



▣ Kohlekraftwerke emittieren außer Wasserdampf und verschiedenartigen Partikeln auch das unsichtbare Gas Kohlendioxid (CO₂). Steigen derartige Gase in ihren atmosphärischen Konzentrationen an, kommt es zu Erwärmungen der unteren Atmosphäre (Verstärkung des Treibhauseffektes). Auch andere fossile Energieträger tragen dazu bei (Öl, Gas, einschließlich Verkehr). Unser Bild zeigt ein Braunkohlekraftwerk im Rheinland.

Neue Erkenntnisse zum menschlichen Einfluss auf das Klima

Wo bleibt die Nachhaltigkeit?

von **Christian-D. Schönwiese**

Die Option der Nachhaltigkeit ist seit Langem in vielen Kulturkreisen zumindest immanent präsent (Grober 2010). Die Begriffsbildung erfolgte jedoch erst in der sächsischen Forstwissenschaft, und als Wortschöpfer gilt Hans Carl von Carlowitz, der 1713 in seiner »Sylvicultura Oeconomica«, einer Art Anweisung zur forstlichen Holznutzung, »Behutsamkeit« fordert, so dass »eine Gleichheit zwischen (...) Zuwachs und dem Abtrieb des Holzes erfolgt«, es somit »eine kontinuierliche, beständige und nachhaltige Nutzung gebe«. Freilich dauerte es eine Weile, unter anderem auf dem Umweg über den angelsächsischen Sprachraum, bis

Nachhaltigkeit (sustainability) eine allgemeinere Bedeutung erhielt: Fähigkeit, Systeme über längere Zeit existent zu halten. Statt existent wird häufig auch von »tragfähig« gesprochen. Im konkreten Fall der Forstwissenschaft bedeutet dies, das Ökosystem Wald so zu bewirtschaften, dass es in seiner Quantität und Qualität nutzbar erhalten bleibt (Tragfähigkeit), und dies auch für die nachfolgenden Generationen (Nachhaltigkeit).

Im allgemeineren Sinn erreichte dieses Konzept mit dem Bericht der von der norwegischen Politikerin Gro Harlem Brundtland geleiteten »Weltkommission für Umwelt und Entwicklung« (WCED) die Öffentlich-

Die UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung (UNCED)

Bei dieser Konferenz, 1992 in Rio de Janeiro, war nachhaltige Entwicklung bereits Gegenstand internationaler Erklärungen und Übereinkommen:

Rio-Deklaration (Grundsatz 3): »Das Recht auf Entwicklung muss so erfüllt werden, dass den Entwicklungs- und Umweltbedürfnissen heutiger und künftiger Generationen in gerechter Weise entsprochen wird.«

Klimarahmenkonvention: »Das Endziel dieses Übereinkommens (...) ist es (...), die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine ge-


fährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird. Ein solches Niveau sollte innerhalb eines Zeitraums erreicht werden, der ausreicht, damit sich die Ökosysteme auf natürliche Weise den Klimaänderungen anpassen können, die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht und die wirtschaftliche Entwicklung auf nachhaltige Weise fortgeführt werden kann.« (Zitiert nach Tremmel 2002)

Zu dieser Konvention gibt es seit 1995 jährlich Vertragsstaatenkonferenzen, auf denen über die konkrete Umsetzung und Zielvorstellungen beraten wird. Doch sind die Erfolge bisher sehr bescheiden.

Neuronale Netze in der Klimatologie

Neuronale Netze ermitteln anhand geeigneter Daten in einer Art Training optimale nicht lineare Zusammenhänge zwischen Einfluss- und Zielgrößen. Wichtig ist bei solchen statistischen Methoden, diese Größen sinnvoll auszuwählen. In der Klimatologie geschieht das anhand der physikalischen Grundlagen, insbesondere der Strahlungsantriebe, welche die Strahlungsbilanz des Klimasystems stören. Ein weiterer Anhaltspunkt bei der Auswahl der Einfluss- und Zielgrößen ist der Vergleich mit physikalischen Klimamodellrechnungen (vgl. dazu IPCC 2007, Schönwiese 2008). Die hier verwendeten Einflussgrößen sind die Sonnenaktivität, der explosive Vulkanismus, das El-Niño-Phänomen sowie die atmosphärischen Treibhausgas- und Sulfatpartikel-Konzentrationen. Zielgröße ist die global gemittelte bodennahe Lufttemperatur. Alle diese Daten gehen als jährliche Zeitreihen zwischen 1860 und 2008 in die Analysen ein. Zur ausführlichen Darstellung der Methodik siehe Walter 2001 (Übersicht auch bei Schönwiese 2008, wobei hier eine Backpropagation-Version benutzt wurde), zu den Ergebnissen Schönwiese et al. 2010.

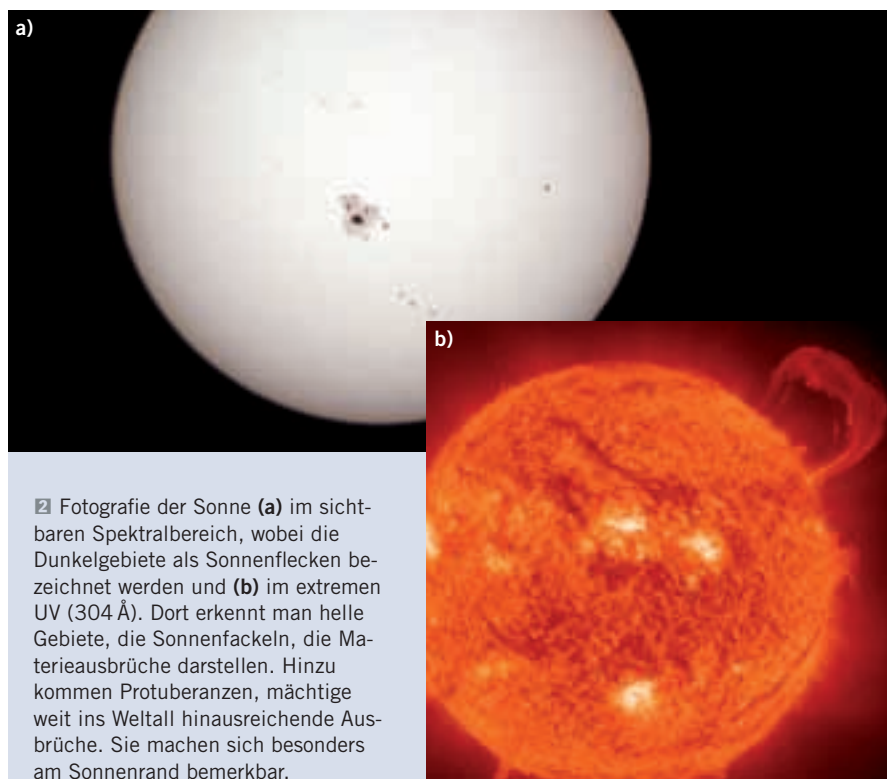
keit. Dort heißt es: »Sustainable development seeks to meet the needs and aspirations of the present without compromising the ability to meet those of the future« (zitiert nach Tremmel 2002). Bei der UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung (UNCED) in Rio de Janeiro (1992) wurde dieses Prinzip nicht nur in dieser allgemeinen Form aufgegriffen, sondern auch auf das Klima angewandt [siehe »Die UN-Konferenz über Umwelt und Entwicklung«].


Damit ist bereits der wichtigste Aspekt der menschlichen Beeinflussung des Klimas angesprochen: Die Anreicherung der Atmosphäre mit klimawirksamen Spurengasen wie Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und anderen »Treibhausgasen«, wie sie populärwissenschaftlich genannt werden, infolge der Nutzung fossiler Energieträger (Kohle, Öl, Gas, einschließlich Verkehr ) , Waldrodungen und industrieller sowie landwirtschaftlicher Produktion. Der daraus resultierende anthropogene Klimawandel (zusätzlicher anthropogener Treibhauseffekt, »global warming«) wird von den aktiv in der Forschung tätigen Wissenschaftlern – im Gegensatz zur öffentlichen Diskussion – grundsätzlich nicht angezweifelt (Oreskes 2004, vgl. auch Forschung Frankfurt 3/2008, S. 86 bis 90). Doch gibt es im Detail durchaus Probleme und Unsicherheiten.

Zum einen hat es Klimawandel, zunächst aus natürlichen Gründen, immer gegeben, und dagegen sind wir machtlos. Allerdings hat sich nach der letzten Eiszeit, das heißt in den letzten rund 10000 Jahren, ein relativ stabiles Klima eingestellt, was für die kulturelle und wirtschaftliche Entwicklung der Menschheit sicherlich förderlich war, trotz immer wieder auftretender Naturkatastrophen. Da aber im Vergleich dazu der anthropogene Klimawandel den natürlichen in seinem Ausmaß wesentlich übertreffen könnte, insbesondere in den kommenden Jahrzehnten und Jahrhunderten,



ist der klimatologische Nachhaltigkeitsgedanke durchaus angebracht. Weitere Probleme bestehen darin, dass der Mensch nicht nur durch die Treibhausgase, sondern auch durch diverse weitere Eingriffe Einfluss nimmt, die in der Wissenschaft eingehend diskutiert werden (IPCC 2007, Schönwiese 2008). Dazu gehören das Stadtklima, das sich vom Klima des Umlands deutlich unterscheidet, und die Abkühlungswirkung durch Sulfatpartikel, die aus der Emission von Schwefeldioxid stammen.

Es kommt somit darauf an, zunächst für die Vergangenheit dieses Zusammenwirkens verschiedener anthropogener und natürlicher Einflüsse auf das Klima zu erfassen, zu analysieren und die Konsequenzen daraus zu ziehen. Um dazu einen Beitrag zu liefern, haben sich der Autor und zwei ehemalige Mitglieder seiner Arbeitsgruppe, Dr. Andreas Walter (Deutscher Wetterdienst) und Diplom-Meteorologe Sven Brinckmann (Institut für Atmosphäre und Umwelt), zusammengetan, um auf statistischem Weg abzuschätzen, in



 Fotografie der Sonne (a) im sichtbaren Spektralbereich, wobei die Dunkelgebiete als Sonnenflecken bezeichnet werden und (b) im extremen UV (304 Å). Dort erkennt man helle Gebiete, die Sonnenfackeln, die Materieausbrüche darstellen. Hinzu kommen Protuberanzen, mächtige weit ins Weltall hinausreichende Ausbrüche. Sie machen sich besonders am Sonnenrand bemerkbar.

Sonnenaktivität

Seit der Erfindung des Fernrohrs werden auf der sichtbaren Sonnenoberfläche zeitlich veränderliche Dunkelgebiete beobachtet, die wegen ihres Aussehens Sonnenflecken heißen  a. Da dort die Sonne relativ kalt ist, müsste sie bei starker Sonnenfleckentätigkeit eigentlich schwächer ausstrahlen. Aufgrund von Satellitenmessungen weiß man aber, dass genau das Gegenteil der Fall ist. Der Grund liegt darin, dass bei relativ starker Sonnenaktivität und somit Fleckentätigkeit gleichzeitig verschiedenartige Materieausbrüche stattfinden, die Sonnenfackeln und Protuberanzen, die man nur im relativ kurzwelligen Bereich der Sonnenausstrahlung sichtbar machen kann  b. Sie führen zu einer Überkompensierung der Sonnenflecken. Moderne Abschätzungen der Sonnenaktivität gehen daher von diesen Ausbrüchen aus und nutzen die historischen Sonnenfleckenbeobachtungen nur, um daraus für frühere Zeiten die Stärke dieser Ausbrüche zu rekonstruieren.

welchem Ausmaß sich in historischen Daten natürliche und anthropogene Faktoren erkennen lassen. Als Grundlage dienten Aktualisierungen früherer Arbeiten der Autoren und die aus Beobachtungsdaten abgeleiteten global gemittelten Jahreswerte der bodennahen Lufttemperatur zwischen 1860 und 2008. Das statistische Prinzip ist dabei einerseits die übliche (lineare mul-

tipel) Korrelations- und Regressionsrechnung, andererseits kamen neuronale Netze zur Anwendung [siehe »Neuronale Netze in der Klimatologie«, Seite 45].

Zu den Einflussgrößen sei Folgendes angemerkt: Der wichtigste natürliche Einfluss auf das Klimasystem (Verbund aus Atmosphäre, Ozean, Eisgebieten, Boden und Vegetation) ist sicherlich die Sonneneinstrahlung. Dabei interessieren hier weder der Tages- und Jahresgang noch die Orbitalparameter des Erdumlaufs um die Sonne, die das Kommen und Gehen der Eiszeiten steuern, sondern die Sonnenaktivität, die sich in der variablen Anzahl von Sonnenflecken und den wichtigeren, sie überkompensierenden Sonnenfackeln und Protuberanzen äußert. Dies führt dazu, dass die Sonne in ihrer aktiven Phase etwas mehr ausstrahlt als in ihrer ruhigen [siehe »Sonnenaktivität«, Seite 45]. Anstelle des antiquierten Vergleichs der Sonnenflecken-Relativzahlen mit der Temperatur, der nur eine geringe Korrelation aufweist (Schönwiese 2008), sind hier die wesentlich zielführenderen Abschätzungen der solaren Ausstrahlung benutzt worden, wie sie die Space Science Division des Naval Research Laboratory (USA, Lean 2009) freundlicherweise zur Verfügung gestellt hat.

Ein weiterer wichtiger Einfluss ist der Vulkanismus. Dabei sind klimatologisch nur solche Ausbrüche relevant, die explosionsartig schwefelhaltige Gase in die Stratosphäre (die Schicht in 10 bis 50 Kilometer Höhe) schleudern. Nach einigen Monaten wandeln sich die schwefelhaltigen Gase in Sulfatpartikel um. Diese streuen verstärkt die Sonneneinstrahlung, so dass nur ein verringerter Anteil die untere Atmosphäre erreicht und dort für Abkühlungen sorgt – typischerweise ungefähr ein Jahr nach dem Ausbruch. Das »Jahr ohne Sommer« (1816) nach dem Ausbruch des Tambora auf Indonesien (1815) ist ein besonders eklatantes Beispiel dafür. Wir haben einen ursprünglich von Grieser und Schönwiese (1999) definierten Vulkanwirkungsindex aufgrund der Informationen der US Smithsonian Institution aktualisiert [siehe »Klimatologische Klassifizierung von Vulkanausbrüchen«]. Als dritter natürlicher Einfluss sind schließlich noch die El-Niño-Ereignisse berücksichtigt, und zwar in Form der mit ihnen verbundenen und daher hoch korrelierten Südlichen Oszillation, einer Luftdruckschwankung der Südhemisphäre. In Wechselwirkung mit der ozeanischen Zirkulation führt dies zu so starken und ausgedehnten Erwärmungsepisoden des tropischen Ostpazifiks, dass sie in der Globaltemperatur sozusagen durchschlagen.

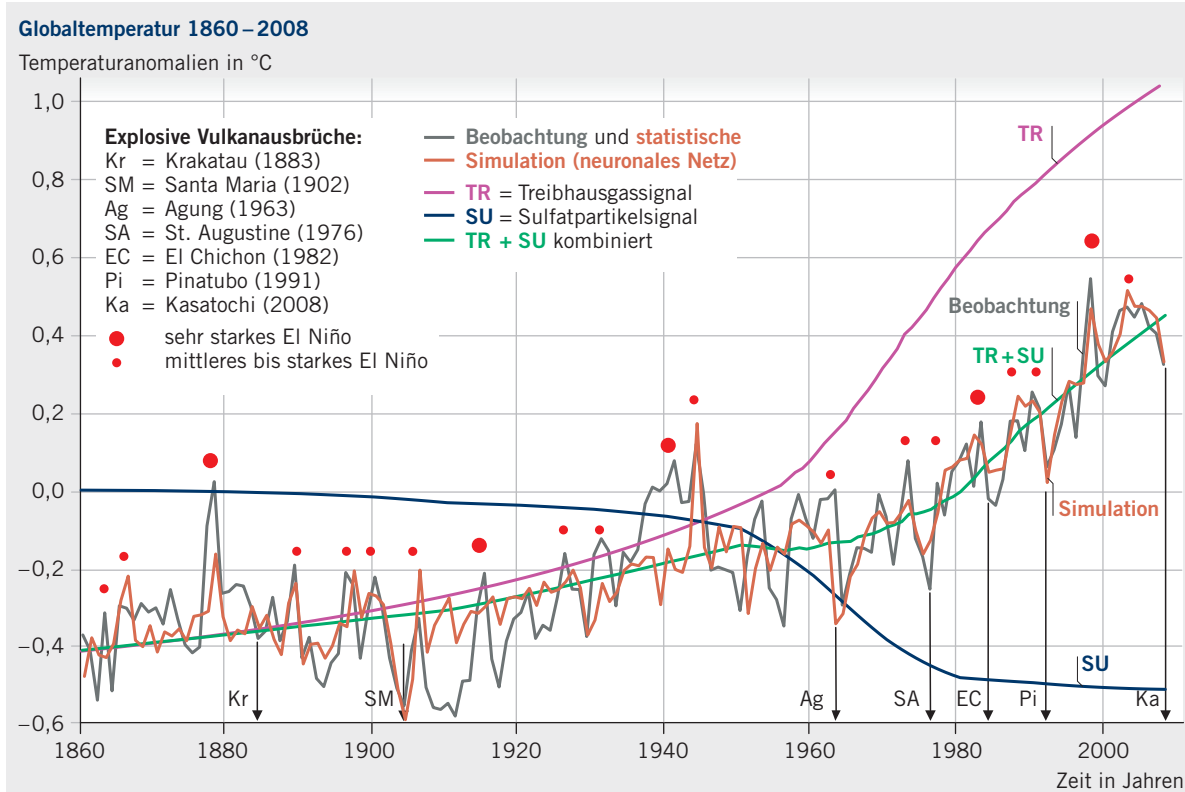
Der Mensch ist nach unseren Abschätzungen zum einen durch die äquivalente CO₂-Konzentration der Atmosphäre präsent, in der außer CO₂ noch die Anteile der wichtigsten weiteren Treibhausgase stecken, und dem SO₂-Ausstoß (Schwefeldioxid), der als proportional zum kühlenden Sulfatpartikelanteil der unteren Atmosphäre angesehen wird. Steckt man alle diese Einflüsse und die Temperaturwirkung in ein neuronales Netz-Modell, so lassen sich – je nach Variante – bis zu 88 Prozent der beobachteten Temperaturvariationen erklären. **■** Mithilfe der simplen Regression schafft man immerhin 80 Prozent. Hier lässt sich bereits festhalten, dass wir bei der Globaltemperatur (1860–2008) mithilfe des neuronalen Netzes 61 Prozent der beobachteten Variabilität den menschlichen Einflüssen zuordnen und 27 Prozent den natürlichen (12 Prozent bleiben somit unerklärt und sind möglicherweise zufälliger Natur).



■ Vulkan Pinatubo (Philippinen) bei seinem explosiven Ausbruch am 12. Juni 1991 (VEI=5). Klimawirksam sind jedoch vor allem unsichtbare schwefelhaltige Gase, die sich in der Stratosphäre (10 bis 50 km Höhe) nach einigen Monaten in Sulfatpartikel umwandeln und dort einige Jahre verweilen können, bevor sie ausdimentieren. Die stärkste Klimawirksamkeit, die in der erhöhten Streuung der Sonneneinstrahlung und somit in bodennahen Abkühlungseffekten besteht, tritt meist ein Jahr nach dem Ausbruch ein; vgl. auch **■**.

Klimatologische Klassifizierung von Vulkanausbrüchen

Für das Klima sind vor allem solche Vulkanausbrüche von Bedeutung, die explosionsartig unter anderem schwefelhaltige Gase in die Stratosphäre (10 bis 50 km Höhe) schleudern, in extremen Fällen sogar darüber hinaus. Je nach Auswurfmasse und erreichter Höhe klassifiziert die US Smithsonian Institution, ähnlich der Erdbebenskala, solche explosiven Vulkanausbrüche mit dem Volcanic Explosivity Index VEI, der Werte von eins bis acht annehmen kann. Der stärkste Ausbruch der letzten Jahrhunderte war der des Tambora (Indonesien, 1815) mit VEI=7. Aber auch der Ausbruch des Pinatubo (1991, Philippinen) **■** gehört mit VEI=5 zu den besonders klimawirksamen Ereignissen. Um die Auswirkungen des explosiven Vulkanismus auf das Klima nun genauer zu analysieren, werden die Sulfatpartikelbildung (aus schwefelhaltigen Gasen) und deren Abbau (Sedimentation) abgeschätzt; denn genau diese Sulfatpartikel sind es, die besonders wirksam die Sonneneinstrahlung streuen und somit die untere Atmosphäre kühlen. Das Resultat sind Vulkanwirkungsindizes, die Informationen darüber liefern, wie lange und wie intensiv solche stratosphärischen Sulfatpartikelschichten nach explosiven Vulkanausbrüchen in der Stratosphäre existieren.



1 Die schwarze Kurve zeigt die aus Beobachtungsdaten abgeleiteten Anomalien (das heißt die Abweichungen vom Referenzmittelwert zwischen 1961 und 1990, der circa 15 °C beträgt) der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur in den Jahren von 1860 bis 2008. Die rote Kurve zeigt die Reproduktion durch ein neuronales Netz, das 88 Prozent der beobachteten Varianz erklärt. Einige durch Vulkanausbrüche verursachte Abkühlungs- und durch El-Niño-Ereignisse verursachte Erwärmungsperioden sind markiert. Die violette Kurve (TR) zeigt die Erwärmung durch die anthropogen angestiegenen Treibhausgaskonzentrationen, die blaue (SU) die Abkühlung durch die ebenfalls anthropogenen erhöhten Sulfatpartikelkonzentrationen. Die grüne Kurve ist der kombinierte anthropogene Effekt, der offenbar eine Erwärmung um rund 0,8 °C anzeigt.

Noch interessanter aber sind die Klimasignale, das sind die Anteile der Temperaturtrends beziehungsweise Fluktuationen, die sich jeweils den einzelnen Einflüssen zuordnen lassen. Hier kommen wir anthropogen auf einen Trend von 0,7 bis 0,9 °C Erwärmung und

natürliche Fluktuationen in der Größenordnung von 0,1 bis 0,3 °C, die diesen Trend überlagern. Da diese Ergebnisse weitgehend mit physikalischen Modellrechnungen übereinstimmen – die allerdings die hier beschriebene Feinstruktur des Klimawandels nur sehr ungenau wiedergeben –, gewinnen die Zukunftsprojektionen an Brisanz und damit die Forderung, auch beim Klimaproblem das Nachhaltigkeitsprinzip anzuwenden, das heißt, durch Minderung der anthropogenen Treibhausgasemissionen Vorsorge zu betreiben und somit den anthropogenen Klimawandel nicht ausufern zu lassen. Wegen der Zeitverzögerungen der im Klimasystem wirksamen Prozesse ist ein gewisser anthropogener – neben dem natürlichen – Klimawandel allerdings nicht mehr zu verhindern, so dass wir auch um Anpassungsmaßnahmen nicht herumkommen. ◆

Literatur

Grieser, J., Schönwiese, C.-D. (1999) <i>Parameterization of spatio-temporal patterns of volcanic aerosol induced stratospheric optical depth and its climate radiative forcing</i> <i>Atmosphäre</i> , 12, 111–133.	Univ. Press, Cambridge, 996 S.	(2010) <i>Statistical assessments of anthropogenic and natural global climate forcing. An update</i> <i>Meteorolog. Z.</i> , 19, 3–10.
Grober, U. (2010) <i>Die Entdeckung der Nachhaltigkeit</i> Kunstmann, München, 299 S.	Lean, J. (2009) <i>Revised and updated solar irradiance data</i> Pers. comm. (s. auch (2000) <i>Geophys. Res. Letters</i> , 27, 2425–2428).	Tremmel, J. (2002) <i>Nachhaltigkeit als politische und analytische Kategorie</i> Diplomarbeit, FB Gesellschaftswissenschaften, Goethe-Universität Frankfurt a. M., 194+XXVIS.
IPCC (Intergovernmental panel on Climate Change, Solomon, S., et al., eds.) (2007) <i>Climate Change 2007. The Physical Science Basis</i> Cambridge	Oreskes, N. (2004) <i>The scientific consensus on climate change</i> <i>Science</i> , 306, 1686.	Walter, A. (2001) <i>Zur Anwendung neuronaler Netze in der Klimatologie</i> (Dissertation) Bericht Nr. 218, Deut. Wetterdienst, Offenbach, 168 S.
	Schönwiese, C.-D., Walter, A., Brinckmann, S. (2008) <i>Klimatologie</i> (3. Aufl.) Ulmer (UTB), Stuttgart, 472 S.	

Der Autor

Prof. Dr. Christian-D. Schönwiese, 70, bis zu seinem Ruhestand Leiter der Arbeitsgruppe Klimaforschung am heutigen Institut für Atmosphäre und Umwelt, hat sich mit der statistischen Analyse beobachteter Klimavariationen und Extremereignisse (global, Europa, Deutschland) und der ursprünglichen Interpretation beschäftigt. Er verfasste mehrere Lehrbücher und über 200 Fachpublikationen. Seine publizistische und gutachterliche Tätigkeit setzt er auch im Ruhestand mit großem Engagement fort. Er ist Mitglied diverser Arbeitsgruppen und Gremien.

schoenwiese@meteor.uni-frankfurt.de
www.geo.uni-frankfurt.de/klima