

# Klimawandel: globale Ursache, regionale Folgen

Hans Schipper

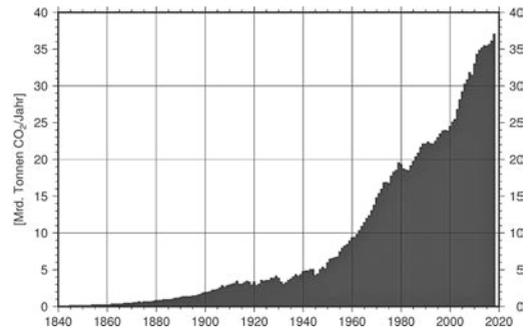
*Das Klima hat sich in der Erdgeschichte immer wieder gewandelt. Allerdings durch sehr hohe zusätzliche Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre aufgrund der Verbrennung fossiler Brennstoffen, steigt die globale Mitteltemperatur in den letzten ca. 150 Jahren rasant an. Auch in Deutschland und Baden-Württemberg ist dieser Temperaturanstieg messbar. Für die Frage, wie es in Zukunft weitergeht, eignen sich Klimamodelle sehr gut, da die mit Hilfe physikalischer Zusammenhänge mögliche Änderungen abschätzen können. Maßgebend für die zukünftige Entwicklung sind die Randbedingungen des Klimas. Davon ist der Ausstoß von Treibhausgasen im aktuellen Klimawandel die entscheidende Größe. Deshalb ist es wichtig, diesen Ausstoß zu reduzieren. Da der Klimawandel ein globales Phänomen ist, finden auf globaler Ebene jährlich Weltklimakonferenzen statt. 2015 wurde in Paris das aktuellste Abkommen von fast allen Ländern der Welt unterschrieben und legt weitgehende Klimaschutzmaßnahmen fest. Dennoch reichen diese Maßnahmen nicht aus, das Ziel des Abkommens zu erreichen, den globalen Temperaturanstieg unter 2 °C (und womöglich unter 1,5 °C) zu halten. Deswegen gilt es in den nächsten Jahren, die Anstrengungen beim Klimaschutz weltweit zu erhöhen, um einen weiteren Fortschritt des Klimawandels mit allen negativen Folgen zu bremsen oder sogar anzuhalten.*

## Die beobachtete globale Perspektive

Das Klima hat sich in der Erdgeschichte häufig geändert. Es gab große Ereignisse wie Eis- und Warmzeiten über tausende Jahre und kleinere Schwankungen über mehrere Jahrhunderte. Informationen aus Eisbohrkernen zeigen die Ursachen für diese Klimaänderungen. Wenn Eis aus mehreren Kilometern Tiefe untersucht wird, enthalten das Eis selbst sowie die darin enthaltenen Luftbläschen wertvolle Informationen über den Zustand der Atmosphäre zum Zeitpunkt, als das Eis an dem Ort gebil-

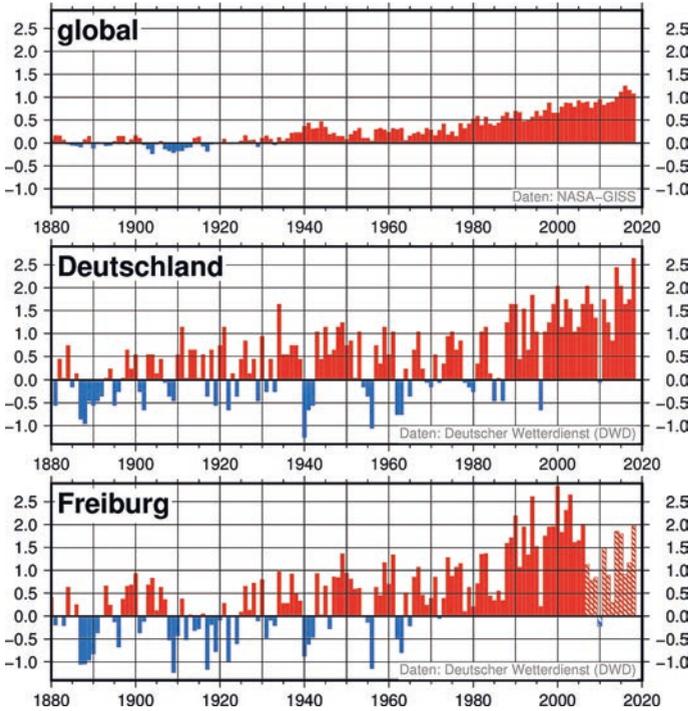
det wurde. Die verschiedenen Eisschichten in einem Eisbohrkern erzählen eine Geschichte über beispielsweise die Menge des Treibhausgases Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) und lassen somit Aussagen über dessen zeitliche Änderung zu. Die chemische Zusammensetzung weiterer Elemente im Eis ermöglicht eine Abschätzung der Temperatur der Atmosphäre. So lassen sich Änderungen der Temperatur auf der Erde bestimmen. Während Warm- und Eiszeiten der letzten ca. 800 000 Jahre änderte sich der CO<sub>2</sub>-Gehalt als Folge dieser Temperaturschwankungen. Das hat hauptsächlich damit zu tun, dass Ozeane einen wichtigen Spei-

cher für  $\text{CO}_2$  sind, die Speicherkapazität bei höheren Temperaturen allerdings abnimmt. Folglich bleibt mehr  $\text{CO}_2$  in der Atmosphäre. Die Treibhauswirkung des  $\text{CO}_2$  führt zu einer positiven Rückkopplung dieses Temperaturanstiegs, was letztendlich zu einem Wechsel von einer Kaltzeit in eine Warmzeit führt. Während Warmzeiten lag der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre bei ca. 280 ppm<sup>1</sup>, während Eiszeiten bei ca. 180 ppm. Die Eis- und Warmzeiten hatten eine Dauer von mehreren zeh- bis hunderttausend Jahren. Die Gründe für eine Änderung der Temperatur und somit auch des Klimas sind vielfältig. Einerseits gibt es sogenannte externe Faktoren, wie beispielsweise die Sonnenaktivität, aber auch die Neigung der Erdachse. Zweitens findet man auf der Erde viele Faktoren, die über kurz oder lang für ein Gleichgewicht des Klimas sorgen. Dabei wäre zu denken an die Oberfläche der Erde (dunkle Wälder absorbieren mehr Sonnenstrahlung als beispielsweise weißer Sand) und die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre (welche und wie viele Treibhausgase sind vorhanden). Jeder dieser Faktoren, sowohl extern als intern, wirkt auf einer bestimmten Zeitskala. Das heißt z. B. für die Neigung der Erdachse, dass sie für uns Menschen praktisch keine Rolle spielt, weil die Neigung sich nur über tausende Jahre hinweg verändert. Im Gegensatz dazu ist die Lebensdauer von einigen Treibhausgasen mit nur einigen Jahrzehnten bis Jahrhunderten relativ kurz. Und gerade diese Treibhausgase spielen eine entscheidende Rolle für die momentan beobachtete Klimaänderung. Es ist schon seit über einem Jahrhundert bekannt, dass neben Wasserdampf die wichtigsten Treibhausgase Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) sind. Ohne Treibhausgase würde die Durchschnittstemperatur auf Erde mit ca.  $-18^\circ\text{C}$  deutlich niedriger als heute mit



Beobachteter jährlicher globaler  $\text{CO}_2$ -Ausstoß  
(Daten: CDIAC;  
Grafik: Süddeutsches Klimabüro am KIT).

ca.  $+15^\circ\text{C}$  liegen (natürlicher Treibhauseffekt). Die genaue absolute Temperatur ist dabei weniger entscheidend. Hauptsache ist, dass die Treibhausgase für einen Temperaturanstieg sorgen. Nun sind die Treibhausgase in sehr geringen Mengen in unserer Atmosphäre vorhanden. Ein Anstieg dieser Gase führt deswegen schon schnell zu einem zusätzlichen Temperaturanstieg (anthropogener, bzw. vom Menschen verursachter Treibhauseffekt). Und genau das ist, was in den letzten 150 Jahren passiert. Seit der industriellen Revolution Mitte des 19. Jahrhundert wurden sehr große Mengen an Treibhausgasen (vor allem  $\text{CO}_2$ ) in die Atmosphäre ausgestoßen. Dadurch stieg die Konzentration von  $\text{CO}_2$  von 280 auf mittlerweile über 400 ppm. Eine solche hohe Konzentration gab es in den letzten 800 000 Jahren nicht. Da die Konzentration von Treibhausgasen eine direkte Auswirkung auf die Durchschnittstemperatur auf der Erde hat, müsste letztere auch anstiegen, was auch passiert. Konnte man bis Anfang des 20. Jahrhunderts die Schwankungen der Temperatur gut aus beispielsweise dem Einfluss der Sonne, der Neigung der Erdachse, oder Vulkanausbrüchen herleiten, geht dies jetzt nur noch zum Teil. Der Anstieg der Durchschnitts-



Abweichung der jährlichen beobachteten Durchschnittstemperatur [°C] für Freiburg, Deutschland und global im Vergleich zum Mittelwert über den Jahren 1881–1910. Schraffierte Balken bei Freiburg markieren eine Stationsverlegung. (Grafik: Süddeutsches Klimabüro am KIT).

temperatur lässt sich hauptsächlich auf die erhöhte Konzentration der Treibhausgase sowie, in geringerem Maße, auf Landnutzungsänderungen zurückführen.

### Die beobachtete regionale Perspektive

In Deutschland hat sich die durchschnittliche Mitteltemperatur der letzten 30 Jahre im Vergleich zum Ende des 19. Jahrhundert (1881 bis 1910) um ca. 1,5 °C erhöht. Laut dem Deutschen Wetterdienst (DWD) war darin das Jahrzehnt von 2009 bis 2018 mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von etwas mehr als 9,4 °C die wärmste Dekade seit mindestens

130 Jahren. Auch ist der beobachtete Temperaturanstieg in Baden-Württemberg messbar. Die wärmsten Jahre 2014 und 2018 lagen dabei mit 10,1 °C und 10,4 °C deutlich über dem langjährigen klimatologischen Mittel (1961–1990) von 8,1 °C. Zu berücksichtigen ist, dass der Temperaturanstieg in den verschiedenen Jahreszeiten unterschiedlich stark ausfällt: Für die Temperaturen im Frühling zeigen die Auswertungen des DWD einen größeren Anstieg als im Jahresmittel. Die vier wärmsten Jahre im Deutschlandmittel waren 2007, 2011, 2014 und 2018 mit über eine 10 °C Durchschnittstemperatur. In der Periode 1961 bis 1990 lag der Durchschnittswert noch bei ca. 7,7 °C. Ebenso tragen die Sommertemperaturen zum

Trend in der Jahresmitteltemperatur bei und zwar wurde es in dieser Jahreszeit etwas über 1,2 °C wärmer als im Mittel 1961–1990. Ein Beispiel eines sehr heißen Sommers war der Sommer 2003. Dieser »Jahrhundertsommer« war im Mittel um knapp 3,5 °C in Deutschland und sogar um knapp 4,5 °C in Baden-Württemberg wärmer als einen durchschnittlichen Sommer in der Periode 1961–1990. In Karlsruhe wurde am 13. August 2003 eine Rekordtemperatur von 40,2 °C beobachtet. Dieser Rekord wurde am 25. Juli 2019 in Lingen (Niedersachsen) mit einem Wert von 42,6 °C gebrochen. Seit 22 Jahre sind alle Jahre im Deutschlandmittel wärmer als in der Periode 1961 bis 1990. Aufgrund vieler lokalen Einflüsse ist einen Temperaturanstieg an einem

Ort meistens nicht so offensichtlich wie beim globalen Mittel. Dennoch lässt sich auch in Freiburg einen Anstieg beobachten. Die Jahre 1977 bis 2006 (ab Ende 2006 wurde die Station Freiburg verlegt) waren im Durchschnitt etwas mehr als 1,4 °C wärmer im Vergleich zu der Periode 1881 bis 1910. Da die Station Freiburg ab Ende 2006 nach etwas außerhalb der Stadt verlegt wurde, sind seitdem die Jahresmitteltemperaturen in Freiburg etwas niedriger und nicht mehr mit den »alten« Stationsdaten zu vergleichen.

Bei der Entstehung von Niederschlag spielt eine Vielzahl an Prozessen auf unterschiedlicher Skala eine Rolle. Deswegen ist es schwierig, einen signifikanten Trend für Niederschlag abzuleiten. Trotzdem lassen sich auch beim Niederschlag Veränderungen beobachten. Gegenüber dem Beginn des 20. Jahrhunderts ist das Gebietsmittel der jährlichen Niederschlagsmenge in Deutschland für die Jahre 1901 bis 2018 um etwa 7 % angestiegen. Die beiden ersten Dekaden des 20. Jahrhunderts waren allerdings vergleichsweise trocken und beeinflussen das Ergebnis stark. Übers Jahr betrachtet hat vor allem im Frühjahr die Menge an Niederschlag zugenommen. Für den Monat März beispielsweise wurde für den 108-jährigen Betrachtungszeitraum gegenüber dem entsprechenden langjährigen Monatsmittel (1961 bis 1990) eine mittlere Zunahme um 34 % beobachtet. Im Sommer ergibt sich insgesamt kein wesentlicher Trend. Allerdings hat sich die Verteilung der Niederschlagsmengen innerhalb der Sommermonate geändert: geringeren Niederschlagsmengen im Juli und August stehen stärkere Niederschläge im Juni gegenüber. Die Winterniederschläge nahmen dagegen generell um 25 % zu. Ein im November 2019 veröffentlichter Monitoringbericht zur Deutschen Anpassungsstrategie an den

Klimawandel zeigt weitere klimatische Veränderungen in Deutschland.

## Das zukünftige Klima ■

Generell können Klimamodelle die klimatischen Gegebenheiten und Entwicklungen gut abbilden und bieten die Möglichkeit, das mögliche Klima der Zukunft abzuschätzen. Viele physikalische Prozesse im Klimasystem sind gut verstanden und können daher auch im Modell gut wiedergegeben werden. Globale Klimamodelle erlauben dank der umfassenden Abdeckung der Erde Projektionen, welche übergeordneten Entwicklungen in unterschiedlichen Klimazonen zu erwarten sind. Regionale Klimamodelle erlauben aufgrund ihrer hohen Auflösung hingegen eine kleinräumig detaillierte Darstellung für spezifische Fragestellungen.

Einschränkungen in der Aussagekraft von Klimamodellen ergeben sich zum einen daraus, dass manche Prozesse und Rückkopplungen im Erdsystem noch nicht umfassend verstanden sind. Forschungsbedarf besteht beispielsweise noch bezüglich der Auswirkung der Klimaänderung auf den Austausch zwischen Treibhausgasen und der Biosphäre oder zwischen Wolken und dem Strahlungshaushalt der Atmosphäre. Interne Rückkopplungen können zur Folge haben, dass sich aus kleinen Änderungen der Anfangsbedingungen große Unterschiede in der Modellrechnung ergeben. Zum anderen bewirkt die interne Variabilität des Klimasystems, dass nichtlineare Prozesse Klimaentwicklungen beeinflussen und damit Projektionen erschweren. Außerdem können zufällige Antriebe wie Vulkanismus das Klima zeitweise beeinflussen. Um die gesamte Bandbreite möglicher Entwicklungen des Klimas zu be-



Für regionale Klimasimulationen werden in mehreren Schritten, von global zu regional, ein immer kleineres, aber dafür höher aufgelöstes, Gebiet gerechnet (Copyright: Süddeutsches Klimabüro am Karlsruher Institut für Technologie)

rücksichtigen, werden mehrere Klimasimulationen durchgeführt, so genannte Ensembles. Diese werden entweder gebildet, indem verschiedene Klimamodelle die gleichen Antriebsdaten benutzen, oder indem ein regionales Klimamodell unterschiedliche Globalmodelle oder unterschiedliche Läufe (Realisierungen) eines Globalmodells heranzieht. Zu berücksichtigen bleibt außerdem, dass die Modellrechnungen für die Zukunft auf Szenarien bezüglich der Entwicklung der Treibhausgase beruhen und daher von den in den Szenarien gemachten Annahmen abhängen. Abhängig von der Höhe des Temperaturanstiegs ergeben sich unterschiedliche Auswirkungen. Ein prominentes Beispiel ist das Abschmelzen der Polkappen. Vor allem in der Arktis beobachtet man seit mehreren Dekaden eine Abnahme des Meereises. Ein anderes

Beispiel ist, dass die Verdunstung von Wasser stark temperaturabhängig ist, wodurch sich weltweit die Niederschläge ändern. Eine Schwierigkeit bei der Betrachtung von Niederschlägen ist allerdings, dass die Verteilung des Niederschlags regional und zeitlich stark variiert, auch ohne Klimawandel. Bevor also von einem Niederschlagstrend, sowohl nach oben als nach unten, die Rede sein kann, bedarf es langen Beobachtungsreihen oder Modellsimulationen. Es ist zu erwarten, dass sich die Menge des Jahresniederschlags in Deutschland zwar kaum, die Verteilung der Niederschläge übers Jahr hinweg allerdings schon ändert. Es wird erwartet, dass sich im Winter die Niederschlagsmenge erhöhen wird, während im Sommer dagegen in Zusammenhang mit längeren Trockenperioden die Menge eher abnehmen wird. Eine indirekte Folge von längeren Trockenperioden wäre die Austrocknung der Böden. Dies bedeutet, dass, wenn es nach längerer Zeit zu regnen anfängt, der Boden kaum Wasser aufnehmen kann. Das Risiko für Überschwemmungen nimmt also zwangsläufig zu. Der momentane Klimawandel findet weltweit statt.

## Weltweite Auswirkungen ■

Nur sind die Auswirkungen des Klimawandels nicht überall gleich. Das heißt, dass es Gebiete auf Erde gibt, wo relativ wenige Änderungen zu spüren sein werden und Gebiete, wo das Gegenteil der Fall ist. Vor allem Gebiete mit sowieso schon vielen existentiellen Problemen, werden den Klimawandel besonders zu spüren bekommen. Beispielsweise gibt es große Teile Afrikas, in welchen auch ohne Klimawandel kaum Wasser zur Verfügung steht. Eine Änderung der Niederschlagsverteilung würde den täglichen Kampf

ums Wasser deswegen verschärfen. In Bezug auf den Meeresspiegelanstieg gibt es zwar viele mögliche Entwicklungen, von einem Anstieg ist aber immer die Rede. Weitaus der größte Teil der Menschheit lebt in Küstenregionen. Wenn nicht für ausreichend Schutz gesorgt wird, werden sehr viele Menschen die Auswirkungen des Klimawandels zu spüren bekommen. In den westlichen Ländern sind genügend finanzielle Mittel vorhanden, sich vorerst für diesen Anstieg zu schützen. Viele Länder haben aber diese Mittel nicht, brauchen aber Anpassungsmaßnahmen. Eine Migration eines Teils der Weltbevölkerung scheint hier unausweichlich, was eine zusätzliche Belastung für die politische Agenda vieler Länder wäre. Der Klimawandel hat große volkswirtschaftliche Auswirkungen. Wenn extreme Wetterereignisse wie Stürme, Hagel oder Überschwemmungen häufiger und intensiver auftreten, steigt damit zwangsläufig das Risiko für Schäden an Gebäuden, Fahrzeugen oder in der Land- und Forstwirtschaft an. Die Schwierigkeit mit Extremereignissen ist, dass sie nur selten auftreten. Für die Analyse eines Ereignisses bräuchte man also sehr lange Zeitreihen, um genügend Ereignisse zu erfassen. Ein hundertjähriges Ereignis tritt eben im Schnitt über viele Hunderte von Jahren einmal pro Jahrhundert auf. Das heißt im Umkehrschluss aber nicht, dass, wenn zwei »Jahrhundert-Ereignisse« innerhalb eines Jahrhunderts auftreten, diese Ereignisse öfter auftreten. Eine ausreichend lange Zeitreihe für statistische Aussagen ist oft nicht vorhanden, wodurch die Aussage über Zu- oder Abnahme eines Ereignisses unsicher wird. Klimamodelle sind mittlerweile recht gut in der Lage, die Häufigkeit von Ereignissen in der Vergangenheit wiederzugeben. Diese gleichen Modelle erwarten nun für die Zukunft eher eine Zunahme der Extremereignisse. Da sol-

che Ereignisse regional sehr unterschiedlich auftreten, ist eine Zunahme weltweit nicht im gleichen Umfang zu erwarten. Welche Ereignisse wo, wann und wie viel zunehmen werden, bedarf noch Forschung.

## Klimapolitik ■

Die internationale Klimapolitik versucht die Ziele beim Klimaschutz in einem gemeinsamen Abkommen festzulegen. Ein erster wichtiger Schritt in dieser Richtung war das Kyoto-Protokoll aus dem Jahr 1997. Dieses Protokoll legte für Industrieländer den maximalen durchschnittlichen Treibhausgasausstoß zwischen 2008 und 2012 fest. In 2009 fand in Kopenhagen eine der jährlichen UN-Klimakonferenzen statt. Obwohl die Ergebnisse der Verhandlungen meist kritisch betrachtet wurden, wurde festgehalten, dass der globale Anstieg der Temperatur 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Wert nicht übersteigen sollte. Die Begründung liegt darin, dass die Forschung davon ausgeht, dass bei einem stärkeren Anstieg die Folgen des Klimawandels nicht mehr beherrschbar sein werden. Inwiefern die Grenze tatsächlich bei exakt 2 °C liegt, ist nicht zu beweisen. Eine solche Grenze aber bietet die Möglichkeit allen Bemühungen beim Klimaschutz eine gleiche Zielsetzung voranzustellen. Schwierig zu beantworten ist die Frage, welche Treibhausgasmengen noch emittiert werden dürfen, um die 2-Grad-Grenze nicht zu überschreiten. Klar ist allerdings, dass das Zeitfenster für ein konsequentes Handeln immer enger wird. Der WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung – Globale Umweltveränderungen) beispielsweise ging in einem Sondergutachten von 2009 davon aus, dass das 2-Grad-Ziel nur erreicht werden kann, wenn

die Industrieländer noch vor 2015 den Trend ihrer CO<sub>2</sub>-Emissionen umkehren. Das ist nicht der Fall gewesen. Bis 2020 müssten die Emissionen auf ein Drittel reduziert werden. Bei erfolgreicher Einführung eines weltweiten Emissionshandels wäre für diese Reduktion allenfalls noch bis 2025 Zeit. Länder wie etwa China, Indien oder Brasilien müssten aufgrund ihrer nachholenden Entwicklung die Trendumkehr zwischen 2020 und 2025 erreichen. Tatsächlich haben die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen mit 37 Mrd. Tonnen Kohlendioxid ein neues Rekordniveau erreicht, Tendenz steigend. Damit übersteigt die weltweite Emissionsentwicklung den angenommenen Verlauf fast aller IPCC-Szenarien. 2015 wurde in Paris auf der 23. UN-Weltklimakonferenz ein weltweites Abkommen von knapp 200 Ländern unterschrieben. Dieses Abkommen hat zum Ziel, den globalen Temperaturanstieg unter 2 Grad zu halten. Auf Druck der Inselstaaten, die den Meeresspiegelanstieg schon jetzt zu spüren bekommen, wurde vereinbart, dass Anstrengungen unternommen werden sollte den Temperaturanstieg auf 1,5 Grad zu begrenzen. Zudem soll es freiwillige Selbstverpflichtungen der einzelnen Länder bezüglich ihres Treibhausgasausstoßes geben, welche alle fünf Jahre überprüft werden sollen. Ebenfalls wurde eine finanzielle Unterstützung von Seiten der Industrieländer für Klimaschutz und -anpassung in den ärmeren Ländern zugesagt (ab 2020 100 Mrd.

Dollar pro Jahr). Das Thema »klimabedingte Schäden und Verluste« wurde als eigenes Kapitel dem Abschlussdokument hinzugefügt, ebenso Angaben über einen Fonds für die weltweite Anpassung an den Klimawandel. Wichtig ist beim Thema Klimawandel, dass nicht nur einzelne Ebene – wie der Wissenschaft, die Industrie, die Politik, oder auch Einzelpersonen – an Lösungen für die Klimawandelproblematik arbeiten sollen, sondern, dass die Ebenen sich gemeinsame Lösungswege überlegen sollen.

---

#### Anmerkungen

- 1 ppm: »parts per million« (Teilchen pro Millionen Teilchen Luft).



Anschrift des Autors:  
Dr. Hans Schipper  
Leiter des Süddeutschen  
Klimabüros am Karlsruher  
Institut für Technologie  
Institut für Meteorologie und  
Klimaforschung  
Hermann-von-Helmholtz-  
Platz 1,  
76344 Eggenstein-  
Leopoldshafen  
E-mail: schipper@kit.edu