



# Die Umwelt im Labor

## I. Woraus besteht unsere Umwelt?

Unsere Umwelt besteht aus den folgenden Umweltmedien, die mit verschiedenen Bereichen verknüpft sind:



Abb. 1: Die Erde - unsere Umwelt

Umweltmedium	Bereich in der Umwelt
Wasser	Hydrosphäre
Boden	Pedosphäre
Luft	Atmosphäre
Eis	Kryosphäre

## II. Gibt es Veränderungen der Umwelt und wieso müssen wir uns dafür interessieren?

Die Umwelt ist ständigen Veränderungen unterworfen. Dies ist aus den Geowissenschaften (z. B. aus der Meteorologie) bekannt und gilt nicht nur für die vergangenen Jahre, sondern auch für sehr viel größere Zeiträume, die lange vor der systematischen Beobachtung der Umwelt liegen. Die Lage der Polkappen verändert sich langsam, aber beobachtbar, ebenso wie das Klima und die Strömungsmuster der Ozeane und der Atmosphäre. Diese Veränderungen sind eigentlich natürlichen Ursprungs.

Veränderungen der Umwelt kommen aber auch durch den Menschen zustande. Dies wird unter dem Begriff der *anthropogen bedingten Veränderungen der Umwelt* verstanden. Diese Veränderungen können durch das direkte Einwirken, wie z. B. die Freisetzung von Schadstoffen in die Umwelt, zustande kommen. Darüber hinaus gibt es aber auch indirekte Einwirkungen des Menschen. Diese erfordern zunächst eine Einwirkung des Menschen auf die Umwelt, die dann nachfolgend ohne weiteres Zutun zu Veränderungen der Umwelt führt. Ein Beispiel hierfür ist z. B. der saure Regen. Zunächst werden Schadstoffe in die Atmosphäre, wie z. B. Stickoxide ( $\text{NO}_x$ ) oder Schwefeldioxid ( $\text{SO}_2$ ), emittiert, die sich nachfolgend durch chemische Reaktionen in der Umwelt zu Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ) bzw. Schwefelsäure ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) umsetzen. Diese Säuren lösen sich im Wasser, wie auch das aus Verbrennungsprozessen stammende Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), so dass der Niederschlag zu einer Versauerung von Böden sowie auch zu Waldschäden ("Waldsterben") führen kann.

Die Veränderungen unserer Umwelt lassen sich auf unterschiedlichen Skalen beobachten. Wir unterscheiden:

- lokale Veränderungen,
- regionale Veränderungen,
- globale Veränderungen

der Umwelt. Die Zusammenhänge der lokalen Veränderungen der Umwelt sind oftmals relativ einfach zu verstehen, da Ursache und Wirkung zeitlich und räumlich eng zusammenhängen. Das Ausbringen eines Schadstoffes (Umweltgiftes) kann z. B. zur Beeinträchtigung der Gesundheit von Lebewesen, bis hin zum Tod führen. Das Ziel der Aktivitäten des Menschen muss es aber sein, jeglichen Schaden von der Umwelt abzuwenden. Hierfür gibt es bereits umfangreiche gesetzliche Maßnahmen und internationale Übereinkünfte, ohne die unsere Umwelt nicht dieselbe Qualität hätte, die sie heute aufweist. Trotz dieser ersten, offensichtlichen Erfolge gibt es keinen Grund sich nun auszuruhen, denn es werden ständig neue Zusammenhänge bekannt, die auf eine Veränderung der Umwelt durch den Einfluss des Menschen deuten.

Die Zusammenhänge auf größeren Skalen, die über den lokalen Bereich hinausgehen, sind für uns deutlich

schwieriger zu erfassen. Als Beispiel sei hier der Ozonsmog in der Atmosphäre genannt, der episodenhaft nahe dem Erdboden hohe Ozonkonzentrationen liefert und meist eine regionale Ausdehnung aufweist. Der diesjährige heiße Sommer ist hierfür ein Beispiel. Zur Kontrolle diese episodenhaften Veränderungen der Umwelt gibt es bereits Gesetze und Maßnahmen, die bis hin zu Fahrverboten reichen können, sofern Grenzwerte der Konzentration des giftigen Stoffes Ozon überschritten werden. Allerdings kann das Wohlbefinden einzelner Personen bereits deutlich unterhalb dieser gesetzlichen Grenzwerte beeinträchtigt werden.

Am schwierigsten ist es, globale Veränderungen unserer Umwelt zu diagnostizieren, die durch Menschen hervorgerufen werden. Das Problem besteht vor allem darin, dass diese Veränderungen nicht unbedingt schlagartig einsetzen müssen. Damit sind diese Veränderungen nur schwer von der natürlichen Variabilität der Umwelt zu unterscheiden. Ebenso ist es oft kaum möglich, globale Veränderungen der Umwelt von einem einzelnen, ortsgebundenen Standpunkt eines Beobachters zu diagnostizieren. Beobachtungen an einem bestimmten Standort müssen zunächst über sehr lange Zeiträume mit akribischer Genauigkeit und Sorgfalt -



möglichst über Generationen - aufgezeichnet werden. Allein dies ist bereits nicht einfach zu realisieren. Hinzu kommt eine flächendeckende Beobachtung an anderen Standorten, an denen die Qualität der Beobachtung nicht minder in ihrer Qualität sein darf. Als ein sehr einfaches Beispiel für diese enormen Anforderungen an Messverfahren sei hier die Messung der Temperatur in der Atmosphäre genannt. Wir nutzen überall Thermometer und sind mit der Temperaturmessung gut vertraut. Wenn es aber auf eine absolute Genauigkeit einer Temperaturmessung von 0,1 °C ankommt, so wird bereits bei einer Punktmessung ein sorgfältig kalibriertes Thermometer notwendig. Zudem muss der Standort der Messung dem internationalen meteorologischen Standard genügen, wenn die Messwerte verlässlich und vergleichbar sein sollen (s. Abb. 2). Es lassen sich so Strahlungsfehler vermeiden. Darüber hinaus werden Temperaturgradienten nahe dem Erdboden berücksichtigt, die die Messwerte auch stark beeinflussen

**Abb. 2:** Englische Messhütte zur zuverlässigen Temperaturmessung in der Meteorologie.

können. Diese Maßnahmen gehen bereits über einfache Temperaturmessungen hinaus, die wir selbst im Alltag nutzen. Flächendeckende Temperaturmessungen nahe dem Erdboden sind dabei noch recht einfach zu realisieren (vgl. Abb. 2). Die Schwierigkeiten steigen aber für flächendeckende Messungen über den Ozeanen, die ca. 2/3 der Erdoberfläche einnehmen. Es gibt nicht in ausreichendem Maße mobile Messplattformen, wie z. B. Schiffe oder Bojen. Eine Lösung zur flächendeckenden Temperaturmessung stellen Satelliten dar, die seit einigen Jahren genutzt werden. Aber auch hier gibt es vielfältige Anforderungen, damit genaue und zuverlässige Temperaturen gemessen werden können. Fazit dieser einfachen Überlegungen zur Temperaturmessung ist, dass es zwar schwierig ist eine Veränderung der globalen Mitteltemperatur auf Grund des Treibhauseffektes zu messen. Dennoch wird dieses schwierige Messproblem zuverlässig gelöst, so dass es heute keinen Zweifel an einer globalen Erwärmung gibt, die sich auf menschliche Aktivitäten zurückführen lässt. Dies entspricht dem anthropogenen Treibhauseffekt.

Aus der reinen Beobachtung der Umwelt (Feldmessung) und ihren Veränderungen werden aber noch nicht die Gründe und Mechanismen deutlich, die zu den Veränderungen führen. Dies liegt am vielfältigen Zusammenwirken von chemischen und physikalischen Prozessen der Umwelt, die sich nicht einfach trennen lassen. Die Gründe für Veränderungen sind aber notwendig zu kennen, denn nur mit ihrer Kenntnis können wirksame und sinnvolle Maßnahmen gegen die Veränderungen der Umwelt durch den Menschen ergriffen werden.

### III. Warum wird die Umwelt im Labor untersucht?

Eine Beobachtung in der Umwelt (**Feldmessung**) lässt sich auf Grund der hohen Variabilität der Umwelt nicht ohne weiteres reproduzieren. Beispielsweise lässt sich das Ergebnis einer Niederschlagsmessung in der Umwelt kaum zu beliebigen Zeitpunkten wiederholen:

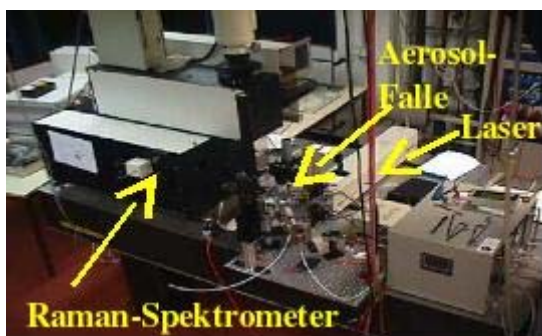


**Abb. 3:** Beispiele für Messplattformen für Feldmessungen in der Atmosphäre (von links nach rechts: Stratosphären-Ballon, hochfliegendes Flugzeug, Satellit zur Beobachtung der Umwelt vom Weltraum).

Es kann entweder beliebige Mengen regnen, aber es kann auch die Sonne scheinen. Der Grund hierfür besteht darin, dass eine große Anzahl von Parametern die Umwelt beeinflusst. Diese lassen sich nicht kontrollieren.

Das grundlegende Verständnis für Veränderungen der Umwelt kommt meist aus **Laborexperimenten**, in denen die Umwelt gezielt und vereinfacht untersucht wird. Dabei werden die Bedingungen der Umwelt aber nicht einfach nur kopiert, sondern es wird alles dafür getan, *einzelne* Prozesse studieren zu können. Es gibt z. B. globale Veränderungen der Umwelt, die mit chemischen Prozessen zusammenhängen (z. B. das Ozonloch). Die chemischen Prozesse sind in der Umwelt oftmals nicht eindeutig nachzuweisen, da sich zahlreiche Reaktionen überlagern und daher die Ursachen und Wirkungen nicht klar verstanden werden können. Hier hilft das Laborexperiment, in dem die sich überlagernden Einflüsse und Störungen der realen Umwelt ausgeschlossen werden. Ein Laborexperiment hat die Aufgabe, *jederzeit* wiederholbare (reproduzierbare) Ergebnisse zu liefern. Dies ist natürlich auch die Anforderung an *jedes* physikalische bzw. chemische Experiment (s. [Abb. 4](#)).

Damit kann vorausgesagt werden, bei welchen Bedingungen der Umwelt es z. B. zum Abbau des Ozons in der Atmosphäre kommt. Dies ist von besonderem Interesse, da uns Ozon vor der kurzwelligen Strahlung der Sonne schützt. Ebenso lässt sich die Effizienz chemischer Reaktionen, die in der Umwelt ablaufen, voraussagen. Hier leistet die Physikalische Chemie einen wichtigen Beitrag.



**Abb. 4:** Blick in ein Labor zur Umweltforschung: Auf der Abbildung ist ein Raman-Spektrometer und ein Fallenexperiment zu sehen, mit dem der Abbau von partikelgebundenen Umweltschadstoffen untersucht werden kann. Mit dem Laser werden die gespeicherten Partikel angeleuchtet, so dass inelastisch gestreutes Licht (Raman-Streuung) vom Raman-Spektrometer detektiert werden kann. Mit Hilfe der Raman-Spektroskopie lässt sich der Abbau von partikelgebundenen Schadstoffe empfindlich nachweisen.

#### IV. Welchen Beitrag leistet die Physikalische Chemie zur Umweltforschung?

Für die Physikalische Chemie sind die folgenden Zusammenhänge von Bedeutung, aus denen sich bedeutende Beiträge zum Lösen von Umweltprobleme ergeben:

- Veränderungen der Umwelt lassen sich experimentell in **Feldmessungen** beobachten, d. h. es ist unumgänglich, die Veränderungen der Umwelt durch geeignete Messverfahren zu quantifizieren. Hierfür dienen auch Messmethoden aus der Physik bzw. der Physikalischen Chemie. Grundsätzlich wird zwischen *in situ* Messmethoden und Methoden der Fernerkundung unterschieden. *In situ* Messmethoden erfordern die Messung der gesuchten Größe vor Ort. Dagegen eröffnen Methoden der Fernerkundung die Möglichkeit, weit ab vom Beobachtungsort das Messgerät aufzubauen. Mit Hilfe von Laserstrahlung kann z. B. in großen Entfernungen die Konzentration von Spurengasen der Atmosphäre ortsaufgelöst gemessen werden.
- Die genauen Zusammenhänge der Mechanismen zu Veränderungen der Umwelt lassen sich aus

Feldmessungen meist nicht ableiten. Gerade im Fall von chemischen Veränderungen der Umwelt können zahlreiche chemische Reaktionen dazu beitragen. Die hierzu beitragenden Einzelreaktionen müssen in **Laborexperimenten** untersucht werden. Charakteristisch für ein Laborexperiment im Bereich der Physikalischen Chemie ist, dass die Bedingungen der realen Umwelt so vereinfacht werden müssen, dass sich jeder einzelne Prozess quantifizieren lässt.

- Die Ergebnisse aus Feldmessungen und Laboruntersuchungen gehen schließlich in Modelle ein, die auch von Physikochemikern erstellt und genutzt werden können. Diese **Modelle** erfordern den Einsatz von leistungsfähigen Computern. Sie haben die Aufgabe, die messbaren Zusammenhänge der Umwelt zu reproduzieren. Modelle der Umwelt können aber noch mehr: Sie lassen auch Prognosen für künftige Entwicklungen zu. Das Ziel von Modellen ist es, unter Nutzung sämtlicher zur Verfügung stehender Informationen, ein realistisches Bild zur künftigen Entwicklung unserer Umwelt zu liefern, damit Schaden für die Umwelt abgewendet werden kann. Prognosen sind damit auch Grundlage für Umweltgesetze und internationale Vereinbarungen, die zur Vermeidung von Schäden unserer Umwelt dienen.

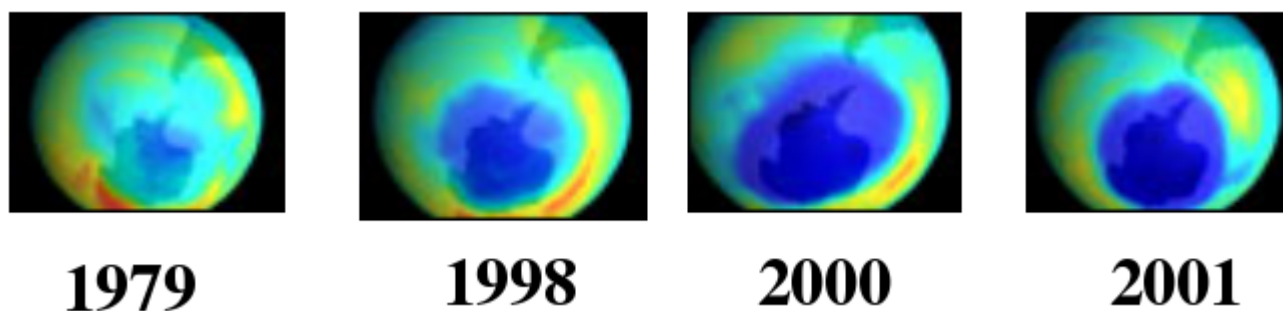
Diese Betrachtungen zeigen auch, dass eine genaue und zuverlässige Beschreibung der Umwelt keinesfalls nur von einem Fach allein durchgeführt werden kann. Es bedarf vielmehr einer engen Zusammenarbeit von verschiedenen Fachgebieten. Hierzu gehören, neben der Physikalischen Chemie, vor allem die anderen Disziplinen der Chemie, die Physik, die Geowissenschaften, die Meteorologie und die Biologie.

#### IV. In welchen Bereichen wird die Umwelt im Labor untersucht?

Grundsätzlich lassen sich Laboruntersuchungen zu Veränderungen der Umwelt in sämtlichen Umweltmedien durchführen. Eine Beschreibung dessen würde den Rahmen dieser Darstellung aber sprengen. Daher wird im Folgenden nur der Bereich der atmosphärischen Umweltforschung vorgestellt, der am Institut für Physikalische Chemie der Universität Würzburg studiert wird. Hier werden u. a. die Mechanismen des Ozonloches, Eigenschaften des atmosphärischen Aerosols und der Abbau von gering flüchtigen Umweltschadstoffen in der Atmosphäre untersucht.

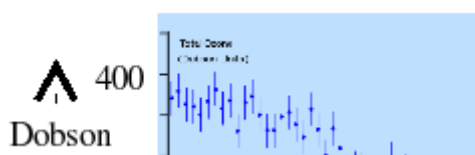
##### 1. Welche Mechanismen führen zur Entstehung des Ozonlochs in der Stratosphäre?

Feldmessungen zeigen am klarsten in der antarktischen Stratosphäre (Höhenbereich von ca. 10 km bis 50 km über dem Erdboden), dass Ozon im Frühling nach dem Ende der Polarnacht sehr schnell verloren geht (s. [Abb. 5](#)).



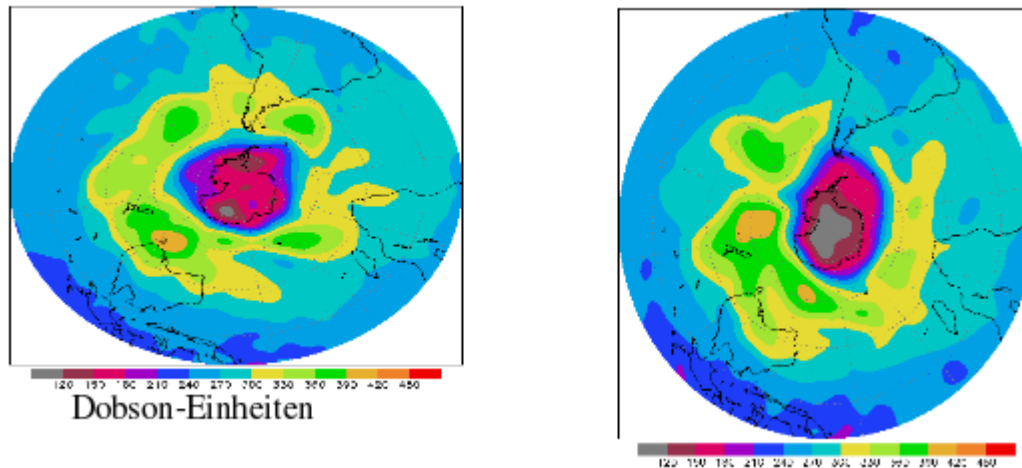
**Abb. 5:** Ausbreitung des Ozonloches über der Antarktis. Die blau markierten Regionen entsprechen niedriger Ozonkonzentration im antarktischen Frühling, der im Oktober liegt. Die Ausdehnung des blau markierten Gebietes ist im Lauf der Zeit angewachsen.

Dies ist ein Hinweis darauf, dass Sonnenlicht für die Abbau-Reaktionen des Ozons eine wichtige Rolle spielt. Diese Prozesse werden erst seit ca. 25 Jahren beobachtet und mit langlebigen Industriechemikalien, wie Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffen (FCKW) oder Halonen, in Zusammenhang gebracht (s. [Abb. 6](#)).



**Abb. 6:** Abnahme der Dicke der Ozonschicht über der Antarktis während der vergangenen 25 Jahre. Die Skala wird in ‚Dobson-Einheiten‘ gemessen. Eine Dobson-Einheit (D.U.) entspricht der Ozon-Schichtdicke von 10  $\mu\text{m}$ , gemessen bei einer Temperatur von 25  $^{\circ}\text{C}$  und normalem Atmosphärendruck ( $p = 1013 \text{ hPa}$ ). In unseren Breiten sind je nach Jahreszeit im Mittel ca. 300 - 400 DU zu finden.

In diesem Jahr ist das Ozonloch wieder stark ausgebildet. Dieser Erwartung entsprechen auch die meteorologischen Beobachtungen während der Polarnacht (tiefe Temperatur), so dass die gestörte Chemie des Ozonloches besonders effizient ablaufen konnte (vgl. auch aktuelle Wochenschau der 34. Woche). Die [Abb. 7](#) zeigt die Ozonverteilung am 14.09.2003 und 06.10.2003. Deutlich zeigt sich die Vertiefung des Ozonloches in diesem Zeitraum:



**Abb. 7:** Ausbreitung des Ozonloches über der Antarktis am 14. September 2003 (links) und am 6. Oktober 2003 (rechts) (Quelle: NOAA). Regionen mit geringer Ozonkonzentration sind mit roter bzw. grauer Farbe gekennzeichnet.

Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW, z. B.  $\text{CF}_3\text{Cl}$ ) oder Halone (z. B.:  $\text{CF}_2\text{ClBr}$ ) werden erst in großen Höhen in der Stratosphäre durch kurzwelliges Sonnenlicht (ultraviolettes Licht) gespalten (photolysiert). Dies ist aus spektroskopischen Experimenten im Labor seit längerer Zeit bekannt. Dabei entsteht atomares Chlor oder Brom. Diese Atome reagieren schnell mit Ozon ( $\text{O}_3$ ). Auch diese Erkenntnisse stammen aus Labormessungen, also der Physikalischen Chemie.

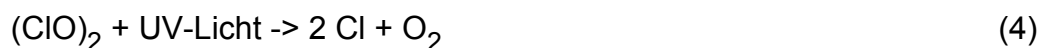
Im Folgenden soll nur auf die Reaktionen des Chlors eingegangen werden: Aus FCKW wird zunächst Chloroxid (ClO), eine sehr reaktive Substanz, gebildet:



In der kalten Stratosphäre kann das ClO mit sich selbst reagieren, d. h. dimerisieren:



Das ClO-Dimer wird durch ultraviolettes, d. h. unsichtbares, kurzwelliges, Sonnenlicht (UV-Licht:  $\lambda < 400 \text{ nm}$ ) photolysiert. Dabei entsteht atomares Chlor und Sauerstoff:



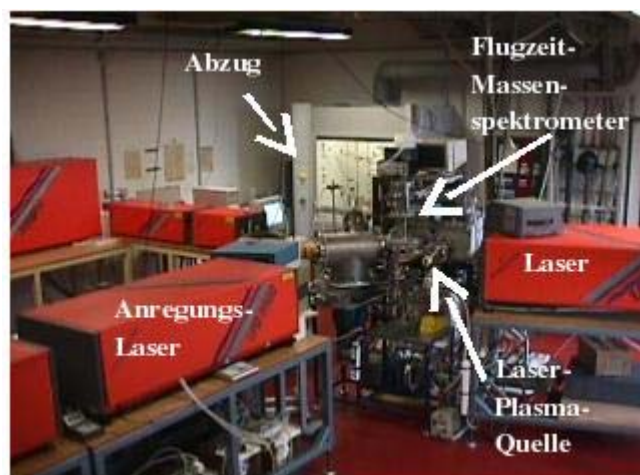
Wenn man die Reaktionsgleichungen (2-4) addiert, so folgt für die Gesamtreaktion unter Berücksichtigung des Massenerhaltungssatzes:



Hier reagiert Ozon mit ultraviolettem Licht zu Sauerstoff. Es handelt sich um einen katalytischen Reaktionsweg, da das Chlor nicht verbraucht wird. Es ist aber für die



hoher Genauigkeit untersuchen. Derartige Experimente führen wir in unserem Labor durch. [Abb. 9](#) öffnet einen Blick in unser Labor.

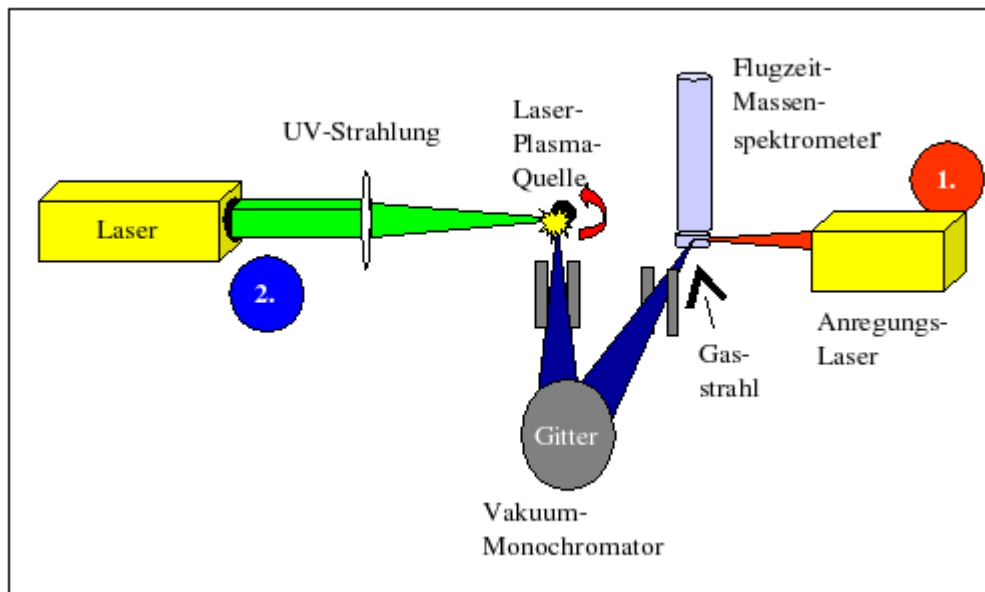


**Abb. 9:** Blick in das Labor zur Untersuchung von Photolyseprozessen atmosphärischer Spurengase. Die Spurengase werden im Abzug synthetisiert. Die orange gefärbten Geräte sind Hochleistungslaser (Excimer-Laser bzw. Farbstoff-Laser), die Photolyse-Experimente finden in der Apparatur in der Mitte des Bildes statt. Dort befindet sich auch das Flugzeit-Massenspektrometer. Weitere Details sind im Text zu finden.

Hierbei handelt es sich um ein "Anregungs-Nachweis-Experiment" ("Pump-Probe-Experiment"), das im Folgenden näher erklärt wird. Damit lassen sich primäre Quantenausbeuten (Effizienz eines Photolyseprozesses pro absorbiertem Photon unter Vermeidung von Stößen zwischen den Gasteilchen) und Verzweungsverhältnisse konkurrierender Photolyseprozesse (Zerstörung eines Moleküls, die durch Licht in Gang gesetzt wird) atmosphärischer Spurengase mit hoher Genauigkeit bestimmen. Es gilt also für das obige Beispiel die beiden Reaktionswege (4) und (6) zu unterscheiden. Dies gelingt mit dem folgenden Ansatz: Zunächst müssen die zu untersuchenden Substanzen hergestellt werden, da sie auf Grund ihrer hohen Reaktivität nicht zu kaufen sind. Dies gelingt sehr ähnlich wie in der Umwelt. Im Labor wird jedoch ein Strömungsreaktor genutzt, der bei geringem Druck im Bereich von 1/100 des normalen Luftdruckes arbeitet. Im Labor wird aber als Quelle für atomares Chlor kein FCKW genutzt, sondern Chlorgas ( $\text{Cl}_2$ ). Dies erleichtert die Synthese des ClO und liefert hohe Konzentrationen dieser Substanz. Chloratome werden aus molekularem Chlor in einer Mikrowellenentladung erzeugt. Danach strömen die Chloratome mit hoher Geschwindigkeit bei niedrigem Druck und geringer Temperatur ( $-70\text{ °C}$  bis  $-90\text{ °C}$ ), zusammen mit Ozon, wobei die Reaktionen (2) und (3) ablaufen. Alternativ kann zur Synthese des ClO auch OClO und Cl genutzt werden.

Im Labor wird die Sonne, die im gesamten ultravioletten Spektralbereich ( $\lambda < 400\text{ nm}$ ) strahlt, durch einen Laser ersetzt. Die Laserstrahlung muss aber eine veränderbare Wellenlänge haben, so dass im Labor die Prozesse (4) und (6) als Funktion der Wellenlänge untersuchbar sind. Wir nutzen hierfür gepulste Laser (s. [Abb. 9](#)), deren Pulslänge 0,00002 Millisekunden (entsprechend: 20 Nanosekunden, wobei  $1\text{ ns} = 10^{-9}\text{ s}$ ) beträgt. Die Produkte aus der Photolyse der Spurengase werden nachfolgend durch Ionisation mit kurzwelliger, bzw. hochenergetischer Strahlung gleichzeitig und vollständig nachgewiesen. Unter Ionisation wird das Entfernen eines Elektrons von einem Molekül verstanden. Es entsteht aus dem elektrisch neutralen Molekül ein positiv geladenes Ion (Kation) und ein freies Elektron. Zur Ionisation dient in unserem Labor eine Laser-Plasma-Strahlungsquelle. Diese Strahlung entsteht, wenn intensives Laserlicht auf eine Metalloberfläche fällt. Sie ist gepulst, so dass die Produkte des Photolysepulses nachfolgend durch die kurzwellige Plasmastrahlung ionisiert werden. All dies erfolgt bei niedrigem Druck (Hochvakuum, dies entspricht ca. einem Milliardstel des normalen Luftdruckes), so dass die photolysierten Gasteilchen keine Stöße erleiden. Der Vorteil der Strahlungsquelle besteht darin, dass sich die Wellenlänge der Photonen einfach mit Hilfe eines Vakuum-Monochromators im Bereich von 50 nm bis 200 nm (entsprechend der Photonenenergie 6-25 eV) verändern lässt. Ionisierende Strahlung derart kurzer Wellenlänge kann sich nicht in der Atmosphäre ausbreiten. Daher muss die Luft aus dem Strahlengang entfernt werden. Dies geschieht im Vakuum-Monochromator, der aus den folgenden Komponenten besteht: einem Vakuum-Tank, zwei Spalten und einem Reflexionsgitter, mit dem die Strahlung entsprechend ihrer Wellenlänge aufgetrennt werden kann. Dies geschieht ähnlich wie beim allgemein bekannten Regenbogen, in dem weißes Sonnenlicht in die Spektralfarben zerlegt wird. Mit Laser-Plasma-Strahlung lassen sich sämtliche Produkte der Photolyse als positiv geladene Ionen (Kationen) selektiv und quantitativ nachweisen. Hierfür dient ein Flugzeit-Massenspektrometer. In diesem Verfahren werden die durch Ionisation entstandenen Ionen entsprechend ihrem Masse-zu-Ladungsverhältnis getrennt und nachgewiesen. Der Vorteil der Ionisation mit Laser-

Plasmastrahlung besteht darin, dass die Messergebnisse sehr einfach, zuverlässig und genau quantifizierbar sind.



**Abb. 10:** Schematischer Aufbau des Anregungs-Nachweis-Experimentes: Der Anregungslaser photolysiert das Spurengas. Nachfolgend wird hochenergetische Strahlung mit einer Laser-Plasma-Strahlungsquelle erzeugt, die mit einem Vakuum-Monochromator spektral zerlegt wird. Durch die hochenergetische Strahlung werden die Photolyseprodukte ionisiert. Im Flugzeit-Massenspektrometer lassen sich schließlich die Photolyseprodukte als Kationen nachweisen (vgl. Abb. 9).

Die Ergebnisse aus den Laborexperimenten zeigen, dass die Photolyse des ClO-Dimers vollständig gemäß Reaktion (4) verläuft, wohingegen Reaktion (6) keine Bedeutung hat. Dies belegt die sehr viel früher formulierte Annahme, dass diese Substanz den größten Anteil zum polaren Ozonabbau hat, sofern die Stratosphäre ausreichend kalt zur Bildung des ClO-Dimers ist, wie dies in diesem Jahr über der Antarktis wieder einmal der Fall ist (vgl. Abb. 7). Die Ergebnisse aus den Laborexperimenten wurden daher auch in Verbindung mit Modellen im Hinblick auf ihre Bedeutung auf den Abbau des stratosphärischen Ozons überprüft und es ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit Resultaten aus Feldmessungen zum Ozonabbau.

Mit dem hier vorgestellten Laborexperiment lassen sich natürlich auch weitere Gase der Atmosphäre untersuchen. Hier gibt es neue, und teils auch unerwartete Erkenntnisse. Detaillierte Informationen zu den Messergebnissen an atmosphärischen Spurengasen gehen über den Rahmen dieser Darstellung hinaus. Sie können bei Interesse zugeschickt werden (e-mail: [eruehl@phys-chemie.uni-wuerzburg.de](mailto:eruehl@phys-chemie.uni-wuerzburg.de)).

### 3. Das atmosphärische Aerosol im Labor

Am Institut für Physikalische Chemie der Universität Würzburg werden folgende Themenbereiche der aktuellen Aerosolforschung mit Hilfe von Laborexperimenten bearbeitet:

- Welche Eigenschaften hat das atmosphärische Aerosol?
- Wie werden partikelgebundene, langlebige Schadstoffe, wie Pflanzenschutzmittel in der Umwelt abgebaut?

Unter dem atmosphärischen Aerosol versteht man fein verteilte Materie in der Atmosphäre, die flüssig oder fest sein kann. Der typische Größenbereich liegt zwischen ca. 50 nm und 50 µm. Die Untersuchung der Eigenschaften des atmosphärischen Aerosols erfordert, dass es möglichst in einem unendlich großen Reaktionsgefäß untersucht werden sollte. Damit lassen sich - wie in der Umwelt - die störenden Einflüsse von Wänden vermeiden. Der übliche Lösungsweg zur Vermeidung von Wandeffekten besteht in der Nutzung von großvolumigen Aerosolkammern, die das Volumen von mehreren Zimmern haben können. Es handelt sich hier um aufwändige Messverfahren.



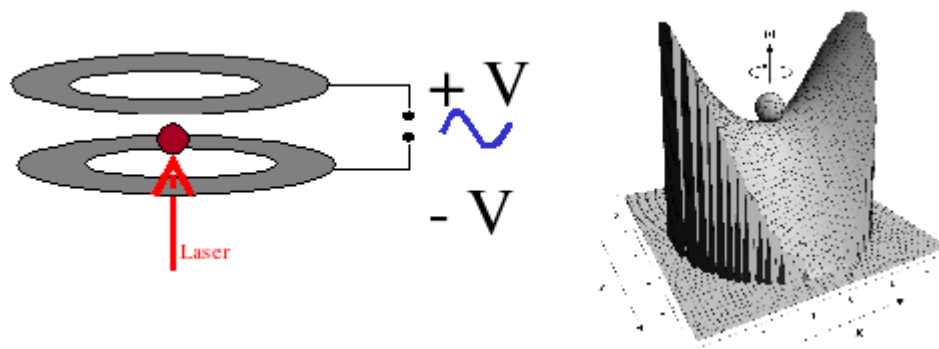
Unsere Laborexperimente gehen den entgegengesetzten Weg: Wir halten

ein einzelnes Aerosol-Partikel in einer geeigneten Falle fest. Damit kann es nicht zur Wand gelangen. Dieses Partikel lässt sich dann über lange Zeiträume untersuchen, die viele Stunden betragen können. Ein Beispiel aus dem Alltag ist in [Abb. 12](#) gezeigt: Hier wird ein großer Ball mit einem Gebläse berührungsfrei an einem Ort gehalten.

**Abb. 12:** Schweben eines großen Balles auf einem Luftstrahl, der aus einem Gebläse kommt.

Der "*Bernoulli-Effekt*" liefert die physikalische Grundlage für die ortsfeste Positionierung des Balles im Luftstrom.

Fallenexperimente am atmosphärischen Aerosol nutzen dagegen meist elektrisch geladene Partikel, die in einer elektrodynamischen Falle (Paul-Falle, bzw. Doppelring-Falle) gespeichert werden. Hier wird zur Speicherung (Levitation) eine Wechselspannung und eine



**Abb. 13:** Schematischer Aufbau einer Doppelring-Falle zur berührungsfreien Untersuchung von einzelnen Aerosol-Partikeln (links). Das mechanische Analogon der elektrodynamischen Speicherung eines geladenen Partikels in einer Falle lässt sich durch ein rotierendes Sattelpotential veranschaulichen (rechts). Das gespeicherte Partikel ruht auf dem Sattel, der schnell rotiert. Damit "sieht" das gespeicherte Partikel nur noch Wände und es kann nicht verloren gehen.

Gleichspannung überlagert. [Abb. 13](#) zeigt einen schematischen Aufbau sowie ein mechanisches Analogon, das in Form eines rotierenden Sattelpotentials die Partikel ortsfest hält. Um eine Aerosol-Falle wird noch eine kleine Klimakammer gebaut, so dass sich im Labor beliebige Regionen der Atmosphäre simulieren lassen.

Mit diesen Fallenexperimenten werden in unserem Labor zahlreiche Fragestellungen zur Umwelt untersucht:

- Bei welcher Temperatur gefriert ein Mikropartikel aus Wasser?
- Bei welcher Luftfeuchte wird ein Seesalz-Partikel fest?
- Spielen Beschichtungen mit organischen Substanzen eine Rolle für Phasenübergänge?
- Wie effizient werden Spurengase der Atmosphäre in flüssige Partikel aufgenommen?
- Wie werden partikelgebundene Schadstoffe abgebaut?

Die Beantwortung dieser Fragen ist von Bedeutung für die Umwelt, um beispielsweise zu wissen, unter welchen Bedingungen der Atmosphäre Wolkenpartikel oder Seesalz-Partikel flüssig oder fest sind. Feste und flüssige Partikel streuen das Sonnenlicht in unterschiedlicher Weise. Chemische Reaktionen von atmosphärischen Spurengasen, die auf bzw. in den Partikeln gebunden sind, können unterschiedlich verlaufen, abhängig vom Aggregatzustand der Partikel. In flüssigen Partikeln werden die Gase gelöst und es können zahlreiche chemische Reaktionen in der Lösung ablaufen. Dagegen werden die Gase auf der Oberfläche festen Partikeln adsorbiert, so dass die Konzentration der Gase im Volumen der Partikel geringer sein kann.

Zur detaillierten Beantwortung dieser Fragen werden von uns als Messmethoden u. a. die elastische (Mie-Streuung) und inelastische Lichtstreuung (Raman-Streuung) genutzt (s. auch [Abb. 4](#)).

Detaillierte Informationen zu den Messergebnissen zum atmosphärischen Aerosol gehen über den Rahmen dieser Darstellung hinaus. Sie können bei Interesse zugeschickt werden (e-mail: [eruehl@phys-chemie.uni-wuerzburg.de](mailto:eruehl@phys-chemie.uni-wuerzburg.de)). Viel besser ist aber ein Besuch bei uns in Würzburg.

## VI. Fazit

Die genaue Kenntnis unserer Umwelt erfordert zuverlässige Experimente und Modelle, damit jeglicher Schaden durch die Einwirkung des Menschen verhindert wird. Dies gelingt nur durch eine interdisziplinäre Kombination von Feldmessungen, Laboruntersuchungen und Modellen. Ebenso muss das grundlegende Verständnis für die natürliche Variabilität der Umwelt vorhanden sein. Die Simulation der Umwelt im Labor liefert auch hierfür einen bedeutenden Beitrag. Die methodische Vielfalt, die hierfür in der Physikalischen Chemie genutzt wird, erfährt neue Impulse aus der Grundlagenforschung sowie den angrenzenden Fächern, wie der Physik oder den angrenzenden Disziplinen der Chemie. Daraus entstehen immer spezifischere und genauere Messverfahren, die sich für die Umweltforschung nutzbringend einsetzen lassen.

## VII. Weitere Auskünfte sind zu erhalten bei:

Prof. Dr. Eckart Rühl  
Lehrstuhl für Physikalische Chemie I  
Institut für Physikalische Chemie  
Bayerische Julius-Maximilians-Universität Würzburg  
Am Hubland  
97074 Würzburg

**Tel.: 0931-888 6300**

**Fax: 0931-888 6302**

**e-mail: [eruehl@phys-chemie.uni-wuerzburg.de](mailto:eruehl@phys-chemie.uni-wuerzburg.de)**

**[www.phys-chemie.uni-wuerzburg.de/ruehl/index.html](http://www.phys-chemie.uni-wuerzburg.de/ruehl/index.html)**