



Lachgas – Übersicht und Einführung

Prof. Dr. med. Jörg Weimann, D.E.A.A.

Charité – Universitätsmedizin Berlin, Campus Benjamin Franklin

Seit mehr als 150 Jahren wird Lachgas klinisch zur Narkose und Schmerzbehandlung eingesetzt und gehört auch heute noch zur täglichen Routine weltweit. Gleichzeitig kann Lachgas aufgrund dieser langen Anwendungszeit und der Unzahl behandelter Patienten bezüglich seines Nebenwirkungsspektrums und der sich daraus ableitenden Kontraindikationen als eines der am besten untersuchten Pharmaka überhaupt gelten.

Lachgas ist ein Inhalationsanästhetikum mit schwacher hypnotischer und mäßiger analgetischer Potenz, eine muskelrelaxierende Wirkung fehlt. Der MAK-Wert liegt für Lachgas bei 104%, d.h. eine Narkose mit Lachgas allein ist nur theoretisch unter Überdruck und unter Verzicht auf Sauerstoff zu erzielen. Daher wird in der Praxis Lachgas in einer maximalen inspiratorischen Konzentration von 70% verwendet und mit anderen Anästhetika kombiniert. So lässt sich ähnlich wie in der Chemotherapie durch die Kombination mit anderen narkotisch und analgetisch wirksamen Substanzen – seien dies nun intravenöse Narkotika, Opiate oder Inhalationsanästhetika –, deren Wirkung verstärken und deren Nebenwirkungen vermindern.

Aufgrund seines niedrigen Blut-Gas-Verteilungskoeffizienten von 0,47 und seines geringen Fett-Blut-Verteilungskoeffizienten ist Lachgas das am besten steuerbare, heute zugelassene Anästhetikum (1). Genauso wie die anderen Inhalationsnarkotika kann die Lachgas-Konzentration kontinuierlich in der Ausatemluft von Atemzug zu Atemzug überwacht werden. Sein Einsatz ist auch bei schwer eingeschränkter Organfunktion insbesondere von Leber und Nieren möglich, da es nicht metabolisiert wird. Wegen seiner schnellen An- und Abflutkinetik wird Lachgas besonders bei kurzen Eingriffen, z.B. im ambulanten Bereich eingesetzt, und als Analgetikum besonders dort, wo die atemdepressiven Eigenschaften der Opiate vermieden oder zumindest minimiert werden müssen. Es hat einen festen Platz in der Kinderanästhesie.

Lachgas hat nur geringe kardiozirkulatorische und respiratorische Nebenwirkungen. Während eine direkte negative Inotropie im Tiermodell nachgewiesen wurde, kommt diese aufgrund einer gleichzeitigen zentralen Sympathikusstimulation klinisch im Sinne einer Reduktion des arteriellen Blutdrucks kaum zum Tragen. Lachgas führt zu einer zerebralen Vasodilatation und so auch zu einer Erhöhung des intrakraniellen Druckes, besonders bei Patienten mit eingeschränkter zerebraler Compliance. Auch wenn dieser Effekt durch gleichzeitige Gabe anderer Anästhetika wie Propofol oder Pentobarbital unterdrückt werden kann, sollte bei Patienten mit erhöhtem intrakraniellen Druck oder einem Risiko dafür (z.B. Schädelhirntrauma) auf Lachgas verzichtet werden.

Lachgas diffundiert seinem Konzentrationsgefälle folgend in luftgefüllte Höhlen und Räume. Handelt es sich dabei um abgeschlossene Räume kann es so zu einer Druckerhöhung bzw. Ausdehnung dieser Räume führen. Hieraus ergeben sich als Kontraindikationen für die Anwendung von Lachgas: Ileus, Pneumothorax, Pneumomediastinum, Pneumoperikard, Eingriffe am Mittelohr, Luftembolie, sowie neurochirurgische und herzchirurgische Eingriffe,



und Eingriffe am offenen Auge. Die repetitive Überprüfung des Tubuscuffdruckes gehört heute zur anästhesiologischen Routine.

Eine immer wieder beschriebene Darm-Distension durch Lachgas konnte in mehreren prospektiven, doppelblinden Studien an Patienten mit abdominalen Eingriffen nicht eindeutig verifiziert werden (2-4). Bezüglich der Gruppenzugehörigkeit geblindete Kollegen der Chirurgie konnten intraoperativ anhand des Operationssitus nicht bestimmen, ob die Patienten Lachgas erhielten oder nicht. Unterschiede zwischen den Lachgas- und Kontrollgruppen bezüglich postoperativer Darmtätigkeit wurden nicht detektiert (4,5). Nur in einer Studie von Pedersen et al. zeigte sich ein um im Mittel um 10,3 Stunden verzögerter erster postoperativer Stuhlgang bei mit Lachgas behandelten Patientinnen nach Hysterektomie gegenüber einer Kontrollgruppe (2).

Zwei große Metaanalysen (6,7) zeigten eine leichte, aber signifikant erhöhte Inzidenz von postoperativer Übelkeit und Erbrechen (PONV) durch Lachgas mit einer Odds-Ratio von 1,3. Diese liegt damit deutlich niedriger als die für Inhalationsanästhetika und Opiate (8). Nur wenige Studien haben die Auswirkung allein von Lachgas - und nicht von Lachgas in Kombination mit anderen Anästhetika - auf die Inzidenz von PONV untersucht (und kamen dabei zu zum Teil widersprüchlichen Ergebnissen). Erst die kürzlich publizierte „IMPACT“-Studie (9), in deren Rahmen 6 verschiedene Interventionen auf ihre Potenz, das PONV-Risiko zu vermindern, untersucht wurden, zeigte, dass durch das Weglassen von Lachgas während der Narkose eine Reduktion der PONV-Inzidenz um 12,1% (95% CI: 4,3-19,3%) – in dieser Studie von 38,4% mit Lachgas auf 31,1% ohne Lachgas – erreicht werden kann. Zuletzt soll in diesem Zusammenhang noch darauf hingewiesen sein, dass die bereits zitierte Metaanalyse von Tramèr et al. zusätzlich zeigte, dass das Weglassen von Lachgas während Narkose mit einem erhöhten Risiko für das Auftreten intraoperativer Wachheit einhergeht: die "numbers-needed-to-treat" lag hier bei 46 (7).

Die wesentliche toxische Nebenwirkung von Lachgas, die Inaktivierung von Vitamin B12, wurde bereits 1956 erstmals beschrieben und stellt nur dann eine klinisch relevante Nebenwirkung dar, wenn Lachgas über längere Zeit kontinuierlich (über Tage) bzw. intermittierend (über Monate) inhaliert wird (10).

In seinem Statement „Waste Anesthetic Gases Information for Management in Anesthetizing Areas and the Postanesthesia Care Unit (PACU)“ kommt das Committee on Occupational Health of Operating Room Personnel der American Society of Anesthesiology zu dem Schluss, dass es – abgesehen von tierexperimentellen Hinweisen – keine hinreichend belegten Daten gibt, die beweisen, dass Lachgas eine teratogene, mutagene oder karzinogene Wirkung hat. Ebenso fehlen entsprechende Daten, bezüglich einer Auswirkung von Lachgas auf die Reproduktivität (siehe die Internetseite der ASA unter <http://www.ASAhq.org>).

Lachgas gehört neben CO₂ und Methan zu den sogenannten Treibhausgasen. Medizinisches Lachgas hat jedoch nur einen Anteil von weniger als 0,1% an der jährlichen weltweiten Gesamt-Treibhausgas-Emission. Es besteht kein direkter Zusammenhang zwischen Lachgas und der Problematik des „Ozon-Lochs“ (11).



Zusammenfassend kann gesagt werden, dass vor dem Hintergrund der heute vorliegenden Literatur kein Grund besteht, die Anwendung von Lachgas generell abzulehnen. Lachgas hat klare Indikationen und ebenso klar definierte Kontraindikationen, deren Beachtung – wie bei jedem anderen Medikament auch – zur täglichen Routine gehört. Im Gegenteil, der Verzicht auf Lachgas könnte auch ein Risiko darstellen (7), mehrten sich doch Berichte über intraoperative Wachheit unter total-intravenöser Anästhesie (TIVA) (12). Unter dem zunehmenden Kostendruck – nicht erst seit der Einführung der DRGs in Deutschland – gilt es heute außerdem die Kosten eines Medikamentes gegenüber seinem Nutzen abzuwägen. Vor diesem Hintergrund scheint der Einsatz von Lachgas zur Supplementierung sowohl einer Inhalationsnarkose wie auch einer TIVA weiterhin attraktiv. Nicht zuletzt sollte uns stutzig machen, dass die seit 1999 aufgekommene Diskussion über den Einsatz von Lachgas eine weitestgehend auf Deutschland beschränkte Kontroverse ist, die zum Teil sehr emotional geführt wurde (11,13-15). Nicht zuletzt: ein Anästhetikum, welches seit über 150 Jahren seine sichere sinnvolle Anwendung beweist, darf nur dann durch andere „ersetzt“ werden, wenn die Überlegenheit dieses neuen eindeutig bewiesen ist.

Literatur:

1. Stenqvist O. Nitrous oxide kinetics. *Acta Anaesthesiol Scand.* 1994;38:757-760.
2. Pedersen FM, Wilken-Jensen C, Knudsen F, Lindekaer AL, Svare EI. The influence of nitrous oxide on recovery of bowel function after abdominal hysterectomy. *Acta Anaesthesiol Scand.* 1993;37:692-696.
3. Krogh B, Jorn JP, Henneberg SW, Hole P, Kronborg O. Nitrous oxide does not influence operating conditions or postoperative course in colonic surgery. *Br J Anaesth.* 1994;72:55-57.
4. Taylor E, Feinstein R, White PF, Soper N. Anesthesia for laparoscopic cholecystectomy. Is nitrous oxide contraindicated? *Anesthesiology.* 1992;76:541-543.
5. Karlsten R, Kristensen JD. Nitrous oxide does not influence the surgeon's rating of operating conditions in lower abdominal surgery. *Eur J Anaesthesiol.* 1993;10:215-217.
6. Divatia JV, Vaidya JS, Badwe RA, Hawaldar RW. Omission of nitrous oxide during anesthesia reduces the incidence of postoperative nausea and vomiting. A meta-analysis. *Anesthesiology.* 1996;85:1055-1062.
7. Tramér M, Moore A, McQuay H. Omitting nitrous oxide in general anaesthesia: meta-analysis of intraoperative awareness and postoperative emesis in randomized controlled trials. *Br J Anaesth.* 1996;76:186-193.
8. Apfel CC, Roewer N. Einflussfaktoren von Ubelkeit und Erbrechen nach Narkosen. Fiktionen und Fakten. *Anaesthetist 2000 Jul;49 (7):629 -42.* 2000;49:629-642.
9. Apfel CC, Korttila K, Abdalla M, Kerger H, Turan A, Vedder I, Zernak C, Danner K, Jokela R, Pocock SJ, Trenkler S, Kredel M, Biedler A, Sessler DI, Roewer N. A factorial trial of six interventions for the prevention of postoperative nausea and vomiting. *N Engl J Med.* 2004;350:2441-2451.
10. Weimann J. Toxicity of nitrous oxide. *Best Pract Res Clin Anaesthesiol.* 2003;17:47-61.
11. Stenqvist O, Husum B, Dale O. Nitrous oxide: an ageing gentleman. *Acta Anaesthesiol Scand.* 2001;45:135-137.
12. Miller DR, Blew PG, Martineau RJ, Hull KA. Midazolam and awareness with recall during total intravenous anaesthesia. *Can J Anaesth.* 1996;43:946-953.



13. Rothhammer A. Lachgas heute - eine klinische Wertung auf dem Boden der Literatur. *Anesthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther.* 2002;37:375-377.
14. Schulte am Esch J, Scholz J. Zur Diskussion über das Ende der Lachgas-Ära in Deutschland - emotionales Meinungsbild oder zwingende Notwendigkeit? *Anesthesiol Intensivmed Notfallmed Schmerzther.* 2001;36:597-598.
15. Raeder JC. Total intravenous anaesthesia-free from nitrous oxide, free from problems? *Acta Anaesthesiol Scand.* 1994;38:769-770.

Arbeitsplatzbelastung durch Inhalationsanästhetika

J. Hobbahn¹, F. Schiewe-Langgartner¹, G. Wiesner²

¹Klinik für Anästhesiologie, Klinikum der Universität Regensburg; ²Institut für Anästhesiologie, Deutsches Herzzentrum München, Klinik a. d. der TU München

Die Diskussion über die Relevanz der am Anästhesiearbeitsplatz auftretenden Konzentrationen der Inhalationsanästhetika wird seit Jahrzehnten geführt. Obwohl heute die Exposition des Personals in nach DIN-Vorgaben ausgestatteten Operationsbereichen (Klimaanlagen, Narkosegas-Absaugung) sehr niedrig sind, herrscht gelegentlich Verunsicherung. Hierfür gibt es mehrere Gründe:

1. Es wird mit einigen human-epidemiologischen Studien aus den 60-iger, 70-iger und 80-iger Jahren argumentiert, die nachteilige, insbesondere teratogene Effekte, durch Spurenkonzentrationen der damals gebräuchlichen Inhalationsanästhetika postuliert haben. Diese Studien genügen aber nicht den Anforderungen einer fachlich einwandfreien epidemiologischen Untersuchung und wurden deshalb, was z.B. Halothan anbetrifft, von der DFG-Kommission als nicht schlüssig eingestuft (1).
2. Die Arbeitsplatzkonzentrationen waren damals wesentlich höher als heute der Fall ist. Die Exposition gegenüber Stickoxydul war bis zu 20- bis 100-fach höher als heute (2)
3. Halothan stellte aufgrund seiner leber-toxischen Wirkung auch unter Arbeitsschutz-Gesichtspunkten ein Risiko dar.
4. Es wird nicht zwischen Arbeitsplätzen mit und ohne klimatechnische Anlagen bzw. Narkosegas-Absaugung differenziert.
5. Befindlichkeitsstörungen werden gern auf die Inhalationsanästhetika zurückgeführt, weil deren Konzentration am Arbeitsplatz einfach zu messen ist. Allerdings spielen diese Spurenkonzentrationen in Anbetracht der multifaktoriellen Belastung des Anästhesisten allenfalls eine völlig untergeordnete Rolle, zumal viele dieser Belastungsfaktoren kaum mess- und quantifizierbar sind (3).



Definitionen

Die maximale Arbeitsplatz-Konzentration (MAK) ist die höchstzulässige Konzentration eines Arbeitsstoffes in der Luft am Arbeitsplatz, die nach dem gegenwärtigen Kenntnisstand auch bei wiederholter und langfristiger Exposition die Gesundheit der Beschäftigten nicht beeinträchtigt und sie nicht unangemessen belästigt.

Die MAK wird in ml/m^3 (= ppm) oder in mg/m^3 angegeben und darf während eines Arbeitstages nicht überschritten werden. Die MAK-Werte sind Schicht-Mittelwerte und gelten für eine durchschnittliche Exposition während eines 8-h Tages und einer 40 h-Woche. Bei verkürzter Exposition darf der Grenzwert überschritten werden. MAK-Werte gelten nur für reine Stoffe. Liegen mehrere Stoffe gleichzeitig vor, z.B. N_2O und Isofluran, erfolgt eine additive Bewertung.

Die gesetzlichen Grenzwerte liegen derzeit für N_2O bei 100 ppm, für Halothan bei 5 ppm, für Enfluran bei 20 ppm und für Isofluran bei 10 ppm. Darüber hinaus existiert eine Grenzwert-Empfehlung der Bundesländer Hamburg, Rheinland-Pfalz und Schleswig-Holstein von 50 ppm für N_2O (Tab.).

Des Weiteren sind Obergrenzen für die Kurzzeitbelastung definiert: Hier darf in keinem 15-Minuten-Zeitraum die 4-fache MAK überschritten werden (15 min-Mittelwert) (Tabelle 1). Die Dauer der erhöhten Exposition soll in einer Schicht insgesamt 1 Stunde nicht übersteigen.

Die Beschäftigung Schwangerer ist zulässig, wenn die MAK-Werte sicher und dauerhaft unterschritten werden. Dies muss durch ausreichend häufige Messungen nachgewiesen werden.

In die Exposition des Personals gehen auch Zeiten mit ein, in denen durch Pausen,

Dauer	N_2O	Halothan	Enfluran	Isofluran	Sevofluran, Desfluran
8-h-Schicht +	100 (50)	5	20	10	n. a.
Kurzzeit #	400 (200)	20	80	40	n. a.

Tabelle 1: Maximale Arbeitsplatz-Konzentrationen (MAK) in Deutschland (ppm).

+ TWA-S-Werte: durchschnittliche Exposition während eines 8-h-Tages und einer 40-h-Woche.

maximale durchschnittliche Konzentration in 15 min. Dauer der Kurzzeitexposition < 60 min pro Schicht. TRGS 900 / Stand 5 / 98.



Regionalverfahren und Prämedikation keine Exposition stattfindet. Die hieraus resultierende Gesamt-Exposition wird als „zeitgewichteter auf die Schichtlänge bezogener Mittelwert = TWA-S-Wert“ (TWA = time weighted average“; S = shift (Schichtlänge)) angegeben. Arbeitet der Anästhesist z.B. 6 h bei einer durchschnittlichen Sevofluran-Konzentration von 0,6 ppm und 2 h ohne Exposition, so ergibt sich ein auf eine Schichtlänge von 8 h bezogener TWA-S-Wert von 0,45 ppm ($0,6 \text{ ppm} \times 6 \text{ h} / 8 \text{ h}$).

MAK-Werte dürfen nicht so verstanden werden, dass unterhalb des Grenzwerts eine Schädigung ausgeschlossen und oberhalb des Grenzwert eine Schädigung nachgewiesen ist. Sie sind letztlich pragmatische Anhaltspunkte im Sinne einer vorsorglichen Maßnahme Übersicht in (4).

Determinanten der Exposition:

Aufzuführen sind hier die Luftwechselrate, die Größe des Raumes, die Narkosegasabsaugung, der Frischgasstrom, die Zahl der durchgeführten Narkosen, die inhalative Einleitung, die Art der Atemwegssicherung und die Arbeitsweise.

Expositionswerte in Operationssälen, Aufwachraum und Intensivstation:

In Operationssälen des Klinikums der Universität Regensburg lag die Exposition gegenüber Stickoxydul mit Schichtmittelwerten von 12 – 25 ppm relativ niedrig, bei allerdings z.T. deutlicher Streuung (4). Bei den volatilen Anästhetika wurden sehr niedrige Werte mit nur geringer Streuung gemessen: Die mittleren Expositionswerte gegenüber Isofluran lagen bei 0,2 ppm, gegenüber Desfluran bei 0,5 ppm. Für Sevofluran hat unsere Arbeitsgruppe vor längerer Zeit Expositionswerte von im Mittel 0,6 ppm (4), in einer neuen Studie von 0,2 ppm erfasst (5).

Bei der Langzeitsedierung mit Isofluran auf der Intensivstation fanden wir durchschnittliche Arbeitsplatz bezogene Expositionswerte von ca. 1 ppm (6). Mit dem neuen “Anaconda“-Applikationssystem wurden jüngst erheblich niedrigere Expositionswerte bei der Langzeitsedierung mit Isofluran gefunden: Spektrophotometrisch gemessen lagen sie bei nur $0,1 \pm 0,2$ ppm. Bei der passiven Messung durch Diffusionssammler (Dosimeter) wurde Werte zwischen nicht nachweisbar und 0,16 ppm gemessen. Die Expositionswerte waren mit oder ohne Narkosegasabsaugung gleich niedrig (7).

Im Aufwachraum unserer Klinik wurden durchschnittliche Arbeitsplatz bezogene Expositionswerte von ca. 2 – 4 ppm N₂O (8), im Aufwachraum einer anderen Universitätsklinik lagen die Werte für N₂O bei 10 – 12 ppm (9).

Gentoxische Effekte durch Spurenkonzentrationen von Inhalationsanästhetika?

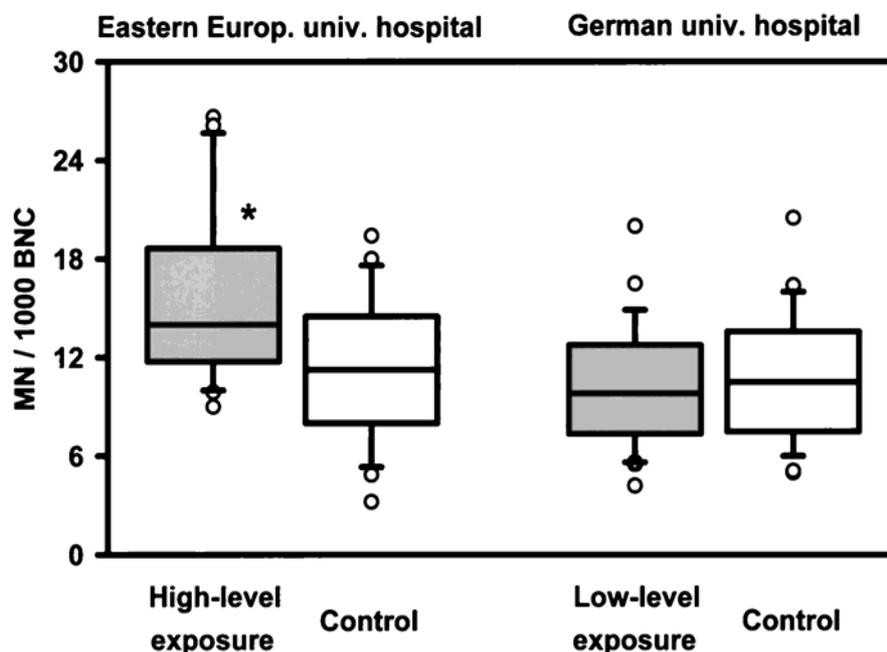
Potentiell mutagene Effekte der Inhalationsanästhetika wurden anhand von in vitro-Testsystemen, z.B. dem als "Goldstandard" unter den Mutagenitätstests angesehenen Ames Test (*Salmonella typhimurium*) ausgeschlossen (4). Ebenfalls negative in vitro-Resultate ergaben Tests, in denen in Ovarzellen des chinesischen Hamsters nach einem vermehrten Auftreten von Chromosomen-Aberrationen (CA), Mikrokernen (Mikronuclei = MN) oder Schwester-Chromatid-Austauschen (sister chromatid exchanges = SCE) gesucht wurde (4).



In-vivo-Tests beim Menschen zeigten widersprüchliche Ergebnisse; einige Studien haben in Lymphozyten von Personal, das über längere Zeit gegenüber Inhalationsanästhetika exponiert war, eine erhöhte Rate an CA, MN oder SCE gefunden, andere hingegen nicht (4). Mutagene Effekte wurden vor allem aus Ländern berichtet, in denen wegen unzulänglicher klimatechnischer Ausstattung Konzentrationen der Inhalationsanästhetika am Arbeitsplatz vorgelegen haben, die in Deutschland nicht mehr vorkommen (4). Eine im Vergleich zu einer deutschen Klinik ca. 10-fach höhere Exposition gegenüber N₂O und volatilen Anästhetika war in einer osteuropäischen Klinik mit einer höheren Rate an MN assoziiert. Bei den Mitarbeitern der deutschen Klinik entsprach die MN-Rate der des nicht exponierten Kontroll-Kollektivs (Abb. 1) (10). Diese Unterschiede sind möglicherweise aber nicht nur auf die unterschiedliche Höhe der Exposition, sondern auch auf die verwendeten volatilen Anästhetika zurückzuführen. In der osteuropäischen Klinik wurde vorwiegend mit Halothan, in der deutschen Klinik mit modernen volatilen Anästhetika gearbeitet.

In neueren zytogenetischen Untersuchungen wurden die Raten an Schwester-Chromatid-Austauschen (SCEs) bei Personal in technisch zeitgemäß eingerichteten Operationssälen gemessen. Dabei fanden sich keine nennenswerten Unterschiede mit denen von nicht-exponiertem Personal (11,12).

Anteil von Lymphozyten mit Mikronuklei (MN) bei Personal, das hohen Konzentrationen von Inhalationsanästhetika gegenüber exponiert war (Eastern Europ. univ. hospital) und Personal,



das niedrigen Konzentrationen gegenüber exponiert war (German univ. hospital). Aufgeführt ist ausserdem Personal, das nicht exponiert war (Control). Die Konzentration an Inhalationsanästhetika war bei der hohen Exposition durchschnittlich ca. 10-fach höher (10).

Es stellt sich die grundsätzliche Frage, wieweit ein positiver zytogenetischer Befund eine Vorhersage über ein gesundheitliches Risiko, z.B. das Auftreten maligner Erkrankungen,



erlaubt. Hier kommt den Chromosomen-Aberrationen Bedeutung zu; im Gegensatz zu einer erhöhten Rate an SCE zeigen sie ein erhöhtes Risiko für Tumorerkrankungen an (13,14). Inwieweit die vermehrte Bildung von MN einen prädiktiven Wert hat, ist noch unklar (13). Keinen prädiktiven Wert haben erhöhte Raten an Schwester-Chromatid-Austauschen (SCEs). Sie stellen lediglich Biomarker für eine erhöhte Exposition dar („biol. Dosimeter“).

Resumee

Die Exposition gegenüber N₂O ist meist, aber nicht immer gering. Die Exposition gegenüber Isofluran, Sevofluran und Desfluran ist minimal und weit unter den MAK-Werten von Isofluran. Es gibt keine Evidenz für gesundheitsschädliche Wirkungen bei den heute üblichen niedrigen Expositionswerten der volatilen Anästhetika.

Literatur:

1. Greim HH. Sammelkapitel MAK-Werte und Schwangerschaft, Nachtrag 1989. Gesundheitsschädliche Arbeitsstoffe. Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 1997:1-5.
2. Sweeney B, Bingham RM, Amos RJ, et al. Toxicity of bone marrow in dentists exposed to nitrous oxide. *Br Med J Clin Res* 1985;291:567-9.
3. Jackson SH. The role of stress in anaesthetists' health and well-being. *Acta Anaesthesiol Scand* 1999;43:583-602.
4. Hobbhahn J. Inhalationsanästhesie. In: E.Kochs, C.Krier, W.Buzello, H.A .Adams, eds. *Anästhesiologie*. Stuttgart: Thieme, 2001:604-18.
5. Schiewe-Langgartner F, Wiesner G, Gruber M, Hobbhahn J. [Exposure of hospital personnel to sevoflurane]. *Anaesthesist* 2005;54:667-72.
6. Hoerauf K, Koller C, Taeger K, Hobbhahn J. Exposition des Intensivpersonals durch Isofluran bei Langzeitsedierung. *AINS* 1995;30:483-7.
7. Sackey PV, Martling CR, Nise G, Radell PJ. Ambient isoflurane pollution and isoflurane consumption during intensive care unit sedation with the Anesthetic Conserving Device. *Crit Care Med* 2005;33:585-90.
8. Hoerauf K, Koller Ch, Fröhlich D, et al. Lachgasexposition des Aufwachraumpersonals unter moderner Klimatechnik. *Anaesthesist* 1995;44:590-4.
9. Westphal K, Byhahn C, Strouhal U, et al. [Exposure of recovery room personnel to inhalation anesthetics]. *Anaesthesiol Reanim* 1998;23:157-60.
10. Wiesner G, Hoerauf K, Schroegendorfer K, et al. High-level, but not low-level, occupational exposure to inhaled anesthetics is associated with genotoxicity in the micronucleus assay. *Anesth Analg* 2001;92:118-22.
11. Hoerauf KH, Wiesner G, Schroegendorfer KF, et al. Waste anaesthetic gases induce sister chromatid exchanges in lymphocytes of operating room personnel. *Br J Anaesth* 1999;82:764-6.



12. Bozkurt G, Memis D, Karabogaz G, et al. Genotoxicity of waste anaesthetic gases. *Anaesth Intensive Care* 2002;30:597-602.
13. Hagmar L, Bonassi S, Strömberg U, et al. Chromosomal aberrations in lymphocytes predict human cancer: areport from the european study group on cytogenetic biomarkers and health (ESCH). *Cancer Research* 1998;58:4117-21.
14. Tucker JD, Preston RJ. Chromosome aberrations, micronuclei, aneuploidy, sister chromatid exchanges, and cancer risk assessment. *Mutat Res* 1996;365:147-59.

Treibhausgase und Klimawandel

Prof. Dr. Mojib Latif

Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel

Die Klimaproblematik

Die sich weltweit häufenden Wetterextreme während der letzten Jahrzehnte haben immer wieder die Klimaproblematik in den Blickpunkt des öffentlichen Interesses gerückt. Dabei stellt sich die Frage, in wieweit die Zunahme von Wetterextremen, wie beispielsweise die Zunahme von Starkniederschlägen in Deutschland oder die Intensivierung tropischer Wirbelstürme (Hurrikane, Taifune), schon Anzeichen der globalen Erwärmung sind. Es gibt heute kaum noch einen Zweifel darüber, dass der Mensch einen Einfluss auf das weltweite Klima ausübt und dass sich das Weltklima in den nächsten Jahrzehnten infolge dieses Einflusses noch weiter erwärmen wird. In einer wärmeren Welt kann mehr Wasser verdunsten, wodurch sich individuelle Wetterphänomene verstärken können.

Das Klimaproblem hat seinen Ursprung darin, dass der Mensch durch seine vielfältigen Aktivitäten bestimmte klimarelevante Spurengase in die Atmosphäre entlässt. Diese Spurengase führen zu einer zusätzlichen Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Luftschichten, dem "anthropogenen Treibhauseffekt". Von größter Bedeutung ist dabei das Kohlendioxid (CO₂), das vor allem durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe (Erdöl, Kohle, Erdgas) in die Atmosphäre entweicht. Der weltweite CO₂ Ausstoß ist eng an den Welt-Energieverbrauch gekoppelt, da die Energiegewinnung vor allem auf der Verbrennung fossiler Brennstoffe (Erdöl, Kohle, Erdgas) basiert. Andere wichtige Spurengase sind vor allem Methan (CH₄), Distickstoffoxid (N₂O) und die Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW). Das Kohlendioxid hat einen Anteil von ca. 50% an dem durch den Menschen verursachten (anthropogenen) Treibhauseffekt. Vom Menschen in die Atmosphäre emittiertes CO₂ hat eine typische Verweildauer von ca. 100 Jahren, was die Langfristigkeit des Klimaproblems verdeutlicht.



Der CO₂ Gehalt der Erdatmosphäre war seit Jahrhunderttausenden nicht so hoch wie heute. Messungen belegen zweifelsfrei, dass sich die Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre seit Beginn der industriellen Revolution rasant erhöht hat. Lag der CO₂ Gehalt um 1800 noch bei ca. 280 ppm (ppm: parts per million), so liegt er heute schon bei fast 380 ppm. Dass der Mensch für diesen Anstieg verantwortlich ist, ist unstrittig. Ein Blick in die Vergangenheit zeigt, dass der CO₂ Gehalt heute schon so hoch ist wie seit ca. 450.000 Jahren nicht mehr (Abbildung 1). Dabei hat man die Schwankungen in der chemischen Zusammensetzung der Erdatmosphäre aus Eisbohrkernen der Antarktis rekonstruiert, indem die im Eis eingeschlossenen Luftbläschen analysiert wurden. Neueste Bohrungen zeigen sogar, dass die heutige CO₂ Konzentration einmalig für die letzte eine Million Jahre ist.

Der zusätzliche (anthropogene) Treibhauseffekt

Bei einer Erde ohne Atmosphäre wäre die Oberflächentemperatur ausschließlich durch die Bilanz zwischen eingestrahelter Sonnenenergie und der von der Erdoberfläche abgestrahlten Wärme- (Infrarot-) Strahlung festgelegt. Diese Oberflächentemperatur würde im globalen Mittel etwa -18°C betragen. Selbst eine Atmosphäre aus reinem Sauerstoff und Stickstoff, die ja die Hauptkomponenten unserer Atmosphäre (ca. 99%) bilden, würde daran nichts Wesentliches ändern. Dagegen absorbieren bestimmte Spurengase, wie Wasserdampf und Kohlendioxid, die von der Erdoberfläche ausgehende Wärmestrahlung und emittieren ihrerseits auch in Richtung der Erdoberfläche (langwellige) Strahlung. Dies führt zu einer

Anstieg der Spurengase

CO₂ Konzentration in den letzten ca. 450.000 Jahren

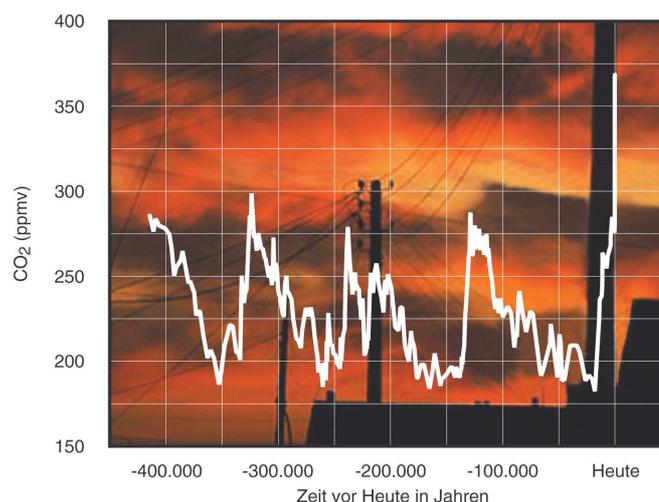


Abbildung 1: Der Kohlendioxid (CO₂) Gehalt der Erde in den letzten ca. 450.000 Jahren. Der Anstieg der CO₂ Konzentration seit Beginn der Industrialisierung ist offensichtlich und auf den Menschen zurückzuführen.



zusätzlichen Erwärmung der Erdoberfläche (Abbildung 2). Die Temperatur der Erdoberfläche beträgt daher im globalen Mittel ca. $+15^{\circ}\text{C}$. Dieser natürliche Treibhauseffekt ist dafür mitverantwortlich, dass es Leben auf unserem Planeten gibt. Die beteiligten Gase werden als "Treibhausgase" bezeichnet.

Die Konzentration der langlebigen Treibhausgase nimmt systematisch zu: seit Beginn der Industrialisierung bis heute bei Kohlendioxid (CO_2) um ca. 30%, bei Methan (CH_4) um 120% und bei Distickstoffoxid (N_2O) um ca. 10%. Hierdurch wird eine langfristige zusätzliche Erwärmung der unteren Atmosphäre und der Erdoberfläche angestoßen. Ein verstärkter Treibhauseffekt führt auch zu Veränderungen des Niederschlags, der Bewölkung, der Meereisausdehnung, der Schneebedeckung und des Meeresspiegels sowie der Wetterextreme, d.h. letzten Endes zu einer globalen Klimaveränderung. Für die Menschheit besonders wichtig ist hierbei die mögliche Änderung der Extremwertstatistik, was anhand der Elbe-Flut 2002 und der Dürre 2003 deutlich geworden ist. Aber auch die Veränderungen in den Gebirgsregionen können dramatische Ausmaße annehmen. Dies erkennt man vor allem an dem Rückzug der Gebirgsgletscher in den Alpen, die bereits etwa die Hälfte ihres Volumens seit 1850 verloren haben. Die Gletscher werden sich aber noch weiter zurückziehen. Die meisten Alpengletscher wären schon in etwa fünfzig Jahren unter Annahme eines "business as usual" (BAU)-Szenariums verschwunden, d.h. wenn keine Maßnahmen unternommen werden, um den anthropogenen Treibhauseffekt abzumildern.

Die Permafrostgebiete, das sind Regionen, in denen die Böden praktisch das ganze Jahr über gefroren sind und nur oberflächlich im Sommer leicht antauen, werden sich ebenfalls zurückziehen. Die Folgen im Gebirge wären unübersehbar, da der Rückzug des Permafrostes

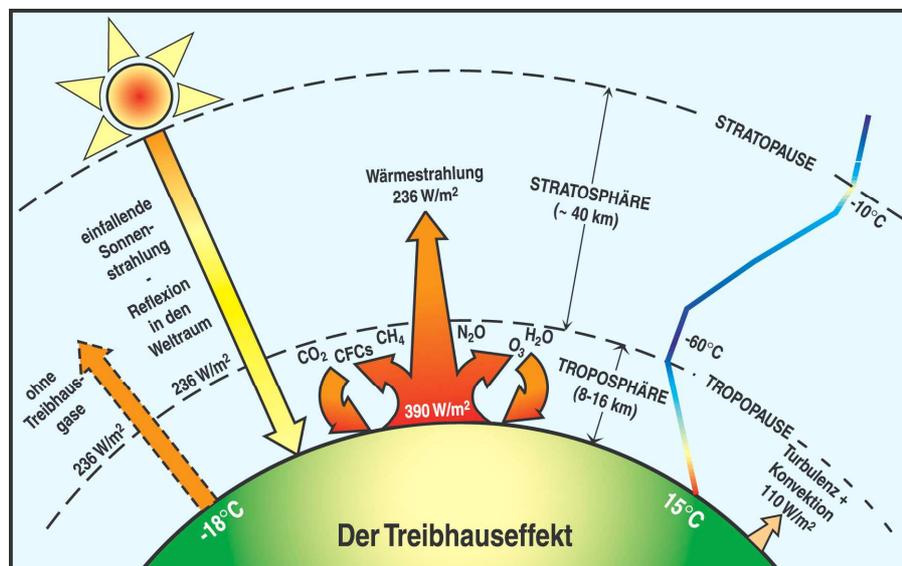


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Treibhauseffekts. Ohne ihn betrüge die Oberflächentemperatur der Erde ca. -18°C , sie beträgt aber tatsächlich ca. $+15^{\circ}\text{C}$. Der Anstieg der Treibhausgase durch den Menschen führt zu einer globalen Erwärmung und damit zu einer globalen Klimaveränderung.



die Stabilität ganzer Berglandschaften gefährden könnte. Bis jetzt nicht gekannte Hangabrutschungen und Murenabgänge, das sind Schlamm- und Gerölllawinen, könnten die Folgen sein. Darüber hinaus besteht die Gefahr, dass infolge des Auftauens der Permafrostgebiete in den hohen Breiten große Mengen von Methan freigesetzt werden, welche die globale Erwärmung weiter verstärken können. Große gefrorene Methanvorkommen (Gashydrate) gibt es auch im Meer, und auch diese können bei genügend starker Erwärmung freigesetzt werden. Auch der Kohlenstoffkreislauf kann verstärkend auf die globale Erwärmung wirken. Die Löslichkeit des Meerwassers nimmt mit zunehmender Temperatur ab und eine durch Klimastress geschädigte Vegetation nimmt weniger CO₂ auf. Im Extremfall gibt sie sogar CO₂ an die Atmosphäre ab. Die Veränderungen in den Weltmeeren und in der Vegetation können also dazu führen, dass der Atmosphäre weniger CO₂ entzogen wird, sodass sich der CO₂ Gehalt der Atmosphäre und die Temperatur der Erde noch rasanter erhöhen.

Als Folge der globalen Erwärmung wird der Meeresspiegel ansteigen, zum einen infolge der Wärmeausdehnung der Meere (thermische Expansion) und zum anderen infolge der Eisschmelze. Der Anstieg des Meeresspiegels infolge der thermischen Expansion kann bis zum Jahr 2100 je nach angenommenem Szenarium bis zu 80 cm betragen. Falls die großen Eispanzer Grönlands oder der Antarktis schmelzen sollten wären noch deutlich stärkere Anstiege zu erwarten. So würde beispielsweise ein komplettes Abschmelzen des grönländischen Eispanzers den Meeresspiegel um weltweit sieben Meter ansteigen lassen. Allerdings wird die Frage der Stabilität der großen Eisschilde innerhalb der Klimaforschung noch kontrovers diskutiert.

Die Wissenschaft hat die Bringschuld erbracht

Es drängt sich nun die Frage auf, was man schon heute an Klimaänderung beobachten kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Klima auf äußere Anregungen immer mit einer Zeitverzögerung von einigen Jahrzehnten reagiert. Die globale Mitteltemperatur der Erde zeigt aber bereits einen offensichtlichen Erwärmungstrend in den letzten 100 Jahren (Abbildung 3). Zusammen mit weiteren statistischen und auf Modellen basierenden Analysen (Fingerabdruckmethoden) kann man heute bereits sagen, dass der beobachtete Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit vor allem auf den Menschen zurückgeht. Es hat zwar in der Vergangenheit immer wieder Klimaschwankungen gegeben, die nicht auf menschliche Aktivität zurückgehen, wie beispielsweise die mittelalterliche Warmzeit oder die kleine Eiszeit. Diese waren im Vergleich zum Anstieg der Temperatur der letzten Jahrzehnte allerdings deutlich schwächer, zumindest im globalen Maßstab.

Es wird immer wieder die Frage nach der Rolle der Sonne für die Erderwärmung gestellt. Die Sonneneinstrahlung unterliegt Schwankungen, die auch mit der Sonnenfleckenaktivität zusammenhängen. Gemittelt über die letzten 100 Jahre stieg die Solarkonstante an: Nach Schätzungen liegt sie zurzeit etwa 0.25% höher als vor 100 Jahren. Klimamodellsimulationen zeigen, dass in den letzten 100 Jahren durch den Anstieg der Sonnenintensität ein Teil der beobachteten Erwärmung erklärt werden kann, allerdings mit etwa 0.2°C nur ungefähr ein Drittel der Gesamterwärmung. Die Sonnenvariabilität allein kann also nicht für den

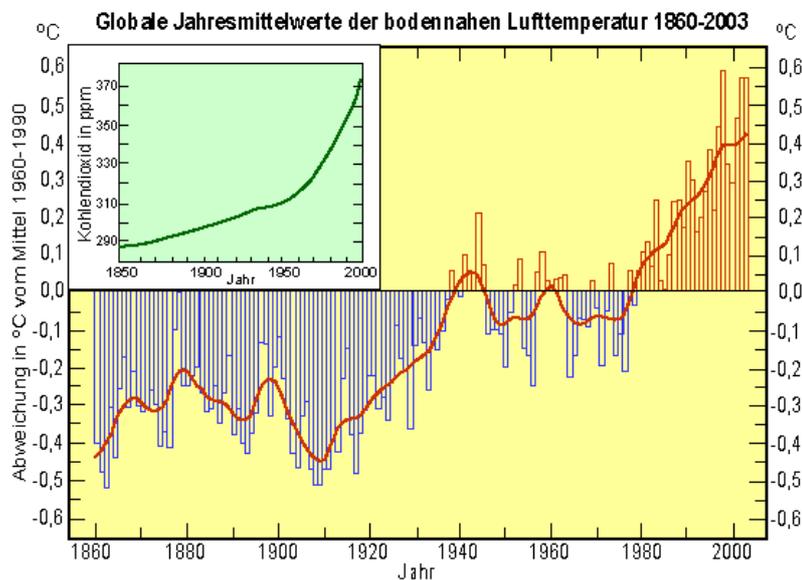


Abbildung 3: Die globale Mitteltemperatur der Erde seit 1860. Man erkennt einen deutlichen Erwärmungstrend in den letzten 100 Jahren. Die Werte sind Abweichungen vom Mittelwert der Jahre 1961-1990. Das kleine Bild zeigt die Entwicklung des CO₂ Gehaltes.

beobachteten Temperaturanstieg der letzten 100 Jahre von ca. 0,6°C verantwortlich sein, der überwiegende Anteil an der Erderwärmung ist daher vom Menschen verursacht. Dies ist Konsens in der internationalen Klimaforschung. Es gibt also einen erkennbaren Einfluss des Menschen auf das Klima. Insofern kann es heute nicht mehr darum gehen, ob der Mensch das Klima beeinflusst, sondern nur noch darum, in wieweit wir die Klimaveränderung noch minimieren können.

Ist das Klima überhaupt vorhersagbar?

In wieweit reagieren chaotische Systeme wie das Klima auf menschliche Einflüsse und können sie überhaupt berechnet werden? Am besten vergleicht man den Einfluss des Menschen auf das Klima mit einem gezinkten Würfel. Das Zinken besteht darin, dass wir die Temperatur der Erde infolge des Ausstoßes bestimmter klimarelevanter Gase, wie beispielsweise das Kohlendioxid, erhöhen. Dies führt zu mehr Wetterextremen, so wie der gezinkte Würfel mehr Sechsen hervorbringt. Wir können aber nicht sagen, wann die nächste Sechse kommt, denn die Reihenfolge der Zahlen bleibt zufällig. Ähnlich verhält es sich mit den Wetterextremen: Wir können zwar ihre Statistik berechnen, beispielsweise dass sie sich infolge der globalen Erwärmung häufen werden, wir wissen aber nicht, wann genau die Wetterextreme eintreten. Dies erklärt auch, warum längerfristige Klimavorhersagen möglich sind, obwohl Wettervorhersagen prinzipiell auf kurze Zeiträume beschränkt sind.

Das Beispiel des gezinkten Würfels verdeutlicht auch, dass die Tatsache, dass ein bestimmtes Ereignis schon einmal beobachtet worden ist, keinerlei Rückschlüsse auf die Eigenschaften



des Würfels zulässt: Der Würfel

hat auch vor dem Zinken schon Sechsen geliefert. Auf das Wetter übertragen bedeutet dies, dass die Tatsache, dass man beispielsweise schon einmal eine schwere Überschwemmung oder eine lang anhaltende Trockenperiode

beobachtet hat, nicht bedeutet, dass sich die Statistik des Wetters nicht verändert hat. In der Tat zeigen Beobachtungen der letzten hundert Jahre, dass sich extreme Wetterereignisse weltweit häufen, wie von den Klimamodellen vorhergesagt. Und es ist genau diese Häufung extremer Wetterereignisse, die man der globalen Erwärmung zuordnen kann. Die Analogie zum gezinkten Würfel verdeutlicht darüber hinaus, dass es prinzipiell nicht möglich ist, einzelne Wetterextreme, wie die Elbeflut des Jahres 2002, den Rekordsommer 2003 oder einen speziellen Hurrikan wie Katrina im Jahr 2005, der globalen Erwärmung zuzuschreiben, genauso wenig wie man eine bestimmte Sechse dem Zinken des Würfels zuordnen kann. Man muss immer die Statistik der Ereignisse betrachten, wie etwa die Anzahl von Wetterextremen über einen längeren Zeitraum, wenn man den Zusammenhang zwischen Wetterextremen und der globalen Erwärmung beleuchten möchte.

Wie wird das Klima in Europa im 21. Jahrhundert aussehen?

Die Folgen für das Klima der Erde können mit Hilfe von Computersimulationen abgeschätzt werden. Dazu werden globale Klimamodelle entwickelt, welche die Wechselwirkung zwischen den physikalischen Prozessen in Atmosphäre, Ozean, Meereis und Landoberflächen quantitativ beschreiben. Mit einem am Max-Planck-Institut für Meteorologie entwickelten Modell wurde das Klima von 1860 bis zum Ende des 21. Jahrhunderts simuliert. Dabei wurden die wichtigsten Treibhausgase und Sulfat-Aerosole berücksichtigt, inklusive deren Einfluss auf die Wolkenbildung. Für die Vergangenheit (1860 bis heute) wurden die beobachteten Konzentrationen bzw. Emissionen vorgeschrieben während für die Zukunft angenommen wurde, dass sich die heute beobachteten Trends unvermindert fortsetzen. In dieser Simulation wird bis heute eine globale Erwärmung seit Ende des 19. Jahrhunderts von etwa 0.6°C berechnet, was mit den Beobachtungen übereinstimmt (Abbildung 4). Die globale Erwärmung bis zur Mitte dieses Jahrhunderts, d.h. die Differenz der Dekadenmittel (2040 bis 2049) minus (1990 bis 1999) liegt bei etwa 0.9°C . Die Erwärmung der Kontinente ist mit 1.4°C etwa doppelt so groß wie die der Ozeane. Bis zum Jahr 2100 kann die globale Erwärmung je nach angenommenem Szenarium bis zu 4°C im globalen Mittel betragen. Zusammen mit der heute bereits realisierten globalen Erwärmung von etwa 0.6°C entspräche dies fast dem Temperaturunterschied von der letzten Eiszeit bis heute. Es würde sich also um eine für die Menschheit einmalig rasante globale Klimaänderung handeln, für die es in der letzten Million Jahre kein Analogon gäbe.

Die globale Erwärmung hat eine Zunahme des atmosphärischen Wasserdampfs zur Folge sowie einen verstärkten Wasserdampftransport von den Ozeanen zu den Kontinenten und damit eine Zunahme des Niederschlags über den Landgebieten. Regional sind die Niederschlagsänderungen jedoch sehr verschieden. Dabei fällt generell mehr Niederschlag in hohen Breiten und in Teilen der Tropen, während die regenärmeren Subtropen noch weiter austrocknen. Damit vergrößern sich die Unterschiede zwischen den feuchten und trockenen Klimaten auf der Erde.

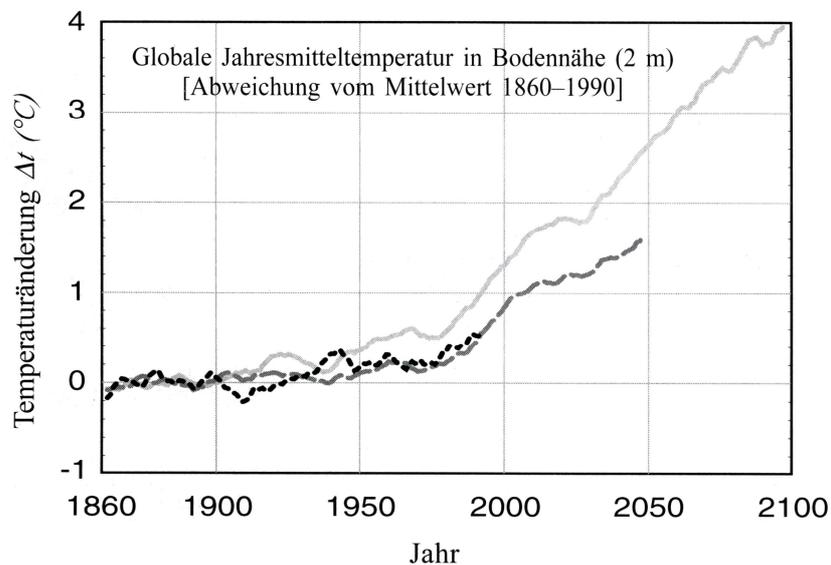


Abbildung 4: Die Entwicklung der beobachteten global gemittelten Temperatur seit 1860 (punktierte Linie). Simulation der Temperatur unter Berücksichtigung des Anstiegs der Treibhausgase bis zum Jahr 2100 und Simulation der Temperatur unter zusätzlicher Berücksichtigung der Aerosole (Schwebstoffe, die u.a. auch bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehen und einen kühlenden Einfluss auf die Oberflächentemperatur besitzen) bis zum Jahr 2050.

Diese Aussage gilt auch für das Klima in Europa. Allerdings sind die Niederschlagstendenzen in den Winter- bzw. Sommermonaten sehr unterschiedlich. Während der Sommerniederschlag fast überall in Europa abnimmt, wird im Winter ein ausgeprägtes Nord-Süd-Gefälle vorhergesagt mit einer Abnahme im niederschlagsarmen Südeuropa und einer Zunahme im niederschlagsreichen Mittel- und Nordeuropa. Diese Zunahme hängt zusammen mit intensivierter winterlicher Sturmaktivität über dem Nordostatlantik und verstärkten Westwinden, die feuchte

Luft vom Atlantik heranzuführen. Auffällig ist eine Häufung von Starkniederschlägen sowohl im Winter wie auch im Sommer und damit eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Überschwemmungen. Die Anzahl von Frosttagen wird in Europa bis zur Mitte dieses Jahrhunderts deutlich abnehmen, während sich die Anzahl von Hitzetagen (Temperaturen über 30°C) um etwa dreißig Tage stark erhöhen wird. Nach neuesten Berechnungen mit hochauflösenden regionalen Klimamodellen wird sich die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von sehr trockenen und sehr warmen Sommern in Europa dramatisch erhöhen. Sommer, wie der des Jahres 2003, würden im Jahr 2070 im Mittel alle zwei Jahre auftreten.

Die Modellrechnungen zeigen auch, dass sich tropische Wirbelstürme infolge der globalen Erwärmung intensivieren werden. In der Tat kann man heute bereits beobachten, dass die Zerstörungskraft von Hurrikänen und Taifunen in den letzten Jahrzehnten in dem Maße zugenommen hat, wie die Meerestemperatur in den Tropen angestiegen ist. Man muss daher



annehmen, dass sich dieser Trend hin zu stärkeren tropischen Wirbelstürmen in den kommenden Jahrzehnten fortsetzen wird, da die Meerestemperatur infolge der Trägheit des Klimas in den kommenden Jahrzehnten weiter ansteigen wird. Tropische Wirbelstürme wird es aber trotz der globalen Erwärmung bei uns in Europa nicht geben. Dies liegt daran, dass für die Entwicklung von Hurrikanen oder Taifunen eine Meerestemperatur von mindestens 26,5°C erforderlich ist. Derart hohe Meerestemperaturen sind für den Nordatlantik selbst bei einer massiven globalen Erwärmung nicht zu erwarten.

Das Kioto-Protokoll, ein erster wichtiger Schritt

Die Klimaproblematik steht inzwischen an oberster Stelle auf der Agenda der Weltpolitik. Am 10. Dezember 1997 haben die Vertragsstaaten der Rahmenkonvention der Vereinten Nationen zu Klimaänderungen einstimmig das so genannte Kioto Protokoll angenommen. Die Industrieländer verpflichten sich mit ihm, ihre Treibhausgasemissionen um im Mittel 5,2% (bezogen auf die Emission im Jahre 1990) bis zur Periode 2008 bis 2012 zu mindern. Mit der Ratifizierung Russlands im Februar 2005 ist das Kioto Protokoll völkerrechtlich verbindlich. Die Europäische Union muss im Mittel um 8% reduzieren, stärker als die USA mit 7% oder Japan mit 6%. Russland soll nur stabilisieren und Norwegen darf gar zulegen. Diese unterschiedlichen Minderungssätze sind Resultat nachweislich unterschiedlicher Bedingungen aber auch teilweise Folge des Verhandlungsgeschicks einzelner Länder. Die USA haben sich allerdings inzwischen vom Kioto Protokoll losgesagt. Und auch die Schwellenländer, wie etwa China oder Indien, sind im Kioto Protokoll nicht berücksichtigt.

Den aus Sicht der Klimaforscher notwendigen Klimaschutz liefert das Kioto Protokoll in der gegenwärtigen Form keineswegs. Um gravierende Klimaänderungen in den nächsten hundert Jahren zu vermeiden, müsste der Ausstoß von Treibhausgasen auf ein Bruchteil des heutigen Ausstoßes bis zum Jahr 2100 reduziert werden. In der Zukunft muss daher der Einführung der regenerativen Energien mehr Gewicht beigemessen werden, denn nur diese, insbesondere die Sonnenenergie, stehen praktisch unbegrenzt zur Verfügung. Da das Klima nur auf unsere langfristige Strategie reagiert, kann der Umbau der Wirtschaft in Richtung der erneuerbaren Energien allmählich innerhalb der nächsten hundert Jahre erfolgen. Wichtig ist aber, dass wir heute bereits alle Energiesparpotentiale ausschöpfen und den Weg der Reduzierung der Treibhausgasemissionen beschreiten. In sofern ist das Kioto Protokoll ein erster, wichtiger Schritt in die richtige Richtung.

Obwohl aus wissenschaftlicher Sicht der Einfluss des Menschen auf das Klima nachgewiesen ist und Klimamodelle bei weiter wachsenden Treibhausgaskonzentrationen eine weitere globale Erwärmung mit einer Zunahme der Wetterextreme vorhersagen, tut sich die Politik jedoch sehr schwer, auf diese Herausforderung zu reagieren. Das Zustandekommen des Kioto Protokolls dokumentiert die vielen konkurrierenden Interessen, die in den langwierigen Verhandlungen ausgeglichen werden mussten. Insbesondere die U.S.A. hatten vor allem ihre kurzfristigen wirtschaftlichen Interessen im Auge und haben sich schließlich komplett von dem Kioto Protokoll losgesagt. Dies ist um so schmerzlicher als die U.S.A. allein für etwa ein Viertel des weltweiten CO₂ Ausstoßes verantwortlich zeichnen. Darüber hinaus ist der CO₂ Ausstoß der Schwellenländer, wie der Chinas, im Kioto Protokoll nicht geregelt. Gerade China aber auch Indien schicken sich an, die U.S.A. beim CO₂ Ausstoß zu überflügeln. Um



gravierende Klimaänderungen in den nächsten hundert Jahren zu vermeiden, müsste der weltweite Ausstoß von Treibhausgasen bis zum Ende des Jahrhunderts auf deutlich weniger als zehn Prozent des heutigen Ausstoßes reduziert werden. Dies ist weit mehr als im Kioto Protokoll gefordert wird. Das Kioto Protokoll kann daher nur ein Anfang in Richtung der Senkung der weltweiten Treibhausgasemissionen sein. Man kann das Klimaproblem in dieser Hinsicht mit der Staatsverschuldung vergleichen. Eine Reduzierung der Neuverschuldung um einige wenige Prozent lässt den Schuldenberg und die Zinszahlungen weiter anwachsen, so wie eine vergleichbare kleine Reduzierung des CO₂ Ausstoßes den CO₂ Gehalt der Atmosphäre weiter anwachsen lassen würde und damit auch seine Klimawirkung.

Die jährlichen Vertragsstaatenkonferenzen bieten die Chance für Nachbesserungen, so wie es auch bei dem Montrealer Protokoll zum Schutz der Ozonschicht der Fall war. Das ursprüngliche Montrealer Protokoll aus dem Jahr 1987 garantierte keineswegs den Schutz der Ozonschicht, manche Wissenschaftler sprachen damals sogar von "Sterbehilfe" für die Ozonschicht. Es wurde aber Schritt für Schritt verschärft, und man kann heute davon ausgehen, dass die Welt das Ozonproblem in letzter Sekunde gerade noch gelöst hat. Da das Klima infolge seiner Trägheit nur auf unsere langfristige Strategie reagiert, ist es noch nicht zu spät, einen wirksamen Klimaschutzprozess in Gang zu bringen, der gravierende Klimaänderungen vermeidet. Nach Meinung vieler Experten, wäre es dabei wichtig, die globale Erwärmung unter 2°C bis zum Jahr 2100 zu halten. Eine besondere Bedeutung kommt hierbei der Entwicklung der erneuerbaren Energien, vor allem der Sonnenenergie, zu. Die neuen Technologien können langsam entwickelt und zur Anwendung gebracht werden, ohne große Verwerfungen in der Wirtschaft zu hinterlassen. Über die Modalitäten, wie den erneuerbaren Energien weltweit zum Durchbruch verholfen werden kann, sollte man sich auf den kommenden Klimakonferenzen verständigen. Wichtig wäre auf jeden Fall, dass die Langfristigkeit in die Politik zurückkehrt. Wenn man Länder wie die U.S.A. oder China mit in den Klimaschutzprozess einbindet möchte, muss man längerfristige Ziele formulieren, die kurzfristig zu keinen allzu großen wirtschaftlichen Belastungen führen.

Kurzfristig sollte man aber auf jeden Fall auf Energieeinsparungen und effizientere Energienutzung setzen, um schon jetzt einen kleinen Beitrag entsprechend dem Kioto Protokoll zu leisten. So könnte man beispielsweise bei uns in Deutschland Verkehr von der Straße auf die Schiene verlagern oder etwa das Fahren sparsamer Autos fördern. Langfristig werden wir aber infolge der knapper werdenden fossilen Ressourcen nicht umhin können, den erneuerbaren Energien mehr Gewicht zukommen zu lassen. Selbst die großen Mineralölkonzerne haben dies erkannt und werben im deutschen Fernsehen für die Solarenergie. In sofern sitzen wir alle im gleichen Boot, die Wirtschaft, die Umweltschützer und die Politiker. Die knapper werdenden fossilen Brennstoffe werden zudem in den kommenden Jahren bzw. Jahrzehnten immer teurer und damit die erneuerbaren Energien wettbewerbsfähiger. Der Umbau zu einer kohlenstofffreien Weltwirtschaft bleibt aber eine große Herausforderung. Deutschland wäre gut beraten, hierbei eine Vorreiterrolle zu übernehmen, da wir langfristig davon auch ökonomisch profitieren. Unsere gegenwärtige Wirtschaftskrise ist zumindest teilweise in einem Mangel an Innovation begründet. Die Energiefrage ist eine der großen Zukunftsfragen. Das Land, das als erstes konkrete Antworten darauf findet, wie die erneuerbaren Energien in großem Maßstab und ökonomisch eingesetzt

2. Satellitensymposium Lachgas

15. Symposium Intensivmedizin & Intensivpflege
Bremen, 22. Februar 2006



18

werden können, wird sich einen enormen Wettbewerbsvorteil verschaffen. Der Werbespruch des Landes Baden Württembergs „Wir können Alles außer Hochdeutsch“ ist in diesem Zusammenhang als Ansporn für uns Deutsche zu verstehen, Spitzentechnologie auch im Bereich der erneuerbaren Energien zu entwickeln. Besonders wichtig wäre hierbei ein parteiübergreifender Konsens, die Forschung im Bereich der erneuerbaren Energien langfristig zu fördern. Die Themen erneuerbare Energien und Klimaschutz eignen sich nicht für Wahlkämpfe.

Wenn wir heute die Weichen für eine nachhaltige Entwicklung stellen, dann ist dies auch in ökonomischer Hinsicht sinnvoll, denn es ist insgesamt billiger, Vorsorge zu treffen, als die sich in der Zukunft häufenden klimabedingten Schäden zu begleichen. Die Dimension der Schäden der Elbe-Flut hat uns dies nur zu deutlich vor Augen geführt. Darüber hinaus sollten wir nicht mit unserem Planeten experimentieren, da die Vergangenheit immer wieder gezeigt hat, dass vielerlei Überraschungen möglich sind. So wurde beispielsweise das Ozonloch über der Antarktis von keinem Wissenschaftler vorhergesagt, obwohl die ozonschädigende Wirkung der FCKWs bekannt war. Das Klimasystem ist ein nichtlineares System, das bei starken Auslenkungen für uns alle verblüffende Lösungen bereithalten kann.

Das Satellitensymposium wurde in Zusammenarbeit mit dem Industriegaseverband e.V.
und dessen freundlicher Unterstützung veranstaltet.



International Society for Inhaled Medical Gases and Therapies e.V.

Jostweg 14, D-13465 Berlin, Germany, Fon +49-(0)30-40109352, www.ismg.org