

Zusammenfassung der Begründung für eine zweite Phase von ROMIC

von

Franz-Josef Lübken (Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik, Kühlungsborn)
Katja Matthes (GEOMAR, Kiel), Ralf Koppmann (Univ. Wuppertal),
Ulrich Achatz (Univ. Frankfurt), Andreas Engel (Univ. Frankfurt),
Björn-Martin Sinnhuber (KIT Karlsruhe), Hauke Schmidt (MPI für Meteorologie, Hamburg)

Kühlungsborn, den 8. November 2016

1 Einleitung

Die Atmosphäre spielt eine wichtige Rolle im Klimawandel von globalen bis zu regionalen Skalen. Insbesondere in der mittleren Atmosphäre, d. h. von der oberen Troposphäre bis zur unteren Thermosphäre (ca. 10 bis 100 km), werden bereits tiefgreifende Änderungen durch anthropogene Einflüsse beobachtet, und eine weitere Verstärkung für die kommenden Jahrzehnte ist vorhergesagt.

Die Bedeutung der mittleren Atmosphäre für das Klima ist in den vielfältigen Wechselwirkungen dieser Schichten mit der Troposphäre (ca. 0-10 km) begründet und lässt sich grob einteilen in a) Klimaeffekte in der mittleren Atmosphäre, und b) Einfluss der mittleren Atmosphäre auf die Troposphäre. Änderungen der Zusammensetzung der mittleren Atmosphäre beeinflussen den Strahlungshaushalt der gesamten Atmosphäre und damit auch das Bodenklima. Dynamisch sind mittlere Atmosphäre und Troposphäre auf vielfältige Art und Weise miteinander gekoppelt, insbesondere durch Wellen auf sehr unterschiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen. Seit wenigen Jahren steht außerdem fest, dass nicht nur die mittlere Atmosphäre auf anthropogene Aktivitäten reagiert, sondern dass z. B. stratosphärische Zirkulationsänderungen auch das regionale Klima beeinflussen. Um die Rolle der mittleren Atmosphäre für das Klima besser zu verstehen und auch in Zukunftsprojektionen berücksichtigen zu können, muss unser Verständnis dieser Kopplungsmechanismen verbessert werden (siehe Abb. 1). Die mittlere Atmosphäre ist gleichzeitig eine Schlüsselregion, über die Änderungen der Sonnenaktivität und große Vulkanausbrüche auf das Klima einwirken. Die Bedeutung der mittleren Atmosphäre für die Troposphäre wird schon allein daran deutlich, dass Wetterdienste ihre operationellen Vorhersagemodelle inzwischen bis in die Mesosphäre (ca. 50–100 km) ausgedehnt haben, weil dies die Vorhersagen verbessert.

Das BMBF hat im Jahre 2013 eine Fördermaßnahme mit der Bezeichnung ROMIC (Role Of the Middle atmosphere In Climate) gestartet, die in absehbarer Zeit auslaufen wird. Diese Initiative hat u. a. dazu geführt, dass die weltweit größte Wissenschaftsorganisation auf dem Gebiet der solar-terrestrischen Forschung, SCOSTEP*, ein langfristiges Forschungsprogramm mit praktisch gleicher Bezeichnung (ROSMIC[†]) initiiert hat. Deutsche Wissenschaftler aus ROMIC spielen dabei eine wichtige Rolle. Im Rahmen der ersten Phase von ROMIC sind beeindruckende Ergebnisse erzielt worden, die auch im internationalen Rahmen Aufmerksamkeit erregt haben. Es hat sich jedoch auch gezeigt, dass es in vielen Bereichen weiteren Forschungsbedarf gibt. Diese Zusammenfassung soll die Notwendigkeit weiterer Forschung im Rahmen einer zweiten Phase (ROMIC-II) darstellen. Auf den Bezug zu den förderpolitischen Zielen des BMBF wird am Ende dieses Dokuments eingegangen. Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse von ROMIC-I und Ziele von ROMIC-II sind im Konzeptpapier vom 22. Februar 2016 enthalten.

last updated: 8. November 2016

c:/ROMIC/Konzeptpapier/Phase-2/Zusammenfassung-ROMIC-II-V1.tex

(F.-J. Lübken)

*Scientific Committee on Solar-Terrestrial Physics

[†]Role Of the Sun and the Middle atmosphere/thermosphere/ionosphere In Climate

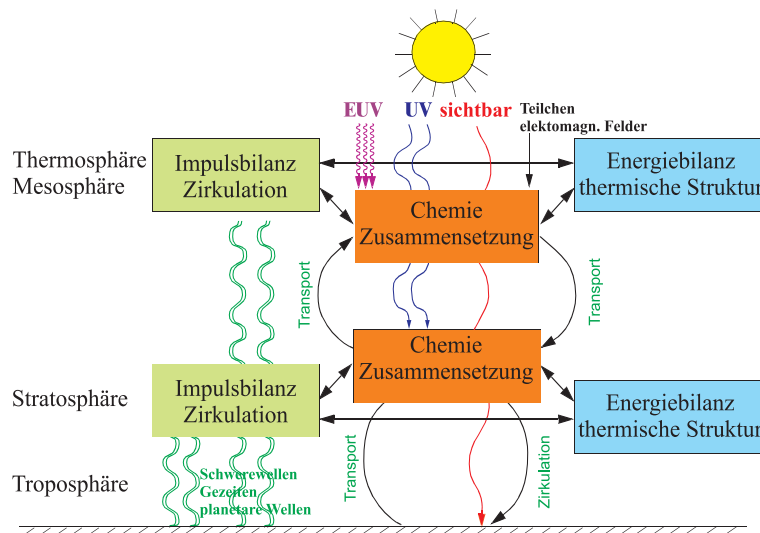


Abbildung 1: Schematische Darstellung der verschiedenen Kopplungsmechanismen in der unteren und mittleren Atmosphäre. (E)UV = (Extrem) ultraviolette Strahlung.

2 Trends in der mittleren Atmosphäre

Inzwischen hat sich herausgestellt, dass der Anstieg von klimarelevanten Spurengasen in der Stratosphäre und Mesosphäre zu einer Abkühlung führt, die (betragsmäßig) in einigen Höhen um ein Vielfaches größer ist als die Erwärmung in der Troposphäre. Zum Verständnis dieser Abkühlung wurden in ROMIC-I zwar große Fortschritte erzielt, es bleiben aber noch viele ungeklärte Fragen, z. B. ob das erste Erscheinen von leuchtenden Nachtwolken (Ende des neunzehnten Jahrhunderts) ein erstes Anzeichen von Klimaänderungen ist, oder nicht. Die mittlere Atmosphäre reagiert jedenfalls besonders empfindlich auf anthropogene Erhöhungen von Spurengaskonzentrationen. In ROMIC-II soll u. a. die Frage geklärt werden, wie eine weitere Abkühlung der Mesosphäre und ein weiterer Anstieg von mesosphärischem Wasserdampf durch Beobachtungen von leuchtenden Nachtwolken verifiziert werden kann. Bezüglich Trends in der Stratosphäre verbleiben ebenfalls wichtige offene Fragen. Z. B. ist nicht geklärt, warum Temperaturen in den letzten zwei Jahrzehnten fast kaum mehr abnehmen und warum es große Unterschiede der Trends in den hohen Breiten der beiden Hemisphären gibt. Außerdem ist nicht klar, wie sich die Tropopause entwickeln wird und welchen Einfluss Wasserdampf und Sulfataerosole in der mittleren Atmosphäre auf das Klima haben.

Es gibt deutliche Hinweise darauf, dass sich die großskalige Zirkulation der mittleren Atmosphäre langfristig ändert, mit entscheidenden Auswirkungen auf die Atmosphäre und das Klima am Erdboden. Ein Beispiel hierfür sind Änderungen der Nordatlantischen Oszillation, welche wesentlich das Klima und Wetter in Europa bestimmt. Seit kurzem ist auch bekannt, dass es Trends in der Intensität von planetaren Wellen und Schwerewellen gibt. Die Ursache für diese Trends und deren Auswirkungen sind allerdings nicht ausreichend gut verstanden. Wellen werden in Klimamodellen noch nicht korrekt berücksichtigt und sollen daher in ROMIC-II weiter untersucht werden. In ROMIC-I wurde anhand neuer Messmethoden zur Untersuchung von Transportzeiten gezeigt, dass Zirkulationsänderungen wesentlich komplexer sind als in vielen Klimamodellen angenommen. In ROMIC-II sollen Transport und Mischung separiert werden und der Einfluss auf andere, klimarelevante Spurengase, wie Ozon, Wasserdampf und Sulfataerosole, untersucht werden.

Untersuchungen in ROMIC-I haben Indizien dafür geliefert, dass es in der mittleren Atmosphäre langfristige Schwingungen gibt und dass lunare Gezeiten eine nicht zu vernachlässigende Rolle spielen. Die Ursachen für diese Effekte sind bislang weitestgehend unbekannt und sollen in ROMIC-II untersucht werden.

3 Antrieb durch solare Strahlung, Treibhausgase und stratosphärische Aerosole

Ein wichtiger externer Antrieb des Klimasystems ist die solare Strahlung, wobei es signifikante Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung in den letzten Jahrhunderten gibt. Dabei rücken zusehends die Variationen im UV- und EUV-Bereich[‡] in den Vordergrund, da diese um ein Vielfaches größer sind als die Änderung der Gesamtstrahlung. Diese großen Variationen sind entscheidend für die mittlere Atmosphäre, da dieser Wellenlängenbereich hier absorbiert wird und aufgrund von photochemischen Prozessen direkte Auswirkungen auf die Stratosphäre und Mesosphäre hat (Beispiel: Ozonschicht). Dadurch wird nicht nur die Temperaturverteilung in diesen Schichten geändert, sondern die gesamte Zirkulation wird beeinflusst. Dies wiederum verändert den Transport von photochemisch aktiven Spurengasen und modifiziert die Ausbreitungsbedingungen von planetaren Wellen und Schwerewellen, und damit die Kopplung zwischen mittlerer Atmosphäre und Troposphäre.

Der 11-jährige solare Zyklus spielt in diesem Zusammenhang eine besondere Rolle, weil sich durch diese regelmäßige Modulation der Einfluss der solaren Strahlung auf die Atmosphäre gut studieren lässt. Außerdem verhält sich die Intensität dieser Schwankung in den letzten Dekaden sehr außergewöhnlich. Es gilt als wahrscheinlich, dass die solare Aktivität in den nächsten Jahrzehnten deutlich reduziert sein wird, vielleicht so ähnlich wie während des Maunder-Minimums im siebzehnten Jahrhundert. Das Klima war in dieser Zeit vermeintlich außergewöhnlich kalt.

Messungen der Variabilität der solaren Strahlung mit der benötigten Genauigkeit sind sehr anspruchsvoll und immer noch eine große Herausforderung. Als Beispiel sei erwähnt, dass vor kurzem ein neuer Wert für die Solar-„konstante“ ermittelt wurde, der immerhin um $4,6 \text{ W/m}^2$ niedriger ist als der bisherige Wert. Modellrechnungen zur solaren Aktivität, in denen die sehr komplexen Prozesse in der Sonne berücksichtigt werden und in denen die kurz- und langperiodischen Schwankungen wiedergegeben werden, sind daher für die Klimaforschung von großer Bedeutung. Im Rahmen von ROMIC-I wurde der solare Strahlungs- und Teilchenantrieb entwickelt und für Modellstudien im Rahmen von IPCC bereitgestellt. Es bleibt aber noch zu klären, welchen Beitrag Langzeittrends in der solaren Strahlung im Vergleich zu anthropogenen Klimatrends liefern. Dies gilt auch für dekadische Klimavorhersagen.

Die mittlere Atmosphäre ist auch für den direkten Strahlungsantrieb der Erde von Bedeutung. Dies gilt insbesondere für Gase, die im Vergleich zu CO_2 ein großes Treibhauspotential haben und die teilweise in der Stratosphäre abgebaut werden. So wirkt z. B. Distickstoffoxid 310-mal stärker als Kohlendioxid. Einige Gase in der Stratosphäre (insbesondere Ozon und Wasserdampf) beeinflussen direkt die terrestrische Strahlungsbilanz. So bedeutet z. B. der in den letzten beiden Dekaden beobachtete Abbau von stratosphärischem Ozon allein eine Abkühlung von $0,15 \text{ W/m}^2$.

Stratosphärische Aerosole spielen ebenfalls eine wichtige Rolle für die Strahlungsbilanz der Erde (Rückstreuung solarer Strahlung) und für die Chemie in der Stratosphäre. Immerhin verursacht das stratosphärische Aerosol einen Strahlungsantrieb von bis zu $-0,25 \text{ W/m}^2$. Aerosole werden zum Teil in der Troposphäre erzeugt und durch die Zirkulation in höhere Schichten transportiert. Aerosole werden aber auch direkt in der Stratosphäre aus troposphärischen Quellgasen gebildet. Im Rahmen von ROMIC-I wurden wichtige Fortschritte zur Beschreibung der Emissionen von Schwefel- und Halogenverbindungen aus dem Ozean erzielt, sowie zum Transport in die Stratosphäre und zu den Auswirkungen auf die Stratosphärenchemie. Es bestehen allerdings noch große Unsicherheiten bezüglich der mittel- bis langfristigen Entwicklung der Aerosol- und Spurengasentwicklung in der Stratosphäre. Hier bietet sich für ROMIC-II die Chance, das verbesserte Prozessverständnis in Modelle einfließen zu lassen, um hiermit zu verbesserten Prognosen der Aerosol- und Spurengasentwicklung und der Rückkopplung auf das Klimasystem zu kommen.

[‡](E)UV = (Extrem) ultraviolette Strahlung.

4 Kopplung zwischen Troposphäre und mittlerer Atmosphäre

Grundsätzlich hat sich in der Klimaforschung in den letzten Jahren immer deutlicher herausgestellt, dass der bodennahe anthropogene Temperaturanstieg die natürliche Variabilität deutlich übersteigt, wohingegen das Klimasignal in dynamischen Prozessen (Winde, Wellen etc.) sehr viel unsicherer ist. Dies ist jedoch für regionale Vorhersagen, z. B. von Klimaänderungen von Wettersystemen, von entscheidender Bedeutung. Hierbei spielt die mittlere Atmosphäre offensichtlich eine wichtige Rolle.

In den letzten Jahren gibt es verstärkt Hinweise darauf, dass sich Zirkulationssysteme von der mittleren Atmosphäre bis zur Erdoberfläche ausbreiten können. So werden Klimaänderungen in der Südhemisphäre beeinflusst durch das antarktische Ozonloch und damit verbundene Zirkulationsänderungen in der Stratosphäre. Außerdem gibt es verstärkt Hinweise auf einen regionalen Einfluss des solaren Zyklus auf bodennahe Temperaturen. Obwohl einige Teilprozesse inzwischen besser verstanden sind, fehlt immer noch eine vollständige Erklärung der vorhandenen Beobachtungen. Der Transport von photochemisch aktiven Spurengasen aus der unteren Thermosphäre in niedrigere Schichten könnte dabei eine wichtige Rolle spielen. In einigen Klimamodellen findet dieser Transport aber gar nicht statt.

Die Kopplung der verschiedenen Schichten durch dynamische Prozesse ist ganz allgemein von besonderer Bedeutung, da sie einen großen Skalenbereich umfasst und deshalb in Modellen nur näherungsweise repräsentiert werden kann. Dies betrifft z. B. die Quasi-Zweijährige-Oszillation in der Stratosphäre in niedrigen Breiten, die an vielen Stellen in der Atmosphäre entsprechende Modulationen erzeugt (auch in der Troposphäre), die aber in Klimamodellen meistens nur unzureichend beschrieben wird, da sie durch Schwerewellen erzeugt wird, die in diesen Modellen nicht aufgelöst werden.

Generell spielen dynamische Wellen (planetare Wellen, Schwerewellen, Gezeiten) für die mittlere Atmosphäre eine entscheidende Rolle. Sie führen z. B. dazu, dass die mittleren Temperaturen in der Mesopausenregion um mehr als 100 Grad (!) vom strahlungsbedingten Zustand abweichen können. Außerdem sind sie für den großräumigen Transport von Spurengasen verantwortlich und beeinflussen somit maßgeblich deren Konzentration (Beispiel: breitenabhängige Ozonverteilung, Wasserdampf und Sulfataerosole oberhalb der Tropopause). Da diese Gase i. Allg. strahlungsaktiv sind, z. B. durch die Absorption solarer Strahlung oder durch Strahlungstransfer, ändert sich damit auch die Energiebilanz der Atmosphäre, was wiederum die Zirkulation beeinflusst.

Die Effekte von Schwerewellen werden in Klimamodellen nur durch näherungsweise Ansätze, sogenannte „Parametrisierungen“ beschrieben. In ROMIC-I wurde jedoch gezeigt, dass die heute verwendeten Parametrisierungen sehr ungenau oder sogar falsch sind. Zur Zeit werden Schwerewellen in der mittleren Atmosphäre sowohl theoretisch als auch experimentell mit noch nie da gewesener Genauigkeit untersucht. Es zeigt sich, dass klassische Vorstellungen zum Lebenszyklus dieser Wellen völlig unzureichend sind. In ROMIC-II soll die Entwicklung belastbarer Parametrisierungen von Schwerewellen für Klimamodelle fortgesetzt werden. Außerdem sollen die Wechselwirkungen von Schwerewellen mit großräumigen atmosphärischen Strömungssystemen und mit atmosphärischen Wolken untersucht werden, da sie einen wichtigen Beitrag für unser Verständnis des Klimawandels leisten.

5 Strategie und Bezug zu FONA

Der Klimawandel ist eine der großen globalen Herausforderungen. Daher ist die Vorsorgeforschung als ein wichtiges förderpolitisches Ziel im Rahmenprogramm des BMBF zur Forschung für nachhaltige Entwicklung (FONA) verankert. Wesentliche Ziele dieser Vorsorgeforschung bestehen darin, vordringliche Wissenslücken zum Klimawandel durch exzellente Forschung zu schließen, ein besseres Verständnis des Klimasystems als Wissensbasis für Klimaschutzmaßnahmen zu erreichen und verlässliche und leistungsstarke Klimamodelle zur Klimafolgeabschätzung zu entwickeln.

ROMIC-II wird ganz wesentlich zum besseren Verständnis des Klimasystems beitragen. Dabei geht es um Zeitskalen von Dekaden bis zu wenigen Jahrhunderten sowie um regionale und globale Phänomene. Aus den obigen Darstellungen geht hervor, dass es trotz erheblicher Fortschritte, die in ROMIC-I erzielt wurden, dringenden Forschungsbedarf zur Rolle der mittleren Atmosphäre für das Klima gibt. In ROMIC-II soll eine umfassende Betrachtung des Zusammenhangs zwischen mittlerer Atmosphäre und Klima erfolgen. Die Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung sind hervorragend, weil deutsche Wissenschaftler bei der Erforschung der mittleren Atmosphäre inzwischen zu den international führenden Akteuren gehören.

Internationale und nationale Fördermaßnahmen konzentrieren sich in diesem Zusammenhang oft auf Teilgebiete. So fokussiert das BMBF-Programm Miklip[§] auf Zeitskalen bis zu einer Dekade, während in der DFG-Forschergruppe MS-Gwaves[¶] die spezielle Dynamik von Schwerewellen untersucht wird und in SSiRC^{||} die Bedeutung von stratosphärischen Aerosolen für das Klima erforscht wird. ROMIC-II besitzt somit ein Alleinstellungsmerkmal und wird einen wesentlichen Beitrag zur Klimaforschung und somit zu den förderpolitischen Zielen des BMBF leisten.

Zusammenfassend darf man feststellen, dass ROMIC wichtige Aspekte der strategischen Ausrichtung des BMBF bezüglich Klimaforschung aufgreift, wobei ein enger Bezug zu Referat 723 („Globaler Wandel“) gegeben ist. Die deutsche Wissenschaftslandschaft ist hervorragend dazu geeignet, die in dieser Zusammenfassung erwähnten Forschungsaufgaben anzugehen. Die Einrichtung einer zweiten Phase von ROMIC würde die internationale Bedeutung der in Deutschland betriebenen solar/terrestrischen Klimaforschung weiter stärken. Wir bitten daher das BMBF um die Einrichtung einer zweiten Phase von ROMIC.

[§]Mittelfristige Klimaprognosen

[¶]MultiScale Dynamics of Gravity Waves

^{||}Stratospheric Sulfur and its Role in Climate