

Langjährige Be⁷-Bodenluftmessungen lassen Änderung des atmosphärischen Austauschverhaltens während der letzten Jahrzehnte vermuten

S. Hartwig

Fachbereich Sicherheitstechnik der Bergischen Universität Wuppertal,
Gauß-Straße 20, D-42119 Wuppertal

Z. Naturforsch. **51a**, 1139–1143 (1996); angenommen 22. Juli 1996

*Ground Level Be⁷-Concentration Measurements for Many Years Indicate a Change
of Atmospheric Exchange Processes During the Last Decades*

An analysis covering three decades (1964–1994) of monthly Be⁷ ground-level-air concentration measurements at Braunschweig shows a systematic trend of the data. This trend is related to the yearly maximum/minimum concentration ratio. The observation may be due to a continuous mitigation of exchange processes between stratosphere and troposphere. This finding is commensurate with the hypothesis that, due to the growing concentration of anthropogenic infrared active gases, the heat source distribution in the stratosphere and consequently the eddy diffusivity and exchange process between stratosphere and troposphere are altered. This results in a shorter irradiation period of stratospheric air portions by cosmic rays and consequently can lower the concentration of isotopes of stratospheric origin in ground level air.

Key words: Spallation product, Ground level air concentration, Infrared active gas, Atmospheric exchange.

Im Zusammenhang mit dem ständig weltweit steigenden Verbrauch fossiler Brennstoffe und dem damit verbundenen Anstieg des CO₂-Gehaltes der Atmosphäre und anderer antropogener infrarotaktiver Gase (AIG) sind in vielen Ländern umfangreiche Forschungsvorhaben initiiert und durchgeführt worden, um die damit zu erwartenden Klimaveränderungen zu untersuchen und/bzw. vorherzusagen. Über dieses Vorhaben wird insbesondere in den IPCC- (UN Intergovernmental Panel on Climate Change) und WMO-reports berichtet (siehe u.a. [1]).

Neben CO₂ gibt es eine ganze Reihe zusätzlicher AIG, die in die gleiche Richtung wirken (z.B. CH₄, N₂O, CFC 11/12, usw.). Generell absorbieren alle diese zusätzlichen AIG die von der Erdoberfläche ausgehende langwellige Strahlung entsprechend ihrer wachsenden Konzentration. Als resultierende Effekte tritt eine Abkühlung der Stratosphäre durch verstärkte Infrarotabstrahlung ins Weltall auf und eine Erwärmung der Troposphäre und des Erdbodens durch Absorption von Infrarotstrahlung aus den unteren Schichten. Zusätzlich ergibt sich eine reduzierte Absorption von Sonnenstrahlung durch die partielle Zerstörung der Ozonschicht. Das geschieht zusätzlich zu den durch die natürliche Verteilung infrarotaktiver

Gase vorhandenen Strahlungseffekten. Die hinzukommenden Strahlungseffekte führen zur Veränderung klimatischer Parameter. Allerdings sind die dabei auftretenden Prozesse und Rückkopplungen außerordentlich komplex.

Klimatische Parameter beziehen sich auf relativ lange Zeiträume von ungefähr 30 Jahren an aufwärts (WMO). Selbstverständlich ist zu erwarten, daß die durch die wachsende Konzentration der AIG geänderte Wärmequellenverteilung nicht nur langzeitige, sondern auch kurzfristige atmosphärische Parameter ändern wird. Allerdings ist der Nachweis der Änderung dieser kurzzeitigen Parameter, die nicht in das zeitliche Regime von Klimamodellen und klimatischen Untersuchungen fallen, wegen des häufigen Auftretens und der Bedeutung kurzzeitiger, auch stochastischer, Fluktuationen in der Atmosphäre sehr viel schwerer und wurde deswegen nur vereinzelt versucht. Dieser hier aufgeführte Gedanke der Untersuchung kurzfristiger Parameter ist naheliegend und nicht völlig neu. Schon 1993 [2] wurde z.B. die Vermutung geäußert, daß die sich ändernde Mächtigkeit der arktischen Inversionsschicht, die sich zwischen 1968 bis 1990 um 21 m verminderte, – neben anderen möglichen Effekten – durch wachsende Konzentration von AIG verursacht sein könnte. Allerdings war eine verlässliche Zuordnung nicht möglich.

Reprint requests to Prof. S. Hartwig.

0932-0784 / 96 / 1000-1139 \$ 06.00 © – Verlag der Zeitschrift für Naturforschung, D-72072 Tübingen



Dieses Werk wurde im Jahr 2013 vom Verlag Zeitschrift für Naturforschung in Zusammenarbeit mit der Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. digitalisiert und unter folgender Lizenz veröffentlicht:
Creative Commons Namensnennung-Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland Lizenz.

Zum 01.01.2015 ist eine Anpassung der Lizenzbedingungen (Entfall der Creative Commons Lizenzbedingung „Keine Bearbeitung“) beabsichtigt, um eine Nachnutzung auch im Rahmen zukünftiger wissenschaftlicher Nutzungsformen zu ermöglichen.

This work has been digitized and published in 2013 by Verlag Zeitschrift für Naturforschung in cooperation with the Max Planck Society for the Advancement of Science under a Creative Commons Attribution-NoDerivs 3.0 Germany License.

On 01.01.2015 it is planned to change the License Conditions (the removal of the Creative Commons License condition "no derivative works"). This is to allow reuse in the area of future scientific usage.

Ein über sehr lange Zeit bekanntes atmosphärendynamisches Problem, das in früheren Jahren immer wieder durch Messungen bestätigt wurde, ist der Jahresgang des Austausches zwischen der Stratosphäre und Troposphäre in mittlerer geographischer Breite. Hierzu gibt es eine große Zahl von Untersuchungen, die hauptsächlich auf der Messung von radioaktiven Isotopen in Luft- oder Regenwasserproben fußen. Bei den Messungen handelte es sich um Spallationsprodukte (Be⁷, S³⁵, P³², P³³, Na²²) oder um Spaltprodukte aus atmosphärischen Kernwaffenversuchen. Beispiele sind in [3–7] zu finden. Alle diese Messungen zeigen in unseren Breiten im Spätfrühjahr bis Anfang Sommer ein Maximum an Austausch zwischen Strato- und Troposphäre.

Die vertikale Struktur der Troposphäre und der Stratosphäre ist, neben vielen Wechselwirkungen und zusätzlichen Prozessen, unter anderem durch den vom Boden nach oben gerichteten Strahlungsfluß und die Absorption in der stratosphärischen Ozonschicht bestimmt, also stark inhomogen verteilt. Der Konzentrationszuwachs der AIG wird die ursprünglich herrschenden atmosphärischen Stabilitätsstrukturen abschwächen, da die AIG vertikal gleichmäßiger verteilt sind als die oben genannten Wärmequellen. Dadurch wird die Temperaturzunahme mit der Höhe, die die Stratosphäre kennzeichnet, verringert und damit die Schichtung der Stratosphäre weniger stabil. Allerdings ist zu erwarten, daß das stark rückgekoppelte atmosphärische System, einschließlich Hydrosphäre und Kryosphäre, diesen Effekt verwischen kann.

Um den eben beschriebenen Einfluß und die Stabilitätsänderung untersuchen zu können, bedarf es sehr langer, mit großer Stetigkeit durchgeföhrter Meßreihen, die sehr selten zu finden sind, da sie enormen Aufwand bedeuten. Eine in dieser Hinsicht bemerkenswerte Reihe wurde in Braunschweig mit ⁷Be-Messungen in bodennaher Luft erstellt [8, 9]. Um eine mögliche Änderung des Austauschverhaltens über nahezu 3 Jahrzehnte zu untersuchen, wurde jeweils pro Jahr der Monat mit dem Höchstwert mit dem des Tiefstwertes ins Verhältnis gesetzt und eine Ausgleichskurve für dieses Verhältnis für den gesamten Zeitraum von 31 Jahren errechnet. Dieses Verhältnis wird in Bild 1 mit I bezeichnet. Das Verhältnis wurde deswegen gewählt und so berechnet, weil nach allgemeinem Verständnis der Monat mit der höchsten Konzentration im Jahr in mittleren Breiten die Zeit mit maximalem Austausch zwischen Stratosphäre und Troposphäre ist, der Monat mit niedrigster Kon-

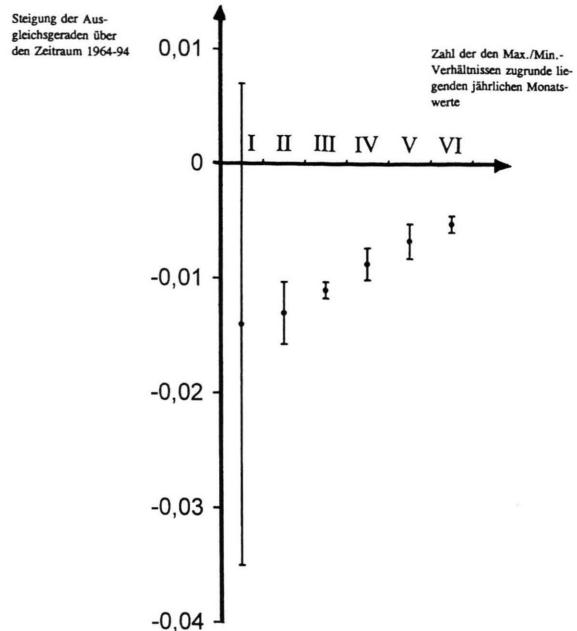


Abb. 1. Im Bild sind die Werte der Steigung verschiedener Ausgleichsgeraden (gemittelt über 31 Jahre) des jährlichen Max/Min-Verhältnisses aufgetragen. Jeder Punkt mit Fehlerngrenzen repräsentiert die Steigung der Ausgleichsgeraden über den gesamten Mittelungszeitraum. Die verschiedenen Ziffern von I–VI beziehen sich auf verschiedene Ausgleichsgeraden. Die Ziffer I bedeutet jeweils den höchsten zu dem tiefsten Be⁷-Monatskonzentrationswert im Jahr. Die Ziffer II bedeutet den zweithöchsten zu dem zweittiefsten Be⁷-Monatskonzentrationswert im Jahr usw.

Die negative Steigung bedeutet, daß das Max/Min-Verhältnis über die 31 Jahre fällt – der stratosphärische Einfluß wird also im Laufe der Jahrzehnte geringer, was auf den sich ändernden Austausch zurückgeführt werden kann. Da schwächere Maxima (Ausgleichsgeraden II, III … VI) schwächeren stratosphärischen Einfluß bedeuten, ist der Abfall (Größe der negativen Steigung) bei Ausgleichsgeraden höherer Ordnungszahl geringer, da sich der Stratosphäreneinfluß nur wenig ändern kann. Die Fehlerbalken an den Meßpunkten geben die Standardabweichung an.

zentration die Zeit mit nahezu oder sogar nur rein troposphärische Luft ist [3, 6, 10]. Wichtig ist es dabei festzuhalten, daß in unseren Breiten der Austausch zwischen Stratosphäre und Troposphäre überwiegend nicht kontinuierlich erfolgt, sondern in Schüben mit Luftpaketen während weniger Monate. Das ist eindeutig durch langjährige Untersuchungen mit radioaktiven Isotopen nachgewiesen [11]. Dementsprechend erhält der Monat mit nächsthöherer Konzentration weniger stratosphärische Luft, der mit dritt-höchster noch weniger, u.s.f. Die Monate mit den niedrigsten Konzentrationen im Jahr enthalten weitgehend nur troposphärische Luft, wobei die Konzen-

tration durch die verschiedensten dynamischen Prozesse wie Ausregnungsvorgänge, sowie horizontaler und vertikaler Transport innerhalb der Troposphäre variieren können, was die Diskussion des hier betrachteten Effektes erschwert. Eine gute Übersicht über die Stärke der dynamischen breiten- und höhen-abhängigen Prozesse in der Troposphäre, diskutiert anhand von Be⁷- und Pb²¹⁰-Konzentrationsmessungen sowie deren Modellierung durch ein dreidimensionales Tracer-Modell, ist in [12] beschrieben. Wird jetzt das Verhältnis der Monate mit zweithöchster zu zweitniedrigster Konzentration gebildet – was in den verschiedenen Jahren oftmals verschiedene Monate bedeutet –, so wird der Einfluß des strato-troposphärischen Austausches nur abgeschwächt zu sehen sein. Das Verhältnis wird in Bild 1 mit II bezeichnet. Entsprechendes gilt mit dritthöchster zu dritt niedrigster Konzentration, das im Bild 1 mit III bezeichnet ist. Für das Verhältnis I wurde über alle 31 Jahre eine Ausgleichsgerade berechnet, für das Verhältnis II ebenso usw. Die berechneten Steigungen dieser Ausgleichsgeraden über 31 Jahre hierzu sind in Bild 1 über der Verhältniszahl einschließlich des einfachen statistischen Fehlers aufgetragen.

Aus Bild 1 ist zu entnehmen, daß bei Be⁷-Bodenluftkonzentrationsmessungen der stratosphärische Einfluß (bei allen 6 eben beschriebenen Maximum/Minimum-Konzentrationsverhältnissen) über die 3 Jahrzehnte abnimmt, obwohl die Be⁷-Produktionsrate faktisch so konstant wie die kosmische Strahlung ist. Variationen der Stärke der kosmischen Strahlung durch den Sonnenwind und den 11jährigen Zyklus der Sonnenfleckenaktivität [12] spielen bei den vorliegenden Überlegungen keine Rolle, da durch die Monatsverhältnisbildung innerhalb eines Jahres die Unterschiede in der Spallationsproduktionsrate zwischen Maximum und Minimum der Sonnenfleckenaktivität weggemittelt werden. Der abnehmende stratosphärische Einfluß ist bei dem I-Monatsverhältnis am stärksten ausgeprägt, denn die negative Steigung ist am größten. Allerdings ist die Streuung wegen lokaler atmosphärenphysikalischer Einflüsse sehr groß. Der genannte Effekt bleibt beim II-Monatsverhältnismittelwert ähnlich signifikant, um über das III- bis zum VI-Monatsverhältnis deutlich abzusinken. Das macht auch Sinn, da bei z. B. dem VI-Monatsverhältnis pro Jahr der Austausch aus der Stratosphäre relativ sehr viel geringer ist als etwa bei dem I-Monatsverhältnis. Die I- und II-Monatsverhältnisse sind massiv vom stratosphärischen Austausch bestimmt. Die negative

Steigung der Ausgleichsgeraden bedeutet, daß die Wichtigkeit des jährlichen Austauschmaximums über 3 Jahrzehnte kontinuierlich abnimmt.

Daß das in der Tat ein kontinuierlicher Prozeß ist und nicht durch eine Zufallsverteilung (allein die 6 verschiedenen Mittelbildungen über 31 Jahre sprechen dagegen), zeigt Bild 2. Hier ist sukzessiv, von 1964–1968 beginnend, (jeweils für die II Monatsverhältnisse) die Ausgleichsgerade berechnet und die jeweilige Steigung in das Bild eingetragen. Die Steigung ist praktisch immer negativ, die relative Bedeutung des Austauschphänomens wird also kontinuierlich schwächer.

Daß die Menge der die Troposphäre erreichenden Be⁷-Atome/m² aus der Stratosphäre pro Jahr über die Jahrzehnte gesehen relativ geringer wird, ist als Hypothese aus dem AIG-Verlauf zu verstehen. Die Schichtungsstabilität der Stratosphäre wird durch die gleichmäßige Verteilung der zusätzlichen AIG geringer, zusätzlich aber auch durch verringerte Infrarotabstrahlung in den Weltraum. Hinzu kommt die reduzierte Absorption in der Ozonschicht durch die partielle Zerstörung, die ebenfalls für eine geringere Schichtungsstabilität sorgt. Durch diese sich jetzt entwickelnde geringere Schichtungsstabilität verringert sich die Bestrahlungslaufzeit von Luftpaketen durch kosmische Strahlung zur Bildung des kosmogenen Spallationsproduktes Be⁷ und damit dessen Konzentration pro Luftvolumen, da die Verweildauer geringer wird. Zusätzlich sorgt eine aus wachsender AIG-Konzentration resultierende Labilität und entsprechende turbulente Diffusion für eine Konzentrationsverarmung, die ebenfalls zu geringeren Maximalkonzentrationen führt.

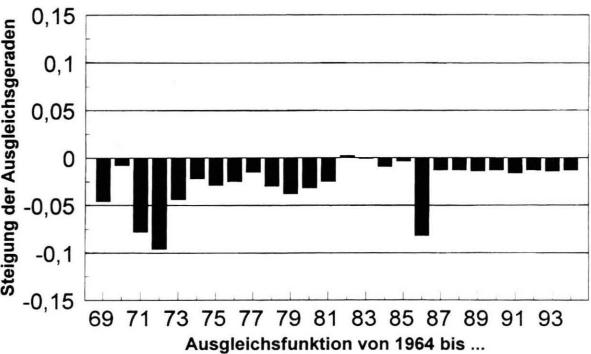


Abb. 2. Der Darstellung liegt eine sukzessive Berechnung der Ausgleichsgeraden, beginnend 1964/68, zugrunde. Im Bild ist die jeweilige Steigung der Geraden über dem Jahr, bis zu dem die Ausgleichsgerade berechnet wurde, aufgetragen.

Wie weiter oben schon ausgeführt, ist durch Einzelluftpaketmessungen mit gleichzeitiger Konzentrationsuntersuchung mehrerer Spallationsprodukte (S^{35} , $P^{32/33}$, Be^7) nachgewiesen, daß der Austausch zwischen Strato- und Troposphäre schubweise meist im Gebiet der Tropopausenbruchzonen erfolgt. Das sind zeitliche und räumliche Kleinstrukturen. Diese Strukturen lassen sich heutzutage mit Globalen Zirkulationsmodellen (GZM) nicht auflösen. Deswegen sind die Ergebnisse der GZM-Rechnungen auf die hier gemachten Aussagen nur äußerst schwer, wenn überhaupt übertragbar [13].

Der hier geschilderte Sachverhalt läßt sich nicht nur in Braunschweig ($10^\circ 33'$ geogr. Länge/ $52^\circ 10'$ geogr. Breite), sondern auch in Skibotn, Schweden ($20^\circ 25'$ geogr. Länge/ $69^\circ 20'$ geogr. Breite) feststellen, wie anderswo diskutiert [14]. Es ist dabei festzuhalten, daß es weltweit extrem wenige Meßstationen gibt, die Spallationsprodukte über Jahrzehnte mit höchster Präzision in Bodenluft messen.

Die hier dargestellten Ergebnisse, die in Bild 1 und 2 zu sehen sind, sind ein Faktum. Diese Ergebnisse sind aber durchaus konsensabel mit der theoretischen Vorstellung und der zu erwartenden Entwicklung, daß die stratosphärische Schichtungsstabilität durch die wachsende Konzentration der AIG nachläßt und damit das stratosphärische-troposphärische Austauschverhalten sich ändert, und zwar wegen der weiter oben beschriebenen differierenden Wärmequellenverteilung des vorindustriellen Zeitalters verglichen mit der wachsenden Bedeutung der AIG heutzutage. Allerdings ist diese Schlußfolgerung nicht kausal sondern ein durch die Physik naheliegender Analogieschluß.

Die hier dargelegten Ergebnisse beziehen sich auf Sachverhalte, die nicht mit der heutigen Diskussion um das sich ändernde Klima deckungsgleich sind, denn wie schon weiter oben angesprochen, beziehen sich klimatische Parameter auf Zeiträume von mehreren Dekaden, während hier sehr kurzfristige, wenn

auch immer wiederkehrende, atmosphärenphysikalische Größen angesprochen sind. Außerdem können gleiche mit Klimamodellen berechnete atmosphärische Temperaturprofile verschiedenes dynamisches Verhalten (Fluktuationen) beinhalten. Deswegen sind auch Übertragungen der Ergebnisse aus Klimamodellrechnungen auf die hier beschriebene Situation nur mit sehr großer Vorsicht möglich, zumal diese Rechnungen meistens von einer Verdoppelung der Konzentration der AIG ausgehen, während die hier beschriebene tatsächliche Situation sich auf Konzentrationssteigerungen von einigen 10 Prozent bezieht. Trotzdem läßt sich feststellen, daß eine durch einige Modelle vorhergesagte Abkühlung der unteren Stratosphäre für diesen Bereich eine Labilisierung in bezug auf tieferliegende Schichten bedeuten würde, die vermutlich zu einer kürzeren Bestrahlungsdauer von Luftpaketen und damit zu geringeren Be^7 -Konzentrationen und damit zu fallenden Maxima/Minima-Verhältnissen in Bodenluft führen. Desgleichen würde eine Verringerung des stratosphärischen Ozons durch die schwächere Absorption zu diesem Effekt führen. Da aber der hier dargelegte Sachverhalt, besonders die hier diskutierten Meßwerte, das Ergebnis vielfältiger integrierender Prozesse ist, sind solche Ergebnisvergleiche, besonders mit Modellrechnungen, nur mit großer Vorsicht möglich. Trotzdem ist festzuhalten, daß, wenn die hier entwickelte Vorstellung richtig ist, damit gezeigt ist, daß die AIG die Atmosphärendynamik geändert haben und auch zunehmend ändern werden. Damit ist ein Bereich angesprochen, der bei der Diskussion der Folgen der antropogenen CO_2 -Emissionen bis jetzt in der allgemeinen Konsequenzdiskussion kaum eine Rolle spielte.

Danksagung

Der Autor dankt Herrn Dr. H. Wershofen, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, für die Bereitstellung der Be^7 -Konzentrationsdaten.

- [1] World Met. Org.; Genf, WMO-report 18 (1988). – World Met. Org.; Genf, WMO-report 20 (1990). – WMO-Bulletin zum UN Intergovernmental Panel on Climate Change, 39/4, 288 (1990). – WMO-Bulletin, Advisory Group on Greenhouse Gases 37/2, 111 (1988). – C. Brühl u. P. J. Crutzen, Climate Dynamics **2**, 173 (1988). – U. Cubasch, K. Hasselmann, H. Höck, E. Maier-Reimer, U. Milolajewicz, B. Sauter u. R. Sansen, Climate Dynamics **8**, 55 (1992).
- [2] S. Raymond, F. T. Bradley, T. Keiming u. H. F. Diaz, CDIAC-Communications. ISSN 1053-1106, S. 1–4, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge TN, USA (1993).
- [3] H. Müh, A. Sittkus, A. Albrecht u. S. Hartwig, Z. Naturforsch. **21a**, 1123 (1966).
- [4] S. Aegeerter, N. Bhandari, L. Rama u. S. Tamhane, Tellus **18**, 212 (1966).
- [5] D. P. Friend, HASP-Report vol. 3 (1961).
- [6] S. Hartwig u. A. Sittkus, Z. Naturforsch. **24a**, 908 (1969).
- [7] H. Müh u. A. Sittkus, Naturwiss. **56**, 211 (1969).
- [8] W. Kolb, Aktivitätskonzentrationen von Radionukliden in der bodennahen Luft Norddeutschlands und Nordnorwegens im Zeitraum von 1963 bis 1990, PTB-Ra-29, Braunschweig, März 1992, ISBN 3-89429-162-1.
- [9] H. Wershofen u. D. Arnold, Die Aktivitätskonzentrationen γ -strahlender Radionuklide im Staub der bodennahen Luft von Braunschweig und Berlin 1992, PTB-6.301-93-1, Braunschweig, Juni 1993/1995.
- [10] V. A. Dathiewicz u. L. Husain, J. Geophys. Res. **90**, 5783 (1985).
- [11] D. Lal u. B. Peters, Handbuch der Physik, 46/2, 551 (1967).
- [12] D. M. Koch, D. Jacob u. W. Graustein, J. Geophys. Res. **101**, 18651 (1996).
- [13] U. Cubasch, B. D. Santer u. G. C. Hegerl, Phys. Bl. **51**, 269 (1995).
- [14] S. Hartwig, Radiocarbon, **37**, 1078 (1995).