹Damit ist gemeint, dass im Mittel Kaskaden von kinetischer und verfügbarer potentieller Energie bezüglich der horizontalen Skala vorliegen, und dass die vertikale Skala aufgrund von Auftriebskräften an die horizontale Skala gekoppelt ist.

von Schwerewellen mit KMCM bei hohen numerischen Auflösungen zu verbessern. Auch soll das DSM zukünftig auf ICON-IAP übertragen werden. Die zukünftigen dreidimensionalen Lidar- und Radarmessungen des IAP dienen zur Validierung unserer grundlegenden These, dass sich das universelle Verhalten der Schwerewellenspektren mit geschichteter Makrturbulenz erklären lässt – im Gegensatz zur bisherigen Lehrmeinung, dass so genannte Sättigungseffekte das spektrale Verhalten bestimmen.

4.3 Spurengase

4.3.1 Transport von Spurengasen, Wellenmischen

Der Transport von Spurengasen wird als wissenschaftliches Themengebiet am IAP in den nächsten Jahren weiter 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 vor³⁰. 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.

5 Langfristige Veränderungen in der mittleren Atmosphäre

5.1 ROMIC

Das IAP hat auch für die zweite Phase von ROMIC³¹ (2019-2022) eine Reihe von Projektanträgen gestellt. Mit einer Entscheidung ist im Herbst 2018 zu rechnen. Es sollen Trends in der mittleren Atmosphäre erforscht werden. Außerdem wird die Bedeutung von mesoskaligen Wellen für die Zirkulation und den Transport von Spurengasen.

5.2 Langzeittrends von Temperaturen, Schwerewellen, NLC und PMSE: Beobachtungen und Modellierung

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. Außerdem stellt sich die Frage, inwiefern das Vorhandensein von Gezeiten die Analyse von Trends beeinflusst (insbesondere relevant für Satellitenmessungen).

Mit LIMA/MIMAS sollen die verschiedenen Einflüsse auf NLC-Trends untersucht werden. In dem Zusammenhang wurde die Fragestellung bearbeitet, warum NLC zum ersten Mal Ende des neunzehnten Jahrhunderts beobachtet wurden. Es zeigt sich, dass die Helligkeit von NLCs (proportional zur Eismasse) eine der stärksten Klimaindikatoren ist. Seit Beginn der Industrialisierung hat sich das Wasserdampfverhältnis in NLC-Höhen durch den anthropogenen Methananstieg um ca. 40 % (1 ppmv) erhöht, wobei die Temperaturen nahezu konstant geblieben sind. Der Anstieg von Wasserdampf hat zu einer großen Verstärkung der NLC-Helligkeit geführt. In mittleren Breiten (ca. 54°–62°N), d. h. dort wo typischerweise visuelle NLC-Beobachtungen möglich sind, hat sich die mittlere Eismasse seit dem Jahr 1870 im Vergleich zu heute mehr als

³⁰Letztere haben allerdings den Nachteil, dass sie photochemisch aktiv sind und somit keinen inerten Tracer darstellen.

³¹Role of the Middle Atmosphere in Climate

verdoppelt. NLC existierten vermutlich schon vor dem 20. Jahrhundert, aber die Chancen, sie mit bloßem Auge zu beobachten, waren extrem gering.

In diesem Zusammenhang bleiben noch eine Reihe von Fragen zu klären, z. B. wie sich diese Modellrechnungen im Detail mit den vorhandenen Beobachtungen von NLC und Spurengasen in der MLT vergleichen. Außerdem soll geklärt werden, ob sich der in Zukunft zu erwartende anthropogene Anstieg von Methan und Kohlendioxid auf Klimänderungen in der mittleren Atmosphäre auswirkt. Von besonderem Interesse wird hierbei die Berechnung der zukünftige Entwicklung von mesosphärischen Eisschichten sein. Wir planen die Berücksichtigung verschiedener Emmissionszenarien ('IPCC climate scenarios') anthropogener Spurengase, um das Langzeitverhalten von NLC zu ermitteln. Insbesondere werden wir das Streu- und Absorptionsverhalten der Eisteilchen untersuchen. Damit soll u. a. geklärt werden, ob die Zunahme von NLC die solare Einstrahlung in mittleren und polaren Breiten im Sommer signifikant blockiert.

Die seit 1997 vorliegende Messreihe von NLC auf ALOMAR wird u. a. auf langfristige Variationen und auf den Einfluss des solaren Zyklus untersucht. Es soll eine Methode entwickelt werden, um aus den Aufnahmen des Netzwerkes von Kameras Strukturen und Höhen von NLC zu bestimmen. Damit soll unter anderem die Genauigkeit der historischen Höhenbestimmungen, die auf fotografischer Triangulation beruhen, untersucht werden. Diese Daten werden dann mit modernen Lidarmessungen verglichen. Die NLC-Messungen und die Modellrechnungen von LIMA/MIMAS sollen mit Satellitenmessungen verglichen werden (z. B. AIM, SBUV etc.), auch hinsichtlich einer möglichen Längenabhängigkeit von NLC.

5.3 Langzeitvariabilität des mesosphärischen Windes, der horizontalen Divergenz und relativen Vortizität in hohen Breiten

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. Des Weiteren ist beabsichtigt, die mittleren Winde hinsichtlich der mittleren Tageslänge über einen solaren Zyklus näher zu betrachten.

Unsere vorläufige Untersuchung zeigt korrelierte Variabilitäten zwischen horizontaler Divergenz in Winden und satellitenbasierten Temperaturen von Microwave Limb Sounder (MLS). In dieser Untersuchung wird die Bedeutung der Wellendynamik (Schwerewellen und Gezeiten) für die langfristige Variabilität der mesosphärischen Temperatur diskutiert.

6 Spezielle Forschungsthemen

6.1 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. Die Messungen über Kühlungsborn, ALOMAR und in der Antarktis werden zur Zeit in Kooperation mit der Arbeitsgruppe von Prof. Plane (Univ. of Leeds) im Hinblick auf dynamische Einflüsse durch Gezeiten,

stratosphärische Erwärmungen etc. untersucht.

In Kooperation mit Leeds wurde in den letzten Jahren das Model WACCM wesentlich weiter entwickelt, sodass erstmals der direkte Vergleich eines 3-D Modells mit vollständiger Dynamik und Metall-Chemie mit Messungen der verschiedenen Metalle möglich wird. Durch Kombination von Model und Messungen wird es damit erstmals möglich, Wellen und Gezeiten ganzjährig bis weit in die Thermosphäre nicht nur zu beobachten, sondern auch zeitlich und räumlich hoch aufgelöst zu modellieren und den Einfluss der Dynamik und Chemie zu quantifizieren.

In Kühlungsborn gelang vor kurzem der weltweit zweite Nachweis von Nickel in der Mesosphäre. Die Untersuchungen sollen bald publiziert werden. Eine Fortsetzung dieser Messungen ist aufgrund begrenzter Ressourcen zunächst nicht vorgesehen.

6.2 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 $1 \cdot 10^8 \text{ m}^{-3}$. Dabei werden sowohl ungestörte Bedingungen als auch durch solare/geomagnetische Ereignisse verursachte Störungen analysiert. Die in Abhängigkeit von Jahreszeit, Tageszeit und Sonnenaktivität bestimmten mittleren Profile sollen in Verbindung mit Absorptionsbeobachtungen (mit dem Riometer AIRIS als auch mit dem MAARSY VHF Radar in Andenes) zur Validierung empirischer Modelle der Elektronendichte 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.

6.3 Aerosole in der Stratosphäre

Die Daten des ALOMAR RMR-Lidars liefern wertvolle und teilweise einzigartige Informationen über Sulfat-Aerosole in der Stratosphäre. Die stratosphärische Aerosolschicht ist von elementarer Bedeutung für die Strahlungsbilanz in der Atmosphäre. Sie dehnt sich von der Tropopause bis in ungefähr 30 km aus, wobei die Aerosolpartikel solare Strahlung streuen und infrarote Wärmestrahlung absorbieren. In Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. von Savigny (Universität Greifswald) sollen neue Methoden zur Analyse der Lidardaten hinsichtlich stratosphärischen Aerosols entwickelt werden. Ziel ist es, wichtige Parameter, wie z. B. das Rückstreuverhältnis, die Extinktion und die Teilchengrößen eindeutig zu bestimmen. Weiterhin werden die Messungen nach Hintergrundaerosol, polare Stratosphärenwolken sowie vulkanisch induziertem Aerosol unterschieden. Das Lidar erlaubt die Untersuchung der Aerosolschicht auf sehr unterschiedlichen zeitlichen Skalen. Es werden Variationen im Minutenbereich genauso untersucht wie langfristige Veränderungen über zwei Dekaden. Der vorhandene umfangreiche Datensatz soll mit Messungen von Satelliten verglichen werden. Die Arbeiten werden teilweise im Rahmen eines DFG-Projektes finanziert.