

Entschärfungstätigkeiten ab. »Bis jetzt ist es dem Bundesgrenzschutz oder der Bundeswehr nur möglich, mit kleinen mobilen Robotern, die lediglich über einen einzigen Greifarm und einzelne Kameras zur Vermittlung von Monosichten verfügen, gefährliche Hinterlassenschaften zu bergen«, erläutert der Ingenieur. »Aber eine sichere Entschärfung ist mit dieser Technologie bis heute nicht möglich. Schon allein bedingt durch die Einschränkung auf einarmiges Handeln, können bislang nur erste unterstützende Maßnahmen aus sicherer Entfernung durchgeführt werden. Der Experte muss in nahezu allen Fällen nach wie vor direkt am gefährlichen Objekt weitere erforderliche Handgriffe ausführen.«

Die TUM-Ingenieure erproben das neue Telepräsenzsystem bereits in der Praxis, in Zusammenarbeit mit Bundeswehr und Bundesgrenzschutz. Die Geräte stehen fertig aufgebaut in den Räumen des Lehrstuhls. In den Tests wird eine Übungsmine des Typs PROM-1 entschärft. »Die PROM-1 ist eine Splittermine, wie sie noch zu tausenden im ehemaligen Jugoslawien im Boden vergraben sind«, erklärt Kron. Die bisherigen Tests verliefen sehr erfolgreich. Noch sind die auf den Roboter übertragenen Handbewegungen etwas eingeschränkt und menschliche Hände dem System gegenüber flexibler. »Trotzdem sind wir zuversichtlich, dass wir mit der Weiterentwicklung unseres Systems eine wesentliche Steigerung des Umfangs und der Effizienz bei künftigen Entschärfungstätigkeiten gegenüber den herkömmlichen Technologien erwarten dür-

fen«, meint Kron. In den nächsten drei Jahren wollen die Ingenieure das Telepräsenzsystem soweit verfeinern, dass sie Handbewegungen in allen Freiheitsgraden ohne Einschränkungen auf Robotergreifarme mit mehrfingerigen Händen übertragen können.

*Thorsten Naeser*

**Dipl.-Ing. Alexander Kron**  
**Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik**  
**Tel.: 089/289-23415**  
**[alexander.kron@ei.tum.de](mailto:alexander.kron@ei.tum.de)**

Super-Treibhausgas in der Atmosphäre

## Aufklärung im Fall SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub>

**Der Treibhauseffekt ist in aller Munde, und jeder Schüler lernt heute, dass Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) auf diesem Weg zur Erwärmung der Erdatmosphäre beiträgt. Weniger bekannt sind die vielen anderen Spurengase, die der Atmosphäre ebenfalls einheizen. Das Gas mit der stärksten bisher bekannten Treibhauswirkung hat die Zusammensetzung SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub> und ist schätzungsweise 19 000 mal so wirksam wie CO<sub>2</sub>. Ein wichtiger Punkt hinsichtlich der Schädlichkeit von SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub> ist dessen Lebensdauer und Schicksal unter atmosphärischen Bedingungen, also die Frage, ob sich dieses Spurengas über die Zeit anreichern kann bzw. wie und wie schnell es abgebaut wird. Diesen Aspekten widmet sich - mit finanzieller Hilfe des Bundes der Freunde der TU München - Dr. Mohamed Turki am Lehrstuhl für Theoretische Chemie in Garching (Prof. Wolfgang Domcke).**

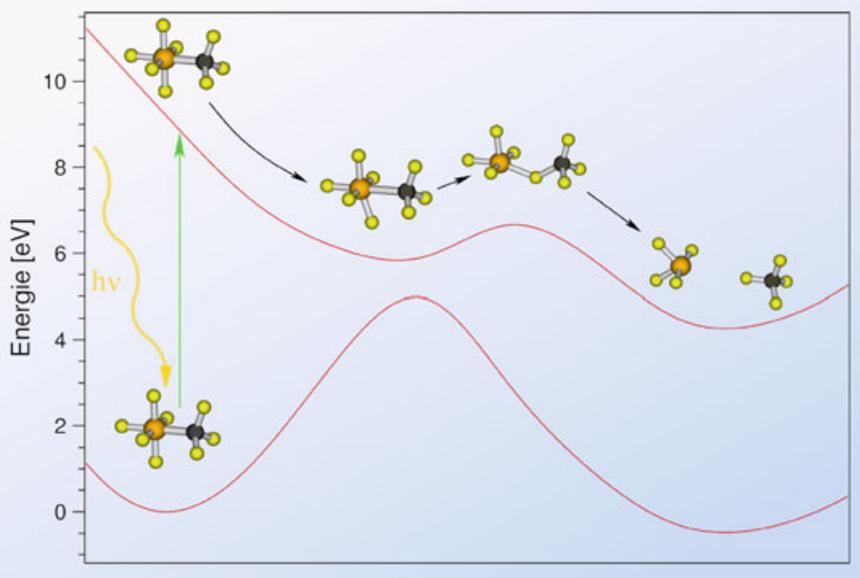
Die Entdeckung des ungiftigen, chemisch völlig unreaktiven und extrem stabilen Gases SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub> in der Atmosphäre sorgte im Jahr 2000 für viel Wirbel und stieß zahlreiche Forschungsprojekte an. Denn SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub> absorbiert extrem viel der von der Erdoberfläche zurückgestrahlten Wärme, trägt also zur Treibhauswirkung bei; zudem vermutet man, dass es eine ausgesprochen lange Lebensdauer von über 1 000 Jahren hat. Die Lebensdauer, eine ungemein wichtige Größe für die potentielle Schädlichkeit als Treibhausgas, lässt sich bei solchen stabilen Molekülen leider nicht direkt messen, so dass man auf Schätzungen und theoretische Modelle angewiesen ist. Genau hier setzt die Arbeit der TUM-Wissenschaftler an, die sich mit den möglichen Zerfallsprozessen von SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub> befasst.

Die »chemischen Räumkommandos« der Atmosphäre, die äußerst reaktiven Radikale und freien Atome wie das Hydroxylradikal (OH), atomarer Sauerstoff (O) und Ozon (O<sub>3</sub>), können SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub> nicht angreifen, da dieses durch die Fluoratome (F) wie durch einen Panzer geschützt ist. Die einzige bisher bekannte relevante Reaktion ist das Einfangen freier Elektronen, das zum spontanen Zerfall in ein SF<sub>5</sub>-Ion und ein CF<sub>3</sub>-Radikal führt. Freie Elektronen kommen in der Atmosphäre aber erst in über 50 Kilometer Höhe in ausreichender Konzentration vor, wo sie durch die extrem energiereiche, kurzwellige Strahlung entstehen, die bestimmte Spurengase photoionisiert.

Die ausgesprochen kurzwellige Strahlung kann aber auch mit SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub> wechselwirken und sehr viel Energie in dieses Molekül »pumpen«. Das führt unter Umständen zum Bruch von Bindungen, zur »Photodissoziation«. Derartige Prozesse untersuchen die TUM-Chemiker mittels quantenchemischer Rechnungen, die gezeigt haben, dass SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub> Strahlung mit Wellenlängen (λ) von rund 133 Nanometer (nm) absorbieren kann und dadurch in einen angeregten Zu-

stand übergeht. Zur Erzeugung freier Elektronen ist jedoch eine Wellenlänge von  $\lambda \leq 122$  nm nötig. Da die kürzeren Wellenlängen bereits in größerer Höhe durch die

lohnt und bereits zu durchaus unerwarteten Erkenntnissen geführt: Gleich nach der elektronischen Anregung beginnt sich das Molekül zu verformen, wobei sich die zentrale S-C-Bindung stark dehnt und sich ein F-Atom des  $SF_5$ -Fragments in Richtung  $CF_3$  verbiegt. Eine weitere S-F-Bindung wird ebenfalls stark gestreckt. Die Energie des absorbierten



Durch Photoanregung ( $h\nu$ ) geht das  $SF_5CF_3$ -Molekül in den angeregten Zustand über (grüner Pfeil) und zerfällt dann unter Übertragung eines Fluoratoms. Die roten Kurven geben die berechneten Energien der beiden elektronischen Zustände an. Orange: Schwefel, gelb: Fluor, schwarz: Kohlenstoff.

Atmosphäre herausgefiltert werden, nimmt ihre Strahlungsintensität mit abnehmender Höhe rapide ab. Dadurch kann  $SF_5CF_3$  auf seiner vertikalen Wanderung durch die Atmosphäre zuerst Photonen von  $\lambda \sim 133$  nm absorbieren, bevor es in Höhen gerät, in denen genügend freie Elektronen vorhanden sind.

Die nächste Frage zu lösen - wie verhält sich  $SF_5CF_3$  nach der elektronischen Anregung? -, ist eine knifflige Aufgabe, da die theoretische Behandlung von Molekülen in angeregten Zuständen sehr schwierig ist und die Größe des Moleküls (also die Anzahl der Elektronen) an der Grenze des derzeit Machbaren liegt. Die Mühe hat sich allerdings ge-

neneinfach verkürzen diese beiden Zerfallsmechanismen die Lebensdauern von  $SF_5CF_3$  etwas, weil die notwendige Strahlung bereits in tieferen Regionen der Atmosphäre zur Verfügung steht. Die Wissenschaftler haben jedoch noch einen weiteren Reaktionsweg gefunden, der einen völlig neuen Aspekt ins Spiel bringt: Während des Bruchs der S-C-Bindung kann ein F-Atom vom  $SF_5$ - auf das  $CF_3$ -Fragment übertragen werden, wobei  $CF_4$  und  $SF_4$  (im angeregten Zustand) entstehen.  $CF_4$  ist ebenfalls ein bekanntes Treibhausgas, zwar weniger effizient als  $SF_5CF_3$ , dafür aber quasi unzerstörbar mit einer geschätzten Lebensdauer von 50 000 Jahren. Dieses überraschende Ergebnis deutet an, dass zumindest ein kleiner Teil der Treibhausaktivität von  $SF_5CF_3$  in Form von  $CF_4$  erhalten bleibt. Wie groß dieser Anteil tatsächlich ist, sollen weitere theoretische Untersuchungen zeigen, die hoffentlich in Zukunft auch eine experimentelle Bestätigung anregen werden.

**Dr. Wolfgang Eisfeld**  
**Lehrstuhl für Theoretische Chemie**  
**Tel.: 089/289-13614**  
**wolfgang.eisfeld@ch.tum.de**

Photons reicht aus, um das Molekül in ein  $SF_5$ - und ein  $CF_3$ -Fragment zu spalten. Dennoch ist dies nicht der günstigste Zerfallsweg, da ausgehend vom angeregten Zustand ein Ionenpaar erzeugt wird. Ein deutlich effizienterer Prozess ist die gleichzeitige Spaltung der S-C- und einer S-F-Bindung, die zu  $SF_4$ ,  $CF_3$  und einem F-Atom führt.

Verglichen mit dem dissoziativen Elektro-

*Wolfgang Eisfeld*

Geotechnik-Labor unter dem Rathaus

## Eis als Baustoff

**Unter dem Münchner Rathaus tut sich was: An der U-Bahn wird gebaut, und im Zusammenhang damit beobachten Wissenschaftler vom Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik (Zentrum Geotechnik) der TUM (Prof. Norbert Vogt) in rund 15 Metern Tiefe das Verformungsverhalten von gefrorenem Boden. Üblicherweise verbindet man mit dem Begriff »Labor« weiße Kittel, filigrane Messtechnik und steriles, zumindest staubfreies Arbeiten. Von dieser Vorstellung muss man sich lösen, wenn - wie im vorliegenden Fall - das Labor eine robuste Tunnelbaustelle ist. Aber: Der geometrische Maßstab der Messtechnik hat keinen Einfluss auf die Qualität der Untersuchungsergebnisse.**

Der U-Bahnhof Marienplatz wird derzeit unter dem Neuen Rathaus auf Höhe der U6 erweitert - man braucht mehr Kapazität, um die Fahrgäste zum neuen Fußballstadion zu bringen. Es entstehen zwei Begleittunnel, die parallel zu den bestehenden U-Bahnrohren verlaufen und unter den Gebäudeflügeln des historischen Rathauses liegen. Zum Bau dieser Tunnel wird der Boden vereist, um ihm mehr Festigkeit zu verleihen. Die dafür notwendigen Vereisungsanlagen wurden von Pilotstollen aus gebohrt, die vorab seitlich versetzt über den Begleittunneln hergestellt wurden.

TUM Mitteilungen 5-2004