

**TATORT**

**ANNTARKTIS**

TATORT ANTARKTIS

# WIE HALOGENVER- BINDUNGEN DIE WELT VERÄNDERN

UDO FRIEB &amp; JAN-MARCUS NASSE

**Bislang ist die Atmosphäre der Antarktis vom Menschen noch weitgehend unbeeinflusst. Sie kann deshalb als Reinluftlabor dienen, um zu untersuchen, wie kleine, aber sehr reaktive Verbindungen chemische Prozesse in der Atmosphäre und das Klima der Erde beeinflussen.**

J

Jedes Jahr am 21. Mai beginnt auf der Neumayer-Station III in der Antarktis die Polarnacht. Ab dann bewegt sich die Sonnenscheibe für 68 Tage nicht mehr oberhalb des Horizonts. Bei Temperaturen unter minus 40 Grad Celsius und Windgeschwindigkeiten über 100 Kilometer pro Stunde wird die Station am Rand des antarktischen Kontinents einer der extremsten Orte der Erde. Die Extreme machen die Antarktis aber nicht nur zu einem außergewöhnlichen Arbeitsplatz für Wissenschaftler, die auf der Station überwintern. Sie sind auch der Ursprung für außergewöhnliche chemische Prozesse mit weitreichendem Einfluss auf die Umwelt: die Freisetzung hoch reaktiver Spurengase.

### Ozonlöcher am Boden

Der kurze antarktische Sommer endet etwa drei Monate zuvor: Wenn die Sonne immer niedriger über dem Horizont steht und die Temperaturen immer stärker sinken, beginnt auf dem Südpolarmeer die Neubildung von Meer eis. Damit werden auch die Voraussetzungen für den außergewöhnlichen chemischen Prozess geschaffen, der die hoch reaktiven Spurengase entstehen lässt: Wenn Meerwasser gefriert, kann das in ihm enthaltene Salz nicht in die Eismatrix integriert werden. Stattdessen bildet sich auf der Oberfläche des Eises eine dünne Schicht hoch konzentrierter Salzlösung, die noch bei Temperaturen bis zu minus 20 Grad flüssig ist. Hohe Windgeschwindigkeiten lassen daraus salzhaltige Eiskristalle entstehen,

die vom Wind über die gesamte antarktische Küstenregion verteilt werden.

Diese salzhaltigen Oberflächen bilden die Grundlage für ein Phänomen, das sich alljährlich nach dem Ende des Winters beobachten lässt, wenn erste Sonnenstrahlen die Antarktis und das den Kontinent umschließende Meer eis erreichen. Wie Satellitenmessungen zeigen, ist die Atmosphäre der Polargebiete mit hohen Mengen an reaktivem Brommonoxid (BrO) angereichert – die davon betroffenen Gebiete übersteigen mit mehreren Millionen Quadratkilometern zeitweise die Fläche des europäischen Kontinents. Dieses Phänomen ist bereits seit Mitte der 1980er-Jahre bekannt; zuerst wurde es in der Arktis untersucht. Zurückzuführen ist die Brommonoxid-Anreicherung der Atmosphäre auf katalytische Prozesse, die an salzhaltigen Oberflächen stattfinden: Ein einzelnes gasförmiges Bromatom (in Form von hypobromiger Säure) reagiert mit Bromid (Bromionen), das im Salz vorhanden ist. Nach einigen chemischen Zwischenschritten werden zwei Bromatome (in Form von Br<sub>2</sub>) in die Atmosphäre freigesetzt.

Unter bestimmten Bedingungen steigt die Anzahl solch chemisch hoch reaktiver Bromradikale in der Atmosphäre exponentiell an. Dieses Phänomen wird als „Bromexplosion“ bezeichnet. Es ist ein typisches Beispiel für natürliche

# „Über dem Südpolarmeer beginnt nach dem kurzen antarktischen Sommer ein außergewöhnlicher Prozess, der hoch reaktive Spurengase entstehen lässt.“

nichtlineare Prozesse, die ein Umweltsystem innerhalb kürzester Zeit dramatisch verändern können: Liegen in der Atmosphäre photochemisch instabile Halogenverbindungen vor (dazu gehören neben Brom- auch Chlor- und Jodverbindungen), werden sie unter dem Einfluss der Sonneneinstrahlung in „Radikale“ umgewandelt. Dabei handelt es sich um Moleküle oder einzelne Atome, die ungepaarte Elektronen besitzen – eine energetisch ungünstige Situation, die Radikale hoch reaktiv macht.

## **Einfluss auf zahlreiche chemische Kreisläufe**

Halogenradikale üben einen bedeutenden Einfluss auf zahlreiche komplexe chemische Kreisläufe in der Atmosphäre aus. Bromradikale bewirken beispielsweise, dass die Konzentration von Ozon in Bodennähe drastisch abnimmt: Bereits wenige Brommoleküle unter hundert Milliarden Luftmolekülen genügen, um innerhalb weniger Tage einen vollständigen Abbau von Ozon zu erzielen. Dieser Vorgang wiederum beeinflusst die Bildung von Hydroxylradikalen (OH), die in der Atmosphäre die Funktion eines Waschmittels übernehmen: Hydroxylradikale beschleunigen den oxidativen Abbau natürlicher und menschengemachter Substanzen. Auch Halogenradikale wirken als Oxidationsmittel. Sie können beispielsweise elementares, gasförmiges Quecksilber oxidieren, einen Umweltschadstoff, der teils aus natürlichen Quellen, teils aus der Verbrennung fossiler Energieträger stammt und sich aufgrund seiner schlechten Wasserlöslichkeit mit der atmosphärischen Zirkulation auf der gesamten Erde ver-



**DR. UDO FRIß** studierte Physik an den Universitäten Mainz und Heidelberg. Während seiner Doktorarbeit am Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg entwickelte er zwei DOAS-Instrumente, die für Messungen auf der Neumayer-Station III in der Antarktis und der neuseeländischen „Scott Base“ eingesetzt werden. Nach einem zweijährigen Forschungsaufenthalt an der University of Leicester (Großbritannien) widmet sich Udo Friß seit dem Jahr 2006 am Institut für Umweltphysik der Chemie der Halogene in der Arktis und der Antarktis.

Kontakt: [udo.friess@iup.uni-heidelberg.de](mailto:udo.friess@iup.uni-heidelberg.de)

teilt. Im Gegensatz zu elementarem Quecksilber ist Quecksilber, das von Bromradikalen oxidiert wurde, sehr gut wasserlöslich. Infolgedessen kann das Quecksilber über die Eisoberflächen oder durch direkten Eintrag in den Ozean in die Biosphäre gelangen und dort entlang der Nahrungsketten akkumulieren. Von den Organismen kann Quecksilber nicht ausgeschieden werden, so dass es sich im Gewebe einlagert.

Halogenradikale haben auch einen potenziellen Einfluss auf das Klima der Erde: Partikel von Schwefelsäure sind über den Weltmeeren die wichtigsten Keime zur Bildung von Wolkentropfen. Die Schwefelsäuretröpfchen entstammen unter anderem schwefelhaltigen Verbindungen, die von Plankton gebildet werden und dann aus dem Wasser in die Atmosphäre gelangen. Werden schwefelhaltige Verbindungen von Bromradikalen oxidiert, entsteht weniger Schwefelsäure. Das wiederum beeinflusst die Anzahl und die Größenverteilung der Wolkentropfen. Modellrechnungen legen nahe, dass die optischen Eigenschaften und die Lebensdauer von Wolken davon beeinflusst werden und sich das Klima dadurch verändern kann.

## **Halogenen auf der Spur**

Halogenradikale in der antarktischen Atmosphäre zu messen, ist eine logistische und technische Herausforderung: Messungen im Feld sind schwierig; darüber hinaus machen es die charakteristischen chemischen Eigenschaften der Halogenverbindungen schwer, die

WHODUNNIT IN ANTARCTICA

# HOW HALOGEN COMPOUNDS CHANGE THE WORLD

UDO FRIEB &amp; JAN-MARCUS NASSE

Antarctica is a continent of extremes – but what makes it special are not only its remoteness and its meteorological conditions. A complex interplay between salty ice surfaces and the air above them creates unique chemical conditions in the continent's atmosphere that influence the regional environment and may even affect the earth climate. Under certain conditions, a series of chemical reactions can release compounds that contain halogens from salty surfaces. Solar radiation quickly turns these into highly reactive radicals that change the chemical properties of the atmosphere and affect several chemical cycles. Reactive halogen compounds deplete surface ozone, can lead to an enhanced influx of toxic mercury into the biosphere, and potentially alter the concentration and properties of cloud condensation nuclei, affecting the optical properties of clouds and ultimately the climate.

Since at any time throughout the year several million square kilometres of salty sea ice surfaces are available on earth, elevated halogen concentrations can occur across areas larger than Europe, as observed by satellites. Nevertheless, studying the release and further fate of halogen compounds is a very challenging endeavour. Their high reactivity requires a contactless measurement technique that furthermore has to withstand the environmental conditions of the polar region and needs to operate with minimal maintenance.

Two complementary instruments using the Differential Optical Absorption Spectroscopy principle (DOAS) that were developed at the Institute of Environmental Physics are currently in use on the German Antarctic station Neumayer III to investigate halogen radical chemistry in coastal regions of the continent. The results permit an assessment of the importance of different surface types for the release of reactive halogen compounds. The first long-term observation of chlorine monoxide radical concentrations indicates that the role of this radical in the chemistry of the lower atmosphere and its influence on the greenhouse gas methane may have been underestimated thus far. ●

DR UDO FRIEB studied physics at the universities of Mainz and Heidelberg. While writing his doctoral thesis at Heidelberg University's Institute of Environmental Physics, he developed two DOAS instruments that are used for measurements on the German Antarctic station Neumayer III and on "Scott Base", which is run by New Zealand. After a two-year research stay at the University of Leicester (UK), Udo Frieb transferred back to Heidelberg in 2006, where he investigates the chemistry of halogens in the Arctic and Antarctic at the Institute of Environmental Physics.

Contact: udo.friess@  
iup.uni-heidelberg.de

JAN-MARCUS NASSE studied physics at Heidelberg University and at Université Paris-Sud (France). In 2015 he began doing research for his doctoral thesis on the chemistry of reactive halogen compounds in the Antarctic troposphere. In the context of this work, he and his colleagues of the research group on troposphere and free radicals developed a new measuring instrument (long path DOAS), which he has been running since 2016 on the German Neumayer III station in Antarctica, together with the winter crews of the Alfred Wegener Institute in Bremerhaven.

Contact: Jan.Nasse@  
iup.uni-heidelberg.de

**“After the end of the brief Antarctic summer, an extraordinary process begins over the Southern Polar Sea that gives rise to highly reactive trace gases.”**

polare Halogenchemie zu untersuchen. Wir verwenden für die Messungen die „Differentielle Optische Absorptionsspektroskopie“ (DOAS), eine vom Leiter unserer Arbeitsgruppe, Ulrich Platt, maßgeblich entwickelte, mittlerweile weltweit genutzte Fernerkundungsmethode. Mit ihr lassen sich einige wenige Spurengasmoleküle unter einer Billion Luftmolekülen nachweisen. Das Messprinzip von DOAS funktioniert folgendermaßen: Licht, das die Atmosphäre durchquert, wird von gasförmigen Molekülen, die in der Atmosphäre vorhanden sind, in charakteristischer Weise absorbiert. Die Moleküle hinterlassen eine Art spektralen Fingerabdruck. Spaltet man das Licht mit einem Spektrometer in seine Spektralfarben auf und misst anschließend die Intensität mit einer speziellen Kamera, lassen sich mehrere atmosphärische Spurengase gleichzeitig nachweisen.

Eine Variante von DOAS ist die „Multi-Axiale Differentielle Optische Absorptionsspektroskopie“ (MAX-DOAS). Sie verwendet als Messsignal Sonnenlicht, das in der Atmosphäre an Molekülen oder Partikeln streut. Das Himmelsstreulicht wird von einem Teleskop eingefangen und dann spektral analysiert. Weil die aus unterschiedlichen Blickrichtungen eingefangenen Spektren Informationen aus unterschiedlichen Schichten der Atmosphäre enthalten, erlaubt es eine geschickte Kombination dieser Informationen, die vertikale Verteilung der Gase zu rekonstruieren. Auf der Neumayer-Station III betreiben wir MAX-DOAS-Messungen kontinuierlich seit dem Jahr 1999 und verfügen nunmehr über die weltweit längste Zeitreihe von Konzentrationen reaktiver Halogenverbindungen in der Antarktis.

Das MAX-DOAS-Messprinzip hat allerdings auch Nachteile. Zum einen ist das Bestimmen von Vertikalprofilen mit einigen Unsicherheiten behaftet, zum anderen sind MAX-DOAS-Messungen beschränkt auf Zeiten mit ausreichend Sonnenlicht. Da chemische Prozesse in der Atmosphäre sehr stark von der Sonnenstrahlung beeinflusst werden und sich die Tages- und Nachtchemie erheblich voneinander unterscheidet, lässt sich die Nachtchemie aufgrund der fehlenden Sonneneinstrahlung nicht mit MAX-DOAS beobachten. Für Polargebiete mit der eingangs beschriebenen Polarnacht bedeutet dies, dass – je nach Ort – mehrmonatige Lücken in den Messreihen entstehen.

Hier kann eine weitere DOAS-Technik weiterhelfen, die „Langpfad-DOAS“: Licht einer künstlichen Lichtquelle (meist einer leistungsstarken Xenonlampe) wird von einem Teleskop horizontal durch die Atmosphäre auf einen mehrere Kilometer weit entfernten Reflektor geworfen. Ein Teleskop sammelt das zurückkehrende Licht wieder ein und leitet es einem Spektrometer zu, der das Licht analysiert. Da der Lichtweg genau bekannt ist



**JAN-MARCUS NASSE** studierte Physik an der Universität Heidelberg sowie an der Universität Paris-Sud (Frankreich). Seit 2015 promoviert er an der Universität Heidelberg zur „Chemie reaktiver Halogenverbindungen in der Troposphäre der Antarktis“. Im Rahmen dieser Arbeit entwickelte er mit Kollegen der Arbeitsgruppe für Troposphäre und freie Radikale ein neues Messinstrument (Langpfad-DOAS). Dieses betreibt er zusammen mit den Überwinterungsmannschaften des Alfred-Wegener-Instituts in Bremerhaven seit 2016 auf der deutschen Neumayer-Station III in der Antarktis.

Kontakt: Jan.Nasse@iup.uni-heidelberg.de

(der doppelte Abstand von Teleskop zu Reflektor), lässt sich die mittlere Konzentration der Spurengase zwischen Teleskop und Reflektor einfach berechnen. Diese Technik erlaubt es nicht nur, die Nachtchemie zu beobachten, sie macht auch Messungen im kurzwelligen Spektralbereich (unterhalb 300 Nanometer) möglich, der MAX-DOAS-Instrumenten nicht zugänglich ist.

Mit Langpfad-DOAS gelang Ulrich Platt gemeinsam mit Kollegen schon Mitte der 1980er-Jahre der Nachweis, dass Bromverbindungen beim Abbau bodennahen Ozons in der Arktis eine große Rolle spielen. Damals waren Langpfad-DOAS-Messungen noch eine technische Herausforderung, heute können sie dank zahlreicher Verbesserungen ähnlich wartungsarm wie MAX-DOAS-Instrumente betrieben werden. Seit Anfang 2016 ergänzt ein Langpfad-DOAS-Instrument auch die Messungen auf der Neumayer-Station III und liefert die bislang längste durchgehende Messung mit dieser Technik in der Antarktis.

### Neue Beobachtungen – neue Fragen

Die Kombination der DOAS-Techniken erlaubt es, zahlreiche bislang unbeantwortete Fragen eingehend zu untersuchen. Aktuell beschäftigen wir uns beispielsweise damit, wie verschiedene Oberflächenarten zur Freisetzung von Brom beitragen. Über die Simulation des atmosphärischen Lufttransports und Satellitenmessungen der Meereisbedeckung lässt sich beispielsweise bestimmen, wie lange Luftpakete Kontakt mit dem Meereis haben. Zieht man die vor Ort gemessenen Konzentrationen an Bromradikalen hinzu, kann man auf die Quellen reaktiven Broms rückschließen. So zeigt sich, dass Meereis insbesondere im Frühjahr den Hauptbeitrag zur Bromfreisetzung liefert und dass unter stürmischen Bedingungen salzhaltige Aerosole zu einem Transport von reaktiven Halogenen bis in das Innere des antarktischen Kontinents führen.

Nicht nur das Meereis, auch die Schneeoberfläche kann eine lokale Quelle für reaktive Halogene sein, wenn sich der Schnee nach Stürmen mit Meersalz angereichert hat. Ist die Luft oberhalb des Schnees sehr stabil geschichtet, kommt es nicht zum Austausch mit weiter darüber liegenden Luftmassen. Unter diesen Bedingungen werden regelmäßig extrem hohe Brommonoxid-Konzentrationen gemessen. Sie übersteigen die bisherigen Beobachtungen in den Polargebieten weit. Die hohe Konzentration von Brommonoxid unter ruhigen atmosphärischen Bedingungen deutet darauf hin, dass es neben der „Bromexplosion“ noch weitere Mechanismen der Freisetzung gibt. Doch warum ist das beobachtete reaktive Chlor immer nur in kurzen Episoden in der antarktischen Küstenregion vorhanden? Wie genau werden Chlorradikale freigesetzt?

**„Halogenradikale  
haben einen  
bedeutenden Einfluss  
auf zahlreiche  
komplexe chemische  
Kreisläufe in  
der Atmosphäre.“**

# ORGANISCHE MOLEKÜLE AUF DEM EISMOND

**Der Saturnmond Enceladus ist von einer Eiskruste bedeckt, unter der sich ein globaler Ozean aus flüssigem Wasser verbirgt. Ein Detektor der Raumsonde „Cassini“ hat von Enceladus ins All geschleuderte Eisteilchen aufgespürt, die organische Substanzen in hohen Konzentrationen enthalten. Sie weisen die typischen Strukturen von sehr komplexen makromolekularen Verbindungen auf – und sind der erste Nachweis großer organischer Moleküle einer außerirdischen Wasserwelt. Erzeugt werden können sie nur durch ebenfalls komplexe chemische Prozesse. „Die Entdeckung makromolekularer Verbindungen, die aus einer moderat warmen Wasserumgebung stammen, wird das Interesse an solchen Eismonden als mögliche Habitate extraterrestrischen Lebens weltweit befeuern“, erklärt Prof. Dr. Mario Trieloff vom Klaus-Tschira-Labor für Kosmochemie, das am Institut für Geowissenschaften der Universität Heidelberg angesiedelt ist. Ausgewertet wurden die Daten des „Cassini“-Detektors von einem Wissenschaftlerteam des Instituts unter Leitung des Planetologen Privatdozent Dr. Frank Postberg.**

(red) Enceladus gilt als eines der vielversprechendsten Objekte bei der Suche nach außerirdischem Leben in unserem Sonnensystem. Der Saturnmond schleudert Eisteilchen in Form von mehreren Hundert Kilometer großen Eisfontänen ins All, die vermutlich mit warmen Hydrothermalsystemen

im Kern des Mondes in Verbindung stehen. Dabei werden aus dem Gesteinskern auch organische Verbindungen ausgewaschen, die sich im Wasserozean ansammeln und dann an die Oberfläche transportiert werden. Die Ozeanoberfläche befindet sich – in Spalten der Eiskruste – nur wenige Hundert Meter unter der eisigen Oberfläche von Enceladus.

Die großen organischen Moleküle sind allerdings nicht wasserlöslich. Sie bestehen aus komplexen Mischungen ringförmiger (aromatischer) und linearer (aliphatischer) Bestandteile mit funktionellen Gruppen, die Sauerstoff und vermutlich Stickstoff enthalten, und werden teilweise aus Hunderten von Atomen gebildet. „Wahrscheinlich sorgen Gasbläschen für ihren Transport an die Ozeanoberfläche, wo sie einen organischen Film bilden“, erklärt Dr. Nozair Khawaja, der die begleitenden Laborexperimente mit organischen Substanzen leitete. „Es scheint, als würde Enceladus sein organisches Inventar so aus den Tiefen des Ozeans in stark erhöhten Konzentrationen an die Wasseroberfläche bringen. Von dort aus wird es mit Ozeantröpfchen ins Weltall geschleudert.“

Mit den Daten des „Cassini“-Detektors konnten die Heidelberger Forscher nicht nur die Zusammensetzung des Ozeans, sondern auch die komplexe organische Chemie in seinen Tiefen untersuchen. Laut Prof. Trieloff erlauben die vorliegenden „Cassini“-Daten allein jedoch keine definitive Antwort auf die Frage, ob diesen großen organischen Molekülen hydrothermale oder sogar biogene Prozesse zugrunde liegen. „Dies ließe sich allerdings relativ leicht mit einer zukünftigen Enceladus-Raummission klären.“

Die amerikanisch-europäische „Cassini-Huygens-Mission“ wurde 1997 als gemeinsames Projekt der NASA und der ESA sowie der italienischen Raumfahrtagentur ASI gestartet. Von 2004 an befand sich „Cassini“ im Saturnsystem und wurde im September 2017 kontrolliert in der Saturnatmosphäre zum Absturz gebracht, wo die Raumsonde verglühte. Die Daten, mit denen die Heidelberger Forscher gearbeitet haben, sind Bestandteil eines Datensatzes, der über 13 Jahre gesammelt wurde und die Wissenschaft noch eine Weile beschäftigen wird. ●

# ORGANIC MOLECULES ON THE ICY MOON

Under its icy crust, Saturn's moon Enceladus conceals a global ocean of liquid water. A detector on the "Cassini" space probe detected ice particles propelled from Enceladus that contain high concentrations of organic substances. They exhibit the structures typical of highly complex macromolecular compounds – and are the first evidence of large organic molecules from an extraterrestrial aquatic world. They can be generated only by equally complex chemical processes. "The discovery of macromolecular compounds originating from a moderately warm water environment will fuel interest worldwide in such icy moons as possible habitats for extraterrestrial life," states Prof. Dr Mario Trieloff from the Klaus Tschira Laboratory for Cosmochemistry at the Institute of Earth Sciences. The data from the "Cassini" detector was evaluated by a team of scientists of the institute under the direction of planetologist Assistant Professor Dr Frank Postberg.

Enceladus is considered one of our solar system's most promising candidates in the search for extraterrestrial life. Huge icy jets several hundreds of kilometres high erupt from the Saturn's moon and are likely associated with hydrothermal vents in the moon's core. This hydrothermal activity leach out organic compounds of the rock core; they accumulate in the liquid ocean and are then transported to the surface. The ocean's surface is located – in fissures of the ice crust – just a few hundred metres below the icy surface of Enceladus. Using data from the "Cassini" detector, the Heidelberg researchers were able to study not only the composition of the ocean on Enceladus but also the complex organic chemistry in the ocean's depths. The "Cassini-Huygens" mission began in 1997 as a joint project of NASA, the ESA, and Italy's ASI space agency. "Cassini" entered Saturn's orbit in 2004 and was de-orbited in September 2017 to burn up in Saturn's atmosphere. The data used by the Heidelberg researchers is a subset of a dataset collected over 13 years – data that will certainly occupy the world of research for some time to come. ●

# „Die Atmosphäre der Polargebiete ist mit hohen Mengen an reaktivem Brommonoxid angereichert – die davon betroffenen Gebiete übersteigen mit mehreren Millionen Quadratkilometern zeitweise die Fläche des europäischen Kontinents.“

Und wie stark ist ihr Einfluss auf die atmosphärische Chemie? Das sind Fragen, die wir derzeit in unserer Arbeitsgruppe intensiv erforschen.

Bislang ist die Atmosphäre der Antarktis vom Menschen noch weitgehend unbeeinflusst. Sie kann uns als „Reinluftlabor“ dienen, um Phänomene zu untersuchen, die nicht nur in Polargebieten, sondern auch in vielen anderen Regionen relevant sind, beispielsweise über Salzseen oder in Vulkangasen. Reaktive Verbindungen von Brom, Chlor und Jod spielen sicher auf lokaler und regionaler Ebene eine wichtige Rolle – vermutlich haben sie aber auch auf globaler Ebene einen großen Einfluss, vor allem auf das Erdklima. Aus diesem Grund werden reaktive Verbindungen seit einigen Jahren vermehrt in weltweiten Klima- und Chemiemodellen berücksichtigt. Die in der

Antarktis gewonnenen Erkenntnisse lassen sich Beobachtungen gegenüberstellen, die in der vom Menschen sehr stark beeinflussten Arktis gemacht wurden: Dort ist künftig zu erwarten, dass Klimaveränderungen – vor allem der dramatische Rückgang des Meereises im Sommer – einen bedeutenden Einfluss auf die Freisetzung von Halogenen und somit auf die Zusammensetzung der Atmosphäre haben werden. ●