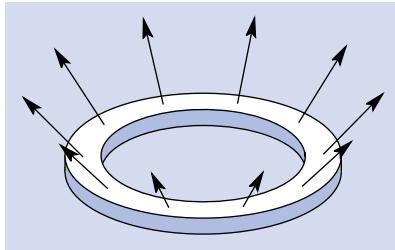


mit einem theoretischen Modell in Übereinstimmung bringen können, wenn sie die Berry-Phase berücksichtigen. Deshalb folgern sie, dass diese in dem von ihnen betrachteten System auftritt.

Im Gegensatz zu Halbleitern ist in Metallen die Geschwindigkeit der Elektronen größer, sodass we-

Abb. 2: Mithilfe eines Ringes im inhomogenen Magnetfeld B ist es möglich, die Berry-Phase in einem Interferenzexperiment zu messen. Die Richtung von B ändert sich entlang des Ringes, nicht aber der Betrag. Solche Felder finden sich z.B. oberhalb eines geeigneten Stabmagneten oder werden effektiv durch Spin-Bahn Kopplung erzeugt.



sentlich höhere Feldstärken für die Beobachtung der Berry-Phase notwendig wären. Diese Einschränkung ist jedoch für diffusive Ringe (im Regime der schwachen Lokalisierung) aufgehoben, wie dies in weiteren Arbeiten von D. Loss et al. gezeigt wurde [7]. Die diffusive Bewegung entsteht durch elastische Streuung an Störstellen; dies beeinträchtigt zwar die Bahn der Elektronen, nicht aber deren Phasenkohärenz. Wie in ballistischen Ringen treten deshalb Interferenzeffekte aufgrund der Berry-Phase auf, die Elektronen bleiben jedoch viel länger in einer Region mit einer bestimmten Magnetfeldrichtung. So ist die adiabatische Annahme bereits für typischerweise 500 Gauß gerechtfertigt [8]. Diese Vorhersagen für Metalle wurden jedoch noch nicht im Experiment bestätigt. Daher sind auch in Zukunft spannende Experimente zu den faszinierenden geometrischen Phasen zu erwarten.

HANS-ANDREAS ENGEL
UND DANIEL LOSS

Dipl.-Phys. Hans-Andreas Engel und Prof. Dr. Daniel Loss, Universität Basel, Klingelbergstrasse 82, 4056 Basel, Schweiz

1) Die Grenzen der angegebenen Intervalle beziehen sich auf den 5–95%-Konfidenzbereich, das heißt, die Grenzen werden mit einer Wahrscheinlichkeit von 5% unter- bzw. überschritten.

2) Earth Simulator: www.es.jamstec.go.jp

Dr. Ulrich Cubasch, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bundesstr. 55, 20146 Hamburg

- A. V. Balatsky, Phys. Rev. Lett. **65**, 1655 (1990).
 [6] A. G. Aronov und Y. B. Lyanda-Geller, Phys. Rev. Lett. **70**, 343 (1993).
 [7] D. Loss, H. Schoeller und P. M. Goldbart, Phys. Rev. B **48**, 15218 (1993).
 [8] H.-A. Engel und D. Loss, Phys. Rev. B **62**, 10238 (2000).

Hitze Fragen

Zwei neue Modelle zeigen, dass Klimaschutz notwendig ist, sich aber erst längerfristig bemerkbar macht.

„Wie wird sich das Klima in den nächsten drei Jahrzehnten entwickeln?“ Dies ist die Standardfrage, mit der jeder Klimaforscher nach einem Vortrag konfrontiert wird. Eine weitere Frage lautet: „Wie groß sind die Fehlerbalken bei den Temperaturvorhersagen?“ Auf beide Fragen lieferte der im Sommer 2001 veröffentlichte Bericht des International Panel on Climate Change (IPCC) noch keine bzw. nur sehr vorläufige Antworten [1]. Hunderte von Wissenschaftlern hatten fünf Jahre lang das derzeitige Wissen über das Klima und seine Veränderlichkeit zusammengefasst und in dem 1000 Seiten langen Bericht veröffentlicht. Als Nebenprodukt dieser Arbeit wurden Wissenslücken deutlich und entsprechende Forschungsarbeiten angeregt. Nun sind zwei Veröffentlichungen erschienen, die sich mit den eingangsgestellten Fragen befassen und den IPCC-Bericht ergänzen. Auf der Grundlage von sehr unterschiedlichen Modellen kommen beide Arbeiten zum Ergebnis, dass die Erwärmung in den nächsten Jahrzehnten unabhängig vom Emissionsszenarium ist und dass die vom IPCC genannten Obergrenzen für die Temperaturerhöhung innerhalb der nächsten 100 Jahre deutlich übertroffen werden können [2, 3].

Die englischen Autoren Stott und Kettleborough verwenden ein volles dreidimensionales gekoppeltes Ozean-Atmosphärenmodell, um die Variationen im Klimasystem auf Zeitskalen von Stunden bis zu Jahrhunderten zu berechnen. Das Modell erlaubt es, die Reaktion des Klimasystems auf Veränderungen des natürlichen Antriebes (Schwankungen der Sonnenintensität, Vulkane) sowie der anthropogenen Faktoren (Treibhausgase, Aerosole)

während des 20. Jahrhunderts und für das 21. Jahrhundert zu berechnen. Allerdings benötigt es eine sehr hohe Rechnerleistung, sodass sich nur eine beschränkte Anzahl von Simulationen durchführen lässt. Die Autoren verwenden komplexe statistische Techniken, um die Klimaänderung im 20. Jahrhundert nachzuweisen und zu beschreiben, und benutzen diese Analyse, um die Schwankungsbreite des zukünftigen Klimas abzuschätzen und einzugrenzen. Auf diese Weise erhält man eine Wahrscheinlichkeitsverteilung für die mit dem Klimamodell vorhergesagten Temperaturänderungen.

In der zweiten Veröffentlichung eines schweizer Teams [3] wird ein vereinfachtes Klimamodell eingesetzt, in dem nur die Nord-Süd-Veränderung der Temperatur- und Feuchtigkeitsverteilung, die Nord-Süd- und Vertikalbewegung der Wassermassen im Ozean sowie seine Salzgehalt- und Temperaturverteilung explizit berechnet werden; alle weiteren Größen werden parametrisiert. Da dieses einfache Modell nur geringe Anforderungen an die Rechenleistung stellt, lassen sich sehr viele Simulationen (in dieser Arbeit 25 000!) mit verschiedenen Parameterkombinationen durchrechnen. Aus diesen Simulationen wurden diejenigen ausgewählt, welche die während des 20. Jahrhunderts beobachtete Meeresoberflächentemperatur und Wärmeaufnahme im Ozean am besten wiedergeben. Sie wurden dann weitergeführt, um IPCC-Szenarien für das 21. Jahrhundert und eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der zukünftigen Temperaturänderung zu berechnen.

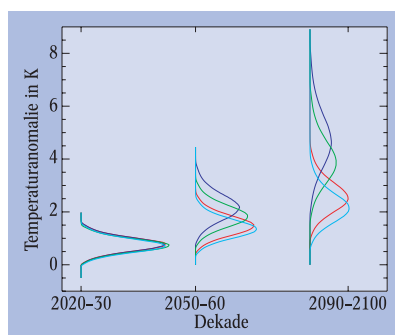
Unabhängig von der Methode erhalten beide Forschergruppen folgende Ergebnisse:

- In den nächsten Dekaden ist die Erwärmung unabhängig davon, wie sich die Emissionen verändern. Dieses kommt durch die starke Dämpfung durch den Ozean und durch den Aerosoleffekt. Für die Dekade 2020–2030 kommt die schweizer Gruppe auf einen Temperaturanstieg von 0,5 bis 1,1 °C und das englische Forscherteam auf 0,3 bis 1,3 °C gegenüber dem Jahrzehnt 1990–2000.¹⁾
- Die angegebenen Obergrenzen überschreiten deutlich die vom IPCC genannten Grenzen. Die Unsicherheiten in dem Temperaturanstieg sind dabei zu gleichen Teil-

- [1] M. V. Berry, Proc. R. Soc. London, Ser. A **392**, 45 (1984).
 [2] A. F. Morpurgo, J. P. Heida, T. M. Klapwijk, B. J. van Wees und G. Borghs, Phys. Rev. Lett. **80**, 1050 (1998); P. Mohanty und R. A. Webb, Phys. Rev. Lett. **84**, 4481 (2000).
 [3] Jeng-Bang Yau, E. P. De Poortere und M. Shayegan, Phys. Rev. Lett. **88**, 146801 (2002).
 [4] A. Shapere und F. Wilczek, Geometric Phases in Physics (World Scientific, Singapore, 1989).
 [5] D. Loss, P. M. Goldbart und

len auf die Unsicherheiten in den Emissionsszenarien und bei der Wahl der Modellparameter zurückzuführen.

Diese Resultate sind auch in politischer Hinsicht von Bedeutung: Da sich unterschiedliche Emissionsszenarien nicht sofort auswirken, schlägt ein stärkerer Umweltschutz innerhalb der nächsten zwei bis drei Jahrzehnte nicht sichtbar an. Dass man dennoch nicht darauf verzichten sollte, zeigt das zweite Ergebnis: Demzufolge kann man sich nicht darauf verlassen, dass die vom IPCC angegebene Obergrenze der Erwärmung von 5,8 °C bis zum Jahr 2100 nicht überschritten wird, denn auch Temperaturänderungen von mehr als 8 °C sind nicht unwahrscheinlich.



Verschiedene Emissionsszenarien beeinflussen den vorhergesagten Temperaturanstieg innerhalb der nächsten drei Jahrzehnte nur unwesentlich. Danach machen sie sich stärker bemerkbar. Die gezeigten Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Temperaturänderungen deuten auf die Möglichkeit einer höheren Temperaturänderung in der letzten Dekade dieses Jahrhunderts hin als im IPCC-Bericht angegeben (nach Ref. [2]).

Beiden Studien kann man ankreiden, dass sie die strukturelle Unsicherheiten nicht berücksichtigen, die dadurch auftreten, dass man in den Modellen noch nicht alle Effekte erfasst hat, zum Beispiel die Wechselwirkungen mit dem Kohlenstoffkreislauf. Auch rapide, nicht-lineare Vorgänge, wie es z. B. ein Umkippen des Golfstromes darstellt, werden nicht hinreichend genau modelliert. Das bedeutet, dass die hier beschriebenen Klimaänderungen durchaus nicht den gesamten Wahrscheinlichkeitsraum abdecken, sondern noch Überraschungen möglich sind.

Um ideale Modell-Experimente durchzuführen und um damit die Aussagen besser abzusichern, müsste man die Vielzahl der schweizer Experimente mit den komplexen Modellen der Engländer und anderer Nationen wiederholen. Dazu

sind massive Rechnerkapazitäten notwendig. In Japan wurde mittlerweile eine Rechneranlage gebaut, mit der man derartige Simulationen rechnen kann.²⁾ Man geht dort davon aus, dass sich diese massive Investition rechnet, da es bei der Klimafrage um Energiepolitik und damit um Billionen von Euros geht. In Europa sind keine konkreten Ansätze zur Schaffung derartiger Rechnerkapazitäten zu erkennen. Die europäische Klimaforschung wird es in den kommenden Jahren schwer haben, den Technologievorsprung der Japaner aufzuholen und sich somit bei Fragen der Umwelt- und Energiepolitik auf deren Ergebnisse verlassen müssen.

ULRICH CUBASCH

- [1] U. Cubasch et al.: Projections of future climate change. In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [J. T. Houghton et al. (Hrsg.)]. Cambridge University Press 2001, ISBN 0521 01495 6.
- [2] P. A. Stott und J. A. Kettleborough, Nature **416**, 723 (2002)
- [3] R. Knutti, T. F. Stocker, F. Joos und G. L. Kasper Plattner, Nature **416**, 719 (2002)
- [4] Für eine Übersicht über diese Modellklasse siehe M. Claussen et al., Climate Dynamics 579 (2002) und: www.pik-potsdam.de/data/emic/table_of_emics.pdf

Unkonventionelle Paarung

Neue Experimente zur Hochtemperatur-Supraleitung schränken die möglichen Erklärungen weiter ein.

Seit der Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung (HTSL) gehen die meisten theoretischen Arbeiten davon aus, dass der Paarungsmechanismus unkonventionell, d. h. elektronischer Natur ist. Es gibt aber auch immer noch Vorschläge, dass die Paarung wie in den „Niedrigtemperatur“-Supraleitern durch Gitterschwingungen, d. h. durch die Ankopplung der Elektronen an die Phononen bewirkt wird. Neue Arbeiten zur inelastischen Neutronenstreuung der Gruppe um Bernhard Keimer [1] zeigen jedoch sehr deutlich, dass die magnetische Austausch-Wechselwirkung und die mit ihr verknüpften magnetischen Anregungen in den Kupfer-Sauerstoffebenen der Kuprate als Schlüssel für den Paarungsmechanismus anzusehen sind. In Kombination mit