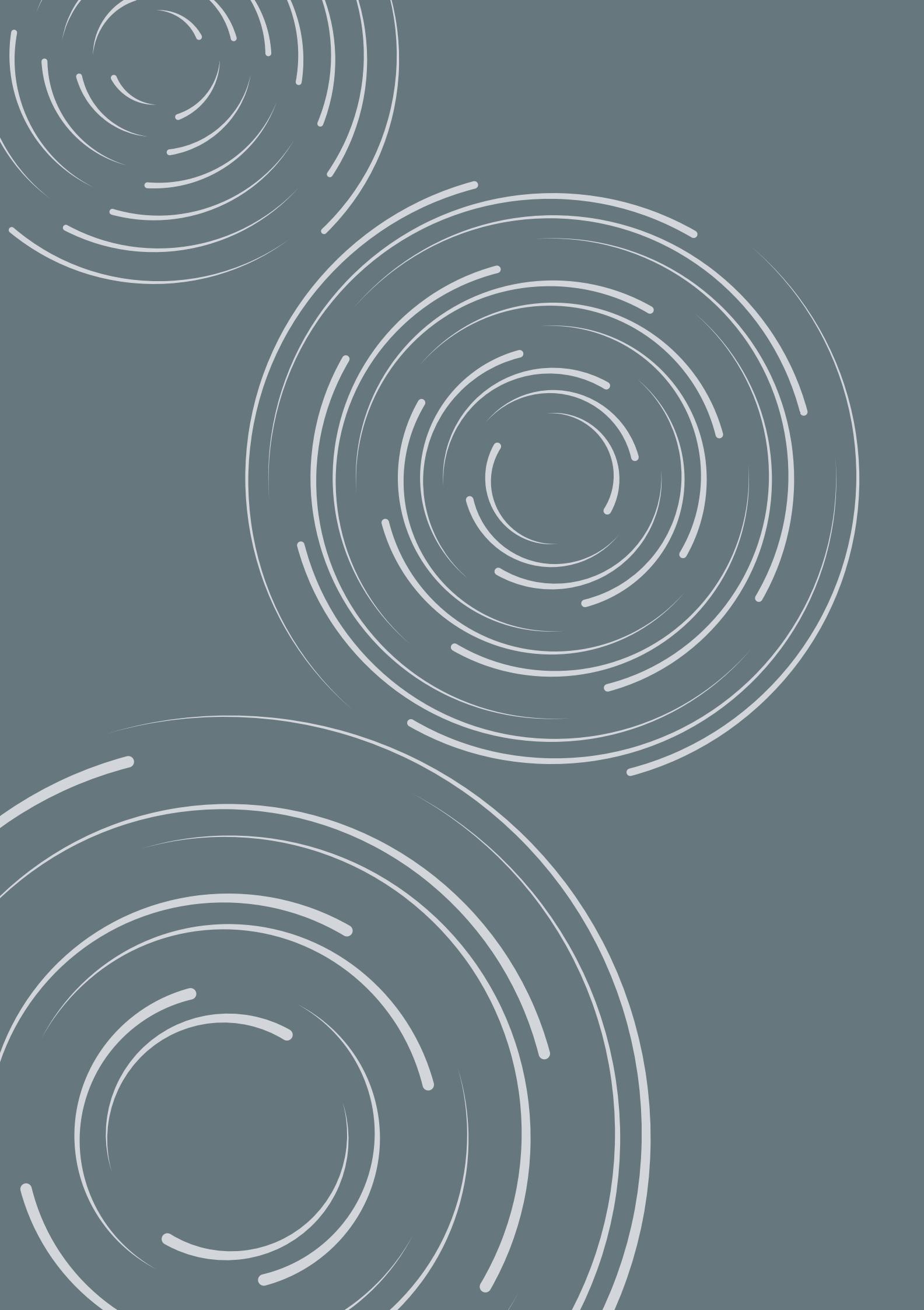


# INSTITUTSBERICHT

# INSTITUTE REPORT

22

—  
23



# INHALTSVERZEICHNIS

## TABLE OF CONTENTS

<b>HIGHLIGHTS</b>	<b>4</b>	<b>ÖFFENTLICHKEIT</b>	<b>32</b>
HIGHLIGHTS		OUTREACH	
<b>OPTISCHE SONDIERUNGEN</b>		<b>PREISE</b>	<b>34</b>
<b>UND HÖHENFORSCHUNGSRAKETEN</b>		AWARDS	
OPTICAL SOUNDINGS	8	<b>BERATUNGSTÄTIGKEITEN</b>	<b>35</b>
AND SOUNDING ROCKETS		COMMUNITY SERVICES	
Technische Entwicklung	9	<b>TECHNOLOGIETRANSFER</b>	<b>36</b>
Technical development		TECHNOLOGY TRANSFER	
Beobachtungen von Schwerewellen	13	<b>WISSENSCHAFTSKOMMUNIKATION</b>	<b>38</b>
Gravity wave observations		SCIENCE COMMUNICATION	
Hochaufgelöste Turbulenzmessungen	14	<b>LEIBNIZ NORDOST</b>	<b>38</b>
High resolution turbulence observations		LEIBNIZ NORDOST	
Leuchtende Nachtwolken: Indikatoren	14	<b>WISSENSCHAFTLICHE TAGUNGEN</b>	<b>39</b>
für Dynamik und Klimawandel		SCIENTIFIC MEETINGS	
Noctilucent clouds: Tracers of dynamics		<b>30 JAHRE IAP</b>	<b>40</b>
and climate change		30 YEARS OF IAP	
<b>RADARSONDIERUNGEN</b>	<b>16</b>	<b>SOZIALE MEDIEN</b>	<b>41</b>
RADAR REMOTE SENSING		SOCIAL MEDIA	
Plasma-Neutral-Wechselwirkungen	17	<b>IAP IM ÜBERBLICK</b>	<b>42</b>
Plasma-Neutral Coupling		IAP AT A GLANCE	
Kopplung der Atmosphärenschichten	19	<b>ORGANIGRAMM</b>	<b>44</b>
Atmospheric Coupling		ORGANISATIONAL CHART	
Mesoskalige Dynamik	20	<b>GREMIEN</b>	<b>45</b>
Mesoscale dynamics		BOARDS	
Instabilitäten in der Mesosphäre	22	<b>STANDORTE UND INFRASTRUKTUR</b>	<b>46</b>
Mesospheric Instabilities		LOCATIONS AND INFRASTRUCTURE	
<b>MODELLIERUNG ATMOSPHÄRISCHER</b>		<b>PERSONAL UND BUDGET</b>	<b>48</b>
<b>PROZESSE</b>		PERSONNEL AND BUDGET	
MODELLING OF ATMOSPHERIC	24	<b>DRITTMITTELPROJEKTE</b>	<b>49</b>
PROCESSES		THIRD-PARTY FUNDING	
Modellentwicklungen	25	<b>VERÖFFENTLICHUNGEN</b>	<b>52</b>
Model developments		PUBLICATIONS	
Theorie-Entwicklung	28	<b>DOKTORARBEITEN</b>	<b>57</b>
Theory development		DOCTORATE THESES	
Sporadisches E und Windscherung	30	<b>KOOPERATIONEN</b>	<b>58</b>
Sporadic E and wind shear		COOPERATIONS	
		<b>ABKÜRZUNGEN</b>	<b>60</b>
		ABBREVIATIONS	
		<b>BILDNACHWEISE</b>	<b>61</b>
		CREDITS	
		<b>ANREISE</b>	<b>62</b>
		HOW TO GET TO IAP	



## LIEBE LESERINNEN UND LESER, LIEBE FREUNDINNEN UND FREUNDE DES IAP DEAR READERS, DEAR FRIENDS OF THE IAP

Die Jahre 2022 und 2023 waren für unser Institut eine ganz besondere Zeit mit vielen motivierenden Highlights.

Im Mai 2022 fand die Evaluierung unseres Leibniz-Institutes statt. Hierzu besuchte eine internationale Bewertungsgruppe das Institut, um einen Einblick in unsere wissenschaftlichen und institutionellen Errungenschaften zu erhalten, mit uns und unseren Kooperationspartnern aktuelle Projekte zu diskutieren und unsere strategischen Ziele zu reflektieren. Mit großer Freude haben wir im März 2023 die Veröffentlichung der Stellungnahme des Senats der Leibniz-Gemeinschaft zum Ergebnis der Evaluierung entgegengenommen, welche eine exzellente Bewertung aller drei Forschungsabteilungen und des Instituts mitteilte. Ein ganz besonderer Erfolg war die positiv beschiedene wissenschaftliche Bewertung des kleinen strategischen Sondertatbestands, um den wir uns im Zuge der Evaluierung beworben haben. Hierbei handelt es sich um eine thematische Institutserweiterung, um mit neuen wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Fragestellungen zur Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Weltraum zu arbeiten. Wir sehen der ministeriellen Mittelfreigabe in 2024 und ihrer Implementierung in 2025 entgegen.

Eine besonders verantwortungsvolle Aufgabe war die Durchführung der Berufungsverfahren für die Nachbesetzung der vakanten Stellen der Leitungen der Abteilungen *Modellierung atmosphärischer Prozesse* und *Optische Sondierung und Höhenforschungsraketen* gemeinsam mit der Universität Rostock. Im Juli und im Dezember 2023 ging der Ruf an Dr. Claudia C. Stephan und Dr. Gerd Baumgarten. Ohne vorweggreifen zu wollen, waren die Berufungsverfahren erfolgreich; ein Ereignis, welches auch im nächsten Berichtszeitraum Würdigung finden soll.

Dieser Bericht gibt weitere Einblicke in die Vielfalt der Arbeiten am IAP in den Jahren 2022 und 2023. Dies war nur Dank der Unterstützung unserer Förderer aus dem Land, dem Bund und weiteren Drittmittelgebern möglich. Ein ausdrücklicher Dank gilt unseren Gremien, ohne deren Zusammenarbeit uns diese Verwirklichungen so nicht möglich gewesen wären. Ich danke im Besonderen unseren rund 70 Mitarbeitenden und den zahlreichen Kooperationspartnern weltweit für deren enthusiastischen Einsatz, dies zu erreichen.

The years 2022 and 2023 were an exceptional time for our institute with many motivating highlights.

The evaluation of our Leibniz Institute took place in May 2022. An international evaluation group visited the institute to gain insight into our scientific and institutional achievements, discuss current projects with us and our cooperation partners and reflect on our strategic goals. In March 2023, we were delighted about the publication of the Leibniz Association Senate's statement on the results of the evaluation, which gave an excellent assessment of all three research departments and the institute. A particular success was the positive scientific assessment of the minor item of strategic expenditure that we applied for as part of the evaluation. It contains a thematic expansion of the Institute in order to work with new scientific and societal questions relating to the interaction between the atmosphere and space. We are looking forward to the ministerial release of funds in 2024 and its implementation in 2025.

One particularly responsible task was carrying out the appointment procedures to fill the vacant positions of the heads of the departments of *Modelling of Atmospheric Processes* and *Optical and Rocket Soundings* together with the University of Rostock. Drs Claudia C. Stephan and Gerd Baumgarten received the calls in July and December 2023, respectively. Without wishing to anticipate, the appointment procedures have been successful; an event that will also be honoured in the next reporting period.

This report provides further insights into the variety of work carried out at the IAP in 2022 and 2023. This work was only possible thanks to the support of our sponsors from the state and federal governments and other third-party donors. I would like to express my sincere thanks to our committees, without whose cooperation these realisations would not have been possible. In particular, I would like to thank our nearly 70 employees and our numerous cooperation partners worldwide for their enthusiastic commitment making this possible.

*Claudia Stolle*

**Claudia Stolle**  
Direktorin

## UNSERE VISION OUR VISION

**Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre und Weltraum.**

**Understanding atmosphere and space interactions.**

## UNSERE MISSION OUR MISSION

**Wir erweitern das Wissen über die Mesosphäre und untere Thermosphäre, indem wir Erkenntnisse in den Bereichen Atmosphärenphysik, Messtechnik, Interpretation der Beobachtungen und Modellierung schaffen und nutzen. Damit tragen wir zur Lösung neuer gesellschaftlicher Herausforderungen bei.**

**Advancing scientific knowledge of the mesosphere and lower thermosphere by developing and exploiting expertise in atmospheric physics, instrumentation, analysis and modelling to serve emerging societal needs.**

Das Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. an der Universität Rostock (IAP) erforscht die Physik der Mesosphäre und unteren Thermosphäre. Dazu entwickelt und betreibt es hochentwickelte Lidar- und Radartechnologie sowie Nutzlasten für Höhenforschungsraketen und atmosphärische Modelle. Neben dem Studium spezifischer Prozesse der Mesosphäre und unteren Thermosphäre verbindet sich unsere Forschung zudem mit Fragen zur Klimaveränderung und dem atmosphärischen Einfluss auf das Weltraumwetter. Das IAP ist durch nationale und internationale Kooperationen weltweit vernetzt.

Die Schwerpunkte der wissenschaftlichen und experimentellen Forschungsarbeit am IAP sind:

1. Erforschung der Mesosphäre und unteren Thermosphäre;
2. Kopplung der Mesosphäre und unteren Thermosphäre zu unteren und oberen Atmosphärenschichten;
3. Langzeitveränderungen in der Mesosphäre und unteren Thermosphäre und angrenzender Regionen.

Das IAP hat seinen Hauptsitz im Ostseebad Kühlungsborn, betreibt eine Außenstelle in Juliusruh und beteiligt sich maßgeblich am ALOMAR-Observatorium in Nordnorwegen. Als An-Institut der Universität Rostock ist das IAP fester Bestandteil des Lehrprogramms des Instituts für Physik. Mit ca. 70 Mitarbeitenden integriert das Institut eine gleichstellungs- und familienorientierte Personalpolitik. Das IAP engagiert sich darüber hinaus im interdisziplinären Verbund der Institute der Leibniz-Gemeinschaft, in der es seit 1992 Mitglied ist.

The Leibniz Institute of Atmospheric Physics at the University of Rostock (IAP) investigates the physics of the mesosphere and lower thermosphere. To this end, it operates sophisticated lidar and radar technology, payloads for sounding rockets and develops atmospheric models. In addition to studying specific processes of the mesosphere and lower thermosphere, our research also connects to questions of climate change and atmospheric influence on space weather. The IAP is globally networked through national and international collaborations.

The main areas of scientific and experimental research at the IAP are:

1. Exploration of the mesosphere and lower thermosphere;
2. Coupling of the mesosphere and lower thermosphere to lower and upper atmospheric layers;
3. Long-term changes in the mesosphere and lower thermosphere and adjacent regions.

The IAP is located near the Baltic Sea resort of Kühlungsborn, it operates a branch station at Juliusruh and participates significantly in the ALOMAR observatory in northern Norway. As an affiliated institute of the University of Rostock, the IAP is an integral part of the teaching program of the Institute of Physics. With about 70 employees, the institute integrates an equal opportunity and family-oriented personnel policy. The institute is also involved in the interdisciplinary network of institutes of the Leibniz Association, of which it has been a member since 1992.

# HIGHLIGHTS

# HIGHLIGHTS

1





In der Mesosphäre und unteren Thermosphäre (englisch: mesosphere/lower thermosphere, MLT) treffen Langzeitveränderungen „von unten“ aufgrund des Klimawandels auf Veränderungen „von oben“ aufgrund der sich periodisch ändernden Sonnenaktivität. Die Kombination beider Effekte hat Auswirkungen auf die Zusammensetzung, die Dynamik und Temperatur in dieser Region, die wiederum auf angrenzende Höhen schichten rückwirken. Die langjährigen Messreihen am IAP ermöglichen zusammen mit den am IAP betriebenen Atmosphärenmodellen einzigartige Studien der Langzeitveränderungen („Trends“) in der MLT. Ein Teil dieser Studien erfolgte im Rahmen des vom IAP koordinierten BMBF-Schwerpunktprogramms ROMIC (Role of the Middle Atmosphere in Climate).

In the mesosphere and lower thermosphere (MLT), long-term changes “from below” due to climate change meet changes “from above” due to periodically changing solar activity. The combination of both effects has an impact on the composition, dynamics and temperature in this region, which in turn affects neighbouring altitude layers. The long-term measurement series at the IAP, together with the atmospheric models operated at the IAP, enable unique studies of long-term changes (“trends”) in the MLT. Some of these studies were carried out as part of the BMBF priority programme ROMIC (Role of the Middle Atmosphere in Climate) coordinated by the IAP.

## LEUCHTENDE NACHTWOLKEN UND

## SPURENGASE

### NOCTILUENT CLOUDS AND

### TRACE GASES

Langjährige Lidarmessungen von leuchtenden Nachtwolken (engl. Noctilucent clouds, kurz NLC) haben unser Verständnis dieser einzigartigen Eiswolken in der sommerlichen MLT-Region verbessert. Mithilfe des am IAP entwickelten Eismodells MIMAS können NLC als Indikatoren für die eingangs erwähnten Veränderungen in der mittleren Atmosphäre genutzt werden. Wir beobachten eine komplexe Abhängigkeit von Wasserdampf und NLC von der Sonnenaktivität. Mit zunehmender Sonnenaktivität steigt zum einen die Temperatur, und zum anderen wird mehr Wasserdampf durch die kurzwellige Strahlung der Sonne aufgespalten. Beide Effekte führen dazu, dass die Eismasse in den NLC abnimmt. Dies verringert die vertikale Umverteilung von Wasserdampf aufgrund des sogenannten „freeze-drying“ und führt in bestimmten Höhen zu einer Erhöhung der Wasserdampfkonzentration. Die MIMAS-Studien haben so erstmals gezeigt, dass die Änderung der Wasserdampfkonzentration mit der Sonnenaktivität stark von der Höhe abhängt und sich positive und negative Veränderungen innerhalb weniger Kilometer ausgleichen können. Dies erklärt bisher unverstandene Satelliten-Messungen in der Mesopausenregion.

Die realitätsnahen MIMAS-Simulationen erlauben uns, sowohl in die Vergangenheit zu blicken als auch zukünftige Szenarien im Zuge des Klimawandels zu untersuchen. Dabei zeigt sich, dass der Einfluss der Sonnenaktivität auf Wasserdampf und Eiswolken in der MLT mit steigender Treibhausgaskonzentration noch weiter zunimmt. Seit den 1960er Jahren sind die periodischen Änderungen der Höhe und Helligkeit leuchtender Nachtwolken stärker ausgeprägt, was auf die Abkühlung der MLT-Region aufgrund des CO<sub>2</sub>-Anstiegs zurückzuführen ist. Der Wasserdampfgehalt in der mittleren Atmosphäre wird durch Methan-Einträge beeinflusst, die im Zuge des Klimawandels ebenfalls zunehmen. MIMAS-Simulationen bis in das Jahr 2100 zeigen, dass sich die Eismasse der leuchtenden Nachtwolken im Vergleich zu 1950 verdreifachen könnte. Dies führt zu häufigeren und stärkeren leuchtenden Nachtwolken, was besonders in hohen Breiten die Strahlungsbilanz deutlich beeinflusst. Es wird erwartet, dass kurzwellige UV-Strahlung im Durchschnitt bis zu 7 % stärker absorbiert wird, aufgrund der Eiswolkenvariabilität sogar teilweise bis zu 30 %. Die Auswirkungen dieser Änderungen auf die Photochemie der mittleren Atmosphäre sind Gegenstand zukünftiger Forschungen.

Long-term lidar measurements of noctilucent clouds (NLC) have improved our understanding of these unique ice clouds in the summer MLT region. Using the MIMAS ice model developed at the IAP, NLCs can be used as indicators of the changes in the middle atmosphere mentioned above. We observe a complex dependence of water vapour and NLC on solar activity. On the one hand, the temperature rises with increasing solar activity, and on the other hand, more water vapour is dissociated by the short-wave radiation from the sun. Both effects lead to a decrease in the ice mass in the NLC. This reduces the vertical redistribution of water vapour due to so-called "freeze-drying" and leads to an increase in water vapour concentration at certain

altitudes. The MIMAS studies have thus shown for the first time that the change in water vapour concentration with solar activity is strongly dependent on altitude and that positive and negative changes can balance each other out within a few kilometres. This explains previously misunderstood satellite measurements in the mesopause region.

The realistic MIMAS simulations allow us to look into the past as well as analyse future scenarios in the course of climate change. This shows that the influence of solar activity on water vapour and ice clouds in the MLT continues to increase with rising greenhouse gas concentrations. Since the 1960s, the periodic changes in the height and brightness of noctilucent clouds have become more pronounced, which can be attributed to the cooling of the MLT region due to the increase in CO<sub>2</sub>. The water vapour content in the middle atmosphere is influenced by methane emissions, which are also increasing as a result of climate change. MIMAS simulations up to the year 2100 show that the ice mass of the noctilucent clouds could triple compared to 1950. This will lead to more frequent and stronger noctilucent clouds, which will have a significant impact on the radiation balance, especially at high latitudes. It is expected that short-wave UV radiation will be absorbed up to 7 % more on average, and in some cases even up to 30 % more due to the variability of ice clouds. The effects of these changes on the photochemistry of the middle atmosphere are the subject of future research.

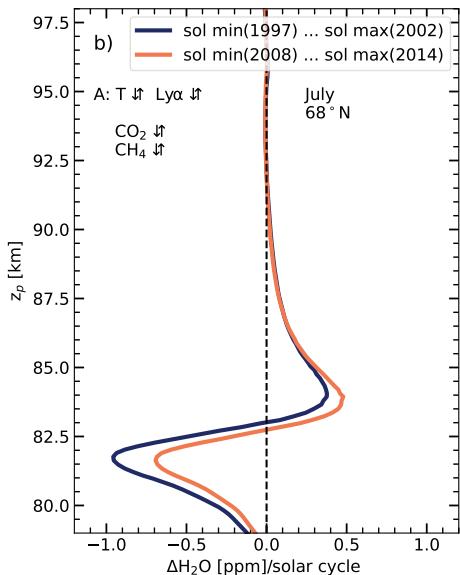
## TRENDS IN WIND UND ELEKTRONENDICHTEN

### TRENDS IN WINDS AND ELECTRON DENSITIES

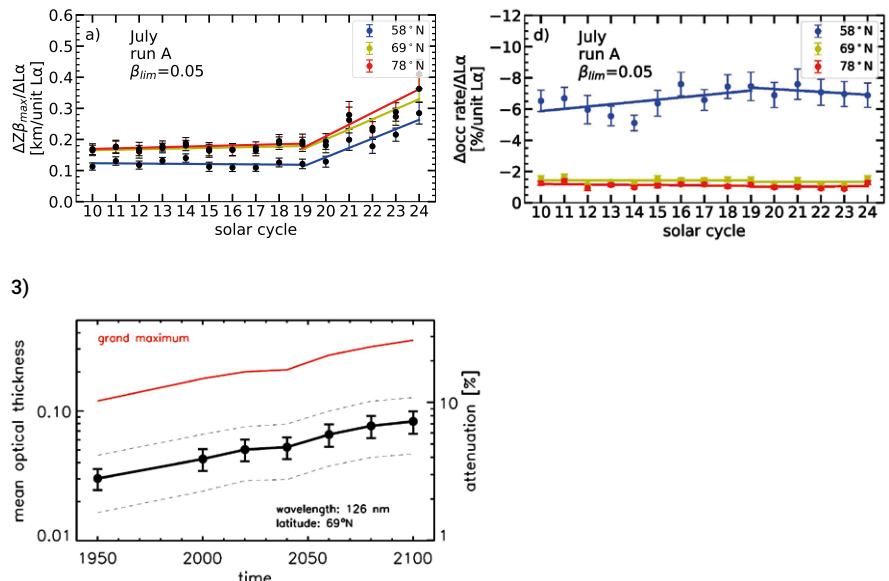
Die langjährigen Messreihen mit MF- und Meteor-Radaren in Norddeutschland zeigen, dass der Ostwind unterhalb von 90 km im Sommer zunimmt, während der Nordwind schwächer wird. In Nordnorwegen dagegen ist der Trend im Ostwind auf den Juli beschränkt und deutlich schwächer. Interessanterweise beeinflusst eine stärkere geomagnetische Aktivität die Winde oberhalb von 90 km in hohen und mittleren Breiten gegensätzlich: schwächere Westwinde in Norddeutschland und stärkere in Nordnorwegen. Unterhalb von 90 km werden die Winde in beiden Regionen schwächer. Aus den Ionosondenmessungen in Juliusruh über einen Zeitraum von etwa 60 Jahren konnten Trends für Ionosphärenparameter abgeleitet werden. Es wurde festgestellt, dass die Höhe und Elektronendichte der F-Region (~250 km) sowie die Elektronendichte in der E-Region (~150 km) abnehmen.

The long-term measurement series with MF and meteor radars in northern Germany show that the westward wind increases below 90 km in summer, while the southward wind weakens. In northern Norway, on the other hand, the westward wind trend is limited to July and is significantly weaker. Interestingly, stronger geomagnetic activity influences the winds above 90 km in high and middle latitudes in opposite ways: weaker eastward winds in northern Germany and stronger winds in northern Norway. Below 90 km, the winds become weaker in both regions. Trends for ionospheric parameters were derived from the ionosonde measurements in Juliusruh over a period of around 60 years. It was found that the height and electron density of the F region (~250 km) and the electron density in the E region (~150 km) are decreasing.

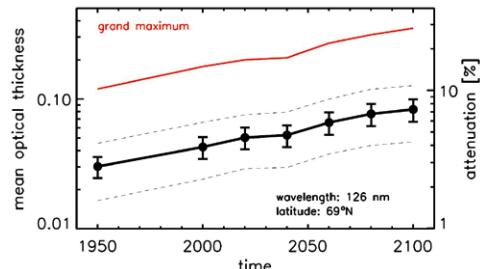
1)



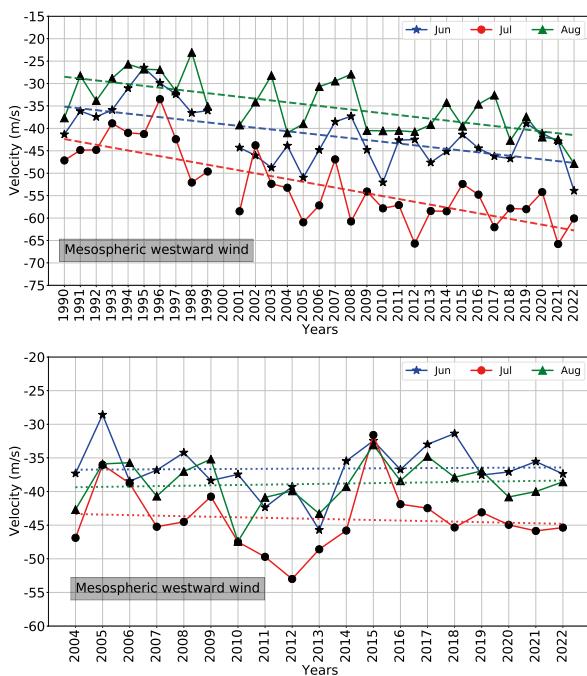
2)



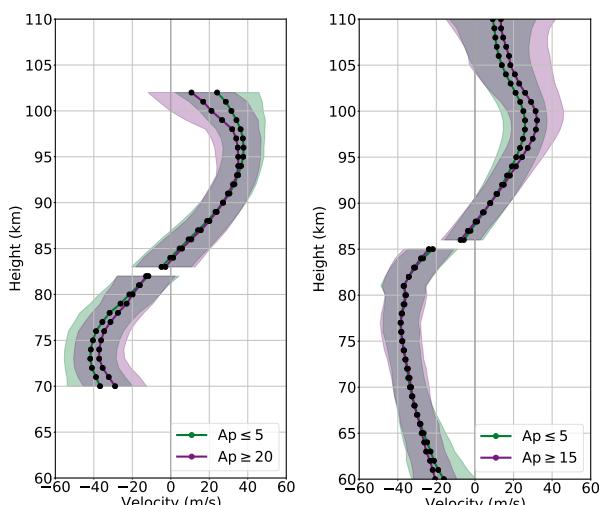
3)



4)



5)



1)

Änderung der Wasserdampfkonzentration zwischen solarem Minimum und Maximum für zwei verschiedene Solarzyklen. Insbesondere im späteren Solarzyklus gleichen sich eine Abnahme unter 82,5 km und eine Zunahme oberhalb von 82,5 km aus. Change in water vapor concentration between solar minimum and maximum for two different solar cycles. In the later solar cycle, a decrease below 82.5 km and an increase above 82.5 km balance each other. (Vellalassery et al., 2023)

2)

Entwicklung der NLC-Helligkeit und -Häufigkeit über die vergangenen 15 Solarzyklen (seit ca. 1850) gemäß MIMAS-Berechnungen. Die NLC-Helligkeit reagiert aufgrund Zunahme der Treibhausgase seit 1960 (Solarzyklus 20) zunehmend empfindlich auf die solare Variabilität. Die Häufigkeit der NLC wird besonders in mittleren Breiten von der Sonnenaktivität beeinflusst. Development of NLC brightness and frequency over the past 15 solar cycles (since approx. 1850) according to MIMAS calculations. NLC brightness is increasingly sensitive to solar variability due to the increase in greenhouse gases since 1960 (solar cycle 20). The frequency of NLCs is mainly in mid-latitudes influenced by the sun. (Vellalassery et al., 2024)

3)

Prognose der Abschwächung der kurzweligen UV-Strahlung aufgrund der mit dem Klimawandel zunehmenden NLC. Die Punkte mit Fehlerbalken beschreiben die Mittelwerte und Standardabweichungen, die rote Linie das Maximum aller Einzelwerte des jeweiligen Zeitraums. Forecast of the attenuation of short-wave UV radiation due to the increase in NLCs as a result of climate change. The points with error bars describe the mean values and standard deviations, the red line the maximum of all individual values for the respective period. (Lübken et al., 2024)

4)

Trenduntersuchungen zeigen für die Mesosphäre (unterhalb 90 km) eine Zunahme des Ostwindes in mittleren Breiten im Sommer (oben), während in hohen Breiten nur im Juli ein schwächerer Trend erkennbar ist (unten). Trend studies show for the summer mesosphere (below 90 km) an amplification of the westward wind at mid-latitudes (top), while only a weak trend in July is discernable at high latitudes (bottom). (Jaen et al., 2023)

5)

Bei höherer geomagnetischer Aktivität (violett) wird im Sommer in mittleren Breiten ein schwächerer Westwind oberhalb von 90 km beobachtet (links). In hohen Breiten ist es umgekehrt (rechts). The zonal wind in summer decreases with increasing geomagnetic activity at mid-latitudes (left), but increases at high latitudes (right). (Jaen et al. 2023)

# OPTISCHE SONDIERUNGEN UND HÖHENFORSCHUNGSRAKETEN

## OPTICAL SOUNDINGS AND SOUNDING ROCKETS



**Die Abteilung Optische Sondierungen und Höhenforschungsraketen nutzt Lidar-Fernerkundung, um verschiedene Aspekte der Atmosphäre zu untersuchen. Dazu gehören Temperatur, Wind, Dichte, Aerosole, Wolken und Spurenstoffe. Zusätzlich werden In-situ-Messungen mit speziellen Instrumenten an Bord von Höhenforschungsraketen durchgeführt. Die Abteilung hat tageslichtfähige Lidare entwickelt, die ganzjährig die mittlere Atmosphäre in mittleren und hohen Breiten untersuchen können. Durch die Kombination verschiedener Instrumente können einzigartige Analysen der dynamischen Eigenschaften der Atmosphäre auf verschiedenen Skalen durchgeführt werden. Das IAP investiert Zeit und Ressourcen in die Entwicklung neuer Messtechniken und bietet damit einzigartige Ausbildungsmöglichkeiten für den Nachwuchs**

Our department, Optical and Rocket Soundings, uses lidar remote sensing to study temperatures, wind, densities, aerosols, clouds (including noctilucent clouds), and trace substances from the upper troposphere to the lower thermosphere. Special instruments on sounding rockets provide high-altitude in-situ measurements. The department has developed daylight-capable lidars for year-round middle atmosphere research at mid and high latitudes. This complete temporal coverage and combination of instruments allows unique analyses of the middle atmosphere's dynamic properties from large to small spatial and temporal scales. The IAP's ability to develop new measurement techniques offers unique training opportunities for the next generation of scientists.

## **TECHNISCHE ENTWICKLUNG** **TECHNICAL DEVELOPMENT**

Das IAP will das Verständnis der Grenze zwischen Atmosphäre und Weltraum erweitern. Um dieses Ziel zu erreichen, werden Lidar- und Raketeninstrumente benötigt, die qualitativ hochwertige Messungen in diesen großen Höhen durchführen. Wir entwerfen, entwickeln und bauen solche Instrumente für die Mesosphäre und untere Thermosphäre.

IAP aims to push the boundaries of human understanding of our near-space environment. To achieve this goal, lidar, and rocket instruments are needed that can perform high-quality measurements at these high altitudes. We design, develop and build such instruments for the mesosphere and lower thermosphere.

## **TEAM**

Gerd Baumgarten, Ronald Eixmann, Jens Fiedler, Eframir Franco-Diaz, Jan Froh, Michael Gerding, Hans-Jürgen Heckl, Josef Höffner, Torsten Köpnick, Franz-Josef Lübken, Alsu Mauer, Thorben Mense, Mohamed Mossad, Reik Ostermann, Michael Priester, Tristan Staszak, Boris Strelnikov, Irina Strelnikova, Ashique Vellalassery, Robin Wing



Justagearbeiten am Hochleistungslaser für die Wind- und Temperatursoundings in Kühlungsborn. Alignment work at the high-power laser used for the wind and temperature soundings at Kühlungsborn.

## **RMR-LIDARS ALOMAR UND KÜHLUNGSBORN**

### **RMR LIDAR ALOMAR AND KÜHLUNGSBORN**

Unser Institut entwickelt und betreibt kontinuierlich zwei Doppler-Rayleigh-Lidar-Stationen. Diese Lidare sind weltweit einzigartig, da sie gleichzeitig Winde, Temperaturen und Aerosole in der mittleren Atmosphäre messen können. Die Lage dieser beiden Stationen in Norwegen und Deutschland ermöglicht es uns, wertvolle Messungen von dynamischen Mustern und Trends auf kontinentaler Ebene vorzunehmen. Von besonderem wissenschaftlichem Interesse sind z. B. Studien über die Fernausbreitung von Schwerewellen, lange Zeitreihen der Schwerewellenenergie, die Wechselwirkung von Schwerewellen mit dem Polarwirbel und Studien über nachtleuchtende Wolken als Indikator für Dynamik und globale Klimaveränderungen.

Um solche ehrgeizigen Langzeitstudien an zwei Standorten durchführen zu können, haben wir erhebliche Anstrengungen unternommen, um die Messungen der beiden Lidare zu harmonisieren. Das beinhaltet die Ergänzung der Hardware an beiden Standorten und die einheitliche Verarbeitung der Daten mit der gleichen automatischen Software. Der unmittelbare Vorteil dieser Arbeit besteht darin, dass wir konsistente,

qualitativ hochwertige Daten in nahezu Echtzeit von zwei unabhängigen Instrumenten erzeugen können. Dadurch können wir aussagekräftige Trendanalysen erstellen und einen bedeutenden Beitrag zum Verständnis des Klimawandels leisten.

Our institute continuously develops and operates two Doppler-Rayleigh lidar stations. These stations are unique worldwide, as both systems can measure winds, temperatures and aerosols in the middle atmosphere simultaneously. The location of these two stations in Norway and Germany allows us to make valuable two-site measurements of continent-scale dynamic patterns and trends. Of particular scientific interest are, e.g., studies on the long-distance propagation of gravity waves; long time-series of gravity wave energy; analyses of the interaction of gravity waves and polar vortex; and studies of noctilucent clouds as a tracer for dynamics and global climate change.

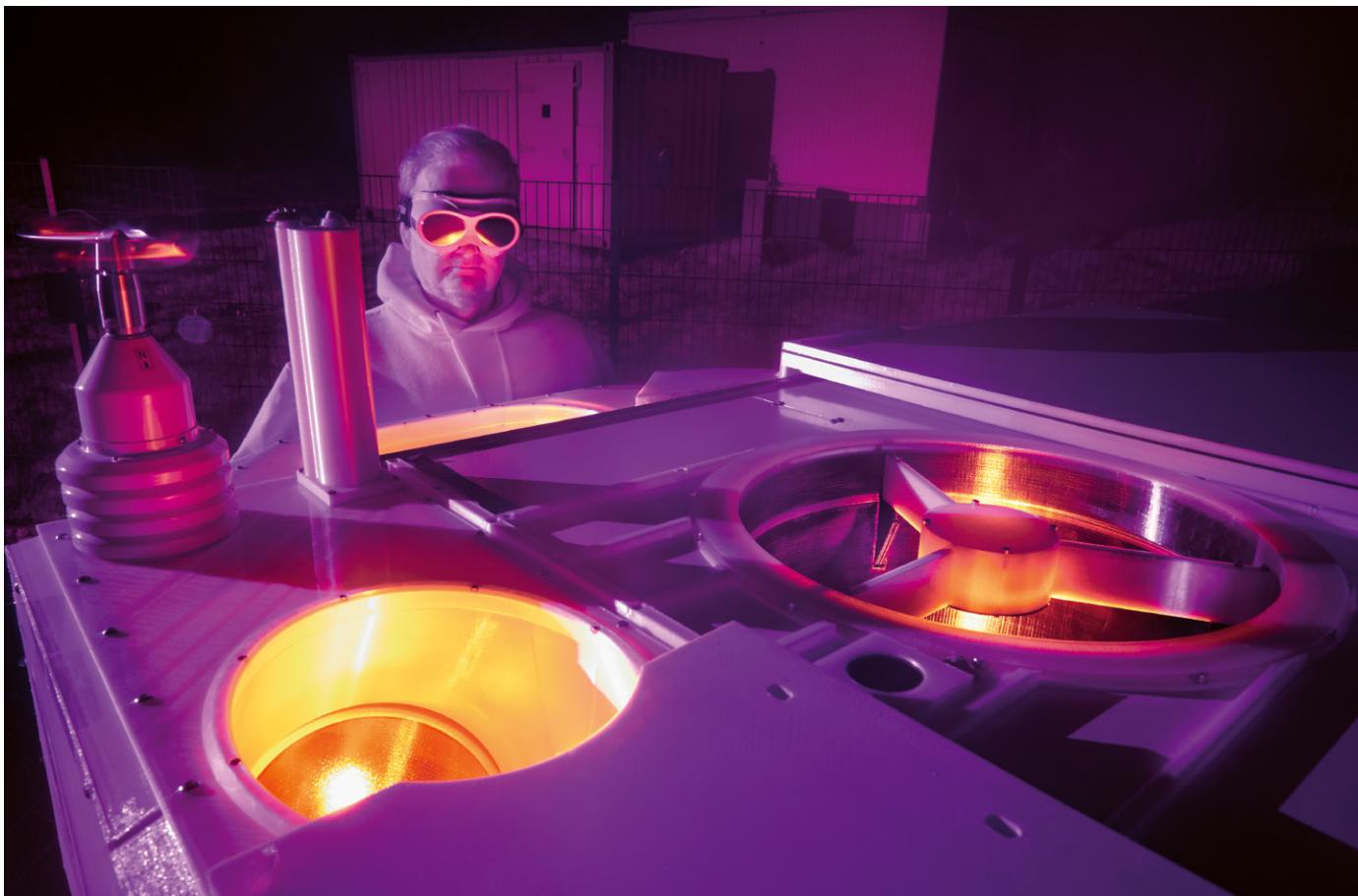
In order to make such ambitious long-term studies at two sites, we have invested significant effort to harmonize the measurements at both stations. This entails ensuring that hardware is upgraded at both sites and that the data is processed consistently using the same automated software. The direct advantage of this work is that we can produce consistent, high-quality data in near real-time from two independent instruments. As a result, we can produce impactful trend analyses and meaningfully contribute to our understanding of climate change.



Das ALOMAR RMR-Lidar in Betrieb vor der beeindruckenden Kulisse der norwegischen Insel Andøya mit Polarlichtern. The ALOMAR RMR lidar in operation in front of the impressive scenery of the Norwegian island Andøya and polar lights.



Das Kühlungsborner RMR-Lidar mit seinen drei Strahlen aus der Luft betrachtet. View from the sky on the Kühlungsborn RMR lidar with its three beams.



Ein neuartiges Lidar mit fünf Sichtfeldern im laufenden Betrieb. Die Fotografie wurde mit einem erweiterten Spektralbereich aufgenommen, da die Systeme im nahen Infrarotbereich arbeiten und für das bloße Auge unsichtbar sind. A novel lidar system with five fields of view in operation. The photo is made with an extended spectral range as the systems use an infrared wavelength that is invisible to the human eye. © Ralf Baumgarten / Fraunhofer ILT

## **ENTWICKLUNG VON LIDARARRAYS** DEVELOPMENT OF LIDAR ARRAYS

Um sowohl die horizontalen als auch die vertikalen Eigenschaften der Atmosphäre mittels Lidar-Messungen zu erfassen, haben wir am Institut ein Konzept und die Umsetzung eines Arrays identischer, kompakter, mobiler und dennoch leistungsfähiger Lidar-Instrumente entwickelt. Unsere Instrumente verwenden einen Ansatz, bei dem der Laser in schneller Folge in fünf verschiedene Richtungen gelenkt wird. Dabei messen wir Wind, Temperatur, Metalle und Aerosole entlang dieser Strahlen. Durch die Kombination von drei verschiedenen Verfahren in nur einem einzelnen System können wir den gesamten Bereich von der Troposphäre bis in die untere Thermosphäre abdecken, was normalerweise mehrere spezialisierte Instrumente erfordert würde. Unser skalierbares Netzwerk ermöglicht es uns, Untersuchungen räumlich ausgedehnter atmosphärischer Effekte durchzuführen, die aufgrund ihrer horizontalen oder vertikalen Ausdehnung nicht mit einzelnen Instrumenten erfasst werden können. Das IAP-Konzept wird derzeit in nationalen (LidarCUBE) und europäischen (EULIAA) Projekten mit industrieller Beteiligung auf Skalierbarkeit hin untersucht und erprobt.

To record both the horizontal and vertical properties of the atmosphere using lidar measurements, we developed a concept for an array and build identical, compact, mobile, and powerful lidar instruments at the institute. Our instruments use a method in which the laser is rapidly directed in five different directions. We use these beams to measure wind, temperature, metals, and aerosols. By combining three different techniques into a single system, we can cover the entire range from the troposphere to the lower thermosphere, which would normally necessitate multiple specialised instruments. Our scalable network enables us to investigate spatially extended atmospheric effects that single instruments cannot detect due to their horizontal or vertical extent. The IAP concept is currently being evaluated and tested for scalability in national (LidarCUBE) and European (EULIAA) projects involving industry.

## HÖHENFORSCHUNGSRAKETEN SOUNDING ROCKETS

Sensor und Elektronik des vormals neu entwickelten kompakten, flexiblen und hochauflösenden CONE-Instruments zur Messung von Elektronen und Neutralteilchen im Höhenbereich von 60 bis 110 km werden derzeit weiterentwickelt. Ziel ist es, künftig auch in Höhen von etwa 200 km, also in den sehr niedrigen Orbiten von zukünftigen Satelliten, in-situ messen zu können. Für atmosphärische Messungen auf Höhenforschungsraketen sind hierfür technische Lösungen erforderlich, die über die Möglichkeiten der Standardhochvakuumtechnik hinausgehen.

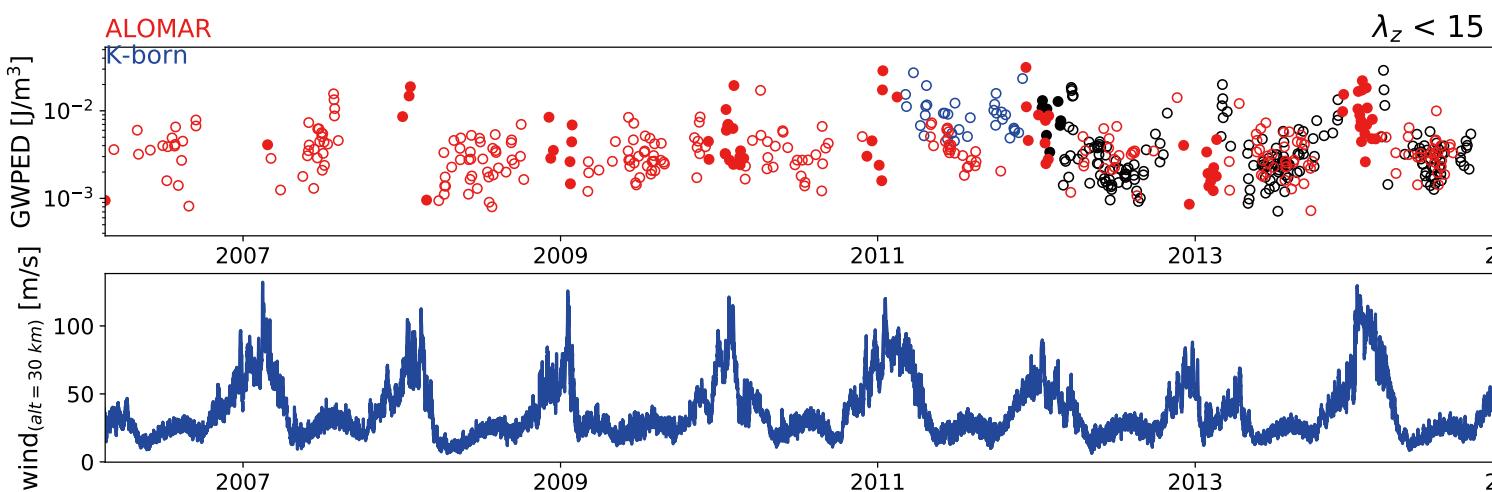
Building on the previous developments of a compact, flexible, and high-resolution combined ionization manometer and electron probe sensor for use at altitudes of 60 to 110 km, further enhancements to the sensor and electronics are currently underway. The goal is to enable in-situ measurements at altitudes of approximately 200 km, corresponding to very low orbits of satellites. For atmospheric measurements on sounding rockets, technical solutions are required that surpass the capabilities of standard high vacuum technology.



CONE-Sensor zur hochauflösten Messung von Neutralgas- und Elektronendichte und deren Schwankungen mit Höhenforschungsraketen.  
CONE sensor for high-resolution measurements of neutral gas and electron density and their fluctuations with sounding rockets.



Zwei Höhenforschungsraketen bereit zur Erforschung von polaren mesosphärischen Winterechos, die mit Radaren beobachtet werden.  
Two sounding rockets ready to investigate Polar Mesosphere Winter Echoes, observed by radar.



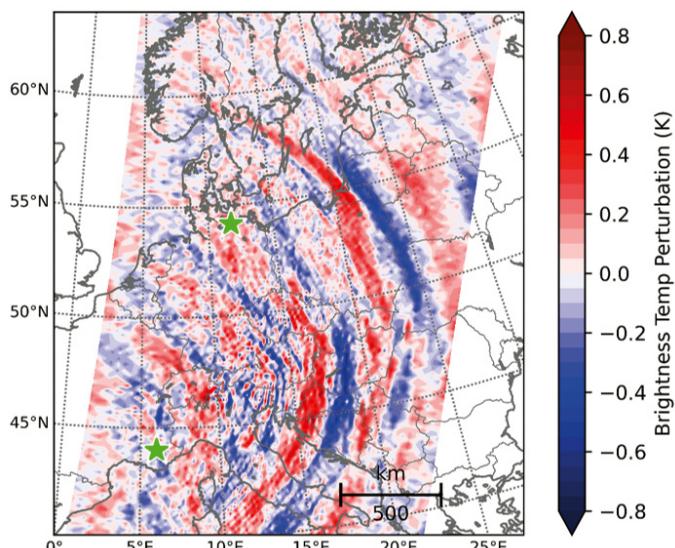
Langzeit-Datensatz der potentiellen Schwerewellenenergie und der Windgeschwindigkeit gemessen von unseren Lidaren in Kühlungsborn und ALOMAR.

# BEOBACHTUNGEN VON SCHWEREWELLEN

## GRAVITY WAVE OBSERVATIONS

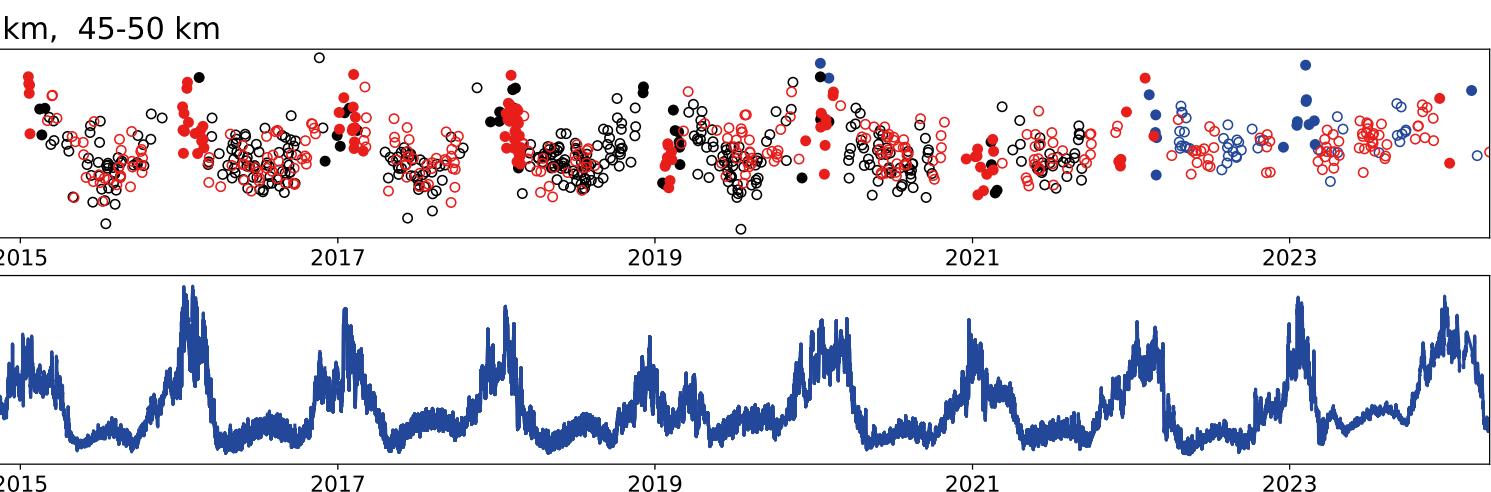
Schwerewellen sind ein sehr wichtiger Faktor für die globale atmosphärische Zirkulation. Sie ermöglichen den Transport von Energie und Impuls über große Entferungen durch die Atmosphäre. Mit unserem neuen Wind-Lidar in Kühlungsborn sowie unserem bestehenden Wind-Lidar an der ALOMAR-Forschungsstation machen wir Messungen von Temperaturen und Winden in einem Höhenbereich, der nur durch Lidartechnik zugänglich ist. Diese Messungen sind erforderlich, um die Schwerewellen in der Atmosphäre zu isolieren und zu rekonstruieren. Durch die Kombination unserer Lidar-Daten mit den Beobachtungen des AIRS-Satelliten haben wir neuartige Studien durchgeführt. Wir untersuchen, wie Schwerewellen, die über einem einzelnen Gewitter in Westeuropa entstehen, den gesamten Kontinent betreffen und in allen Höhen von der Troposphäre bis zur Thermosphäre zu sehen sind. Eine neue, homogene 18-jährige Zeitreihe der Energie von Schwerewellen über unseren beiden Lidar-Stationen wurde erstellt und erlaubt es uns nun, den Energietransport zu quantifizieren. Die Beobachtungsstudien helfen uns, die Natur dieses wichtigen Motors der atmosphärischen Zirkulation sowohl in Einzelfällen wie auch in seinem langfristigen Verhalten zu verstehen.

Gravity waves are a significant factor in global atmospheric circulation. They allow for the transport of energy and momentum across long distances in the atmosphere. With our new wind lidar in Kühlungsborn and our existing wind lidar at the ALOMAR research station, we can measure temperatures and winds at heights that are only accessible with lidar technology. These measurements are required to isolate and reconstruct gravity waves in the atmosphere. We conducted novel studies by combining our lidar data with AIRS satellite observations. We are looking into how gravity waves that form



Messung von großräumigen Temperaturvariationen durch Schwerewellen aufgrund eines Gewitters über Frankreich (mittels AIRS Satelliteninstrument). Die grünen Sterne markieren die Lidare in Kühlungsborn und bei unseren Partnern am OHP in Frankreich. Continent-scale gravity wave temperature perturbations from a thunderstorm in France measured by the AIRS satellite-instrument. Green stars indicate the location of the Kühlungsborn lidar and our partner lidar at OHP in France.

above a single thunderstorm in Western Europe affect the entire continent and can be seen at all levels, from the troposphere to the thermosphere. A new, homogeneous 18-year time series of gravity wave energy from our two lidar stations has been established, allowing us to quantify energy transport. Observational studies help us understand the nature of this important engine of atmospheric circulation, both in individual cases and over time.



Long-term time-series of gravity wave potential energy (top) and wind speed (bottom) measured by our lidars in Kühlungsborn and ALOMAR.

# HOCHAUFGELÖSTE TURBULENZMESSUNGEN

## HIGH RESOLUTION TURBULENCE OBSERVATIONS

Turbulenz ist ein entscheidender Mechanismus für den Energiehaushalt und die Durchmischung in der Atmosphäre. Sie ist eng mit sich brechenden atmosphärischen Wellen verbunden. Ein Maß für die Turbulenzstärke ist die sog. Energiedissipationsrate, die die Rate der in Wärme umgewandelten kinetischen Energie beschreibt. In-situ-Messungen mit Höhenforschungsraketen sind einzigartige Methoden für den direkten Zugang zur mittleren Atmosphäre auf den relevanten Skalen von bis zu wenigen Metern. Zur Turbulenzmessung werden die Schwankungen der Luftdichte spektral ausgewertet.

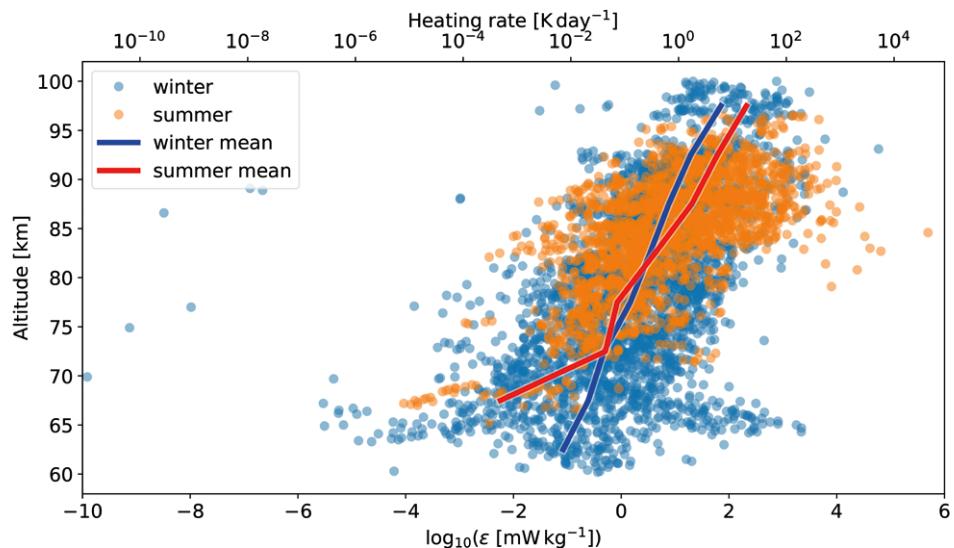
Turbulenzmessungen in der Mesosphäre und unteren Thermosphäre werden mit Hilfe von Höhenforschungsraketen durchgeführt. Gemeinsam mit Industriepartnern wurde das CONE-Instrument vor einigen Jahren weiterentwickelt und seitdem ständig an neue Forschungsgebiete angepasst. Seit 1990 wurden viele erfolgreiche Raketensondierungen mit regelmäßigen

Turbulenzmessungen durchgeführt. Damit ist die Sammlung von turbulenten Energiedissipationsraten oder Heizraten so umfangreich, dass eine aussagekräftige statistische Analyse durchgeführt werden kann.

Turbulence is a crucial mechanism for the energy budget and mixing in the atmosphere. It is strongly connected to breaking atmospheric waves. Turbulence is quantified by the energy dissipation rate, which describes the rate of kinetic energy transformed into heat. In-situ measurements by sounding rockets are a unique tool for directly accessing the middle atmosphere on the relevant scales of a few meters. Turbulence analysis utilizes fluctuations in air densities together with spectral data evaluation.

Sounding rockets are used for turbulence measurements in the mesosphere and lower thermosphere. Together with industrial partners, the CONE instrument has been redeveloped and is continuously improved to address new scientific questions. Since 1990, many successful rocket soundings with regular turbulence measurements have been carried out. Now, our collection of turbulent energy dissipation rates, or heating rates, is so extensive that a meaningful statistical analysis can be carried out.

Raketentragene Turbulenzmessungen mit dem CONE-Instrument. Die Punkte zeigen Schichten von 100 m Ausdehnung. Die Linien geben die mittlere turbulente Dissipationsrate an. Rocket-borne turbulence measurements with the CONE instrument. Points show layers of 100 m vertical extent. Lines show mean turbulent dissipation rates.



## LEUCHTENDE NACHTWOLKEN: INDIKATOREN FÜR DYNAMIK UND KLIMAWANDEL

### NOCTILUCENT CLOUDS: TRACERS OF DYNAMICS AND CLIMATE CHANGE

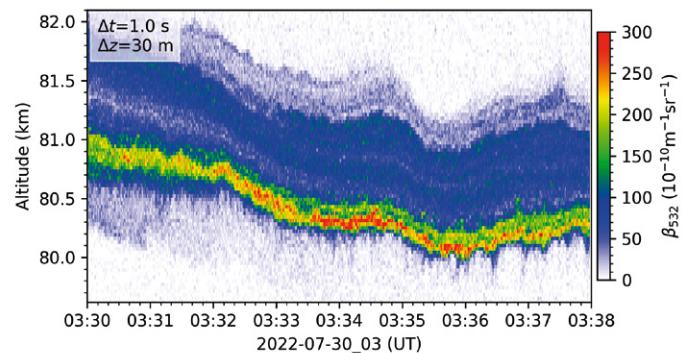
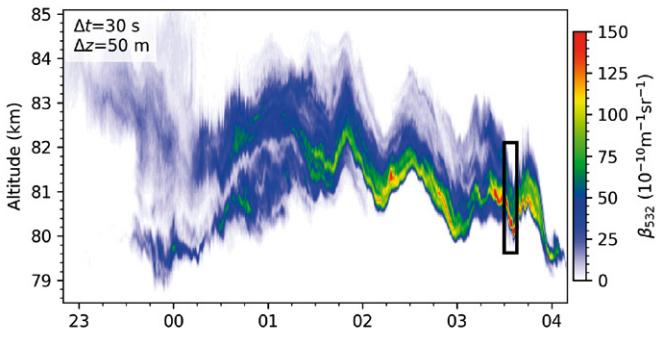
Leuchtende Nachtwolken ermöglichen einen einzigartigen Blick auf die Grenze zwischen Atmosphäre und Weltraum. Jahrzehnte Beobachtungen dieser Wolken erlauben uns, sie jetzt als Indikatoren für kleinräumige dynamische Prozesse, aber auch für langfristige Trends und Klimawandel zu verwenden. Lidare können diese Eisteilchen, die jeweils weniger als ein tausendstel Millimeter groß sind, mit sehr hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung nachweisen. Damit werden erstmals

kleinskalige Wellen und Turbulenz sichtbar, die für den Energie-transport in der Atmosphäre entscheidend sind, bisherigen Beobachtungen aber verborgen blieben. Durch die gleichzeitige Messung in mehreren Richtungen können auch vertikal-horizontale Strukturen untersucht werden, die bisher nicht sichtbar waren. Erste Untersuchungen zeigen unerwartete Unterschiede in der Struktur leuchtender Nachtwolken innerhalb weniger zehn Kilometer. Zudem "wandern" diese Strukturen teilweise nicht mit dem von IAP-Radaren gemessenen Wind, sondern ihm entgegen. Dies belegt den Einfluss von Schwerewellen auf die Morphologie leuchtender Nachtwolken.

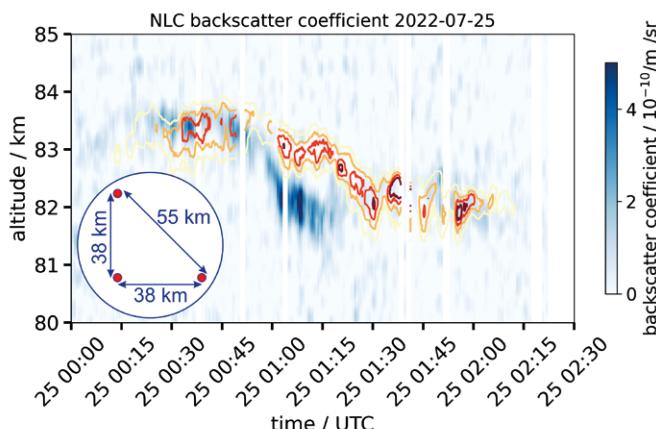
Noctilucent clouds provide a unique view on the boundary between the atmosphere and space. Years of observations of these clouds now allow us to use them as indicators for small-scale dynamic processes, but also for long-term trends

and climate change. Lidars detect these ice particles, each less than a thousandth of a millimeter in size, with very high temporal and spatial resolution. This makes small-scale waves and turbulence visible for the first time, which are crucial for energy transport in the atmosphere but have remained hidden from previous observations. Simultaneous measurement in several directions also makes it possible to obtain vertical/horizontal information that were not detectable

until now. Initial investigations show unexpected differences in the structure of noctilucent clouds within a few tens of kilometers. In addition, some of these structures do not 'move' with the mean wind as measured with IAP radars, but rather against it. This demonstrates the influence of gravity waves on the morphology of noctilucent clouds.



NLC-Beobachtungen mit dem ALOMAR RMR-Lidar. Die linke Abbildung zeigt die NLC mit weltweit einmaliger zeitlicher/räumlicher Auflösung über mehrere Stunden. In der rechten Detail-Abbildung sind noch höher aufgelöste Daten dargestellt und zeigen mehrere Schichten und Microbursts am Unterrand.  
NLC observations using the ALOMAR RMR lidar. The left image depicts the NLC with a unique temporal/spatial resolution spanning several hours. The detailed image on the right displays even higher resolution data, as well as several layers and microbursts visible near the bottom edge.



NLC-Beobachtung mit dem RMR-Lidar am IAP. Die NLC-Helligkeit im Zenit ist in blau und nördlich in orange/rot dargestellt. Die NLC zeigt deutliche Unterschiede zwischen diesen beiden ca. 38 km entfernten Messpunkten und auch zum östlichen Beobachtungspunkt (hier nicht dargestellt).  
NLC observation in the vicinity of IAP. The blue color shows the NLC in zenith, orange/red to the north. The NLC shows strong differences at both sites and also compared to the east-site (not shown here).

## AUSGEWÄHLTE PUBLIKATIONEN SELECTED PUBLICATIONS

J. Faber, M. Gerding und T. Köpnick, Acquiring high-resolution wind measurements by modifying radiosonde sounding procedures, *Atmos. Meas. Tech.*, 16, 4183-4193, doi:10.5194/amt-16-4183-2023, 2023.

J. Froh, J. Höffner, A. Mauer, T. H. Mense, R. Eixmann, F.-J. Lübken, A. Munk, M. Strotkamp und B. Jungbluth, Aerosol measurements in the tropo- and stratosphere by spectral splitting of Rayleigh and Mie signals within a compact lidar of 1m³, *SPIE*, 12265, doi:10.1117/12.2636289, 2022.

S. Khaykin, A. Podglajen, F. Ploeger, R. Wing, G. Baumgarten, M. Gerding et al., Global perturbation of stratospheric water and aerosol burden by Hunga eruption, *Commun Earth Environ*, OA, doi:10.1038/s43247-022-00652-x, 2022.

F.-J. Lübken, Physics in the mesosphere/lower thermosphere: A personal perspective, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, OA, doi:10.3389/fspas.2022.1000766, 2022.

B. Strelnikov, M. Rapp, D. C. Fritts und L. Wang, Assessment of the precision of spectral model turbulence analysis techniques using direct numerical simulation data, *J. Geophys. Res., OA*, doi:10.1029/2021JD035516, 2022.

S. L. Vadas, E. Becker, K. Bossert, G. Baumgarten, L. Hoffmann und V. L. Harvey, Secondary Gravity Waves From the Stratospheric Polar Vortex Over ALOMAR Observatory on 12-14 January 2016: Observations and Modeling, *J. Geophys. Res.*, 128, e2022JD036985, doi:10.1029/2022JD036985, 2023.

A. Vellalassery, G. Baumgarten, M. Grygalashvily und F.-J. Lübken, Greenhouse gas effects on the solar cycle response of water vapour and noctilucent clouds, *Ann. Geophys.*, 41, 289-300, doi:10.5194/angeo-41-289-2023, 2023.

# RADARSONDIERUNGEN

## RADAR REMOTE SENSING



**Wir tragen zu den Themen des IAP bei, indem wir modernste bodengestützte aktive und passive Radartechnologien einsetzen, die unter allen Wetterbedingungen funktionieren. Der Schwerpunkt liegt auf der Untersuchung der MLT-Dynamik auf verschiedenen Skalen und ihrer Kopplung mit anderen atmosphärischen Regionen, indem wir zeitliche und räumliche Mehrdeutigkeiten der atmosphärischen und ionosphärischen Parameter auflösen. Hierzu nutzen wir verschiedene Radare und Radarnetzwerke in Deutschland, Nordnorwegen, Südamerika und Anlagen in Äquatornähe.**

We contribute to IAP's topics by employing state-of-the-art ground-based radar and radio techniques that work under all weather conditions. Our focus is on studies of MLT dynamics at different scales and their coupling to other atmospheric regions, by resolving temporal and spatial ambiguities of atmospheric and ionospheric parameters. For this purpose we use various radars and radar networks in Germany, Northern Norway, South America and facilities near the equator.

## TEAM

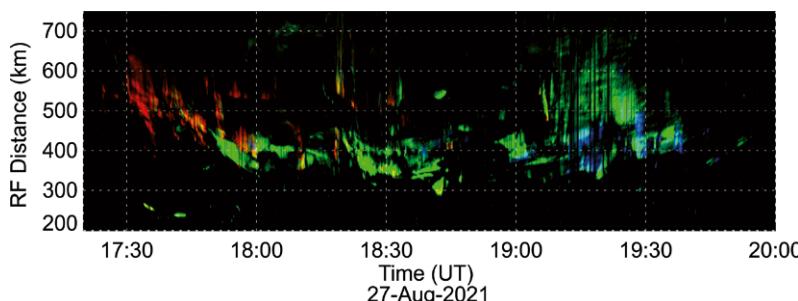
Thomas Barth, Matthias Clahsen, Jorge Chau, Harikrishnan Charuvil Asokan, Federico Conte, Fabio Feraco, Priyanka Ghosh, Jennifer Hartisch, Maosheng He, Juliana Jaen, Sivakandan Mani, Jens Mielich, Ralph Latteck, Nico Pfeffer, Facundo Poblet, Kesava Ramachandran, Toralf Renkwitz, Robert Schattschneider, Jose Suclupe, Miguel Urco, Jens Wedrich, Marius Zecha

## PLASMA-NEUTRAL-WECHSELWIRKUNGEN PLASMA-NEUTRAL COUPLING

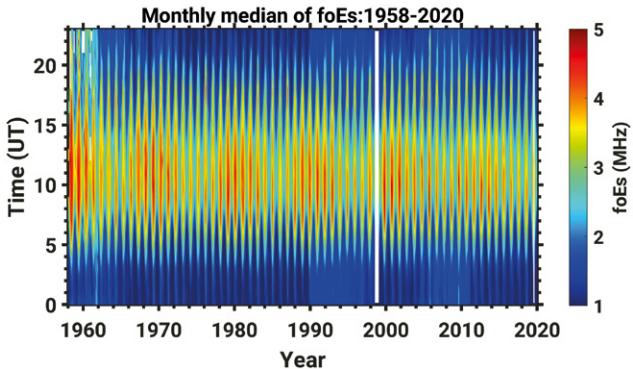
Radar-Aurora ist ein Phänomen, das in Struktur und Eigenschaften ebenso vielfältig ist wie die optische Aurora, auch bekannt als Nordlicht. Radarsignale werden an Plasmadichte-fluktuationen in Höhen von etwa 110 km gestreut, die durch erhöhte elektrische Felder, Plasmadichten und Turbulenz in der Ionosphäre entstehen. Durch die Implementierung eines zusätzlichen Signalverarbeitungsalgorithmus in das SIMONe-Radarnetz, ist es nun möglich, sowohl die Radar-Aurora als auch die von den Meteorospuren abgeleiteten neutralen Winde gleichzeitig zu erfassen. Zu den Zielen dieser Arbeit gehören das Verständnis der Kopplung zwischen neutraler Atmosphäre und Plasmaturbulenz, die Untersuchung des Einflusses magnetosphärischer Prozesse auf die MLT-Region und die Ableitung ionosphärischer elektrischer Felder aus den Streuungen, die für Berechnungen der atmosphärischen Erwärmung verwendet werden können.

Für 56 Jahre kontinuierlicher Iono-sondenbeobachtungen wurden Trends mittels Analyse der kleinsten Quadrate auf die Residuen abgeleitet, wobei das Modell von den Beobachtungen abgezogen wird. In der E-Region nimmt die kritische Frequenz der sporadischen E-Schichten mit -2 kHz/Jahr ab. In der F-Region zeigen die maximale Plasmafrequenz ( $foF2$ ) und die Höhen ( $hmF2$ ) einen abnehmenden Trend. Außerdem ist der Trend bei  $hmF2$  nachts etwas höher als tagsüber. Für die Jahre 1964 – 1996 bzw. 1997 – 2019 wurden jeweils gegensätzliche Trends für  $foF2$  gefunden, für den ersten Zeitraum war dieser negativ. Die obere Atmosphäre schrumpft aufgrund der Abkühlung in der mittleren Atmosphäre. Die aktuelle Untersuchung deutet darauf hin, dass der kühlende Treibhauseffekt und der negative Trend des atomaren Sauerstoffs ( $O$ ) sowie die Windscherungsvariabilität die Hauptursachen für die beobachteten negativen Trends bei  $hmF2$ ,  $foF2$  bzw.  $foE$  sein könnten.

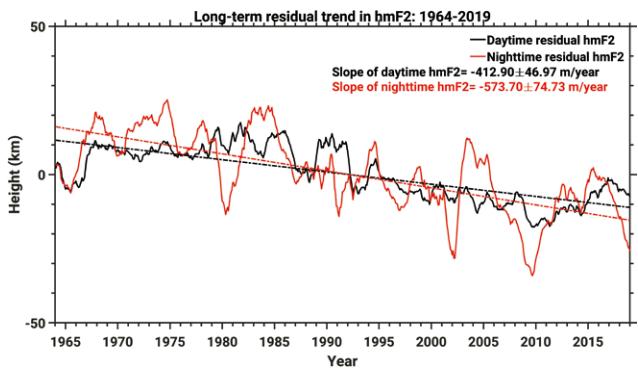
Kürzlich wurde eine verbesserte Methode zur Messung der Elektronendichte in der D-Region für das nordnorwegische Saura-Radar eingesetzt. Dabei werden fortschrittliche Signalverarbeitungsmethoden, die Unterdrückung von Ausreißern und



Aurora-Beobachtungen mit dem SIMONe Radarnetzwerk in Norwegen, die Dopplerverschiebung ist farblich markiert.  
Observations of radar aurora with the SIMONe network in Norway, the observed Doppler shift is color coded.



Variation der kritischen Frequenz sporadischer E-Schichten (Es) über Juliusruh für den Zeitraum 1958– 2020. Diurnal, seasonal and inter-annual variation of foEs over Juliusruh during the period of 1958 – 2020.



Residuen von Tages- und Nacht-hmF2 und Trends von 1958 – 2020.  
The residual value of day and nighttime hmF2 and its residual trends from 1958 – 2020.

Richtungen außerhalb des nominalen Beobachtungsvolumens angewandt. Die Detektion von erhöhter Strahlung und Teilchen-niederschlag sowie das semi-empirische FIRI-Modell (Faraday IRI) werden verwendet, um unrealistische Werte auszuschließen.

Auf diese Weise haben wir eine Klimatologie für solar und geomagnetisch ruhige sowie für gestörte Zeiträume für insgesamt neun aufeinanderfolgende Jahre abgeleitet. Wir fanden eine Asymmetrie der Frühjahrs- und Herbstbedingungen, die in Modellen nicht dargestellt wird, sowie eine plötzliche Reduktion im Oktober. Wir bringen beides mit Veränderungen in der Winddynamik und Zirkulation in Verbindung, insbesondere mit dem unterschiedlichen Zeitpunkt der Herbstwindumkehr in hohen und mittleren Breiten.

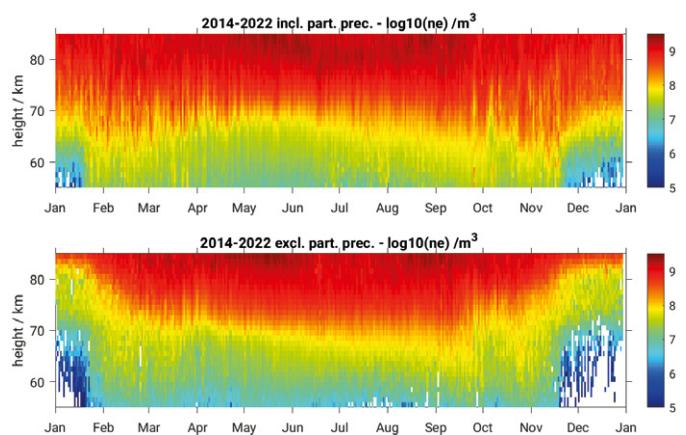
The radar aurora is a phenomenon that is as diverse in structure and characteristics as the optical aurora, also known as the northern lights. Radar signals scatter from plasma density turbulence at altitudes of approximately 110 km generated due to elevated ionospheric electric fields and plasma densities. Through the implementation of an additional signal processing algorithm to the SIMONe radar network, it is now possible to monitor both the radar aurora and meteor

trail derived neutral winds simultaneously. Goals of this work include understanding the neutral atmosphere-plasma turbulence coupling, investigating the imprint of magnetospheric processes on the MLT region, and deriving ionospheric electric fields from the scatter that can be used in atmospheric heating calculations.

Using 56 years of continuous ionosonde observations, the trend calculation is derived by applying a least-squares fit analysis to the residuals, subtracting the model from the observation. In the E-region, the critical frequency of sporadic E layers decreases in the order of -2 kHz/yr. In the F-region, the peak plasma frequency (foF2) and peak altitude (hmF2) are showing the decreasing trends. Furthermore, in hmF2 the nighttime trend is slightly higher than during daytime. The Piecewise linear trend of foF2 provides negative and positive trends in 1964 – 1996 and 1997 – 2019, respectively. The upper atmosphere is shrinking due to the cooling in the middle atmosphere. The present investigation suggests that the greenhouse cooling effect and negative trend in the atomic oxygen (O) as well as wind shear variability could be the main drivers for the observed negative trends in the hmF2, foF2, and foEs, respectively.

Recently, an improved method for measuring the D region electron density was employed to the Saura radar in Northern Norway. Advanced signal processing methods, rejection of outliers and directions off the nominal observational volume are applied. Detections of enhanced radiation and particle precipitation and the semi-empirical FIRI (Faraday IRI) model are used to exclude unrealistic estimates.

This data provides a climatology for solar and geomagnetic quiet and disturbed periods for a total of nine consecutive years. We found an asymmetry of spring and autumn conditions, which is not represented in models as well as a sudden decrease in October. We relate both to changes in the wind dynamics and circulation, specifically the different timing of the autumn wind reversal at high and mid latitude.



Klimatologie der Elektronendichten der Mesosphäre mit (oben) und ohne (unten) Eintrag hochenergetischer Teilchen über Nordnorwegen. Climatology of mesospheric electron densities with (upper image) and without (lower image) energetic particle precipitation over Northern Norway.

# KOPPLUNG DER ATMOSPHÄRENSCHICHTEN

## ATMOSPHERIC COUPLING

Der Ausbruch des Hunga-Vulkans am 15. Januar 2022 erzeugte Störungen in der Atmosphäre bis hin zur Thermosphäre/Ionosphäre und bot eine unschätzbare Gelegenheit, die Kopplung zwischen atmosphärischen Schichten als Reaktion auf explosive Ereignisse mit globaler Reichweite zu untersuchen.

Zwei SIMONE-Radarsysteme des IAP in Südamerika entdeckten ein eindeutiges Signal im Zusammenhang mit der Eruption, das sich in Form von Windfluktuationen zwischen 80 und 100 km Höhe zeigte. Die Entwicklung der Winde über die Zeit und in der Höhe zeigte weitere Merkmale des Signals. Insbesondere wies es eine hohe Kohärenz in der Höhe auf und dauerte einige Stunden an. Die Fluktuationen überstiegen das Dreifache der normalen Variabilität der Windschwankungen. Um die physikalischen Mechanismen hinter dieser extremen Windvariabilität zu verstehen, wurden Vergleiche mit Modellsimulationen mittels WACCM-X durchgeführt. Die Schlussfolgerung war, dass bestimmte gemessene Parameter des Signals mit einem bestimmten, im Modell simulierten Wellentyp übereinstimmten.

(a) Karte der Meteorbeobachtungen in Peru und Chile am 15./16. Januar 2022. (b) Höhengemittelte zonale (links) und meridionale (rechts) Windresiduen von drei Radarsystemen in Südamerika.

(a) Map of meteor detections in Peru and Chile on January 15–16, 2022. (b) Height-averaged zonal (left) and meridional (right) residual winds from three radar systems in South America.

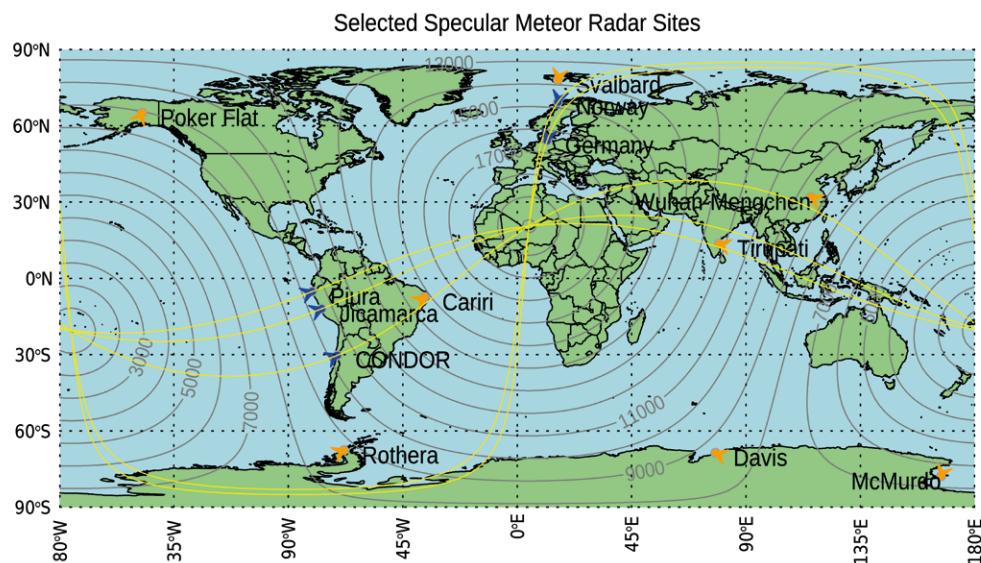
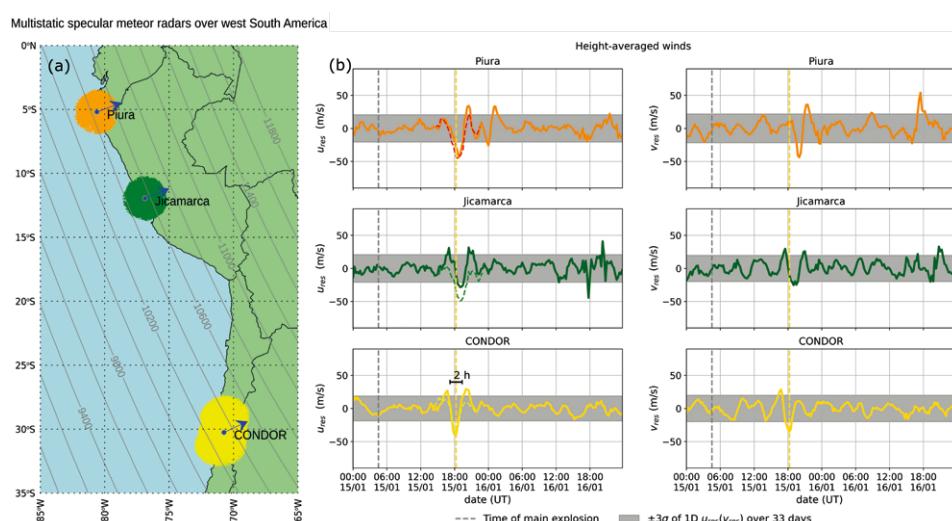
Karte ausgewählter Meteorradarstandorte: monostatisch (orange-farbene Pfeile) und multistatisch (blaue Pfeile). Gelbe Linien zeigen die Ausbreitung über Großkreise für multistatische Standorte, und graue Linien markieren die Entfernung in Kilometern zum Epizentrum der Hunga-Eruption von 2022.

Map of selected meteor radar sites: monostatic (orange arrows) and multistatic (blue arrows). Yellow lines show propagation over great circles for multistatic sites, and gray lines mark distances in kilometers to the 2022 Hunga eruption epicenter.

Um die räumliche Ausdehnung der Windvariabilität als Folge der Eruption zu bestimmen, wurden zwei weitere SIMONE-Radarsysteme in Nordeuropa in die Analyse einbezogen. Die Ergebnisse zeigten, dass sich das Signal in Richtung Osten und Westen unterschiedlich ausbreitete. Die Merkmale der sich nach Osten ausbreitenden Störungen stimmten mit denen des von den südamerikanischen Systemen erfassten Signals überein.

Darüber hinaus wurde eine umfassende Untersuchung der ionosphärischen Signaturen dieses Ereignisses im europäischen Sektor mit verschiedenen Instrumenten durchgeführt. Es wurde nachgewiesen, dass das Ereignis zu wandernden ionosphärischen Störungen führte, die durch Wellen verschiedener Art verursacht wurden. Dies unterstreicht die Bedeutung des Einsatzes mehrerer unabhängiger Instrumente bei derartigen Beobachtungen, um sicherzustellen, dass signifikante Effekte nicht übersehen werden.

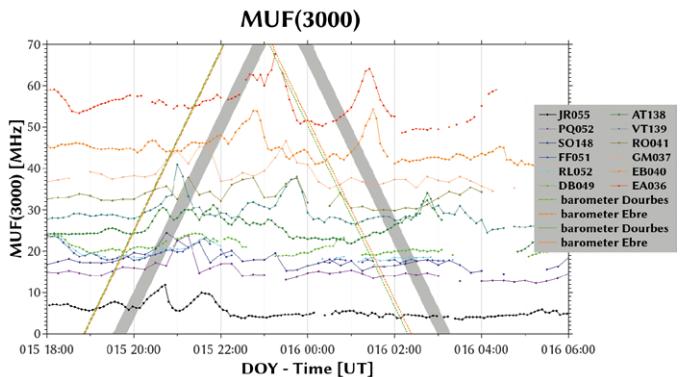
The eruption of the Hunga volcano on 15 January 2022 disrupted the entire atmospheric column up to the thermosphere/ionosphere, offering an invaluable opportunity to study the coupling between atmospheric layers as a response to explosive events with global reach.



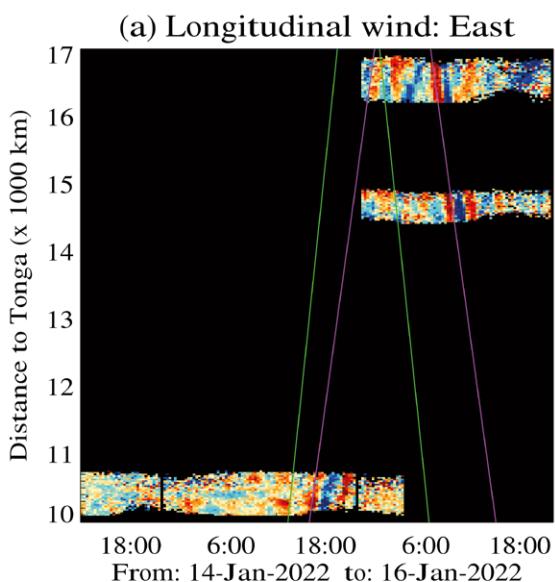
Two IAP SIMONE radar systems located in South America detected an unambiguous signal related to the eruption, manifesting as wind fluctuations between 80 and 100 km altitude. The evolution of the winds over time and altitude revealed further characteristics of the signal. Specifically, it exhibited high coherence in height and lasted for a couple of hours. The amplitude of the fluctuations exceeded three times the regular variability of wind fluctuations. In an effort to understand the physical mechanisms behind this extreme wind variability, we conducted a comparison with model simulations from WACCM-X. The conclusions drawn were that certain measured parameters from the signal aligned with a specific type of wave simulated by the model.

To determine the spatial scope of the wind variability as a result of the eruption, we incorporated two additional SIMONE radar systems into the analysis, located in Northern Europe. The results indicated that the signal propagated differently towards the East and West. The characteristics of the Eastward propagating perturbations were consistent with those of the signal detected by the South American systems.

In addition, an exhaustive examination of ionospheric signatures of this event was conducted over the European sector utilizing various instruments. It was demonstrated that the event led to the presence of traveling ionospheric disturbances caused by waves of various types. This highlights the importance of using multiple independent instruments in observations to ensure that significant effects are not overlooked.



Manuell analysierte kritische Frequenz, Höhe und MUF(3000) für europäische Ionomonden während des Hunga-Ausbruchs 2022. Grüne und orangefarbene Linien zeigen die Ankunftszeiten der troposphärischen akustischen Welle in verschiedenen Entfernung, basierend auf Barometerdaten von Dourbes und Ebre. Die gestrichelten Linien stellen die kürzesten Großkreis-Pfade dar, die gepunkteten Linien die längeren Pfade. Manually scaled critical frequency, height and MUF(3000) for European ionosondes during the 2022 Hunga eruption. Green and orange lines show arrival times of the tropospheric acoustic wave at various distances, based on barometer data from Dourbes and Ebre. Dashed lines represent the shortest great-circle paths, dotted lines the longer paths.

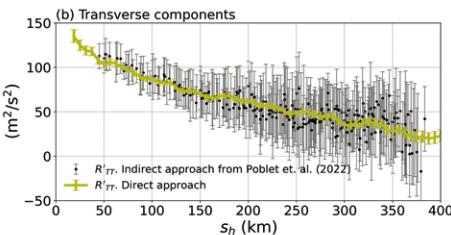
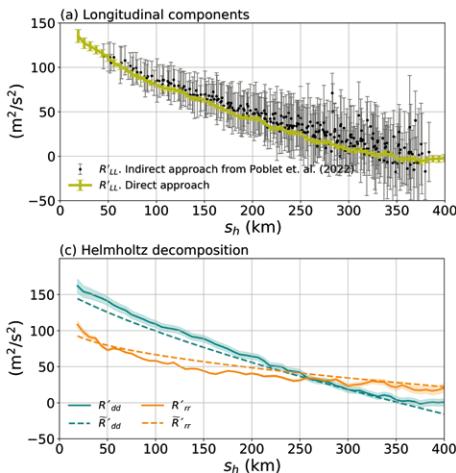


Ostwärtige Ausbreitung der Fluktuationen in den horizontalen Winden nach dem Hunga-Ausbruchs von 2022, wie sie von Meteoraadaren in Südamerika und Europa erfasst wurden. Eastward propagation of longitudinal horizontal wind fluctuations from the 2022 Hunga's eruption as detected by specular meteor radars in South America and Europe.

## MESOSKALIGE DYNAMIK MESOSCALE DYNAMICS

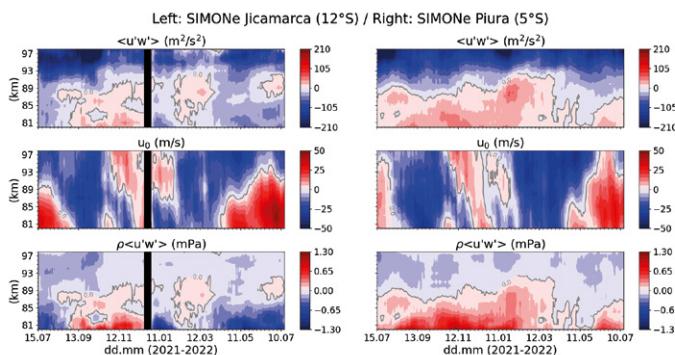
Die mesoskalige Dynamik bezieht sich auf Veränderungen über horizontale Skalen von einigen hundert Kilometern, die durch Schwerewellen (GWs) und geschichtete Turbulenz angetrieben werden. Welche der beiden letzteren dominiert, lässt sich durch einen Vergleich der longitudinalen und transversalen Korrelationsfunktionen der Doppler-Verschiebungen feststellen, die von multistatischen Meteoraadaren wie SIMONE gemessen werden. In einer aktuellen Studie wurden diese Korrelationsfunktionen anhand der von SIMONE Deutschland gesammelten Daten bestimmt und zeigte, dass Schwerewellen und geschichtete Turbulenz eine gleichwertige Rolle für die Mesosphäre und untere Thermosphäre spielen. Ergebnisse zu horizontalen Windresiduen für SIMONE Argentinien und Modellsimulationen zeigen, dass Schwerewellen und geschichtete Turbulenz in ähnlicher Weise zum mesoskaligen Energiehaushalt in der südlichen Hemisphäre in der Sommermesopause beitragen.

Untersuchungen der vertikalen Flüsse des zonalen Impulses, die aus den Messungen von SIMONE Jicamarca (12°S) und Piura (5°S) abgeschätzt wurden, zeigten, dass die westwärts gerichteten Jets der zonalen MLT-Hintergrundwinde in niedrigen Breiten Südamerikas teilweise auf Impulsdeposition durch nichtlineare anisotrope Schwerewellen zurückzuführen sind und sich in die gleiche Richtung wie der mittlere zonale Wind ausbreiten. Außerdem konnte für die Gradienten der horizontalen Winde festgestellt werden, dass diese Schwerewellen unterschiedlichen Ursprungs sind und die mesoskalige Dynamik über Entfernnungen von weniger als 1000 km entlang der Anden erheblich variiert.

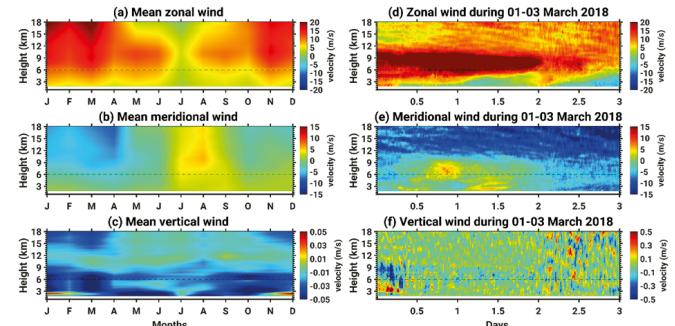


In den oberen Bildern werden zwei Methoden zur Schätzung der longitudinalen (links) und transversalen (rechts) horizontalen Windkorrelation mit Hilfe des Meteordrads in Deutschland verglichen. Die direkte Methode (oliv) weist eine geringere Variabilität auf als die indirekte Methode (schwarz). Das untere Feld zeigt die Helmholtz-Zerlegung des horizontalen Windes in divergente (cyan) und rotierende (orange) Komponenten.

The top panels compare two methods for estimating longitudinal (left) and transverse (right) horizontal wind correlation using meteor radar in Germany. The direct method (olive) has lower variability than the indirect method (black). The bottom panel shows the Helmholtz decomposition of horizontal wind into divergent (cyan) and rotational (orange) components.



Von oben nach unten: monatliche Werte der dritten Komponente des Spannungstensors, des mittleren zonalen Windes und des vertikalen Flusses des zonalen Impulses in Jicamarca (links) bzw. Piura (rechts). From top to bottom, monthly values of the third component of the stress tensor, the mean zonal wind, and the vertical flux of zonal momentum, respectively, at (left) Jicamarca and (right) Piura. Data gaps are shown in black. (Conte et al. 2023).



(a-c) Klimatologie und (d-f) 3 Tage Winde in der Troposphäre/untere Stratosphäre über Nordnorwegen. (a-c) Climatology and (d-f) 3 days of winds in the Troposphere/Lower Stratosphere over Northern Norway (Ghosh et al., GRL, 2023)

In der polaren Troposphäre der Nordhemisphäre deuten die Höhenprofile des Impulsflusses darauf hin, dass die Schwerewellenaktivität im Sommer weniger intermittierend ist. Andererseits wird die maximale Variabilität des Impulsflusses und des vertikalen Windes während des Winters um die Tropopause herum beobachtet.

Mesoscale dynamics refer to changes occurring within horizontal scales of a few hundred kilometres that are driven by gravity waves (GWs) and stratified turbulence. A way to determine which of the latter two dominates is by comparing the longitudinal and transverse correlation functions of the Doppler shifts measured by multi-static specular meteor radars like SIMONe. A recent study explored these correlation functions using data gathered by SIMONe Germany, revealing that GWs and stratified turbulence play equivalent roles in shaping the mesosphere and lower thermosphere (MLT) at mesoscales during both winter and summer seasons. Results on horizontal wind residuals from SIMONe Argentina data and model simulations indicate that GWs and stratified turbulence

contribute similarly to the mesoscale energy budget in the southern hemisphere's summer mesopause region.

Studies of vertical fluxes of zonal momentum estimated from SIMONe Jicamarca ( $12^{\circ}$ S) and SIMONe Piura ( $5^{\circ}$ S) measurements revealed that the westward jets observed in the MLT zonal background winds over low latitudes in South America are partly due to momentum deposition by non-linear anisotropic gravity waves that propagate in the same direction as the zonal mean wind. Besides, the exploration of the gradients of the horizontal winds helped to identify that these gravity waves are of different origins, meaning that mesoscale dynamics vary considerably over distances of less than 1000 km along the Andes.

At lower altitudes, but in northern hemisphere's polar region, height profiles of the momentum flux indicate that the GW activity is less intermittent during the summer. On the other hand, the maximum variability of the momentum flux and the vertical wind is observed during the winter around the tropopause.

# INSTABILITÄTEN IN DER MESOSPÄHRE

## MESOSPHERIC INSTABILITIES

Mesosphärische Instabilitäten umfassen kleinräumige dynamische Veränderungen und Störungen in der Atmosphärenschicht, die sich etwa 50 bis 85 Kilometer über der Erdoberfläche befindet. Diese empfindliche Region reagiert dramatisch auf die Sonneneinstrahlung und atmosphärische Bedingungen und zeigt Phänomene wie Bores (engl., vgl. hydraulischer Sprung), Kelvin-Helmholtz-Instabilitäten (KHI) und andere Strukturen im Kilometermaßstab, die für den Transport und Deposition von Energie und Impuls in der Atmosphäre entscheidend sind. Um diese komplexen Muster und Prozesse erfassen und untersuchen zu können, werden häufig Tracer wie Airglow und polare mesosphärische Sommerechos (PMSE) genutzt.

Mit MAARSY konnten varikose Ereignisse – gleichzeitige Aufwärts- und Abwärtsbewegungen der Luft – in PMSE beobachtet werden. Hierbei sind gelegentlich außerordentlich hohe vertikale Windgeschwindigkeiten vorzufinden, die manchmal das Dreifache der Standardabweichung in dieser Region überschreiten. Dieses unerwartete Verhalten, das zunächst bei einem ausgeprägten Ereignis im Jahr 2016 festgestellt wurde, motivierte zur weiteren Suche und Auffinden solcher Ereignisse während mehrerer PMSE-Saisons, insbesondere im Juni und Juli, wenn auch nicht immer mit extremen vertikalen Geschwindigkeiten. Diese Studien zeigten, dass varikose Ereignisse zu erheblichen vertikalen Ausdehnungen der PMSE-Schicht führen und oft nur wenige Minuten andauern. In ihrem Erscheinungsbild ähneln diese Ereignisse optisch undulären mesosphärischen Bores oder Soliton-Wellenpakete. Obwohl diese Phänomene bekannt sind, hängt die Beobachtung ihrer Entstehung oder Auflösung in der Regel von eher zufälligen Beobachtungen ab. In einem glücklichen Fall wurde die Dissipation einer solchen Struktur im März 2021 von einem Airglow-Imager in Kühlingsborn dokumentiert.

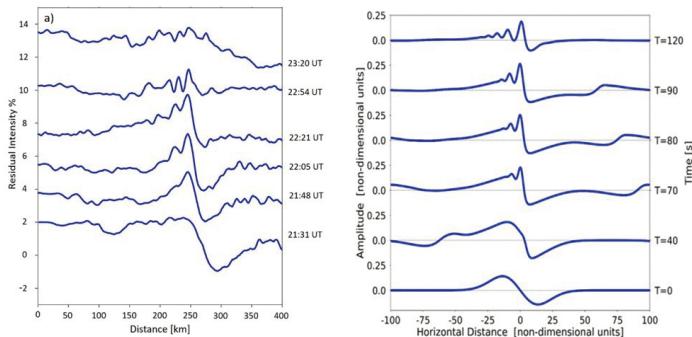
Die Fortbewegung der Struktur am Nachthimmel beeinflusste die umgebenden Airglow-Muster deutlich, was auf Veränderungen der atmosphärischen Dichte und Temperatur hinweist. Ergänzende Simulationen mit zweidimensionalen Direkten Numerischen Simulationen (DNS) der Navier-Stokes-Gleichungen mittels Boussinesq-Näherung konnten die physikalischen Eigenschaften der beobachteten Strukturen nachbilden. Diese Simulationen unterstreichen die entscheidende Rolle von Temperaturinversionen und Windscherung für die Untersuchung der Eigenschaften dieser Strukturen und ihrer Dissipation. Zusammen bestätigen Beobachtungen und Simulationen die komplexen Wechselwirkungen zwischen atmosphärischen Wellen und der mesosphärischen Umgebung und erlauben weitere Einblicke in die Mechanismen die diese ungewöhnlichen atmosphärischen Phänomene antreiben.

Mesospheric instabilities encompass small-scale dynamic changes and disturbances in the Earth's atmospheric layer situated approximately 50 to 85 kilometers above the ground. This sensitive region responds dramatically to both solar radiation and atmospheric conditions, displaying phenomena like bores, Kelvin-Helmholtz instabilities (KHI), and other kilometer-scale structures vital for the transport and deposition

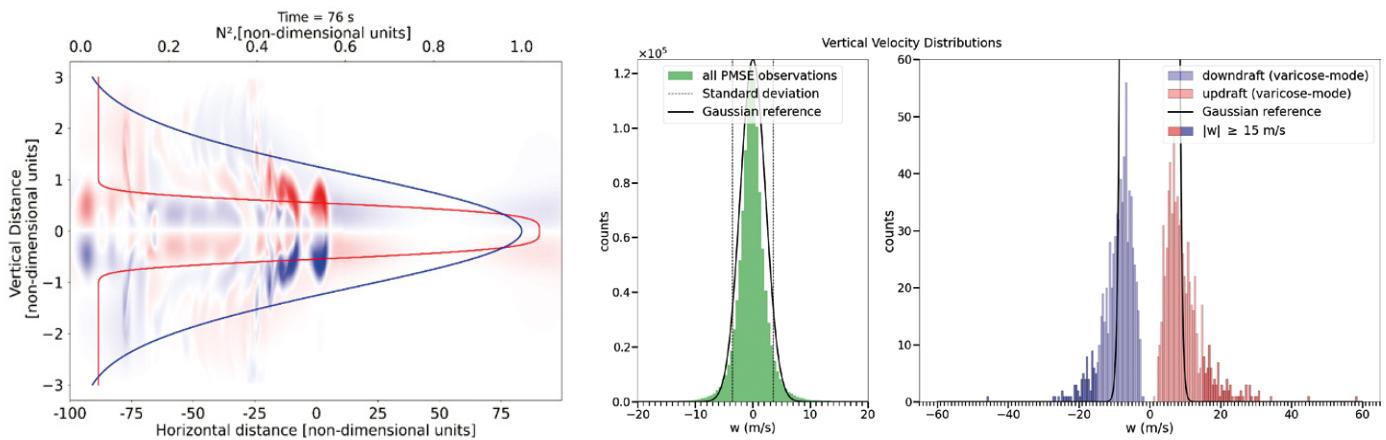
of energy and momentum across the atmosphere. To study and map these intricate patterns, scientists frequently employ tracers such as airglow and polar mesospheric summer echoes (PMSE), which display the processes occurring within this elusive layer.

Recent focus has been on varicose-mode events observed with MAARSY, where specific areas in the mesosphere exhibit simultaneous upward and downward movements of air. These events are particularly notable for their occasionally extraordinarily high vertical wind velocities, sometimes exceeding three times the standard deviation of the vertical wind velocities in this region. This intriguing behavior, initially identified in a significant event in 2016, prompted further examination of older data sets, revealing a frequent occurrence of such events during several PMSE seasons, especially in June and July, even though not always with extreme vertical velocities. These studies showed that varicose-mode events not only lead to substantial vertical expansions of the PMSE layer but also last only a few minutes. In their appearance, varicose-mode events visually resemble undular mesospheric bores or solitary waves. Although these phenomena are known to researchers, witnessing their formation or dissipation typically relies on timely and serendipitous observations.

In a fortunate instance, the dissipation of such a bore was documented in March 2021 by an airglow imager in Kühlingsborn. The bore's progression across the night sky markedly influenced the surrounding airglow patterns, signaling changes in atmospheric density and temperature. Complementary simulations using two-dimensional Direct Numerical Simulations (DNS) of the Navier-Stokes equations under the Boussinesq approximation successfully replicated the physical features of the observed bore. These simulations underscored the critical roles of temperature inversions and wind shear in defining the bore's characteristics and its eventual dissipation. Together, these observational and simulation efforts confirm the complex interactions between atmospheric waves and the mesospheric environment, offering deeper insights into the mechanisms driving these fascinating atmospheric phenomena.

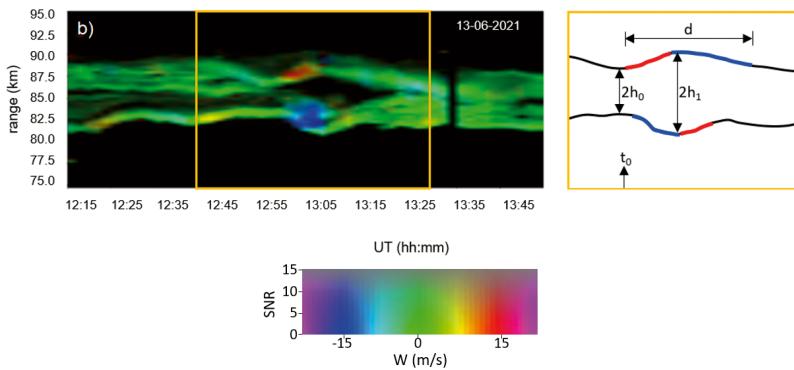


(a) räumlich-zeitliche Entwicklung der undularen Bore in O(1S)-Airglow, (b) DNS-Reproduktion der undularen Bore-Entwicklung in einem Kanal und konstantem Hintergrundwind Spatiotemporal evolution of undular bore in O(1S) airglow emission, (b) DNS reproduction of the undular bore evolution in a duct and constant background wind (Ramachandran et al., 2023).

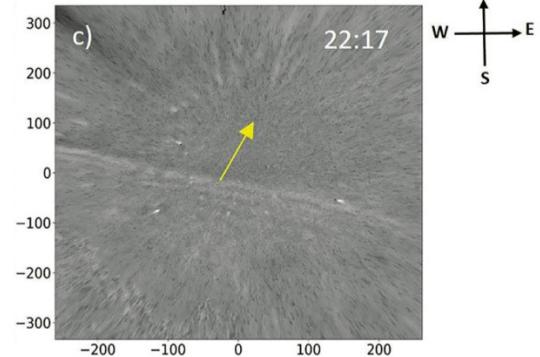


Simulierte Formation einer Wellenfront und Kelvin-Helmholtz-Instabilität in einem Doppler- (blau) und thermischen (rot) Kanal (Dissertation Ramachandran 2024). Simulated formation of a wavefront and Kelvin-Helmholtz-Instability in a Doppler (blue) and thermal (red) duct (Dissertation Ramachandran 2024).

Verteilung der vertikalen Geschwindigkeiten ( $w$ ) über alle Höhen und 7 Jahre (links) sowie von varikosen Events (rechts) in blau (aufwärts) und rot (abwärts). Distribution of vertical velocities ( $w$ ) over all altitudes and 7 years (left). Maximum velocities of varicose-mode events (right) in blue (down-drafts) and red (up-drafts).



Varikoses Event, farbkodierter Vertikalwind (rot: aufwärts, blau: abwärts) über Zeit und Höhe sowie Schema des Ereignisses. Varicose-mode event, color-coded vertical velocities (red: upwards, blue: downwards) vs. time and altitude. Schematic of the event. (Hartisch et al., 2023).



In O(1S)-Airglow über Norddeutschland beobachtetes Bore-Ereignis, das sich in Richtung des gelben Pfeils ausbreitet. Bore event observed in O(1S) airglow image over northern Germany propagating in the direction of the yellow arrow. (Ramachandran et al., 2023)

## AUSGEWÄHLTE PUBLIKATIONEN SELECTED PUBLICATIONS

V. Avsarkisov und J. F. Conte, The Role of Stratified Turbulence in the Cold Summer Mesopause Region, *J. Geophys. Res.*, 128, e2022JD038322, doi:10.1029/2022JD038322, 2023.

J. F. Conte, J. L. Chau, E. Yiğit, J. Suclupe und R. Rodriguez, Investigation of Mesosphere and Lower Thermosphere Dynamics over Central and Northern Peru Using SIMONe Systems, *J. Atmos. Sci.*, doi:10.1175/JAS-D-23-0030.1, 2023.

J. Hartisch, J. L. Chau, R. Latteck, T. Renkwitz und M. Zecha, Observations of polar mesospheric summer echoes resembling kilometer-scale varicose-mode flows, *Ann. Geophys.*, Preprint, 10.5194/egusphere-2023-1856, 2023.

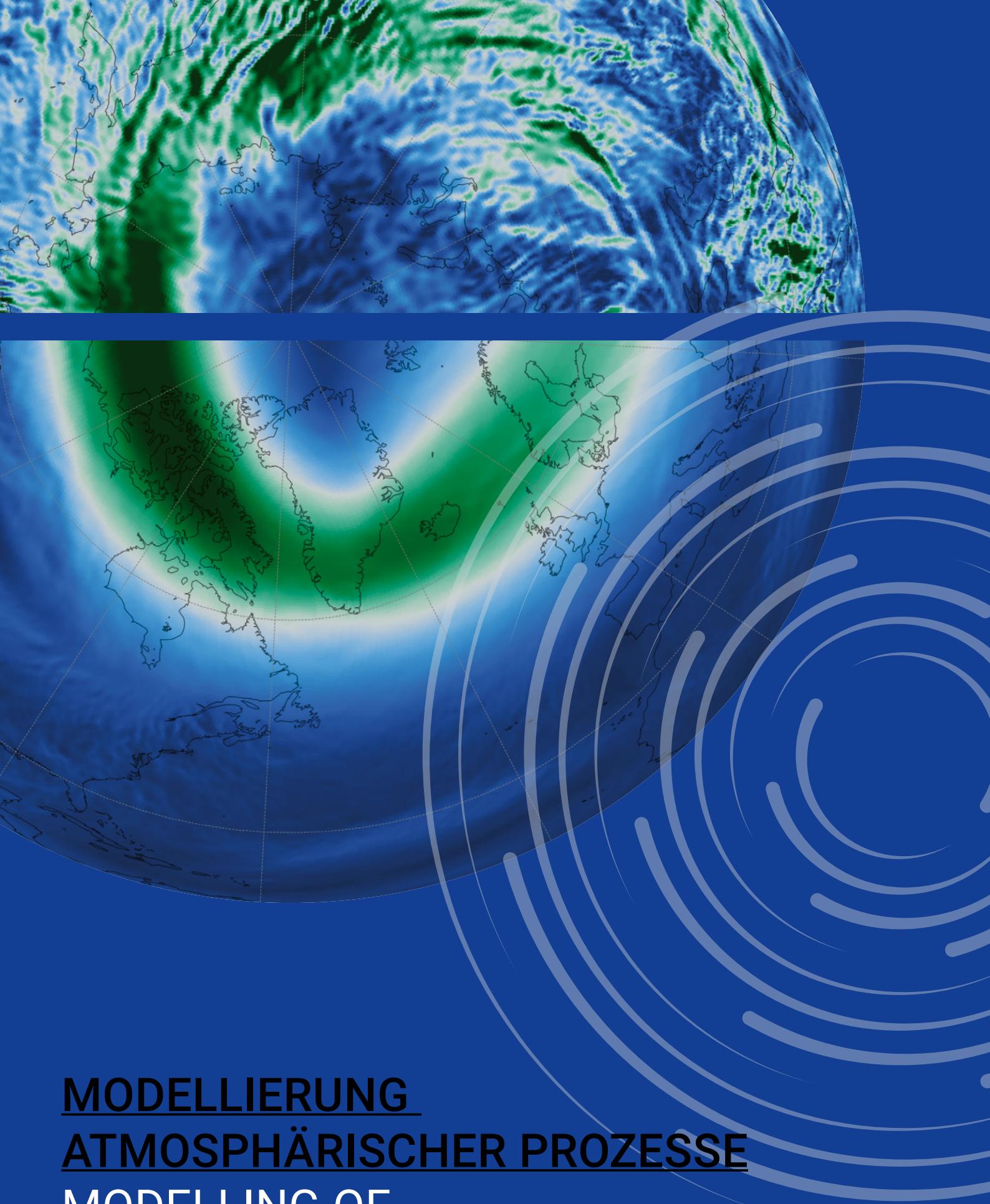
F. L. Poblet, J. L. Chau, J. F. Conte, V. Avsarkisov, J. Vierinen und H. Charuvil Asokan, Horizontal wavenumber spectra of vertical vorticity and horizontal divergence of mesoscale dynamics in the mesosphere and lower thermosphere using multistatic specular meteor radar observations, *Earth and Space Science*, OA, doi:10.1029/2021EA002201, 2022.

F. L. Poblet, J. L. Chau, J. F. Conte, J. Vierinen, J. Suclupe, A. Liu und R. R. Rodriguez, Extreme Horizontal Wind Perturbations in the Mesosphere and Lower Thermosphere Over South America Associated With the 2022 Hunga Eruption, *Geophys. Res. Lett.*, 50, e2023GL103809, doi:10.1029/2023GL103809, 2023.

K. Ramachandran, M. Sivakandan, J. L. Chau, J. M. Urco, M. Gerding, S. Grundmann und St. M. Smith, Investigation of a dissipating mesospheric bore using airglow imager and direct numerical simulation, *J. Geophys. Res.*, 128, e2022JA031114, doi:10.1029/2022JA031114, 2023.

T. Renkwitz, M. Sivakandan, J. Jaen und W. Singer, Ground-based nocturnal D-region electron density climatology over northern Norway, *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 10823–10834, doi:10.5194/acp-23-10823-2023, 2023.

M. Sivakandan, J. Mielich, T. Renkwitz, J. L. Chau, J. Jaen und J. Lastowicka, Long-Term Variations and Residual Trends in the E, F, and Sporadic E (Es) Layer Over Juliusruh, Europe, *J. Geophys. Res.*, 128, e2022JA031097, doi:10.1029/2022JA031097, 2023.



# **MODELLIERUNG** **ATMOSPHÄRISCHER PROZESSE**

## **MODELLING OF** **ATMOSPHERIC PROCESSES**

---

**Der Beitrag der Abteilung zu den Forschungsthemen des IAP besteht in der Anwendung fortgeschritten der Diagnostik zur Untersuchung physikalischer Systeme verschiedener Komplexitätsebenen, der Nutzung konzeptioneller Modelle zum Verständnis atmosphärischer Prozesse und der Entwicklung numerischer Modelle. Diese Arbeiten sind auf die MLT-Region gerichtet. Eine besondere Stärke besteht im kontinuierlichen Vergleich und der gemeinsamen Auswertung unserer Modellergebnisse mit bodengestützten und satellitengetragenen Beobachtungen für regionale Erscheinungen sowie globale Untersuchungen.**

The department contributes to the research themes of IAP by applying advanced diagnostics to study physical systems of different levels of complexity, utilising conceptual models for understanding atmospheric processes, and developing numerical models. These efforts are focused on the MLT. A particular strength are the continuous efforts in comparing and co-analysing our model results with ground-based and space-borne observations for regional phenomena as well as global studies.

---

## TEAM

Mozghan Amiramjadi, Victor Avsarkisov, Serhat Can, Suman Kumar Das, Axel Gabriel, Mykhaylo Grygalashvyly, Markus Kunze, Matthäus Mai, Yanmichel Morfa, Tarique Adnan Siddiqui, Urs Schaefer-Rolffs, Corinna Schütt, Claudia Stephan, Claudia Stolle, Yosuke Yamazaki, Christoph Zülicke

---

## MODELLENTWICKLUNGEN

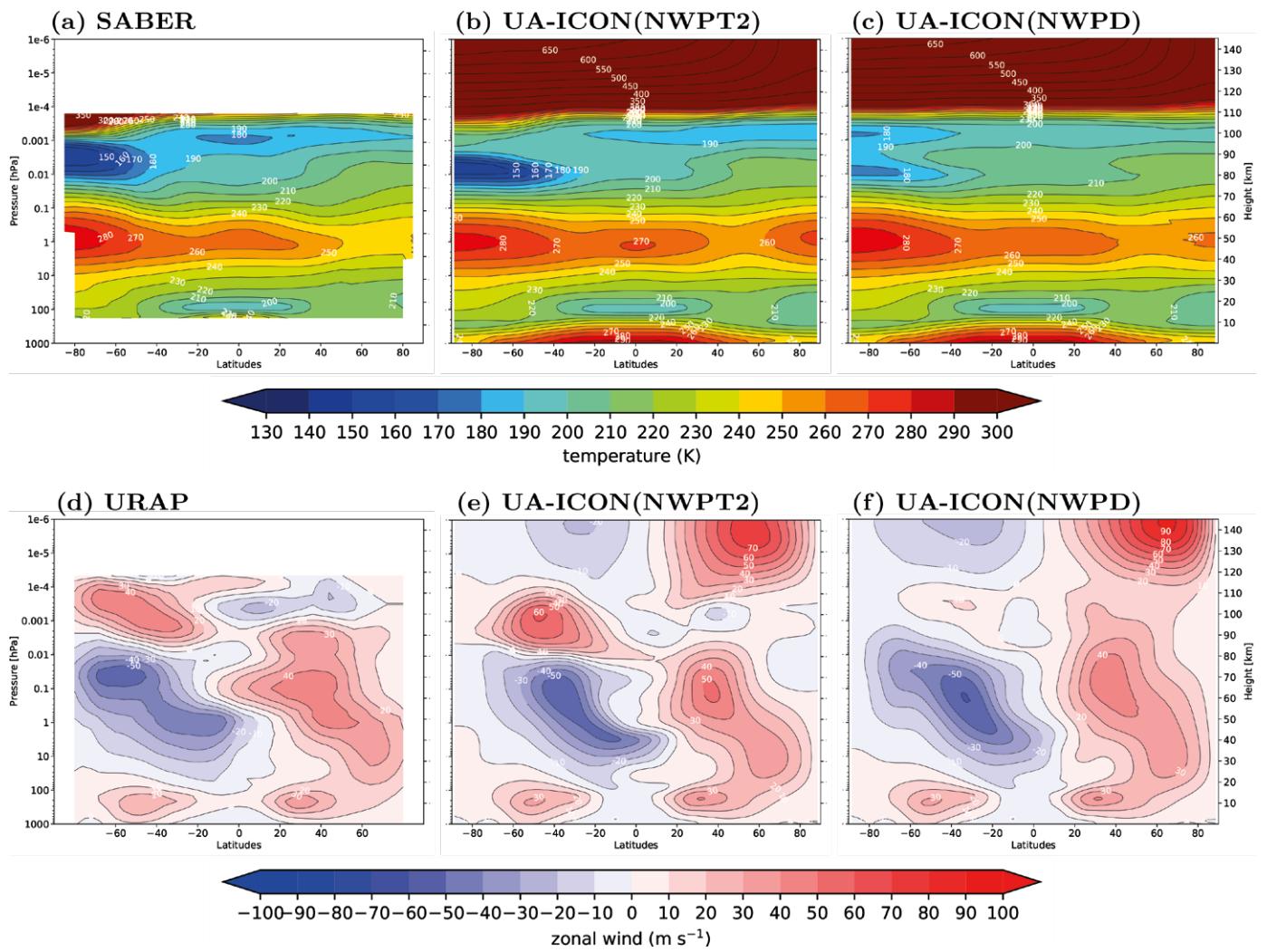
### MODEL DEVELOPMENTS

Die Temperaturen der mittleren Atmosphäre sind stark durch dynamische Prozesse beeinflusst. Das am IAP eingesetzte und weiterentwickelte globale Zirkulationsmodell UA-ICON zeigt mit den Standardparametern der nicht-orografischen Schwerewellenparametrisierung eine zu warme MLT in der Sommerhemisphäre. Mit Hilfe neu eingestellter Parameter konnte die MLT Temperatur deutlich gesenkt werden und stimmt nun, wie der Zonalwind, besser mit Satellitenbeobachtungen überein. Somit verfügt das IAP nun über eine Version des UA-ICON, die langfristige Simulationen der MLT Region mit ca. 160 km horizontaler Auflösung erlaubt. Ein weiterführendes Thema ist der Einfluss des Stratosphärenwirbels auf die Dynamik der oberen Atmosphäre.

Die Möglichkeit, das MCM (Kühlungsborn Mechanistic general Circulation Model) an Reanalysedaten heranzuführen, besteht am IAP seit 2021. In einer ersten Fallstudie wurde untersucht, ob das KMCM Mesopausensprünge im antarktischen Sommer, wie sie 2010 und 2011 mit IAP-Lidaren beobachtet wurden, nachbilden kann. Das KMCM zeigt zum gleichen Zeitpunkt wie die Beobachtungen ein Hochspringen, Abkühlen und Absinken

der Mesopause – die erste erfolgreiche Simulation von Mesopausensprünge. Es treten jedoch in den folgenden Wochen weitere Abkühlungen auf, die sich so nicht in den Beobachtungen widerspiegeln. Diese Diskrepanz wird momentan aufgelöst.

Nach Sonnenuntergang auftretende äquatoriale Plasmablasen (EPBs) stellen eine bedeutende Gefahr für trans-ionosphärische Radiosignale dar, einschließlich derer für Kommunikations- und Navigationssysteme wie GPS. Für ihre Voraussage haben wir ein Modell für die Ionosphärische Blasenvorhersage (IBP) entwickelt, was neun Jahre Magnetfeldmessungen von CHAMP und Swarm-Satelliten ausnutzt. Das Modell sagt die Eintritts-Wahrscheinlichkeit (zwischen 0 und 1) von Nach-Sonnenuntergangs-EPBs für eine bestimmte Länge, Tag des Jahres, Lokalzeit und Sonnenaktivität, für einen Höhenbereich von 350-510 km und niedere Breiten von  $\pm 45^\circ$  voraus. Das IBP-Modell rekonstruiert erfolgreich die EPB-Verteilung, die in früheren Untersuchungen unabhängiger Daten wie den Beobachtungen vom Defense Meteorological Satellite Program (DMSP) berichtet wurden. Das IBP-Modell ist öffentlich zugänglich gemacht worden.

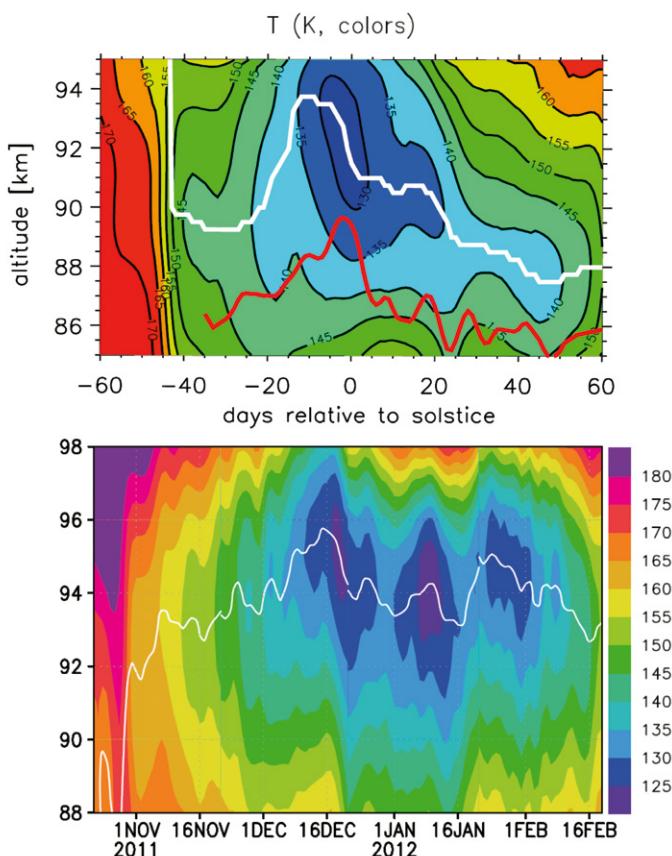


Breiten-Höhenschnitte der zonal gemittelten Temperatur (oben) und der Zonalwinde (unten) für Januar. Dargestellt sind aus Satellitendaten abgeleitete Klimatologien (links) im Vergleich zu den Klimatologien aus UA-ICON mit den Standardparametern für die Schwerewellenparametrisierung (mitte) und den angepassten Parametern (rechts). Latitude-height section of the zonal mean temperature (top) and the zonal wind (bottom) for January. Shown are satellite-derived climatologies (left) in comparison to climatologies of UA-ICON with standard settings for the gravity wave parameterization (middle) and the tuned settings (right).

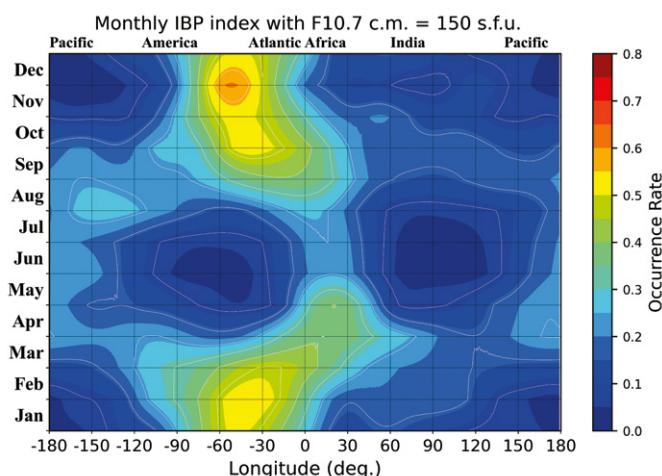
The temperatures of the middle atmosphere are strongly influenced by dynamical processes. The IAP adopted and further developed the global circulation model UA-ICON which showed with default settings for the nonorographic gravity wave parameterization a too warm MLT in the summer hemisphere. By virtue of new adjusted parameters the MLT temperature was substantially reduced and is now in better agreement with satellite observations, as well as the zonal wind. Thus, the IAP is now set up with a UA-ICON version allowing longterm simulations of the MLT region with approx. 160 km horizontal resolution. A further leading topic is the influence of the stratospheric vortex on the dynamics of the upper atmosphere.

The option to nudge the KMCM (Kühlungsborn Mechanistic general Circulation Model) to reanalysis data exists at IAP since 2021. A first case study investigated, how well the KMCM simulates mesopause jumps as observed with IAP lidars in 2010 and 2011. The KMCM shows an upjump, cooling and lowering of the mesopause at the same time as the observations – the first successfull simulation of mesopause jumps. However, further cooling events appeared in the following weeks which were not observed. This discrepancy is about to be resolved.

Post-sunset equatorial plasma bubbles (EPBs) present a significant threat to trans-ionospheric radio signals, including



Temperaturzeitreihen der Mesopausenregion vom 22.10.2011 bis 19.02.2012 für IAP-Lidar-Beobachtungen (oben, Daten relativ zur Sonnenwende) und KMCM-Simulationen (unten). Die weiße Linie zeigt die Lage der Mesopause. Temperaturtime series of the mesopause region from 22 October 2011 until 19 February 2012 for IAP lidar observations (top, data relative to spring equinox) and KMCM simulations (bottom). The white line shows the mesopause altitude.



Monatlich Eintrittswahrscheinlichkeit von EPBs mit der Länge bei F10.7 cm=150 sfu wie sie vom IBP-Modell erhalten wurden. Monthly occurrence rate of EPBs with longitude at F10.7 cm=150 sfu as obtained from the IBP model.

those vital for communication and navigation systems like GPS. For their prediction, we developed the Ionospheric Bubble Prediction (IBP) model, which leverages nine years of magnetic field measurements obtained from both CHAMP and Swarm satellites. The model predicts the occurrence probability (ranging between 0 to 1) of post-sunset EPBs for a given longitude, day of year, local time and solar activity, for the altitude range of about 350-510 km, and low geographic latitudes of  $\pm 45^\circ$ . The IBP model is successful at reconstructing the distribution of EPBs reported in previous studies of independent data, such as observations from the Defense Meteorological Satellite Program (DMSP). The IBP model is made publicly available.

# THEORIE-ENTWICKLUNG

## THEORY DEVELOPMENT

Das Verständnis der dynamischen Kopplung zwischen horizontalen und vertikalen atmosphärischen Bewegungen ist wesentlich zur Offenlegung der Mechanismen, die mesoskalige Energiespektren formen. Globale Simulationen von modernen Allgemeinen-Zirkulations-Modellen auf der Kilometer-Skala bieten eine Möglichkeit, vorgeschlagene Theorien für mesoskalige Energiespektren zu testen. Wir haben ein vereinfachtes analytisches Modell für das vertikale Energiespektrum abgeleitet, was auf linearen Schwerewellen-Polarisationsbeziehungen basiert. Unsere Ergebnisse legen nahe, dass Schwerewellen-Moden das vertikale Kinetische-Energie-Spektrum auf den meisten horizontalen Skalen dominieren.

Mit idealisierten UA-ICON-Simulationen untersuchen wir die Generierung von sekundären Schwerewellen – einem Elementarprozess im Rahmen der mehrstufigen vertikalen Kopplung atmosphärischer Schichten. Wir fanden drei Moden von Schwerewellen, die insgesamt ein Prozent der Wirkung primärer Schwerewellen übernehmen. Obwohl das am Ort der Generierung eine kleine Größe ist, kann es die mittlere Strömung weiter oben beeinflussen.

Geschichtete Turbulenz ist ein Konzept zur Beschreibung der Energiekaskade auf Mesoskalen, das Schwerewellen einschließt. Unsere Untersuchung verbindet makro-, meso- und subgitter-skalige Regime, um die dominanten Mechanismen für die Abwärts-Kaskade in der mittleren Atmosphäre zu finden. Skalenbeziehungen legen eine Korrelation zwischen der horizontalen mesoskaligen Geschwindigkeit und der Dissipationsrate nahe. Diese Beziehung wurde für einen Vergleich von Modellsimulationen mit Radarbeobachtungen genutzt. Frequenz-Spektren ergaben eine weitere Rechtfertigung für die Anwendbarkeit der Theorie geschichteter Turbulenz.

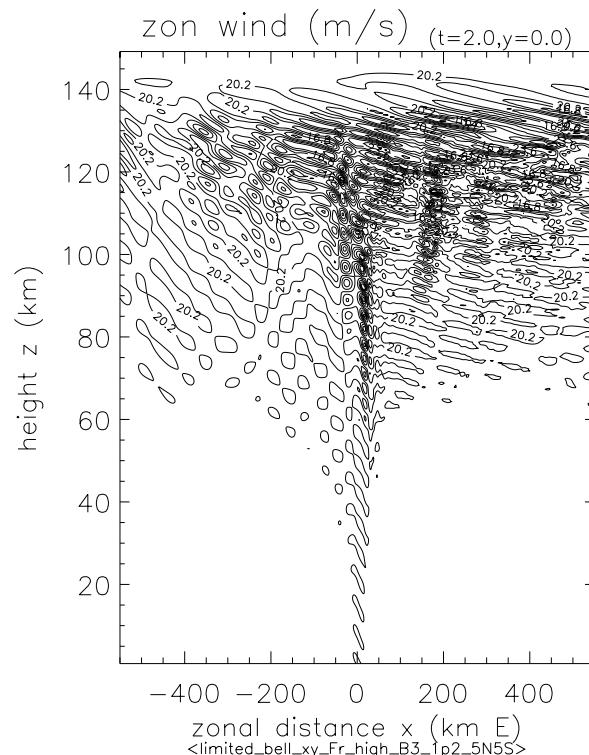
Chemische Heizung aufgrund von exothermen chemischen Reaktionen ist die entscheidende Energiequelle in der MLT-Region. Mit 3D Modellierung haben wir gefunden, dass die Reaktion von Ozon mit atomarem Wasserstoff ein wichtiger Verlustprozess unter Tagesbedingungen ist und daher in der Ozon-Bilanzgleichung nicht vernachlässigt werden sollte. Um diese Reaktion mitzuberücksichtigen, haben wir eine neue Ableitungsprozedur für Tagesbedingungen entwickelt und auf Daten vom SABER-Instrument an Bord des TIMED-Satelliten angewandt. Das zeigte, dass unser neuer Ansatz einen starken Effekt auf die chemische Heizung hat.

Understanding the dynamic coupling between horizontal and vertical atmospheric motions is essential to unraveling the mechanisms shaping mesoscale kinetic energy spectra. Global simulations of state-of-the-art general circulation models at the kilometer scale provide an opportunity to test proposed theories for the mesoscale energy spectrum. We derived simplified analytical models for the vertical velocity spectrum based on linear gravity-wave polarization relations. Our results suggest that gravity wave modes dominate the vertical kinetic energy spectra at most horizontal scales.

With idealized UA-ICON simulations we study the generation of secondary gravity waves – an elementary process in the frame of multi-step vertical coupling of atmospheric layers. We discovered three modes of secondary gravity waves which take over about one percent of the primary wave action. Although this is a small quantity in the region of generation, it may influence the mean flow further aloft.

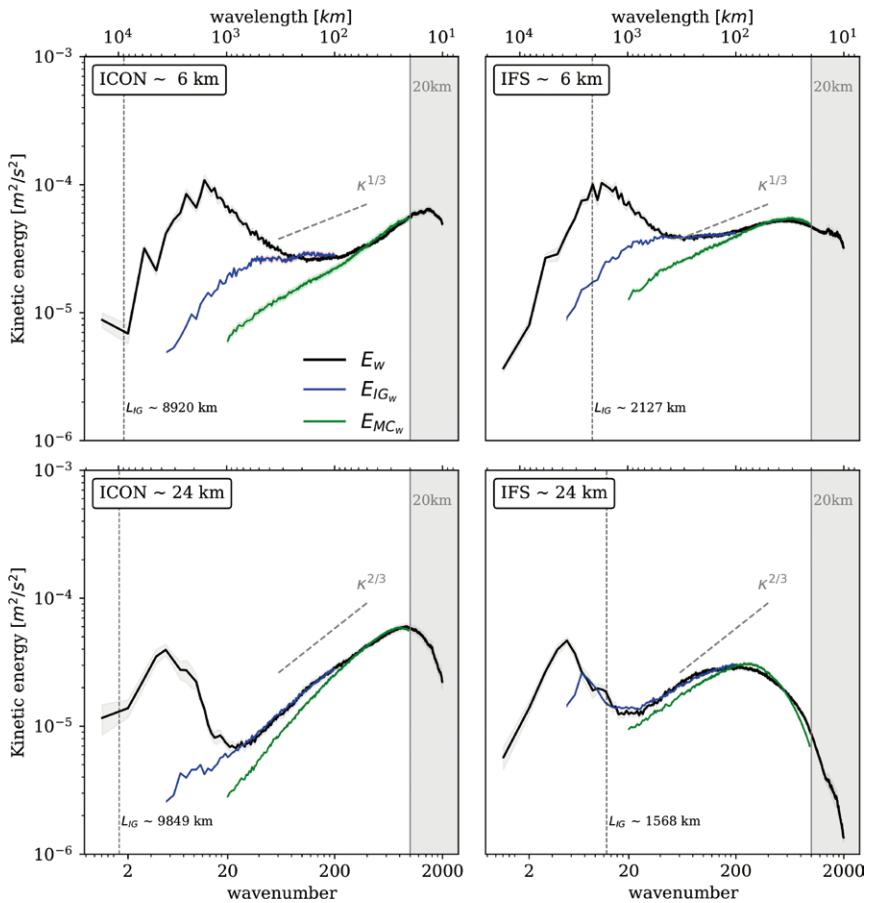
Stratified turbulence is a concept to describe energy cascades at mesoscales, which involves gravity waves. Our investigation links macro-, meso- and subgrid-scale regimes to find the dominant mechanism for the downscale cascade in the middle atmosphere. Scaling considerations suggest a correlation between horizontal mesoscale velocity and dissipation rate. The latter expression has been used for comparison of model simulations with radar observations. Frequency spectra added further evidence to the applicability of stratified turbulence theory.

Chemical heat due to exothermic chemical reactions is the essential source of energy in the MLT region. With 3D modelling we found that the reaction of ozone with atomic hydrogen is an important loss process for daytime conditions and should not be omitted from the ozone balance equation. In order to take this reaction into account we developed a new retrieving procedure for daytime conditions and applied it to data from the SABER instrument onboard the TIMED satellite. This showed that our novel approach has a strong effect on chemical heat.

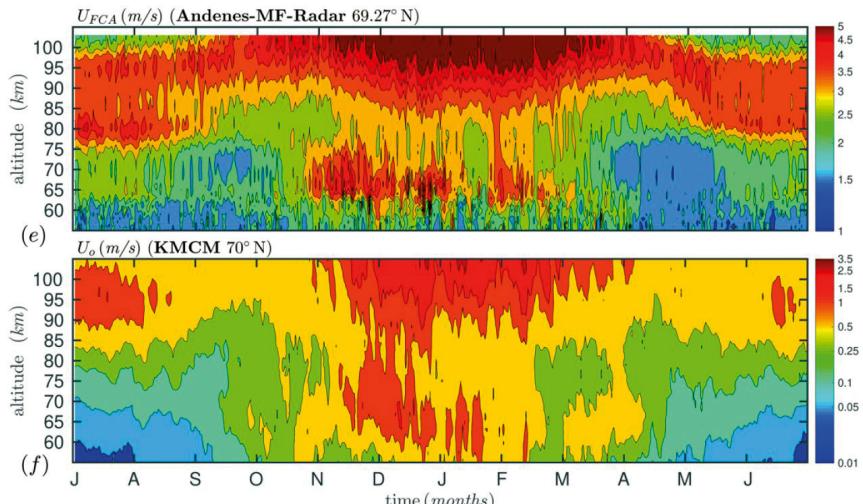


Zonal-Höhen-Schnitt von Zonalwindstrukturen über einem Gauss-förmigen Berg in der Mitte der Domäne. Die primäre Gebirgsquelle über dem Berg wächst mit der Höhe an, was die Wahrscheinlichkeit zu brechen erhöht und damit die Generierung von sekundären Wellen. Zonal-height section of zonal wind structures over a Gauss-shaped mountain in the middle of the domain. The primary mountain wave above the hill is growing with height, increasing the likeliness of breaking which gives rise to secondary gravity waves.

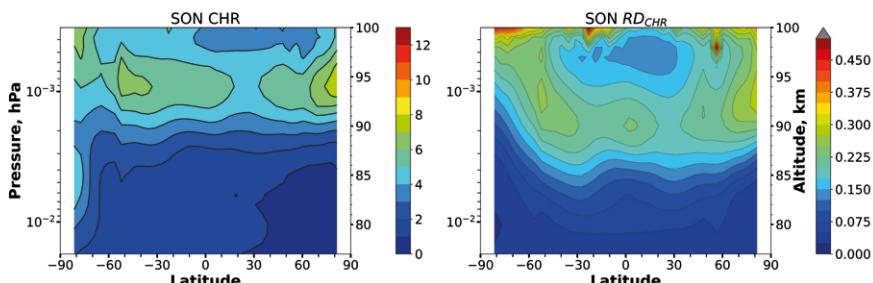
Vertikale-Kinetischen-Energie-Spektren  $E_w$  (schwarz), Spektren berechnet aus der Massen-erhaltung  $E_{MC_w}$  (grün) und der Schwerewellen-theorie  $E_{IG_w}$  (blau) als Funktion der horizontalen Wellenzahl für ICON, und das IFS auf (oben) 6 km und (unten) 24 km Höhe. Die vertikale gepunktete Linie deutet die Skale an, unter der die Näherungen gelten. Vertical kinetic energy spectra  $E_w$  (black), spectra calculated from mass continuity  $E_{MC_w}$  (green) and using gravity wave theory  $E_{IG_w}$  (blue) as a function of horizontal wavenumber for ICON, and the IFS at (top) 6 km and (bottom) 24 km height. The vertical dotted lines indicate the scale below which the approximation is valid.



Vergleich der turbulenten RMS-Geschwindigkeit  $U_o$  von (oben) Mittel-Frequenz-Radar-Messungen mit der Full-Correlation Analysis in Andenes ( $69.27^\circ N$ ) (unten) mit dem Skalierungsbeziehung aus KMCM-Daten mit der Theorie geschichteter Turbulenz. Comparison of turbulent RMS velocity  $U_o$  from (top) mid-frequency radar measurements with Full-Correlation Analysis at Andenes ( $69.27^\circ N$ ) (bottom) with a scaling result derived from KMCM data with stratified turbulence theory.



Tagsüber gemittelte jahreszeitliche Verteilung der gesamten chemischen Heizung [K/day] (links) und die relative Abweichung der chemischen Heizung zwischen der alten und neuen Ableitungsprozedur (rechts) für Herbstbedingungen. Daytime mean seasonally averaged distributions of total chemical heat [K/day] (left) and relative deviation of chemical heat between the new and old procedure (right) for autumn season.



# SPORADISCHES E UND WINDSCHERUNG

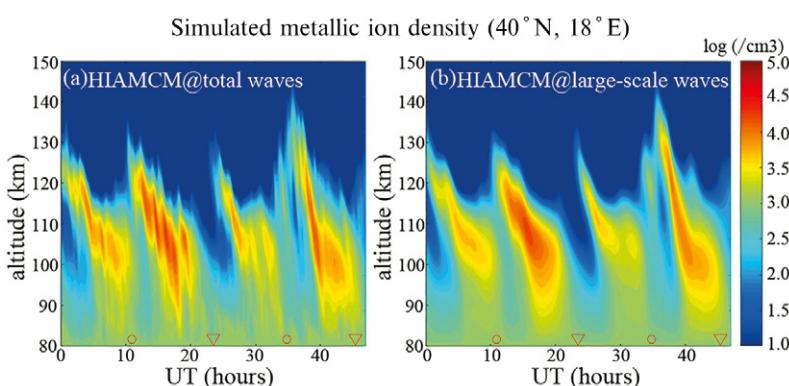
## SPORADIC E AND WIND SHEAR

Sporadisches E (Es) ist die anomale Radio-Ausbreitung, bedingt durch intensive Ionisationswolken in Höhe der E-Region der Ionosphäre, ungefähr 90-120 km über der Oberfläche. Eine Es-Schicht wird durch die vertikale Konvergenz metallischer Ionen gebildet, die sich aus der vertikalen Scherung des horizontalen Windes in E-Schicht-Höhen ergibt. Die tägliche Variation der Es durch atmosphärische Gezeiten von 24 und 12 Stunden aus der mittleren Atmosphäre ist bekannt. Jedoch zeigen Beobachtungen auch kurzperiodischere Es-Variationen, und deren Entstehungsmechanismus ist nicht gut verstanden. Eine mögliche Erklärung ist der Effekt von Schwerewellen, die kürzere Perioden als die atmosphärischen Gezeiten haben können.

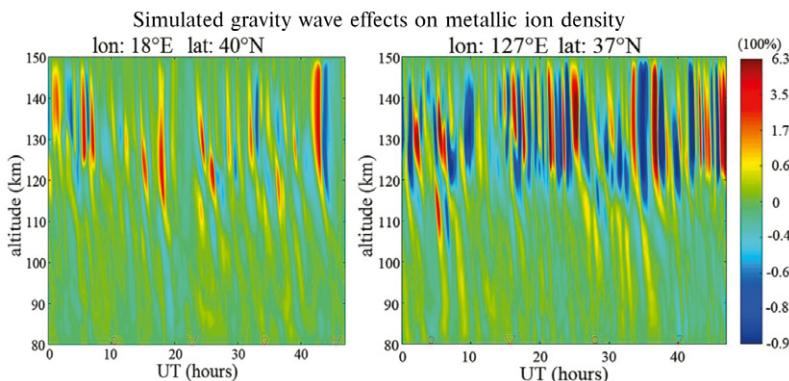
Wir haben eine Reihe von numerischen Experimenten durchgeführt, um die Rolle von Schwerewellen für kurzperiodische Es-Variationen zu untersuchen. Ein Modell für die Metallionendichte wurde entwickelt und durch Neutralwind aus HIAMCM, einem schwerwellenauf lösendem allgemeinen Zirkulationsmodell, angetrieben. Die Ergebnisse legen nahe, dass Schwerewellen effektiv die Metallionendichte in E-Schicht-Höhen modulieren. Die kurzperiodischen Variationen in der Metallionendichte durch Schwerewellen können durch einen Vergleich von Simulationen mit und ohne Schwerewellen isoliert werden. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Stärke des Schwerewellen-Einflusses auf Es beträchtlich mit der Länge variieren kann.

Sporadic E (Es) is anomalous radio propagation caused by intense clouds of ionisation at heights of the E-region ionosphere, approximately 90-120 km above the surface. An Es layer is formed through the vertical convergence of metallic ions, which results from the vertical shear of horizontal winds at E-region altitudes. Daily variation of Es is known to be due to atmospheric tides with periods of 24 hours and 12 hours, which propagate from the middle atmosphere. However, observations also show shorter-period variations in Es, and their production mechanism is not well understood. One possible explanation is the effect of gravity waves, which can have periods shorter than atmospheric tides in the MLT region.

We performed a series of numerical experiments to examine the role of gravity waves for short-period Es variations. A model of metallic ion density was developed and forced by neutral winds obtained from HIAMCM, which is a whole atmosphere model that can resolve gravity waves. The results suggest that gravity waves are effective in modulating the metallic ion density at E-region altitudes. The short-period variations in the metallic ion density induced by gravity waves can be isolated by comparing the simulation results with and without gravity waves. The results suggest that the magnitude of gravity-wave effects on Es can vary considerably with longitude.



Metallionendichte auf  $40^{\circ}$ N breite und  $18^{\circ}$ E Länge, simuliert (a) mit und (b) ohne Schwerwellenantrieb. Metallic ion density at  $40^{\circ}$ N latitude and  $18^{\circ}$ E longitude, simulated (a) with and (b) without gravity wave forcing.



Metallionendichtestörungen durch Schwerewellen, simuliert für zwei Positionen. Metallic ion density perturbations due to gravity waves simulated for two locations.



Intensive Nutzung der Rechen- und Speicherkapazitäten ist wesentlich für die Arbeit der Modellierungsabteilung.  
Intensive use of computer and storage capacity is essential for the work of the modelling department

---

## AUSGEWÄHLTE PUBLIKATIONEN SELECTED PUBLICATIONS

V. Avsarkisov, E. Becker und T. Renkowitz, Turbulent Parameters in the Middle Atmosphere: Theoretical Estimates Deduced from a Gravity Wave–Resolving General Circulation Model. *J. Atmos. Sci.* 79, 4: 933–952, doi:10.1175/jas-d-21-0005.1, 2022.

V. Avsarkisov und J. F. Conte, The Role of Stratified Turbulence in the Cold Summer Mesopause Region. *J. Geophys. Res. Atmos.* 128, 19: 038322, doi:10.1029/2022jd038322, 2023.

M. Y. Kulikov, M. V. Belikovich, M. Grygalashvily, G. R. Sonnemann und A. M. Feigin, Retrieving daytime distributions of O, H, OH, HO<sub>2</sub>, and chemical heating rate in the mesopause region from satellite observations of ozone and OH\* volume emission: The evaluation of the importance of the reaction H + O<sub>3</sub> → O<sub>2</sub> + OH in the ozone balance. *Adv. Space Res.* 69, 1:3362-3373, doi:10.1016/j.asr.2022.02.011, 2022.

S. Kumar, T. A. Siddiqui, C. Stolle, N. M. Pedatella und D. Pallamraju, Impact of strong and weak stratospheric polar vortices on geomagnetic semidiurnal solar and lunar tides. *Earth Planets Space* 75, 1: 52, doi:10.1186/s40623-023-01810-x, 2023.

Y. A. Morfa und C. C. Stephan, The Relationship between Horizontal and Vertical Velocity Wavenumber Spectra in Global Storm-Resolving Simulations. *J. Atmos. Sci.* 80, 4: 1087–1105, doi:10.1175/jas-d-22-0105.1, 2023.

L. Qiu, Y. Yamazaki, T. Yu, E. Becker, Y. Miyoshi, Y. Qi, T. A. Siddiqui, C. Stolle, W. Feng, J. M. C. Plane, Y. Liang und H. Liu, Numerical Simulations of Metallic Ion Density Perturbations in Sporadic E Layers Caused by Gravity Waves. *Earth Space Sci.* 10, 8: 003030, doi:10.1029/2023ea003030, 2023.

C. Stolle, T. A. Siddiqui, L. Schreiter, S. K. Das, I. Rusch, M. Rother und E. Doornbos, An Empirical Model of the Occurrence Rate of Low Latitude Post–Sunset Plasma Irregularities Derived From CHAMP and Swarm Magnetic Observations. *Space Wea.* 22, 6: 003809, doi:10.1029/2023sw003809, 2024.

# ÖFFENTLICHKEIT OUTREACH





**Das IAP kommuniziert mit der Gesellschaft in unterschiedlicher Art und Weise, um die öffentliche Wahrnehmung und das Verständnis der wissenschaftlichen Aktivitäten des IAP zu fördern. Die Kommunikation unserer Forschung und Aktivitäten zur wissenschaftlichen und nichtwissenschaftlichen Welt motiviert die wissenschaftliche Zusammenarbeit, erhöht die Faszination der Menschen an der Wissenschaft und ermöglicht einen gegenseitigen Gewinn durch die Kooperation mit der Privatwirtschaft. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über wissenschaftliche Errungenschaften von besonderem öffentlichen Interesse, Technologietransfer in die lokale Industrie, aktive Presseberichte und vieles mehr.**

The IAP communicates with society in various ways to promote public awareness and understanding of IAP's scientific activities. Communicating our research and activities to academia and to the non-academic world motivates scientific collaboration, increases people's fascination about science and enables mutual benefit in cooperation with the private sector. This chapter gives an overview on scientific achievements with particular public interest, technology transfer to local industry and active press reporting among others.



Young Scientist Award der International Union of Radio Science  
für Jennifer Hartisch Young Scientist Award from the International Union of Radio Science for Jennifer Hartisch



## PREISE AWARDS

Unsere Direktorin Claudia Stolle wurde mit der William B. Hanson Vorlesung der Amerikanischen Geophysikalischen Vereinigung (AGU) in der Sektion Weltraumphysik und Aeronomie ausgezeichnet. Die William B. Hanson Vorlesung stellt eine Anerkennung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern in der Mitte ihrer Karriere, die Einfluss auf die Weltraumphysik und Aeronomie haben, dar und wird jährlich am AGU Fall Meeting abgehalten.

Die Förderung von Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern ist am IAP von hohem Interesse. Wir sind besonders stolz, wissenschaftlichen Nachwuchs aus dem Ausland anzuziehen. Mit Mohamed Mossad konnte einer unserer internationalen Mitarbeitenden beim AGU Fall Meeting 2023, der wichtigsten Geophysik-Konferenz des Jahres mit mehr als 20.000 Teilnehmenden, den Outstanding Student Presentation Award gewinnen. Ein besonderes Anliegen des IAP ist zudem die Förderung weiblicher Studierender und PostDocs. Es freut uns daher besonders, dass mit Priyanka Ghosh und Jennifer Hartisch gleich zwei unserer Mitarbeiterinnen in Folge den Young Scientist Award der International Union of Radio Science (URSI) gewinnen konnten. Dr. Ghosh belegte darüber hinaus auch den 2. Platz des URSI Young Scientist Best Paper Awards.

Our director Claudia Stolle was awarded the William B. Hanson Lecture of the AGU Space Physics and Aeronomy Section. The William B. Hanson lecture recognizes mid-career scientists impacting space physics and aeronomy and is presented annually at the AGU Fall Meeting.

Promoting early career scientists is of high interest to IAP. We are particularly proud to have attracted early career scientists from abroad. With Mohamed Mossad, one of our international employees won the Outstanding Student Presentation Award at the AGU Fall Meeting 2023, the most important geophysics conference of the year with more than 20,000 participants. Further, an important aspect at IAP is the promotion of female students and postdocs. We are therefore particularly pleased that two of our employees, Priyanka Ghosh and Jennifer Hartisch, were able to win the Young Scientist Award from the International Union of Radio Science (URSI) in a row. Dr. Ghosh also reached second place in the URSI Young Scientist Best Paper Award.

# BERATUNGSTÄTIGKEITEN COMMUNITY SERVICES

**Die aktive Beteiligung von IAP Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern in nationalen und internationalen Gremien ist eine Anerkennung der IAP-Leistungen und hilft, an der weltweiten wissenschaftlichen Weiterentwicklung mitzuwirken.**

**The active participation of IAP scientists in national and international bodies is a recognition for IAP achievements and helps to actively participate in internationally advancing science.**

In den Jahren 2022 und 2023 hat sich das IAP z.B. in den folgenden Gremien eingesetzt: SCOSTEP-Büro, COSPAR-Unterkommissionen, ALOMAR SAC, Lenkungsausschuss Geomagnetische Observatorien des GFZ, EISCAT SSC, Externer Beratungsausschuss, High Altitude Observatory, NCAR, SCOSTEP Scientific Discipline Representative, Swarm DISC Advisory Board, Kuratorium des Magnus-Hauses der Deutschen Physikalischen Gesellschaft und als Gutachter von ERC-Anträgen und Anträgen der Alexander-von-Humboldt-Stiftung.

In 2022 and 2023, the IAP acted in the following committees among others: SCOSTEP Bureau, COSPAR subcommissions, ALOMAR SAC, Steering committee of the GFZ geomagnetic observatories, EISCAT SSC, External Advisory Committee, High Altitude Observatory, NCAR, Swarm DISC Advisory Board, Board of Trustees of the Magnus Haus Berlin of the German Physical Society and as referee for ERC grant applications and applications to the Alexander-von-Humboldt Association.

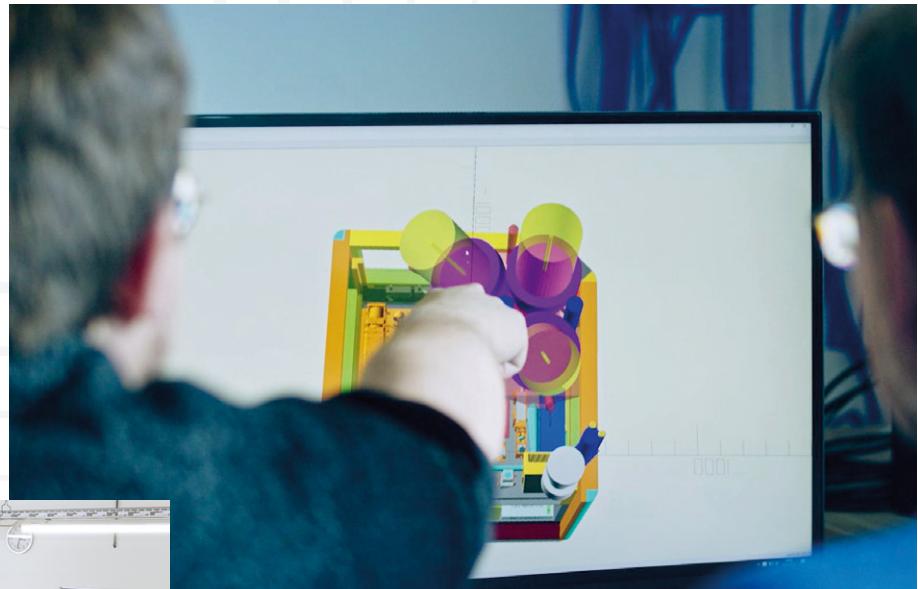


# TECHNOLOGIETRANSFER

## TECHNOLOGY TRANSFER

Die Forschungsaktivitäten am IAP sind mit Technologieentwicklungen verbunden, um neue Phänomene an der Grenze des Wissens zu beobachten. In vielen Fällen können diese Entwicklungen auch für die lokale und regionale Industrie nutzbringend sein. Im Berichtszeitraum wurden zwei Technologietransferprojekte im Zusammenhang mit VAHCOLI verwirklicht: Lidar Cube und MoLiCu. Die VAHCOLI-Entwicklungen bilden zudem die Grundlage für das EU-Projekt EULIAA, das die Entwicklung eines Lidar-Arrays zur Überwachung des atmosphärischen Klimas zum Ziel hat.

The research activities at IAP are accompanied with technological developments in order to observe new phenomena at the edge of knowledge. In many cases, these developments can be beneficial to local and regional industry. During this reporting period, two technological transfer projects were executed in relation to VAHCOLI. These are: Lidar Cube and MoLiCu. The VAHCOLI developments also form the basis for the EU project EULIAA, which aims to develop a lidar array to monitor the atmospheric climate.



## A) Lidar Cube



LidarCube ist ein Netzwerk von neun Partnern, das durch RUBIN (Regionale unternehmerische Bündnisse für Innovation) gefördert wird. Lidar Cube is a network of nine partners funded by RUBIN programme.

## B) EUliaa

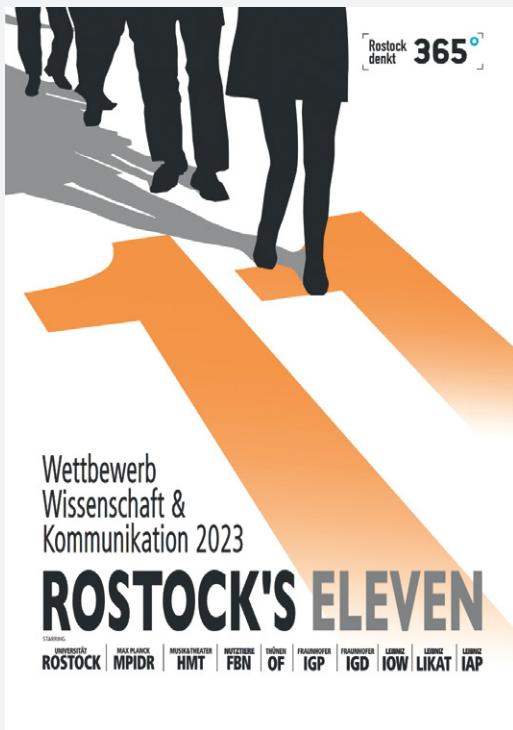


EULIAA ist ein von der EU im Rahmen von Horizon Europe gefördertes Verbundprojekt von sieben internationalen Partnern. EULIAA is a joint project of seven international partners funded by the EU within the framework of Horizon Europe.



# WISSENSCHAFTSKOMMUNIKATION

## SCIENCE COMMUNICATION



Flyer zu Rostock's Eleven 2023  
Flyer for Rostock's Eleven 2023

Das IAP ist ein aktiver Teil der Wissenschaftsgemeinschaft der Region Rostock. Wir sind mit der Universität Rostock nicht nur durch Wissenschaft und Bildung verbunden, sondern auch durch Wissenschaftskommunikation. Als Mitglied des Marketingvereins „Rostock denkt 365°“ sind wir Mitorganisator des Wettbewerbs „Rostock's Eleven“, bei dem elf Studierende aus der Region Rostock elf Wissenschaftsjournalistinnen und -journalisten aus dem ganzen Land ihre Forschung präsentieren. Für das IAP gingen unsere Doktoranden Thorben Mense und Eframir Franco-Diaz ins Rennen. Darüber hinaus war das IAP auf der Langen Nacht der Wissenschaften 2023 in Rostock vertreten und hat sein 1:1-Raketenmodell, eine Dauerleihgabe der DLR zum 30-jährigen Bestehen des Instituts, auf dem Flughafen Laage ausgestellt. Auch am Girl's Day 2022 und 2023 hat das IAP in virtueller Form teilgenommen, um unter dem Motto „Ein Tag als Atmosphärenforscherin“ Schülerinnen aus ganz Deutschland die Atmosphärenphysik näher zu bringen.

The IAP is an active part of the science community in the Rostock region. We are not only associated to the University of Rostock with numerous scientific and educational links, but also in terms of science communication. As a member of the science marketing association “Rostock denkt 365°”, we co-organize the contest “Rostock's Eleven”, where eleven students from the Rostock region present their research to eleven science journalists from all over the country. Our doctoral students Thorben Mense and Eframir Franco-Diaz competed for the IAP. In addition, the IAP was present at the Long Night of Science in Rostock in 2023 and exhibited its original-sized rocket model, a permanent loan from DLR for the institute's 30th anniversary, at Laage Airport. The IAP also took part in Girl's Day 2022 and 2023 in virtual form in order to introduce pupils from all over Germany to atmospheric physics under the motto “A day as an atmospheric researcher”.

## LEIBNIZ NORDOST

## LEIBNIZ NORDOST

Gemeinsam mit den anderen drei Leibniz-Instituten in Mecklenburg-Vorpommern bildet das IAP Leibniz-Nordost. Im halbjährlichen Rhythmus geben wir ein gleichnamiges Journal heraus, was sowohl über aktuelle Forschung und das Institutsleben berichtet als auch Forschende vorstellt. Auch in den letzten beiden Jahren waren wir wieder mit dabei, z.B. mit Beiträgen zu unserem mobilen Lidar-System VAHCOLI, unserem SIMONE Radar-System oder dem Einfluss von blubbernden Plasmablasen auf die Satellitenkommunikation.

IAP is one of four Leibniz institutes in Mecklenburg-Vorpommern that form Leibniz Nordost. Jointly, semi-annually an equally named journal is published which reports on current research, the institutes' life and presents their researchers. In the last two years we participated with contributions about our mobile lidar system VAHCOLI, our SIMONE radar system or the influence of plasma bubbles on satellite communication.



Schnappschuss der Ausgaben des Journals Leibniz Nordost aus den Jahren 2022 und 2023 Snapshot from the Leibniz Nordost journal issues from 2022 and 2023

# WISSENSCHAFTLICHE TAGUNGEN SCIENTIFIC MEETINGS



Dynamic Earth Abschlusskolloquium am IAP  
Dynamic Earth final colloquium at the IAP

Das IAP ist regelmäßig Gastgeber wissenschaftlicher Tagungen und Workshops. Dazu gehörten das Abschlusskolloquium zum DFG geförderten Schwerpunktprogramm „Dynamic Earth“, das vom 31. Mai bis 2. Juni 2022 am IAP in Kühlungsborn abgehalten wurde und das ROMIC-Statusseminar im September 2022. Eine besondere Veranstaltung stellte zudem das Festkolloquium zur Verabschiedung des langjährigen Direktors des IAP, Prof. Franz-Josef Lübken dar, das am 24.06.2022 unter Moderation von Holger Wandsleb (Ministerium für Wissenschaft, Kultur-, Bundes- und Europaangelegenheiten Mecklenburg-Vorpommern) stattfand. Neben zahlreichen hochkarätigen wissenschaftlichen Vorträgen konnten die Gäste auch die Fingerfertigkeiten von Prof. Lübken als Pianist der Swinging Seagulls bewundern.

The IAP regularly hosts scientific conferences and workshops. This included the final colloquium for the DFG-funded priority program “Dynamic Earth”, which was held from May 31 to June 2, 2022 at the IAP in Kühlungsborn and the ROMIC status seminar in September of 2022. A special event was also the celebratory colloquium for the retirement of the long-time director of the IAP, Prof. Franz-Josef Lübken, which took place on June 24, 2022 under the moderation of Holger Wandsleb (Ministry of Science, Culture, Federal and European Affairs Mecklenburg-Vorpommern). In addition to numerous top-class scientific lectures, the guests were also able to admire Prof. Lübken's skills as the pianist of the Swinging Seagulls.



ROMIC-Statusseminar in Kühlungsborn  
ROMIC status seminar in Kühlungsborn



Prof. Lübken als Pianist der Swinging Seagulls  
Prof Lübken as pianist of the Swinging Seagulls

# 30 JAHRE IAP

## 30 YEARS OF IAP

Seit drei Jahrzehnten wird am IAP an der Erforschung der mittleren Atmosphäre gearbeitet. Gegründet im Jahr 1992, hat sich das IAP zu einem international anerkannten Institut entwickelt. Das runde Jubiläum wurde am 25. September 2023 mit einer festlichen Veranstaltung gebührend gefeiert. Moderiert von Holger Wandsleb, dem Vorsitzenden des Kuratoriums des IAP, wurden Grußworte aus dem Landesministerium, der Universität Rostock und der Leibniz-Gemeinschaft sowie vom ehemaligen Direktor und der amtierenden Direktorin übermittelt. Aber auch die Wissenschaft sollte nicht zu kurz kommen. In seinem Gastvortrag ging Prof. John Plane von der Universität Leeds auf aktuelle wissenschaftliche Fragen der Atmosphärenphysik ein, was zu angeregten Diskussionen während des anschließenden Empfangs führte.

Ein besonderes Geburtstagsgeschenk überreichte unser langjähriger Kooperationspartner, das Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), in Form einer Dauerleihgabe einer Höhenforschungsrakete, die nun das Institutsgelände weithin sichtbar schmückt. Dieses Jubiläum ist nicht nur eine Gelegenheit, die bisherigen Errungenschaften zu feiern, sondern auch ein Ansporn, unseren Beitrag zur Wissenschaft und Gesellschaft weiter auszubauen. Wir danken allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, Partnern und Förderern für ihr kontinuierliches Engagement und ihre Unterstützung. Gemeinsam blicken wir erwartungsvoll in die Zukunft und auf die nächsten 30 Jahre erfolgreicher Forschung am IAP.

For three decades, the IAP has been dedicated to researching the middle atmosphere. Founded in 1992, the IAP has become an internationally recognized institute. The milestone anniversary was duly celebrated with a festive event on September 25, 2023. Moderated by Holger Wandsleb, the chairman of the IAP Board of Trustees, the event featured greetings from the State Ministry, the University of Rostock, the Leibniz Association, as well as from the former director and the current director. But science was not to be neglected either. In his guest lecture, Prof. John Plane from the University of Leeds addressed current scientific questions in atmospheric physics, which led to lively discussions during the subsequent reception.

A special birthday gift was presented by our long-standing cooperation partner, the German Aerospace Center (DLR), in the form of a long-term loan of a sounding rocket, which now prominently adorns the institute's grounds. This anniversary is not only an opportunity to celebrate our past achievements but also an incentive to further expand our contribution to science and society. We thank all employees, partners, and supporters for their continuous commitment and support. Together, we look forward to the future and to the next 30 years of successful research at the IAP.

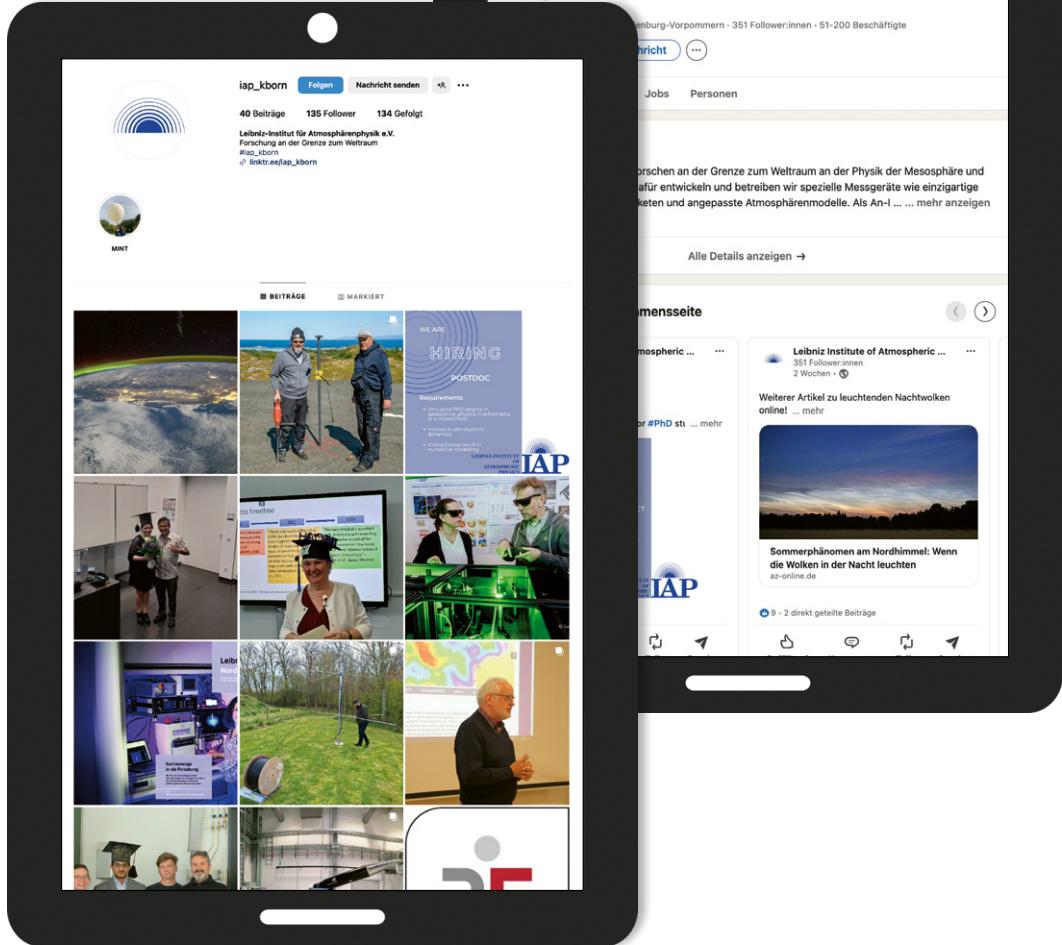


Geburtstagsgeschenk der besonderen Art – Dauerleihgabe einer Höhenforschungsrakete der DLR, dem langjährigen Kooperationspartner des IAP (von links: Leiter der Mobilen Raketen Basis am DLR, Rainer Kirchharz, Institutedirektorin IAP Claudia Stolle, Abteilungsleiter IAP Gerd Baumgarten)

A special kind of birthday present – permanent loan of a sounding rocket from DLR, the IAP's long-standing co-operation partner (from left: Head of the Mobile Rocket Base at DLR, Rainer Kirchharz, Institute Director IAP Claudia Stolle, Head of Department IAP Gerd Baumgarten)

# SOZIALE MEDIEN SOCIAL MEDIA

**Wir sind online**  
Find us online



**Folgen Sie uns / Follow us**



**Schauen Sie sich unseren Imagefilm an / Watch our image movie**



# IAP IM ÜBERBLICK

## IAP AT A GLANCE

3





**Die Forschungsergebnisse beruhen auf einer gut funktionierenden und unermüdlichen Unterstützung durch externe Beratung, operative Infrastruktur, Management und Verwaltung. Dieses Kapitel stellt die Struktur und die Organe des IAP vor. Es gibt einen Überblick über die wissenschaftlichen Aktivitäten des Instituts in Form von Publikationen, Dissertationen und der Teilnahme an nationalen und internationalen Projekten.**

**Research outcome is based on well-functioning and tireless support through external advice, operating infrastructure, management and administration. This chapter introduces the structure and bodies of IAP. It also summarizes the institute's scientific activities in terms of publications, thesis works and involvement in national and international projects.**

# ORGANIGRAMM

# ORGANISATIONAL CHART

**Mitgliederversammlung**  
Vors.: Prof. Dr. S. Lochbrunner

**Kuratorium**  
Vors.: H. Wandsleb

**Wissenschaftlicher Beirat**  
Vors.: Prof. Dr. M. Rex

**Direktorin**

Prof. Dr. C. Stolle

**stellv. Direktor**

Prof. Dr. J. L. Chau



**Transfer**  
Dr. P. Trefz

## Forschungsbereiche

Abteilung  
**Optische Sondierung und Höhenforschungsraketen**  
Prof. Dr. G. Baumgarten

Abteilung  
**Radarsondierungen**  
Prof. Dr. J. L. Chau

Abteilung  
**Modellierung atmosphärischer Prozesse**  
Prof. Dr. C. C. Stephan

## Zentrale Einrichtungen und Funktionen

**Administration**  
C. Schmidt

**Rechenzentrum**

**Bibliothek**

**Werkstätten**

**Ombudsperson**  
Dr. J. Fiedler

**Gleichstellungsbeauftragte**  
R. von Rein

**Datenschutz**  
Dr. U. Schaefer-Rolffs

Mai 2024



# GREMIEN BOARDS

## KURATORIUM BOARD OF TRUSTEES

### **PROF. DR. MARKUS REX**

Vorsitzender

Ministerium für Wissenschaft, Kultur, Bundes- und Europaangelegenheiten Mecklenburg-Vorpommern

### **PROF. DR. OLIVER KÜHN**

Ständiger Gast

Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung Potsdam

### **PROF. DR. KLAUS NEYMEYR**

bis 2023

Universität Rostock, Dekan der Math.-Nat. Fakultät

### **PROF. DR. HANS PETER SCHMID**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Atmosphärische Umweltforschung Garmisch-Partenkirchen

### **DR. SVENJA KRUSE**

stellv. Vorsitzende

Bundesministerium für Bildung und Forschung Bonn

## WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT SCIENTIFIC ADVISORY BOARD

### **PROF. DR. MARKUS REX**

Vorsitzender

Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung Potsdam

### **DR. STEPHAN BUCHERT**

Swedish Institute of Space Physics Uppsala

### **PROF. DR. GEORG CRAIG**

Meteorologisches Institut der Universität München

### **PROF. DR. JOACHIM CURTIUS**

J. W. Goethe-Universität, Institut für Atmosphäre und Umwelt

### **PROF. DR. RALF KOPPMANN**

Bergische Universität Wuppertal, Fachbereich Mathematik und Naturwissenschaften

### **PROF. DR. MAY-BRITT KALLENRODE**

Präsidentin der Stiftung Universität Hildesheim

### **PROF. DR. JUSTUS NOTHOLT**

Universität Bremen, Institut für Umweltpfysik

### **PROF. DR. SUSANNE CREWELL**

Universität zu Köln, Institut für Geophysik und Meteorologie

## MITGLIEDERVERSAMMLUNG BOARD OF MEMBERS

### **PROF. DR. STEFAN LOCHBRUNNER**

Vorsitzender

Universität Rostock, Fachbereich Physik

### **PROF. DR. KARL-HEINZ MEIWES-BROER**

Universität Rostock, AG Moleküle, Cluster, Oberflächen

### **HOLGER WANDSLEB**

Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur Mecklenburg-Vorpommern

### **DR. SVENJA KRUSE**

Bundesministerium für Bildung und Forschung Bonn

### **OLIVER BRÜNNICH**

Norwegischer Honorarkonsul, Stadtwerke AG Rostock

### **RÜDIGER KOZIAN**

Stadt Kühlungsborn, Bürgermeister

### **RAINER KARL**

Kühlungsborn

### **PROF. DR. ALFRED LEDER**

Kühlungsborn

### **PROF. DR. RONALD REDMER**

Universität Rostock, Institut für Physik

### **UTE SCHMIDT †**

bis 2023

Schulzentrum Kühlungsborn, Schulleiterin

### **KNUT WIEK**

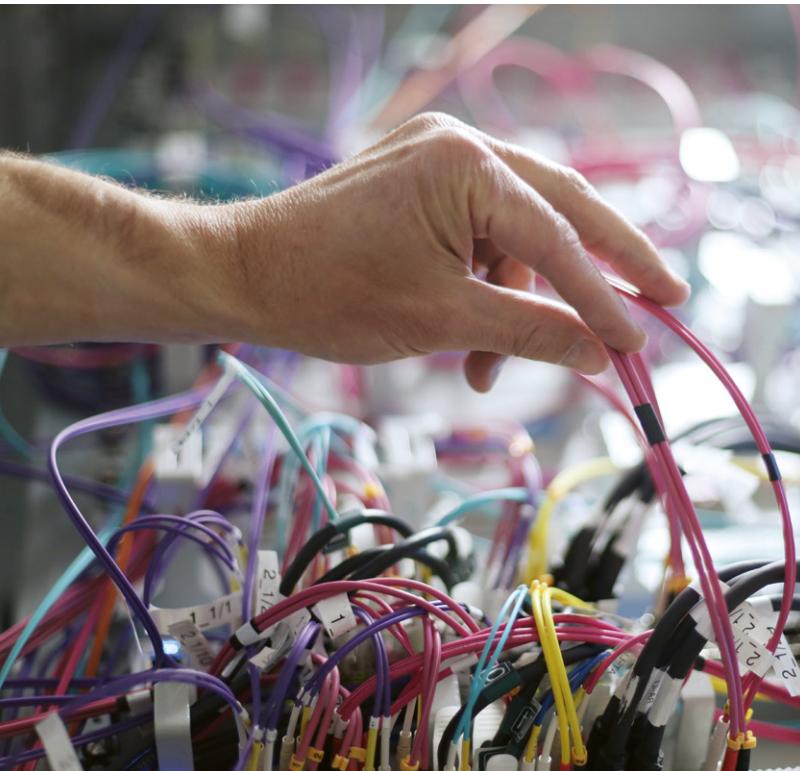
Kühlungsborn

### **PROF. DR. CLAUDIA STOLLE**

Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik

# STANDORTE UND INFRASTRUKTUR

## LOCATIONS AND INFRASTRUCTURE



Das IAP verfügt über verschiedene Werkstätten, die den Aufbau von wissenschaftlichen Experimenten unterstützen. Ein Bereich ist dabei die elektronische Werkstatt. Unsere Fähigkeiten auf diesem Gebiet versetzen uns in die Lage, elektronische Schaltungen nicht nur zu planen, sondern auch deren Aufbau umzusetzen.

Der Workflow umfasst dabei die Entwicklung, die SMD-Bestückung, die Programmierung und den Test von elektronischen Schaltungen. Diese Fähigkeiten ermöglichen uns, den Aufbau der wissenschaftlichen Experimente zu beschleunigen bzw. das Zusammenwirken verschiedener technischer Einheiten zu verbessern.

Darüber hinaus verfügt das IAP über verschiedene Messgeräte, die zur Entwicklung, Prüfung und Instandhaltung von Geräten und Installationen benötigt werden. Hierzu zählen verschiedene Oszilloskope und Analysatoren, mit denen die Eigenschaften von Radarantennen oder Sender- und Empfängerbaugruppen bewertet werden. Mechanische Arbeiten können in der u.a. mit CNC-Fräse, Zyklenrehmaschine, Bandsäge und Schlagschere ausgerüsteten Werkstatt durchgeführt werden.

### **DIE AUSSENSTELLE JULIUSRUH AUF RÜGEN**

Erste Atmosphärenuntersuchungen am Standort Juliusruh wurden anlässlich einer totalen Sonnenfinsternis am 30. Juni 1954 über Südschweden durchgeführt. Sonnenfinsternisse sind von besonderem Interesse, da hierbei die Sonne als Quelle der Ionisation in der Atmosphäre temporär abgeblockt wird. Die Station ging 1957 in Dauerbetrieb und gehört mit den Ionosondenmessungen zu den längsten kontinuierlichen Ionosphären-Messreihen ihrer Art in Europa.

Die IAP-Außenstelle Juliusruh mit dem weithin sichtbaren Wahrzeichen – dem 70 Meter hohen Stahlgittermast, mit dem Hauptgebäude, welches Büros, Labore, Werkstätten und Unterkünfte beherbergt und den verschiedenen Messhütten und -containern befindet sich auf einem über 13 Hektar großen Waldgelände unmittelbar am Ostseestrand.

Mit ihrer vielfältigen Instrumentierung beteiligt sich die IAP-Außenstelle Juliusruh maßgeblich an der Erfüllung der wissenschaftlichen und experimentellen Forschungsarbeit des Instituts, der Untersuchung der Mesosphäre und unteren Thermosphäre

sowie deren langzeitigen Änderungen unter dem Aspekt des Klimawandels.

Folgende Sensoren arbeiten im Frequenzbereich der elektromagnetischen Längstwellen (ab ca. 25 kHz) bis hin zu den oberen Kurzwellen (ca. 32 MHz) und dienen der Erforschung der Ionosphäre in einem Höhenbereich von ca. 60 bis ca. 400 km.

Diese Messgeräte werden für unterschiedliche Zwecke bzw. Zielstellungen sowie im Rahmen verschiedener nationaler, europäischer und internationaler Projekte genutzt:

- Ionomonde: Elektronendichtheprofile ca. 90 – 400 km, Trends, Kurzwellen-Funkprognose, Weltraumwetter-Effekte;
- Partial-Reflection-Radar: Winde und Elektronendichtheprofile ca. 60 – 100 km, Trends;
- Multistatic Specular-Meteor-Radar Sender im Rahmen des SIMONe Netzwerks Deutschland (Meteorwinde 75 – 105 km);
- Phasen-Höhen-Messung: mittlere Höhe der ionosphärischen D-Schicht; ein Magnetometer zur Messung der Variation des Erdmagnetfeldes sowie kleine Kamerasysteme zur Beobachtung sog. Leuchtender Nachtwolken und von Meteoren (Sternschnuppen) komplettieren die Instrumentierung.

The IAP runs various workshops that support the construction of scientific experiments. One area is the electronic workshop, where we have the skills to plan electronic circuits and realise their construction.

The workflow includes the development, SMD assembly, programming and testing of electronic circuits. These skills enable us to accelerate the construction of scientific experiments and improve the interaction of various technical units.

In addition, the IAP is equipped with various measuring instruments that are required for the development, testing and maintenance of devices and installations. These comprise various oscilloscopes and analysers, which are used to evaluate the properties of radar antennas or transmitter and receiver assemblies. Mechanical work can be carried out in the workshop, which is equipped with a CNC milling machine, cycle lathe, band saw and impact shears.

#### THE JULIUSRUH SITE ON THE ISLAND OF RÜGEN

The first atmospheric investigations at the Juliusruh location were carried out on the occasion of a total solar eclipse over southern Sweden on the 30th of June 1954. Solar eclipses are of particular interest as the sun is temporarily blocked as a source of ionisation in the atmosphere. The station went into continuous operation in 1957 and, with its ionomonde measurements, is one of the longest continuous ionosphere measurement series of its kind in Europe.

The IAP Juliusruh field station, with its landmark visible from afar – the 70 metre high steel lattice mast, the main building, which houses offices, laboratories, workshops and accommodation, and the various measurement huts and containers, is located on a 13 hectare forest area directly on the Baltic Sea beach.

With its diverse instrumentation, the IAP Juliusruh branch plays a key role in the fulfilment of the Institute's scientific and experimental research work, the investigation of the mesosphere and



IAP-Außenstelle Juliusruh auf Rügen  
IAP site Juliusrüh on the island of Rügen

lower thermosphere and their long-term changes in terms of climate change.

The following sensors operate in the frequency range of the electromagnetic long waves (from approx. 25 kHz) to the upper short waves (approx. 32 MHz) and are used to study the ionosphere at altitudes of approx. 60 to 400 km.

These measuring devices are used for various purposes and objectives and as part of various national, European and international projects:

- Ionomonde: electron density profiles approx. 90 – 400 km, long-term trends, shortwave radio forecasts, space weather effects;
- Partial reflection radar: winds and electron density profiles approx. 60 – 100 km, long-term trends;
- Multistatic Specular-Meteor-Radar transmitter as part of the SIMONe network Germany (meteor winds 75 – 105 km);
- Phase-height measurement: mean height of the ionospheric D-layer; A magnetometer for measuring the variation of the Earth's magnetic field and small camera systems for observing so-called noctilucent clouds and meteors (small shooting stars) complete the instrumentation.

# PERSONAL UND

# BUDGET

# PERSONNEL AND BUDGET

In den Jahren 2022 und 2023 konnte das IAP mit einem Gesamtbudget von insgesamt 9,13 Mio. € bzw. 9,90 Mio. € wirtschaften. Land und Bund haben davon jeweils zur Hälfte mit einer institutionellen Förderung in Höhe von 7,08 Mio. € bzw. 7,22 Mio. € den größten Anteil getragen.

Neben der institutionellen Förderung kamen Erträge aus Zuwendungen zur Projektfinanzierung in Höhe von 2,05 Mio. € bzw. 2,69 Mio. € dazu. Größter Drittmittelgeber waren neben BMBF, EU und SAW, die DFG. Weitere Erträge wurden aus eigenen Mitteln generiert, vor allem aus der Vermietung des Sendemastes in Juliusruh an die drei großen Telefonanbieter DFMG, Vodafone und Telefonica und aus der Vermietung von Gästewohnungen. Rund 2/3 der institutionellen Förderung stehen dem Institut für Personal- und Sachmittel zur Verfügung. Das IAP hatte in den Jahren 2022 und 2023 einen durchschnittlichen Personalbestand von 66 Mitarbeitenden, wovon durchschnittlich 39 % befristet waren. Das IAP legt großen Wert auf Internationalität. So sind rund 30 % der Beschäftigten international.

Die räumliche Ausstattung des IAP ist sehr gut. Neben der üblichen Infrastruktur (Hauptgebäude mit Labor und Büroräumen, Tagungs- und Verwaltungsgebäude, IT-Gebäude, Werkstatt) verfügt das IAP über eine Vielzahl besonderer Infrastruktureinheiten. Hierzu gehört neben dem Hauptsitz im Ostseebad Kühlungsborn die Außenstelle in Juliusruh mit einem über 60 Jahre alten außergewöhnlichen Stahlgittermast. Weiterhin beteiligt sich das IAP maßgeblich am Betrieb des geophysikalischen Observatoriums ALOMAR auf der Insel Andøya in Nordnorwegen. In Kühlungsborn besitzt und betreibt das Institut zwei Gästeappartements für Gastwissenschaftlerinnen und –wissenschaftler.

In 2022 and 2023, IAP operated with a total budget of € 9.13 million and € 9.90 million respectively. The state and federal governments each provided half of the institutional funding of € 7.09 million and of € 7.22 million, respectively.

In addition to institutional funding, income from grants for project funding totaled by € 2.05 million and by € 2.69 million. In addition to the BMBF, EU and SAW, the DFG was the largest provider of third-party funding. Further income was generated from our own funds, mainly from the leasing of the transmission tower in Juliusruh to the three major telephone providers DFMG, Vodafone and Telefonica and from the leasing of guest apartments. About 2/3rd of the institutional funding is available for personnel and material resources. IAP had an

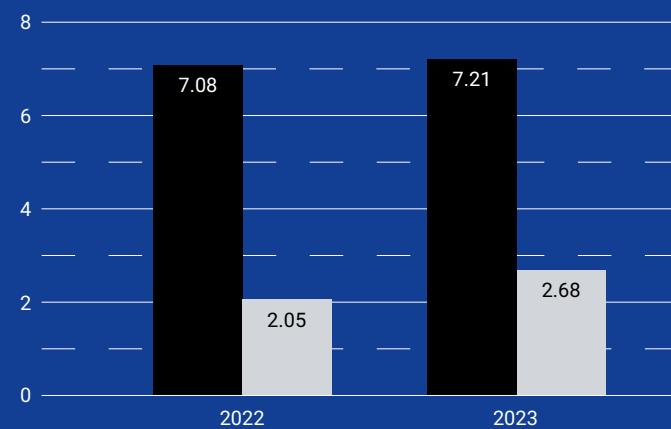
average staff number of 66 in 2022 and 2023, of which an average of 39 % were on fixed-term contract. The IAP emphasizes on internationality. Thus, about 30 % of the employees are international.

The facility equipment of the IAP is very good. In addition to the regular infrastructure (main building with laboratory and offices, conference and administration building, IT building, workshop etc.) IAP operates a number of special infrastructure units. In addition to the headquarters in the Baltic Sea resort of Kühlungsborn, these include the branch office in Juliusruh with an extraordinary steel lattice mast that is over 60 years old. Furthermore, IAP is significantly involved in the operation of the geophysical observatory ALOMAR on the island of Andøya in northern Norway. In Kühlungsborn, the institute owns and operates two guest apartments for visiting scientists.

## Budget / Budget

- INSTITUTIONELLE FÖRDERUNG  
INSTITUTIONAL FUNDING
- DRITTMITTEL  
THIRD-PARTY FUNDING

in Millionen  
in million



## Personal / Personnel



Davon:  
in Wissenschaft 29  
Doktorandinnen und  
Doktoranden 9  
Technik/Administration 31



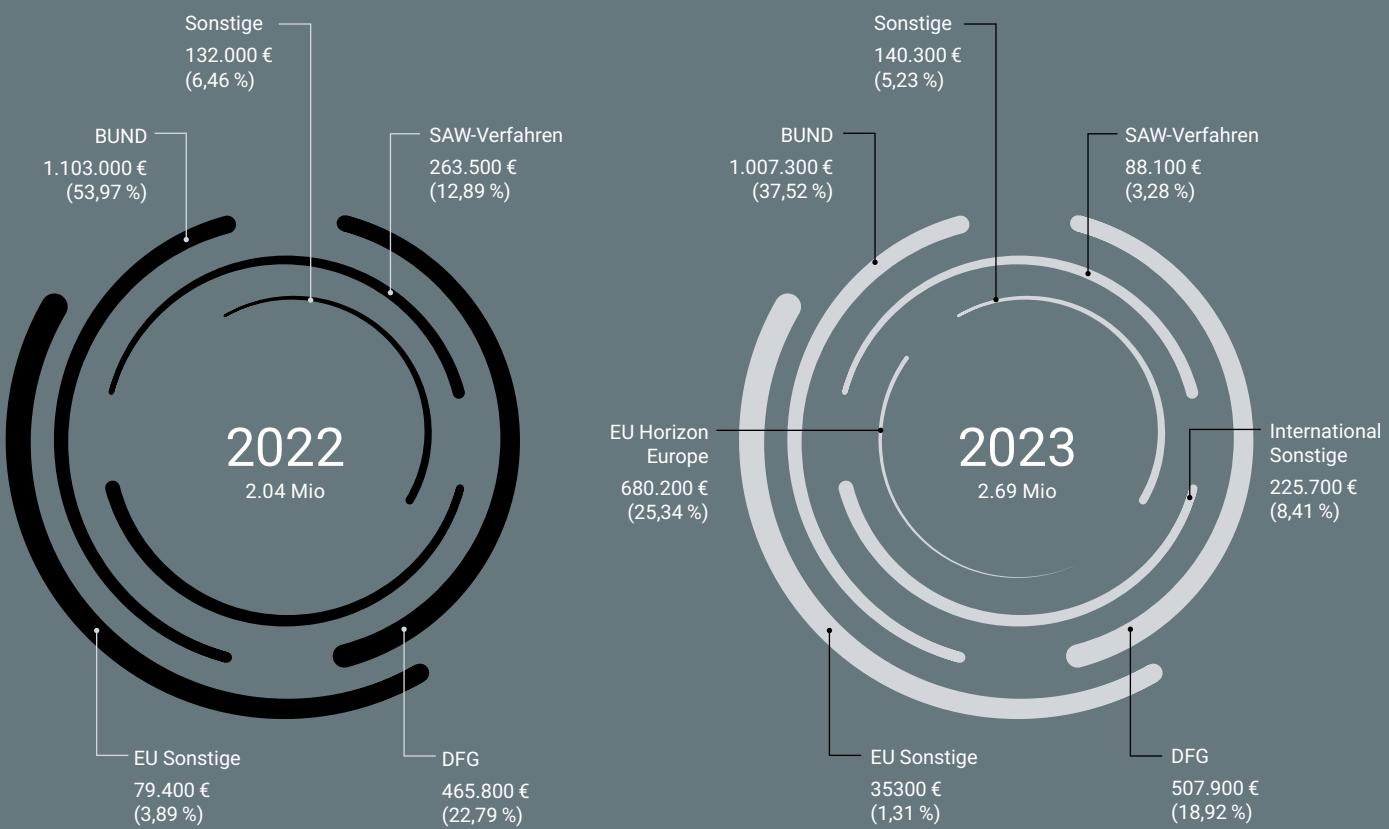
Davon:  
in Wissenschaft 26  
Doktorandinnen und  
Doktoranden 8  
Technik/Administration 29

# DRITTMITTELPROJEKTE

## THIRD-PARTY FUNDING

Zusätzlich zur Grundfinanzierung erhalten wir durch Einwerbung unserer Forschenden weitere finanzielle Mittel als Drittfinanzierung aus Projektzuschüssen. Die jährlichen Einnahmen daraus lagen zwischen den Jahren 2022 und 2023 bei durchschnittlich 2,37 Mio. €. Die größten Beträge wurden vom Bund (rd. 38 %), von der EU (rd. 25 %) und von der DFG (rd. 19 %) eingeworben. Die Verteilung dieser Einnahmen ist in der unteren Abbildung dargestellt. Wir planen, uns weiterhin um Fördermittel von den unten genannten Stellen zu bemühen. Darüber hinaus werden wir unsere externe Finanzierung durch andere Organisationen wie von der EU und der ESA weiter ausbauen.

In addition to the basic funding, we receive further financial resources as third-party funding from project grants applied for by our scientific staff. The average annual income between the years 2022 and 2023 was € 2.37 million. The largest amounts were raised from Bund (approx. 38 %), EU (approx. 25 %) and the DFG (approx. 19 %). The distribution of these revenues is shown in the figure below. We plan to continue to seek funding from the agencies listed below. In addition, we will continue to expand our external funding from other organizations such as from the EU and ESA.



PROJEKTNAMEN PROJECT NAME	KÜRZEL ACRONYM	LAUFZEIT DURATION	GELDGEBER FUNDING AGENCY
Investigations on the generation of nighttime MSTIDs and their role on latitudinal coupling processes	-	2020 – 2022	Alexander von Humboldt Stiftung (Forschungsstipendium für PostDocs)
Understanding the role of ozone in the solar tidal variability in the MLT and ionosphere during sudden stratospheric warmings	-	2020 – 2022	Alexander von Humboldt Stiftung (Forschungsstipendium für PostDocs)
Role Of the Middle atmosphere in Climate	ROMIC	2013 – 2024	BMBF
Trends in the middle atmosphere	TIMA	2014 – 2024	BMBF
Role of gravity waves in the Southern Hemispheric circulation and climate	WASCLIM	2019 – 2022	BMBF
Entwicklung eines mobilen Lidar-Systems in einem Kubikmeter	LIDARCube	2021 – 2027	BMBF
Mobile Lidar Cubes	MoLiCu	2021 – 2022	BMWi
Dichtefeld in Mesosphäre und unterer Thermosphäre: Neutralgas, Elektronen und Spurenstoffe. Strahlungs- und dynamische Bilanz	DEFINE	2023 – 2027	BMWK
Vereinbarung über Vorhersage für die Ausbreitung von Funkwellen durch die Ionosphäre	-	Seit 1994	Bundeswehr
Processes And Climatology Of Gravity waves	PACOG	2014 – 2022	DFG
MultiScale dynamics of Gravity Waves	MSGWaves	2014 – 2023	DFG (Forschungsgruppe)
Mehrskalendynamik von Schwerewellen – Spontanes Ungleichgewicht	SI	2014 – 2023	DFG
Study of Earth system dynamics with a constellation of potential field missions	Dynamic Earth	2016 – 2023	DFG (Schwerpunktprogramm)
Energy transfers in atmosphere and ocean	TRR181	2016 – 2024	DFG (Sonderforschungsbereich/Transregio)
Gravity wave parameterizations for the atmosphere	W1	2016 – 2024	DFG
The role of MLT dynamics at mid and high latitudes on the Ionosphere/Thermosphere weather	DYNAMITE II	2019 – 2022	DFG
Wave coupling processes of the middle and upper atmosphere: Interannual and long-term variability	VACILT	2019 – 2022	DFG

PROJEKTNAMEN PROJECT NAME	KÜRZEL ACRONYM	LAUFZEIT DURATION	GELDGEBER FUNDING AGENCY
Compressed Sensing Radarabbildung polarer mesosphärischer Sommerechos unter Einsatz von Zielverfolgungs- und MIMO-Ansätzen	CS-PMS-MIMO	2020 – 2022	DFG
Windanalysen in der mittleren Atmosphäre mittels nächtlicher RMR-Lidar-Messungen in mittleren Breiten in Kühlungsborn	AMUN	2020 – 2024	DFG
Observationen von Meteor Smoke Partikeln in der mittleren Atmosphäre mit einer neuartigen Lidar-Methode	O-MSP-Li	2023 – 2026	DFG
Polare Mesosphärische Winter-Echos: Rolle der Dynamik und Spurenstoffe	PMWE	2014 – 2022	DLR
Analysis of the Mesosphere and Lower Ionosphere fall Effect	AMELIE	2020 – 2023	DLR
Swarm Data, Innovation, and Science Cluster	Swarm-DISC	2022 – 2024	ESA
Travelling Ionospheric Disturbances Forecasting System	T-FORS	2023 – 2024	EU
European Lidar Array for Atmospheric Climate Monitoring	EULIAA	2023 – 2025	EU
Four dimensional Research applying Modelling and Observations for the Sea and Atmosphere	FORMOSA	2020 – 2023	Leibniz-Gemeinschaft
Dynamic above the Epicentre of Climate Change	DECC	2023 – 2026	NATO
School on Technical and Scientific Aspects of iMST Radar and Lidar on 6-8 September 2024 at IAP	-	2023 – 2024	SCOSTEP
Studies of simultaneous radio, optical and radio signatures of meteors in northern Germany	Non-Specular	2023 – 2027	USAF

# VERÖFFENTLICHUNGEN

## PUBLICATIONS

### 2022

---

L. Alfonsi, N. Bergeot, P. J. Cilliers, G. de Franceschi, E. L. Macotela und et al., [Review of environmental monitoring by means of radiowaves in the polar regions: From atmosphere to geospace](#), Surv. Geophys., doi:10.1007/s10712-022-09734-z, 2022.

M. Amiramjadi, R. Plougonven, A. R. Mohebalhojeh und M. Mirzaei, [Using machine learning to estimate non-orographic gravity wave characteristics at source levels](#), J. Atmos. Sci., doi:10.1175/JAS-D-22-0021.1, 2022.

M. Ardalan, P. Keckhut, A. Hauchecorne, R. Wing, M. Meftah und G. Farhani, [Updated Climatology of Mesospheric Temperature Inversions Detected by Rayleigh Lidar above Observatoire de Haute Provence, France, Using a K-Mean Clustering Technique](#), Atmosphere, doi:10.3390/atmos13050814, 2022.

H. Charuvil Asokan, J. L. Chau, R. Marino, J. Vierinen, F. Vargas, J. M. Urco, M. Clahsen und C. Jacobi, [Frequency spectra of horizontal winds in the mesosphere and lower thermosphere region from multistatic specular meteor radar observations during the SIMONE 2018 campaign](#), Earth Plan. Space, doi:10.1186/s40623-022-01620-7, 2022.

H. Charuvil Asokan, J. L. Chau, M. F. Larsen, J. F. Conte, R. Marino, G. Baumgarten, J. Vierinen und S. Borchert, [Validation of multistatic meteor radar analysis using modeled mesospheric dynamics: An assessment of the reliability of gradients and vertical velocities](#), J. Geophys. Res., 127, e2021JD036039, doi:10.1029/2021JD036039, 2022.

V. Avsarkisov, E. Becker und T. Renkowitz, [Turbulent parameters in the middle atmosphere: Theoretical estimates deduced from a gravity wave resolving general circulation model](#), J. Atmos. Sci., doi:10.1175/JAS-D-21-0005.1, 2022.

E. Becker, S. L. Vadas, K. Bossert, V. L. Harvey, C. Zülicke und L. Hoffmann, [A high-resolution whole-atmosphere model with resolved gravity waves and specified large-scale dynamics in the troposphere and stratosphere](#), J. Geophys. Res., 127, doi:10.1029/2021JD035018, 2022.

B. Boyde, A. Wood, R. A. Fallows, D. Themens, J. Mielich, S. Elvidge und et al., [Lensing from small-scale travelling ionospheric disturbances observed using LOFAR](#), J. Space Weather Space Clim., 12, doi:10.1051/swsc/2022030, 2022.

J. L. Chau, J. M. Urco, T. Weber und J. O. Aweda, [Atmospheric radar imaging improvements using compressed sensing and MIMO](#), 369-400, in Compressed Sensing in Information Processing, Springer International Publishing, Cham, doi:10.1007/978-3-031-09745-4\_12, 2022.

M. Chernigovskaya, B. Shpynev, D. Khabituev, K. Ratovsky, A. Belinskaya, A. Stepanov, V. Bychkov, S. Grigoreva, V. Panchenko und J. Mielich, [Studying the response of the mid-latitude ionosphere of the northern hemisphere to magnetic storms in march 2012](#), Solar Terr. Phys., 8, 44-54, doi:10.12737/stp-84202204, 2022.

J. F. Conte, J. L. Chau, A. Liu, Z. Qiao, D. Fritts, J. L. Hormaechea, J. O. Salvador und M. Milla, [Comparison of MLT momentum fluxes over the Andes at four different latitudinal sectors using multistatic radar configurations](#), J. Geophys. Res., 127, e2021JD035982, doi:10.1029/2021JD035982, 2022.

P. Dalin, H. Suzuki, N. Pertsev, V. Perminov, D. Efremov, P. Voelger, V. L. Narayanan, I. Mann, I. Häggström, M. Zalcik, O. Ugonikov, J. Hedin, J. Gumbel, R. Latteck und G. Baumgarten, [Studies of noctilucent clouds from the stratosphere during the SONC balloon- borne experiment in 2021](#), J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 240, doi:10.1016/j.jastp.2022.105959, 2022.

J. Froh, J. Höffner, A. Mauer, T. H. Mense, R. Eixmann, F.-J. Lübken, A. Munk, M. Strotkamp und B. Jungbluth, [Aerosol measurements in the tropo- and stratosphere by spectral splitting of Rayleigh and Mie signals within a compact lidar of 1m<sup>3</sup>](#), SPIE, 12265, doi:10.1117/12.2636289, 2022.

A. Gabriel, [Ozone-gravity wave interaction in the upper stratosphere/lower mesosphere](#), Atmos. Chem. Phys., doi:10.5194/acp-22-10425-2022, 2022.

P. Ghosh, M. He, R. Latteck, T. Renkowitz, V. Avsarkisov, M. Zecha und J. L. Chau, [Characteristics of frequency-power spectra in the troposphere and lower stratosphere over Andøya, Norway \(69.30°N, 16.04°E\) revealed by MAARSY](#), J. Geophys. Res., doi:10.1029/2021JD036343, 2022.

- V. L. Harvey, C. E. Randall, S. M. Bailey, E. Becker, J. L. Chau, C. Y. Cullens, L. P. Goncharenko, L. L. Gordley, N. P. Hindley, R. S. Lieberman, H. Liu, L. Megner, S. E. Palo, N. M. Pedatella, D. E. Siskind, F. Sassi, A. K. Smith, G. Stober, C. Stolle und J. Yue, **Improving ionospheric predictability requires accurate simulation of the mesospheric polar vortex**, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, doi:10.3389/fspas.2022.1041426, 2022.
- B. Heilig, C. Stolle, G. Kervalishvili, J. Rauberg, Y. Miyoshi, F. Tsuchiya, A. Kumamoto, Y. Kasahara, M. Shoji, M. Kitahara und I. Shinohara, **Relation of the plasmapause to the midlatitude ionospheric trough, the sub-auroral temperature enhancement and the distribution of small-scale field aligned currents as observed in the magnetosphere by THEMIS, RBSP, and arase, and in the topside ionosphere by swarm**, J. Geophys. Res., 127, e2021JA029646, doi:10.1029/2021JA029646, 2022.
- D. Huyghebaert, M. Clahsen, J. L. Chau, T. Renkwick, R. Latteck, M. G. Johnson und J. Vierinen, **Multiple e-region radar propagation modes measured by the VHF SIMONe norway system during active ionospheric conditions**, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, doi:10.3389/fspas.2022.886037, 2022.
- D. Huyghebaert, D. Billett, A. Chartier, J. L. Chau, G. C. Hussey, D. G. Hysell, J. Vierinen und et al., **The future of auroral E-region plasma turbulence research**, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, doi:10.3389/fspas.2022.1062358, 2022.
- D. L. Hysell, J. L. Chau, J. F. Conte, R. Flores und M. A. Milla, **Inferring Zonal Wind Profiles in the Equatorial Electrojet From Coherent Scatter**, URSI Radio Sci. Letters, 4, doi:10.46620/22-0019, 2022.
- J. Jaen, T. Renkwick, J. L. Chau, M. He, P. Hoffman, Y. Yamazaki, C. Jacobi, M. Tsutsumi, V. Matthias und C. Hall, **Long-term studies of mesosphere and lower-thermosphere summer length definitions based on mean zonal wind features observed for more than one solar cycle at middle and high latitudes in the northern hemisphere**, Ann. Geophys., 40, 23-35, doi:10.5194/angeo-40-23-2022, 2022.
- Y. Jin, D. Kotova, C. Xiong, S. M. Brask, L. B. N. Clausen, G. Kervalishvili, C. Stolle und et al., **Ionospheric Plasma IRregularities – IPIR – Data Product Based on Data From the Swarm Satellites**, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2021JA030183, 2022.
- S. Khaykin, A. Podglajen, F. Ploeger, R. Wing, G. Baumgarten, M. Gerding und et al., **Global perturbation of stratospheric water and aerosol burden by Hunga eruption**, Commun Earth Environ, doi:10.1038/s43247-022-00652-x, 2022.
- M. Yu. Kulikov, M. V. Belikovich, M. Grygalashvily, G. R. Sonnemann und A. M. Feigin, **Retrieving daytime distributions of O, H, OH, HO<sub>2</sub>, and chemical heating rate in the mesopause region from satellite observations of ozone and OH\* volume emission: The evaluation of the importance of the reaction H + O<sub>3</sub> → O<sub>2</sub> + OH in the ozone balance**, Adv. Space Res., 69, 3362-3373, doi:10.1016/j.asr.2022.02.011, 2022.
- M. Yu. Kulikov, M. V. Belikovich, M. Grygalashvily, G. R. Sonnemann und A. M. Feigin, **The revised method for retrieving daytime distributions of atomic oxygen and odd-hydrogens in the mesopause region from satellite observations**, Earth Plan. Space, 74, doi:10.1186/s40623-022-01603-8, 2022.
- A. Lange, G. Baumgarten, A. Rozanov und C. von Savigny, **On the colour of noctilucent clouds**, Ann. Geophys., doi:10.5194/angeo-40-407-2022, 2022.
- F.-J. Lübken, **Physics in the mesosphere/lower thermosphere: A personal perspective**, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, doi:10.3389/fspas.2022.1000766, 2022.
- K. Lubyk, M. M. Hoque und C. Stolle, **Evaluation of the midlatitude ionospheric trough using grace data**, Remote Sens., 14(17), doi:10.3390/rs14174384, 2022.
- I. Michaelis, K. Styp-Rekowski, J. Rauberg, M. Korte und C. Stolle, **Geomagnetic data from the GOCE satellite mission**, Earth Plan. Space, doi:10.1186/s40623-022-01691-6, 2022.
- J. Norberg, S. Käki, L. Roininen, J. Mielich und I. I. Virtanen, **Model-free approach for regional ionospheric multi-instrument imaging**, J. Geophys. Res., 128, doi:10.1029/2022JA030794, 2022.
- F. L. Poblet, J. L. Chau, J. F. Conte, V. Avsarkisov, J. Vierinen und H. Charuvil Asokan, **Horizontal wavenumber spectra of vertical vorticity and horizontal divergence of mesoscale dynamics in the mesosphere and lower thermosphere using multistatic specular meteor radar observations**, Earth and Space Science, doi:10.1029/2021EA002201, 2022.
- J. Rodriguez-Zuluaga, C. Stolle, D. Hysell und D. Knudsen, **Topside equatorial spread F-related field-aligned Poynting flux: Observations and simulations**, Earth Plan. Space, doi:10.1186/s40623-022-01679-2, 2022.
- D. Rout, R. Singh, K. Pandey, T. K. Pant, C. Stolle, D. Chakrabarty, S. Thampi und S. Bag, **Evidence for presence of a global quasi-resonant mode of oscillations during high-intensity long-duration continuous AE activity (HILDCAA) events**, Earth Plan. Space, doi:10.1186/s40623-022-01642-1, 2022.
- S. Sarkhel, G. Stober, J. L. Chau, S. M. Smith, C. Jacobi, S. Mondal, M. G. Mlynczak und J. M. Russell III, **A case study of a ducted gravity wave event over northern Germany using simultaneous airglow imaging and wind-field observations**, Ann. Geophys., doi:10.5194/angeo-40-179-2022, 2022.
- E. A. Satterfield, J. A. Waller, D. D. Kuhl, D. Hodyss, K. W. Hoppel, S. D. Eckermann, J. P. McCormack, J. Ma, D. C. Fritts, H. Iimura, G. Stober, C. E. Meek, C. Hall, C. Jacobi, R. Latteck, N. J. Mitchell, P. J. Espy, G. Li, P. Brown, W. Yi, N. Li, P. Batista, I. M. Reid, E. Sunkara, T. Moffat-Griffin, D. J. Murphy, M. Tsutsumi und J. Marino, **Statistical parameter estimation for observation error modelling: Application to meteor radars**, 185-213, in **Data assimilation for atmospheric, oceanic and hydrologic applications (Vol. IV)**, Springer International Publishing, S. K. Park und L. Xu, Cham, doi:10.1007/978-3-030-77722-7\_8, 2022.

- T. A. Siddiqui, J. L. Chau, C. Stolle und et al., **Migrating solar diurnal tidal variability during northern and southern hemisphere sudden stratospheric warmings**, Earth Plan. Space, doi:10.1186/s40623-022-01661-y, 2022.
- M. Sivakandan, Martinis, C., Otsuka, Y., Chau, J. L., Norrell, J., Mielich, J., Conte, J. F., Stolle, C., Rodríguez-Zuluaga, J., Shinbori, A., Nishioka, M. und Tsugawa, T., **On the role of E-F region coupling in the generation of nighttime MSTIDs during summer and equinox: Case studies over northern germany**, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2021JA030159, 2022.
- G. Soaris, Y. Yamazaki, A. Morschhauser, J. Matzka, K. J. Pinheiro, C. Stolle, P. Alken, A. Yoshikawa, K. Hozumi, A. Kulkarni, und P. Supnithi, **Using principal component analysis of satellite and ground magnetic data to model the equatorial electrojet and derive its tidal composition**, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2022JA030691, 2022.
- T. C. Spiegl, S. Yoden, U. Langematz, T. Sato, R. Chhin, S. Noda, F. Miyake, K. Kusano, K. Schaar und M. Kunze, **Modeling the Transport and Deposition of  $^{10}\text{Be}$  Produced by the Strongest Solar Proton Event During the Holocene**, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2021JD035658, 2022.
- B. Strelnikov, M. Rapp, D. C. Fritts und L. Wang, **Assessment of the precision of spectral model turbulence analysis techniques using direct numerical simulation data**, J. Geophys. Res., doi:10.1029/2021JD035516, 2022.
- K. Styp-Rekowski, I. Michaelis, C. Stolle, J. Baerenzung, M. Korte und O. Kao, **Machine learning-based calibration of the GOCE satellite platform magnetometers**, Earth Plan. Space, doi:10.1186/s40623-022-01695-2, 2022.
- T. G. W. Verhulst, D. Altadill, V. Barta, A. Belehaki, J. Mielich und et al., **Multi-instrument detection in Europe of ionospheric disturbances caused by the 15 January 2022 eruption of the Hunga volcano**, J. Space Weather Space Clim., 12, doi:10.1051/swsc/2022032, 2022.
- J. Vierinen, T. Aslaksen, J. L. Chau, M. Gritsevich, G. Gustavsson und et al., **Multi-instrument observations of the Pajala fireball: Origin, characteristics, and atmospheric implications**, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, doi:10.3389/fspas.2022.1027750, 2022.
- A. K. Virkki, S. E. Marshall, E. Franco Diaz und et al., **Arecibo Planetary Radar Observations of Near-Earth Asteroids: 2017 December–2019 December**, Planet. Sci. Journal, 3, doi:10.3847/PSJ/ac8b72, 2022.
- C. Xiong, H. Jiang, R. Yan, H. Lühr, C. Stolle, F. Yin, A. Smirnov, M. Piersanti, Y. Liu, X. Wan, P. Diego, Z. Zhima, X. Shen, M. Förster, St. Buchert und D. Bilitza, **Solar Flux Influence on the In-Situ Plasma Density at Topside Ionosphere Measured by Swarm Satellites**, J. Geophys. Res., 127, doi:10.1029/2022JA030275, 2022.
- Y. Yamazaki, C. Arras, S. Andoh, Y. Miyoshi, H. Shinagawa, B. J. Harding, C. Englert, T. Immel, S. Sobhkhiz-Miandehi und C. Stolle, **Examining the wind shear theory of sporadic E with ICON/MIGHTI winds and COSMIC-2 radio occultation data**, Geophys. Res. Lett., 49, e2021GL096202, doi:10.1029/2021GL096202, 2022.
- Y. Yamazaki, J. Matzka, C. Stolle, G. Kervalishvili, J. Rauberg, O. Bronkalla, A. Morschhauser, S. Bruinsma, Y. Y. Shprits und D. R. Jackson, **Geomagnetic activity index hpo**, Geophys. Res. Lett., 49, e2022GL098860, doi:10.1029/2022GL098860, 2022.
- Y. Yamazaki, G. Soares und J. Matzka, **Geomagnetic detection of the atmospheric acoustic resonance at 3.8 mHz during the hunga tonga eruption event on 15 january 2022**, J. Geophys. Res., 127, doi:10.1029/2022JA030540, 2022.
- Y. Yamazaki, **Solar and lunar daily geomagnetic variations and their equivalent current systems observed by Swarm**, Earth Plan. Space, 74, doi:10.1186/s40623-022-01656-9, 2022.
- E. Yiğit, H. Lühr, A. S. Medvedev, W. Ward, A. G. Elias, J. L. Chau, Y. Miyoshi, S. Jain und L. Liu, **Editorial: Coupling processes in terrestrial and planetary atmospheres**, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 9, doi:10.3389/fspas.2022.857766, 2022.
- K. Zawdie, A. Belehaki, M. Burleigh, M. Sivakandan und et al., **Impacts of acoustic and gravity waves on the ionosphere**, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 9, doi:10.3389/fspas.2022.1064152, 2022.
- ## 2023
- 
- V. Avsarkisov und J. F. Conte, **The Role of Stratified Turbulence in the Cold Summer Mesopause Region**, J. Geophys. Res., 128, e2022JD038322, doi:10.1029/2022JD038322, 2023.
- J. E. Borovsky, J. L. Chau, G. A. de Nolfo, A. Greco, E. E. Grigorenko, Y. Miyoshi, N. Partamies und M. E. Usanova, **Editorial: Generation-to-generation communications in space physics**, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, doi:10.3389/fspas.2023.1195579, 2023.
- A. Buzas, D. Kouba, J. Mielich, D. Buresova, Z. Mozna, P. Koucka Knizova und V. Barta, **Investigating the effect of large solar flares on the ionosphere based on novel Digisonde data comparing three different methods**, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, doi:10.3389/fspas.2023.1201625, 2023.
- J. L. Chau, W. J. Longley, P. M. Reyes, M. N. Pedatella, Y. Otsuka, C. Stolle, H. Liu, S. L. England, J. P. Vierinen, M. A. Milla, D. L. Hysell, M. M. Oppenheim, A. Patra, G. Lehmann und E. Kudeki, **Solved and unsolved riddles about low-latitude daytime valley region plasma waves and 150-km echoes**, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, doi:10.3389/fspas.2023.1091319, 2023.

- J. F. Conte, J. L. Chau, E. Yiğit, J. Suclupe und R. Rodriguez, **Investigation of Mesosphere and Lower Thermosphere Dynamics over Central and Northern Peru Using SIMONE Systems**, *J. Atmos. Sci.*, doi:10.1175/JAS-D-23-0030.1, 2023.
- J. Faber, M. Gerding und T. Köpnick, **Acquiring high-resolution wind measurements by modifying radiosonde sounding procedures**, *Atmos. Meas. Tech.*, 16, 4183-4193, doi:10.5194/amt-16-4183-2023, 2023.
- H. U. Frey, S. B. Mende, R. R. Meier, U. Kamaci, J. M. Urco, F. Kamalabadi, S. L. England und T. J. Immel, **In Flight Performance of the Far Ultraviolet Instrument (FUV) on ICON**, *Space Sci. Rev.*, doi:10.1007/s11214-023-00969-9, 2023.
- D. C. Fritts, G. Baumgarten, P. D. Pautet, J. H. Hecht, B. P. Williams, N. Kaifler, B. Kaifler, C. B. Kjellstrand, L. Wang, M. J. Taylor und A. D. Miller, **Kelvin Helmholtz Instability "Tube" & "Knot" Dynamics, Part I: Expanding Observational Evidence of Occurrence and Environmental Influences**, *J. Atmos. Sci.*, doi:10.1175/JAS-D-22-0189.1, 2023.
- P. Ghosh, T. Renkwitz, R. Latteck, V. Avsarkisov und J. L. Chau, **Momentum Flux and Vertical Wind Power Spectral Characteristics in the Troposphere and Lower Stratosphere Over Andøya, Norway as Observed by MAARSY**, *Geophys. Res. Lett.*, 50, e2022GL101524, doi:10.1029/2022GL101524, 2023.
- H. Haralambous, M. Guerra, J. Chum, T. G. W. Verhulst, V. Barta, D. Altadill, C. Cesaroni, I. Galkin, K. Marta, J. Mielich, D. Kouba, D. Buresova, A. Segarra, L. Spogli, J. Rusz und J. Zednik, **Multi-Instrument Observations of Various Ionospheric Disturbances Caused by the 6 February 2023 Turkey Earthquake**, *J. Geophys. Res.*, 128, e2023JA031691, doi:10.1029/2023JA031691, 2023.
- Y. Huang, Ch. Xiong, J. Wu, C. Stolle, F. Wang, Y. Zheng, Ch. Xu, Y. Hu und S. Wang, **Dayside Vertical Wind Reversal at Transition Altitude from E to F Regions Observed by the ICON Satellite**, *Earth and Space Science*, 10, e2023EA002836, doi:10.1029/2023EA002836, 2023.
- D. Huyghebaert, J. L. Chau, A. Spicher, M. F. Ivarsen, M. Clahsen, R. Latteck und J. Vierinen, **Investigating Spatial and Temporal Structuring of E-Region Coherent Scattering Regions Over Northern Norway**, *J. Geophys. Res.*, 128, e2023JA031682, doi:10.1029/2023JA031682, 2023.
- D. L. Hysell und J. L. Chau, **Aperture Synthesis Imaging of Ionospheric Irregularities Using Time Diversity MIMO Radar**, *Radio Sci.*, 58, e2023RS007765, doi:10.1029/2023RS007765, 2023.
- C. Jacobi, A. Kuchar, T. Renkwitz und J. Jaen, **Long-term trends of midlatitude horizontal mesosphere/lower thermosphere winds over four decades**, *Adv. Radio Sci.*, doi:10.5194/ars-21-1-2023, 2023.
- J. Jaen, T. Renkwitz, H. Liu, C. Jacobi, R. Wing, A. Kuchavr, M. Tsutsumi, N. Gulbrandsen und J. L. Chau, **Long-term studies of the summer wind in the mesosphere and lower thermosphere at middle and high latitudes over Europe**, *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 14871-14887, doi:10.5194/acp-23-14871-2023, 2023.
- S. Kumar, T. A. Siddiqui, C. Stolle, N. M. Pedatella und D. Pallamraju, **Impact of strong and weak stratospheric polar vortices on geomagnetic semidiurnal solar and lunar tides**, *Earth Plan. Space*, 75, doi:10.1186/s40623-023-01810-x, 2023.
- G. Mitra, A. Guharay, J. F. Conte und J. L. Chau, **Signature of Two-Step Non-Linear Interactions Associated to Zonally Symmetric Waves During Major Sudden Stratospheric Warmings**, *Geophys. Res. Lett.*, 50, e2023GL104756, doi:10.1029/2023GL104756, 2023.
- A. Munk, S. Scheuer, M. Strotkamp, B. Jungbluth, J. Froh, T. Mense, A. Mauer und J. Höffner, **Energy-scaling of diode-pumped Alexandrite laser and prototype development for a compact general-purpose Doppler lidar**, *Appl. Optics*, 62, 8732-8740, doi:10.1364/AO.504567, 2023.
- K. S. Paul, H. Haralambous, C. Oikonomou, A. K. Singh, T. L. Gulyaeva, V. A. Panchenko, D. Altadill, D. Buresova, J. Mielich und T. Verhulst, **Mid-latitude spread F over an Extended European area**, *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 248, 106093, doi:10.1016/j.jastp.2023.106093, 2023.
- F. Poblet, J. L. Chau, J. F. Conte, J. Vierinen, J. Suclupe, A. Liu und R. R. Rodriguez, **Extreme Horizontal Wind Perturbations in the Mesosphere and Lower Thermosphere Over South America Associated With the 2022 Hunga Eruption**, *Geophys. Res. Lett.*, 50, e2023GL103809, doi:10.1029/2023GL103809, 2023.
- F. L. Poblet, J. Vierinen, V. Avsarkisov, J. F. Conte, H. Charuvil Asokan, C. Jacobi und J. L. Chau, **Horizontal correlation functions of wind fluctuations in the mesosphere and lower thermosphere**, *J. Geophys. Res.*, 128, e2022JD038092, doi:10.1029/2022JD038092, 2023.
- L. H. Qiu, X. Lu, T. Yu, Y. Yamazaki, H. X. Liu, Y. Y. Sun, H. N. Wu, X. M. Zuo, X. X. Yan, Y. Yu und Y. F. Qi, **Horizontal structure of convergent wind shear associated with sporadic E layers over East Asia**, *Earth Planet. Phys.*, 7, 548-557, doi:10.26464/epp2023071, 2023.
- L. H. Qiu, Y. Yamazaki, T. Yu, Y. Miyoshi und X. Zuo, **Numerical Investigation on the Height and Intensity Variations of Sporadic E Layers at Mid-Latitude**, *J. Geophys. Res.*, 128, e2023JA031508, doi:10.1029/2023JA031508, 2023.
- L. H. Qiu, Y. Yamazaki, T. Yu, E. Becker, Y. Miyoshi, Y. Qi, T. A. Siddiqui, C. Stolle, W. Feng, J. M. C. Plane, Y. Liang und H. Liu, **Numerical Simulations of Metallic Ion Density Perturbations in Sporadic E Layers Caused by Gravity Waves**, *Earth and Space Science*, 10, e2023EA003030, doi:10.1029/2023EA003030, 2023.
- K. Ramachandran, M. Sivakandan, J. L. Chau, J. M. Urco, M. Gerding, S. Grundmann und St. M. Smith, **Investigation of a dissipating mesospheric bore using airglow imager and direct numerical simulation**, *J. Geophys. Res.*, 128, e2022JA031114, doi:10.1029/2022JA031114, 2023.

- M. Ratynski, S. Khaykin, A. Hauchecorne, R. Wing, J.-P. Cammas, Y. Hello und P. Keckhut, **Validation of Aeolus wind profiles using ground-based lidar and radiosonde observations at Réunion Island and the Observatoire de Haute-Provence**, *Atmos. Meas. Tech.*, 16, 997-1016, doi:10.5194/amt-16-997-2023, 2023.
- T. Renkwitz, M. Sivakandan, J. Jaen und W. Singer, **Ground-based noontime D-region electron density climatology over northern Norway**, *Atmos. Chem. Phys.*, 23, 10823-10834, doi:10.5194/acp-23-10823-2023, 2023.
- D. Rout, S. Patra, S. Kumar, D. Chakrabarty, G. D. Reeves, C. Stolle, K. Panday, S. Chakraborty und E. A. Spencer, **The Growth of Ring Current/SYM-H Under Northward IMF Bz Conditions Present During the 21-22 January 2005 Geomagnetic Storm**, *Space Weather*, 21, e2023SW003489, doi:10.1029/2023SW003489, 2023.
- K. Sato, Y. Tomikawa, M. Kohma, R. Yasui, D. Koshin, H. Okui, S. Watanabe, K. Miyazaki, M. Tsutsumi, D. Murphy, C. Meek, Y. Tian, M. Ern, G. Baumgarten, J. L. Chau, X. Chu, R. Collins, P. J. Espy, H. Hachiguchi, A. J. Kavanagh, R. Latteck, F.-J. Lübken, M. Milla, S. Nozawa, Y. Ogawa, K. Shiokawa, M. J. Alexander, T. Nakamura und W. E. Ward, **Interhemispheric coupling study by observations and modelling (icsom): Concept, campaigns, and initial results**, *J. Geophys. Res.*, 128, e2022JD038249, doi:10.1029/2022JD038249, 2023.
- U. Schaefer-Rolffs, **A Dynamic Mixed Model for General Circulation models**, *Meteorol. Z.*, doi:10.1127/metz/2023/1160, 2023.
- L. Schreiter, C. Stolle, J. Rauberg, G. Kervalishvili, J. van den Issel und D. Arnold, **Topside Ionosphere Sounding From the CHAMP, GRACE, and GRACE-FO Missions**, *Radio Sci.*, 58, e2022RS007552, doi:10.1029/2022RS007552, 2023.
- M. Sivakandan, J. Mielich, T. Renkwitz, J. L. Chau, J. Jaen und J. Lastowicka, **Long-Term Variations and Residual Trends in the E, F, and Sporadic E (Es) Layer Over Juliusruh, Europe**, *J. Geophys. Res.*, 128, e2022JA031097, doi:10.1029/2022JA031097, 2023.
- S. Sobhkhiz-Miandehi, Y. Yamazaki, C. Arras und D. Themens, **A comparison of FORMOSAT-3/COSMIC radio occultation and ionosonde measurements in sporadic E detection over mid- and low-latitude regions**, *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, doi:10.3389/fspas.2023.1198071, 2023.
- C. Stolle, J. Baerenzung, E. A. Kronberg, J. Kusche, H. Liu und H. Shimizu, **Special issue “DynamicEarth: Earth’s interior, surface, ocean, atmosphere, and near space interactions”**, *Earth Plan. Space*, 75, doi:10.1186/s40623-023-01893-6, 2023.
- S. L. Vadas, E. Becker, K. Bossert, G. Baumgarten, L. Hoffmann und V. L. Harvey, **Secondary Gravity Waves From the Stratospheric Polar Vortex Over ALOMAR Observatory on 12-14 January 2016: Observations and Modeling**, *J. Geophys. Res.*, 128, e2022JD036985, doi:10.1029/2022JD036985, 2023.
- C. E. Valladares, Y. L. Chen, M. Herston, J. L. Chau und R. Dhanya, **Observation of Scintillation Enhancements and Large-Scale Structures Within the Equatorial Ionization Anomaly During a Sudden Stratospheric Warming Event**, *J. Geophys. Res.*, 128, e2022JA030985, doi:10.1029/2022JA030985, 2023.
- A. Vellalassery, G. Baumgarten, M. Grygalashvyly und F.-J. Lübken, **Greenhouse gas effects on the solar cycle response of water vapour and noctilucent clouds**, *Ann. Geophys.*, 41, 289-300, doi:10.5194/angeo-41-289-2023, 2023.
- E. Vorobeva, J. Assink, P. J. Espy, T. Renkwitz, I. Chunzuchov und S. P. Näsholm, **Probing Gravity Waves in the Middle Atmosphere Using Infrasound From Explosions**, *J. Geophys. Res.*, 128, e2023JD038725, doi:10.1029/2023JD038725, 2023.
- Y. Yamazaki, **A method to derive Fourier-wavelet spectra for the characterization of global-scale waves in the mesosphere and lower thermosphere and its MATLAB and Python software (fourierwavelet v1.1)**, *Geoscientific Model Development*, 16, 4749-4766, doi:10.5194/gmd-16-4749-2023, 2023.
- Y. Yamazaki, B. J. Harding, L. Qiu, C. Stolle, T. A. Siddiqui, Y. Miyoshi, C. R. Englert und S. L. England, **Monthly Climatologies of Zonal-Mean and Tidal Winds in the Thermosphere as Observed by ICON/MIGHTI during April 2020 – March 2022**, *Earth and Space Science*, 10, e2023EA002962, doi:10.1029/2023EA002962, 2023.
- C. Zhai, X. Cai, W. Wang, A. Coster, L. Qiang, S. C. Solomon, T. Yu und M. He, **Mid-Latitude Ionospheric Response to a Weak Geomagnetic Activity Event During Solar Minimum**, *J. Geophys. Res.*, 128, e2022JA030908, doi:10.1029/2022JA030908, 2023.

# DOKTORARBEITEN DOCTORATE THESES

2022

## DOKTORARBEITEN

### PHD THESES

**Asokan, Harikrishnan Charuvil:** Investigations of Mesosphere and Lower Thermosphere Mesoscale Dynamics Using Ground-based Measuring Techniques



Serhat Can



Harikrishnan Charuvil Asokan

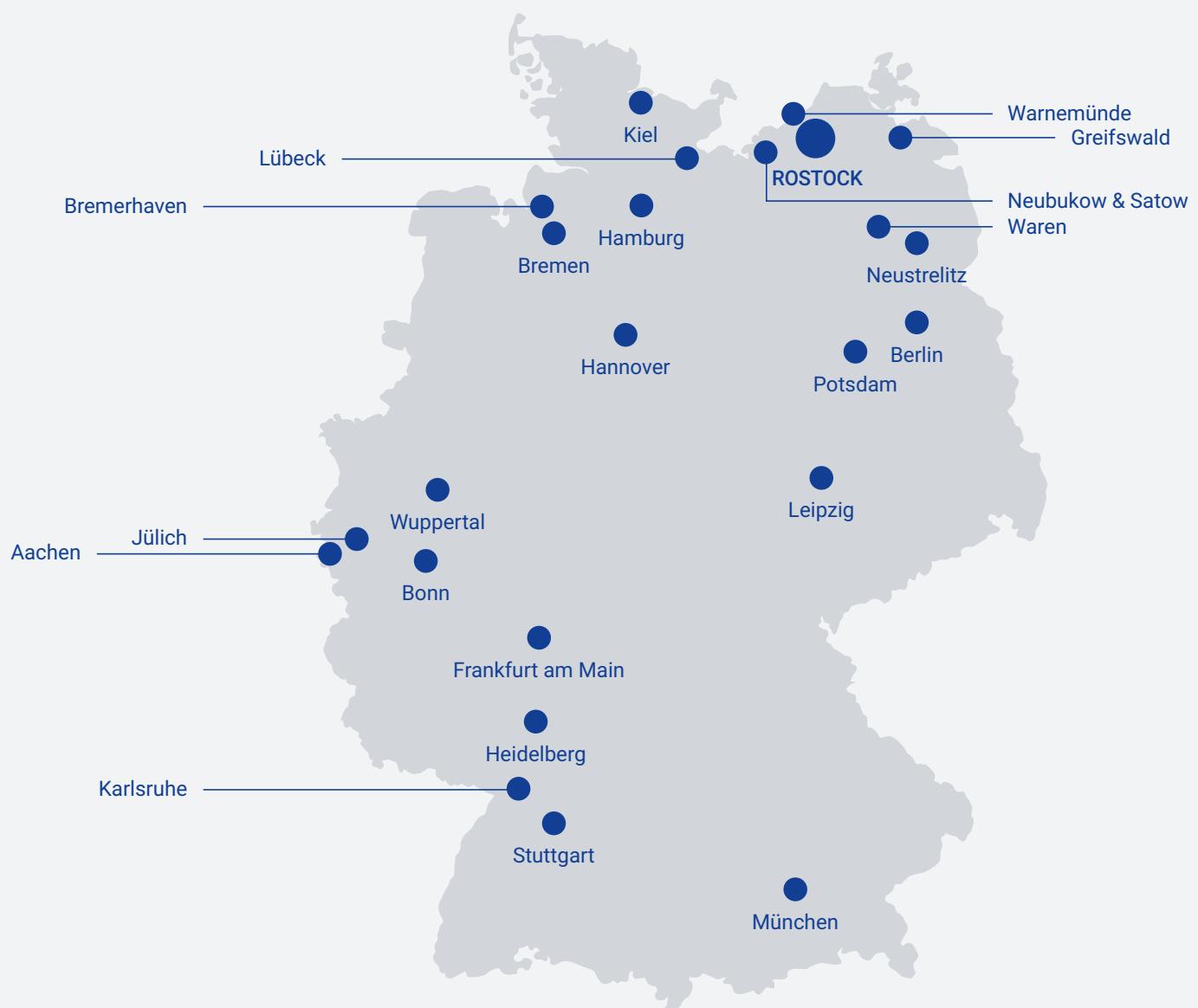
2023

## DOKTORARBEITEN PHD THESES

**Can, Serhat:** Macro-Turbulent Energy Cascades In Upper Tropospheric-Lower Stratopheric Mesocales, Universität Rostock

# KOOPERATIONEN

## COOPERATIONS



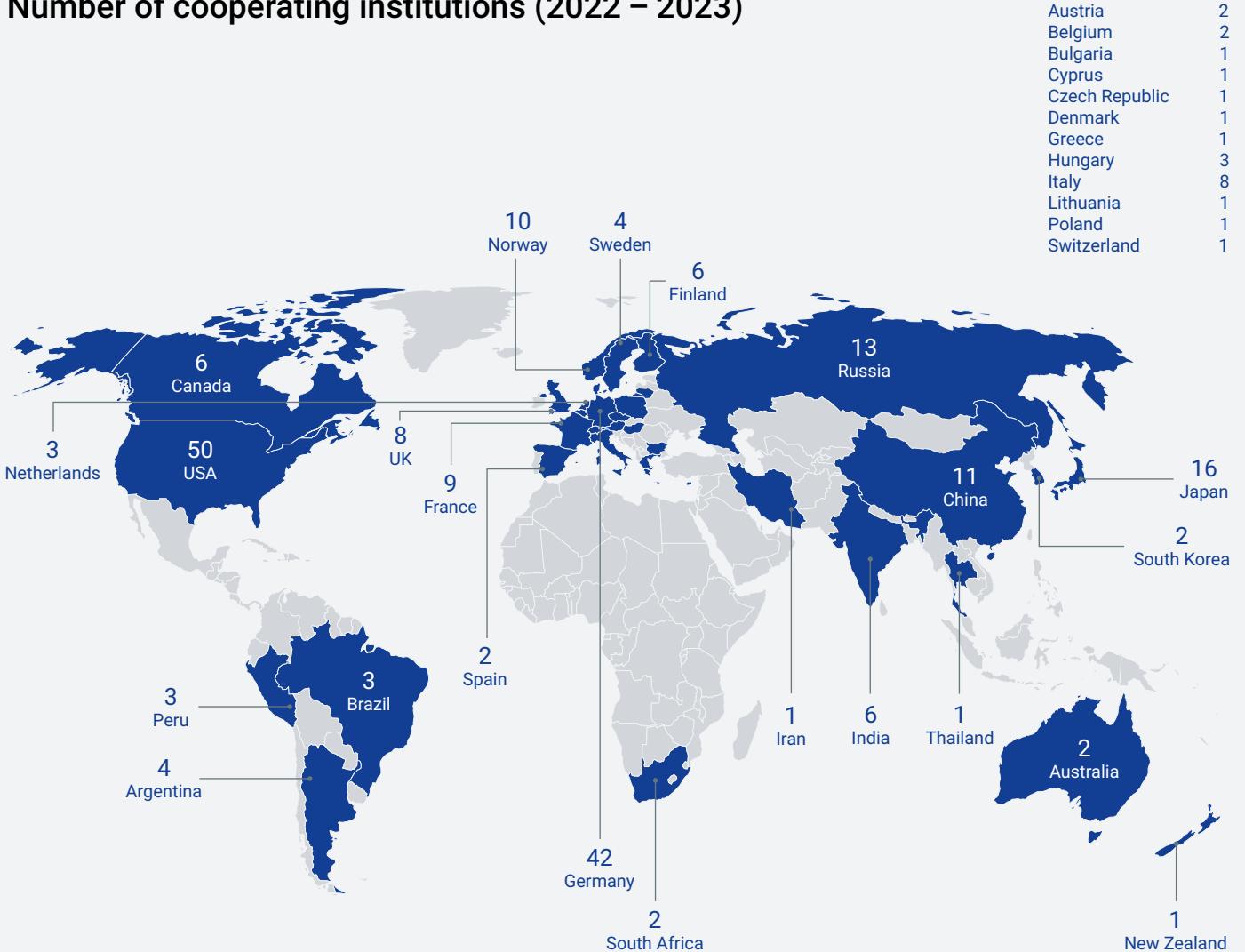
Die Universität Rostock ist der Hauptkooperationspartner des IAP. Die Kooperation umfasst: (a) Professuren aller drei IAP-Abteilungsleiter und der Direktorin; (b) Studierendenseminar; (c) deren Betreuung auf allen drei Ausbildungsstufen, d. h. Bachelor of Science, Master of Science und PhD; (d) Teilnahme an multidisziplinärer Forschung und akademischen Aktivitäten usw. Als Leibniz-Institut hat das IAP auch mit anderen Leibniz-Instituten der Sektion D kooperiert (z. B. AIP – Leibniz- Institut für Astrophysik in Potsdam, WIAS – Weierstraß-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik in Berlin) sowie mit denen anderer Sektionen (z. B. IOW – Leibniz-Institut für Ostseeforschung in Warnemünde).

Des Weiteren ist das IAP aber auch weltweit vernetzt und arbeitet mit wissenschaftlichen Einrichtungen und Unternehmen auf fünf Kontinenten zusammen. Zwischen 2022 und 2023 hat das IAP mit insgesamt 228 Institutionen kooperiert, einschließlich 56 in Nord-Amerika und 116 in Europa. Die letzteren schließen 42 in Deutschland ein.

Eine der aktivsten Kooperationen während dieser Jahre war die Teilnahme an nationalen und internationalen Forschungs-Netzwerken. Zum Beispiel in DFG-Schwerpunktprogrammen (z. B. Dynamic Earth), BMBF-Forschungsprogrammen (z. B. ROMIC), DFG-Forschergruppe (z. B. MSG-Waves), Multi-Instrument-Kam-

## Anzahl der kooperierenden Institutionen (2022 – 2023)

### Number of cooperating institutions (2022 – 2023)



**GESAMT 228**

**TOTAL 228**

pagnen (SOUTHTRAC-GW), NASA Drive Centers (z. B. WAVE – Wave-induced Atmospheric Variability Enterprise) usw.

The University of Rostock is the main cooperation partner of IAP. The cooperation includes: (a) professorship positions to all three IAP department heads and the director; (b) lecturing of students; (c) supervision of theses at all three education levels; i.e., Bachelor of Science, Master of Science and PhD; (d) participation in multi-disciplinary research and academic activities, etc. Being a Leibniz Institute, IAP has cooperated with other Leibniz Institutes from section D (e.g., AIP in Potsdam, WIAS in Berlin) as well as of other sections (e.g., IOW in Warnemünde).

The IAP is also globally networked and co-operates with scientific institutions and companies on five continents. Between 2022 and 2023, IAP has collaborated with 228 institutions worldwide, including 56 institutions in North-America and 116 in Europe. The latter includes 42 in Germany.

One of the most active cooperation during these years has been the participation in national and international research networks. For example, in DFG priority programs (e.g., Dynamic Earth), BMBF research programs (e.g., ROMIC), DFG research units (e.g., MSG-Waves), multi-instrument campaigns (South-TRAC-GW), NASA Drive centers (e.g., WAVE), etc.

# ABKÜRZUNGEN

## ABBREVIATIONS

AGU	Amerikanischen Geophysikalischen Vereinigung	MAARSY	Middle Atmosphere ALOMAR Radar SYstem
AIP	Leibniz-Institut für Astrophysik Potsdam	MF-Radar	Medium-Frequency Radar
AIRS	Atmospheric Infrared Sounder	MLT	Mesosphere/Lower Thermosphere
ALOMAR	Arctic Lidar Observatory for Middle Atmosphere Research	MoLiCu	Mobile Lidar Cubes
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung	MS-GWaves	Multiscale Dynamics of Gravity Waves
CHAMP	CHAllenging Minisatellite Payload	NCAR	National Center for Atmospheric Research
CONE	COmbined sensor for Neutrals and Electrons	NLC	Noctilucent clouds
COSPAR	Committee on Space Research	OHT	Observatoire de Haute-Provence
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft	PMSE	Polar Mesospheric Summer Echoes
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	PMWE	Polar Mesospheric Winter Echoes
DMSP	Defense Meteorological Satellite Program	RMR	Rayleigh/Mie/Raman
EISCAT	European Incoherent Scatter Scientific Association	ROMIC	Role of the Middle Atmosphere in Climate
EPB	äquatoriale Plasmablasen (engl. equatorial Plasma bubbles)	RUBIN	Regionale unternehmerische Bündnisse für Innovation
ERC	European Research Council (Europäischer Forschungsrat)	SABER	Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry
EU	Europäische Union	SAW	Leibniz Gemeinschaft Senatsausschuss Wettbewerb
EULIAA	European Lidar Array for Atmospheric Climate Monitoring	SCOSTEP	Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics
Fraunhofer-ILT	Fraunhofer-Institut für Lasertechnik	SIMONe	Spread-spectrum Interferometric multistatic Meteor radar Observing Network
GFZ	Deutsches GeoForschungsZentrum	SMD	Surface Mounted Devices
GW	Schwerewellen (engl. Gravity Waves)	Swarm DISC	Swarm Data, Innovation, and Science Cluster
HIAMCM	High Altitude Mechanistic General Circulation Model	TIMED	Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics
IAP	Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V. an der Universität Rostock	UA-ICON	Upper Atmosphere ICOsahedral Non-hydrostatic model
IBP	Ionospheric Bubble Prediction (Ionosphärische Blasenvorhersage)	URSI	International Union of Radio Science
IOW	Leibniz-Institut für Ostseeforschung Warnemünde	VAHCOLI	Vertical And Horizontal COverage by Lidar
IRI	international reference ionosphere	WACCM-X	Whole Atmosphere Community Climate Model with thermosphere and ionosphere extension
KHI	Kelvin-Helmholtz-instabilität	WAVE	Wave-induced Atmospheric Variability Enterprise
KIT	Karlsruher Institut für Technologie	WIAS	Weierstraß-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik
KMCM	Kühlungsborn Mechanistic general Circulation Model		
LIDAR	Light Detection And Ranging		

# BILDNACHWEISE

## CREDITS

**Titelbild:** IAP, G. Baumgarten; **S. 2, Vorwort (Portrait Claudia Stolle):** D. Gohlke; **S. 4:** IAP, R. Latteck; **S. 7, Bild 1 und 2:** IAP, A. Vellalassery; **S. 7, Bild 3:** IAP, F.-J. Lübken; **S. 7, Bild 4 und 5:** IAP, J. Jaen; **S. 8:** IAP, G. Baumgarten; **S. 9:** Rabauke Filmproduktion; **S. 10 Beide:** IAP, G. Baumgarten; **S. 11:** R. Baumgarten / ILT; **S. 12 Oben:** D. Gohlke; **S. 12 Mitte:** Andoya Space, T. Abrahamsen; **S. 12 Unten (Grafik über beide Seiten):** IAP, I. Strelnikova; **S. 13 Oben:** IAP, E. Franco-Diaz; **S. 14:** IAP, B. Strelnikov; **S. 15 Oben:** IAP, G. Baumgarten; **S. 15 Mitte:** IAP, M. Gerding; **S. 16:** IAP, G. Baumgarten; **S. 17:** UiT, D. Huyghebaert; **S. 18 oben:** IAP, M. Sivakandan; **S. 18 Mitte:** IAP, M. Sivakandan; **S. 18 unten:** IAP, T. Renkowitz; **S. 19 Mitte:** IAP, F. Poblet; **S. 19 unten:** IAP, J. L. Chau; **S. 20 oben:** IAP, J. Mielich; **S. 20 unten:** IAP, J. L. Chau; **S. 21 oben:** IAP, F. Poblet; **S. 21 unten links:** IAP, F. Conte; **S. 21 unten rechts:** IAP, P. Ghosh; **S. 22:** IAP, K. Ramachandran; **S. 23 oben links:** IAP, K. Ramachandran; **S. 23 oben rechts:** IAP, J. Hartisch; **S. 23 unten links:** IAP, J. Hartisch; **S. 23 oben links:** IAP, K. Ramachandran; **S. 23 unten rechts:** IAP, K. Ramachandran; **S. 24:** IAP, Y. Morfa; **S. 26:** IAP, M. Kunze; **S. 27 oben:** IAP, U. Schaefer-Rolffs; **S. 27 unten:** IAP, S. Das; **S. 28:** IAP, C. Zülicke; **S. 29 oben:** IAP, Y. Morfa; **S. 29 Mitte:** IAP, V. Avsarkisov; **S. 29 unten:** IAP, M. Grygalashvyly; **S. 30 beide:** IAP, Y. Yamazaki; **S. 31:** D. Gohlke; **S. 32:** IAP, G. Baumgarten; **S. 34 links oben:** IAP, R. Latteck; **S. 34 Mitte rechts:** IAP, P. Ghosh; **S. 35:** IAP; **S. 36 & 37 Bilder:** Rabauke Filmproduktion; **S. 37 Grafiken:** IAP; **S. 38 oben:** Rostock denkt 365°; **S. 38 unten:** IAP + LeNo, Layout KRAUT & KONFETTI; **S. 39 oben links und unten:** IAP, Thorben Mense; **S. 39 oben rechts:** IAP; **S. 40:** IAP; **S. 41:** IAP; **S. 42:** IAP; **S. 44 Grafik:** IAP; **S. 44 (Gruppenbild):** D. Gohlke; **S. 46, beide:** D. Gohlke; **S. 47:** IAP, G. Baumgarten; **S. 48 & 49 (Grafiken):** Zahlen IAP, Grafik KRAUT & KONFETTI; **S. 57: oben:** IAP; **unten:** IAP, E. Franco-Diaz; **S. 58:** Zahlen IAP, Grafik KRAUT & KONFETTI; **S. 59:** Zahlen IAP, Grafik KRAUT & KONFETTI; **S. 62:** KRAUT & KONFETTI

# ANREISE

## HOW TO GET TO IAP

### MIT DEM AUTO

#### BY CAR

**VIA A20:** bis Abfahrt Kröpelin in Richtung Kühlungsborn abbiegen – weiter auf der L11 nach Kühlungsborn

**VIA A20:** leave at exit Kröpelin – follow the road L11 to Kühlungsborn

### MIT DEM ZUG/BUS

#### BY TRAIN/BUS

Buslinie 104, Haltestelle Schloßstraße, Kühlungsborn

**VIA KÜHLUNGSBORN, MITTE:** Von Rostock-Hbf mit der Buslinie 121 oder mit dem Zug über Bad Doberan weiter mit der Kleinbahn „Molli“

**VIA BAHNHOF KRÖPELIN:** mit der Buslinie 104

Alternativ von Hamburg bis Bahnhof Bützow, von dort können Sie ein Taxi nehmen oder kontaktieren Sie uns gerne, um ein Shuttle zu bestellen.

Bus line 104, station Schloßstraße, Kühlungsborn

**VIA KÜHLUNGSBORN, MITTE:** From central station Rostock with bus line 121, or train via Bad Doberan and from there with the traditional train "Molli"

**VIA BAHNHOF KRÖPELIN:** Bus line 104

Otherwise from Hamburg to Bützow train station, from there you can take a cab or feel free to contact us for a shuttle.

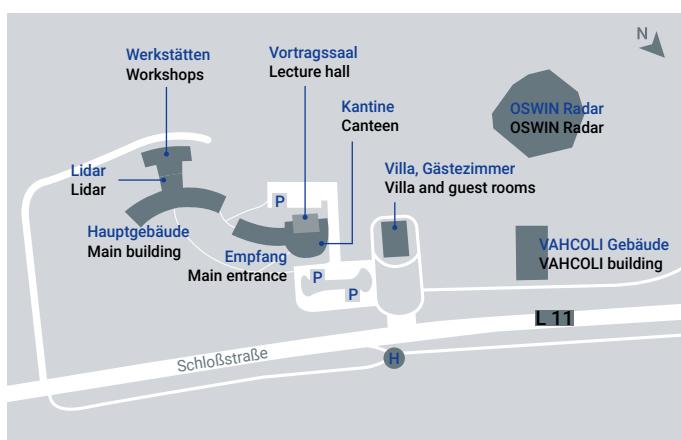
### **FAHRPLAN ONLINE UNTER:**

#### **TIME TABLE ONLINE AT:**

- [bahn.de](http://bahn.de)
- [molli-bahn.de](http://molli-bahn.de)
- [rebus.de](http://rebus.de)



Verkehrsverbindung mit der traditionellen Schmalspurbahn „Molli“ von Bad Doberan und mit dem Bus vom Bahnhof Kröpelin. Connections to IAP from Bad Doberan and Kröpelin with bus and traditional train called "Molli".



Gebäudeplan des IAP. Map of the IAP site.

# IMPRESSIONUM

# IMPRESSIONUM

Herausgegeben durch das  
Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik e. V.  
an der Universität Rostock, Schloßstraße 6  
18225 Kühlungsborn

**Redaktion:**  
Prof. Dr. Gerd Baumgarten, Prof. Dr. Jorge L. Chau,  
Dr. Michael Gerding, Dr. Toralf Renkwitz, Caren Schmidt,  
Prof. Dr. Claudia Stephan, Prof. Dr. Claudia Stolle,  
Dr. Phillip Trefz, Dr. Christoph Zülicke

**Gestaltung:**  
KRAUT & KONFETTI, Berlin

**Auflage:**  
300 Exemplare

**Druck:**  
trigger.medien.gmbh, Berlin

Kühlungsborn, 2024

