

# Gletscherschwund am KILIMANDSCHARO

Ernest Hemingway machte ihn einst berühmt: den Schnee auf dem Kilimandscharo. Inzwischen wird die schrumpfende Eiskappe des Tropenvulkans gern als Kronzeuge für den Klimawandel bemüht. Zu Unrecht, wie eine sorgfältige Analyse offenbart.

Von Georg Kaser und Philip W. Mote

## In Kürze

- ▶ Wie die **meisten Gletscher** weltweit schrumpfen auch die Eisfelder auf dem Kilimandscharo in Tansania. Der prominente Berg wird deshalb gern als Beweis für den Klimawandel herangezogen – so auch in dem Film »Eine unbequeme Wahrheit«.
- ▶ **Am Gipfel** des Tropenvulkans herrschen jedoch ganz andere Bedingungen als in den Gletscherzonen der mittleren und hohen Breiten. So gibt es keine thermischen Jahreszeiten, und die Temperaturen liegen fast stets deutlich unter dem Gefrierpunkt.
- ▶ Eine **Erwärmung** der unteren Luftschichten durch den menschengemachten Treibhauseffekt, die andere Gletscher schmelzen lässt, kann das Schrumpfen der Eiskappe des Kilimandscharo deshalb nicht erklären. Es beruht auf einem komplexen Zusammenspiel anderer Faktoren.

Schrumpfende Gletscher gelten als sichtbare Zeichen der globalen Erwärmung. Durch den Klimawandel ändert sich zwar auch die Vegetation, doch macht sich das im Landschaftsbild nur schleichend bemerkbar. Dagegen erscheint eine große Eiszunge, die auf einen Bruchteil ihrer früheren Ausdehnung geschrumpft ist, als sinnfälliger und unbezweifelbarer Beweis für steigende Temperaturen. Der Film »Eine unbequeme Wahrheit« präsentiert denn auch auf-rüttelnde Vorher-Nachher-Fotos von schwindenden Gletschern rund um den Erdball.

Zweifellos stimmt, dass eine Verbindung zwischen Gletscherschwund und Klimawandel besteht. Doch sind die physikalischen Hintergründe komplizierter als allgemein angenommen. Nicht immer trägt die Erderwärmung die Hauptschuld an der Schmelze.

Ein eklatantes Beispiel bietet das Kilimandscharo-Massiv in Afrika, das nur drei Breitengrade südlich des Äquators liegt. Das Schrumpfen seiner Eiskappe hat so gut wie nichts mit steigenden Temperaturen zu tun. In geringem Maße gilt das auch für andere Tropengletscher.

Die schwindende weiße Haube des »leuchtenden Berges«, der in dem Film von Al Gore eine so prominente Rolle spielt, eignet sich also keineswegs als Aushängeschild für die Folgen der globalen Erwärmung. Der wahre Grund ist weniger plakativ, aber nicht minder interessant. Das ergaben ausgiebige Feldstudien an tropischen Gletschern in den

letzten zwanzig Jahren. Demnach hat der Kilimandscharo, dessen Vulkankegel Kibo weit in die kalte mittlere Troposphäre hineinragt, durch Prozesse, die nur indirekt, sofern überhaupt, mit jüngsten Veränderungen des weltweiten Klimas zu tun haben, Eis verloren.

Auch wenn das Schrumpfen seiner Gletscherhaube nicht direkt mit der Erderwärmung zusammenhängt, bedeutet das freilich nicht, dass es diese nicht gibt. Die überwältigenden Belege dafür hat der UN-Klimarat (IPCC) in seinem jüngsten Bericht dargelegt.

## Eis in den Tropen

Dass in den Tropen überhaupt Gletscher existieren, ist erklärungsbedürftig. Es liegt daran, dass die Lufttemperatur pro tausend Höhenmeter um etwa 6,5 Grad Celsius abnimmt. Am Gipfel eines 5000 Meter hohen Berges ist es also durchschnittlich 32,5 Grad kälter als auf Meereshöhe. So herrschen sogar in Äquatornähe in diesen Regionen im allgemeinen Temperaturen unter dem Gefrierpunkt, die im Jahresverlauf kaum schwanken. Während der Niederschlagszeiten sammelt sich auf den höchsten Bergen deshalb Schnee an und verwandelt sich in Firn und Gletschereis. Das geschieht in Ostafrika am Kilimandscharo, am Mount Kenia und im Rwenzori-Gebirge, in Indonesien auf dem Irian Jaya und insbesondere in den Anden Südamerikas, wo sich 99,7 Prozent des tropischen Gletschereises befinden.

Für das Wachsen oder Schwinden eines Gletschers ist seine Massenbilanz entscheidend. Diese entsteht durch eine Art Tauziehen zwischen Akkumulation und Ablation,



1928



2000



1912

EDUARD ÖHLER



2006

GEORG KASER

Weltweit sind Gletscher in den letzten Jahrzehnten geschrumpft. So hat der South Cascade Glacier (oben) im US-Bundesstaat Washington zwischen 1928 und 2000, als die beiden Fotos entstanden, die Hälfte seiner Masse verloren. Bei ihm und anderen Gletschern in den gemäßigten Breiten spricht vieles dafür, dass der Rückgang von der globalen Erwärmung verursacht wird. Auch die Eiskappe des Kilimandscharo im tropischen Ostafrika (unten) ist seit dem Anfang des 20. Jahrhunderts

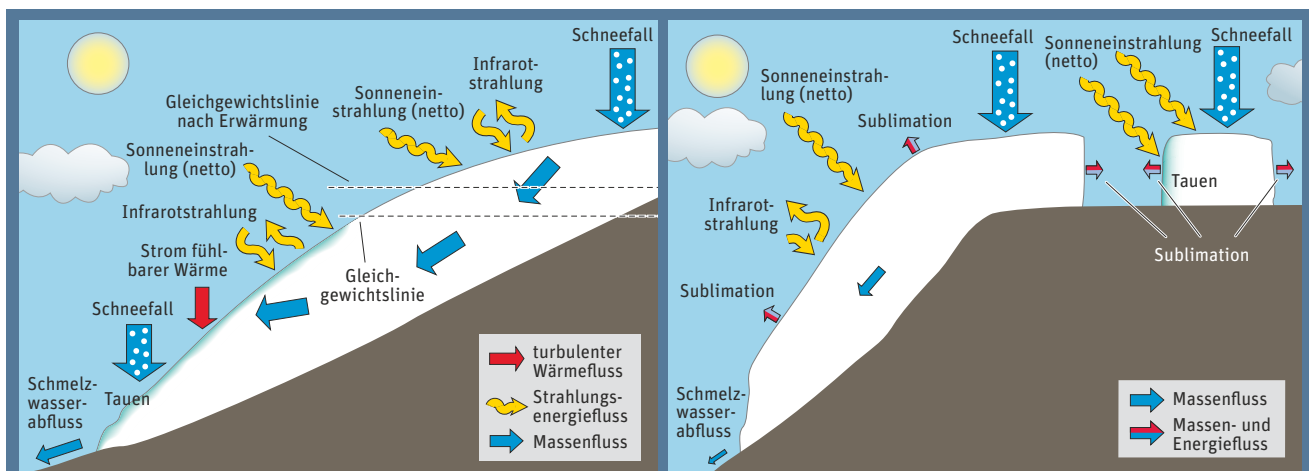
erheblich kleiner geworden. Hier trägt der vom Menschen verursachte Treibhauseffekt aber keine Schuld. Hauptverantwortlich für das Schrumpfen ist die Sonnenstrahlung, nicht warme Luft. Da in der trockenen Kälte am Gipfel das Eis hauptsächlich sublimiert, aber kaum schmilzt, fließt auch, im Gegensatz zum South-Cascade-Gletscher, kaum Schmelzwasser ab. Das Foto von 2006 zeigt den Berg nach einem Neuschneefall, lässt die Gletscherreste aber dennoch gut erkennen.

also Eintrag und Verlust von Wasser in festem, flüssigem oder gasförmigem Zustand. Wegen der Variabilität dieser Vorgänge und auf Grund seiner eigenen dynamischen Trägheit kommt ein Gletscher niemals völlig ins Gleichgewicht; vielmehr schlägt das Pendel stets in die eine oder andere Richtung aus.

Auffälligstes und am besten dokumentiertes Zeichen einer geänderten Massenbilanz ist gewöhnlich eine Zu- oder Abnahme der Zungenlänge, die mit einiger Verzögerung auftritt. So hat sich der Muir-Gletscher in Alaska innerhalb der letzten fünf Jahrzehnte um gut zwei Kilometer verkürzt, der Jakobshavn Isbrae auf Grönland sogar um über

zehn Kilometer seit 2001 (siehe S. 14). Nach einer klimatischen Störung kann es Jahrzehnte dauern, bis sich die Massenbilanz eines Gletschers wieder einem Gleichgewicht nähert.

Nachschub an Masse liefern Niederschläge in Form von Schnee sowie manchmal, unter sehr feuchten und windigen Bedingungen, auch Raureif. Zum Verlust von Masse führt vor allem der Abfluss von Schmelzwasser. Unter trockenen Bedingungen kommt die Sublimation hinzu, also die direkte Umwandlung von Eis in Wasserdampf, die noch bei Temperaturen weit unter dem Gefrierpunkt stattfinden kann, aber etwa achtmal so viel Energie wie das Tauen erfordert.



Die Hauptposten in der Massenbilanz eines typischen Gletschers der mittleren Breiten (hier im Sommer) sind Schneezufuhr und Schmelzwasserabfluss. Substanzgewinn und -verlust halten sich an der so genannten Gleichgewichtslinie die Waage; darüber dominiert die Akkumulation, darunter die Ablation. Unterhalb dieser Linie führt der Energiefluss aus der warmen Luft zu einem Wärmeüberschuss. Dieser nimmt bei steigender Lufttemperatur zu. Dadurch verschiebt sich die Gleichgewichtslinie nach oben, was zu verstärktem Abtauen und damit zum Schrumpfen des Gletschers führt.

Am Kilimandscharo gibt es Eistafeln mit vorwiegend vertikalen Rändern auf dem 5700 Meter hohen, flachen Gipfel sowie mehrere Hanggletscher. In dieser trockenkalten tropischen Klimazone, in der die Temperatur stärker zwischen Tag und Nacht als mit den Jahreszeiten schwankt, bestimmen andere Faktoren die Massenbilanz von Gletschern als in mittleren Breiten. In der großen Höhe herrscht selbst am Äquator praktisch immer Frost und die Hauptenergiequelle ist das Sonnenlicht. Die Abgabe von Infrarotstrahlung übersteigt deren Aufnahme deutlich. Den größten Masseverlust verursacht die Sublimation. Der Schmelzwasserabfluss ist dagegen minimal.

**Schwankungen in der Ausdehnung von Tropengletschern hängen primär mit der Luftfeuchtigkeit zusammen**

Schmelzen, Sublimation und Erwärmung des Eises erfordern Energie. Diese stammt aus einer Reihe von Quellen, die auf komplexe Weise interagieren. Die wichtigste ist die Sonne, deren direkter Einfluss jedoch auf den Tag beschränkt bleibt und durch Schattenwurf sowie die Lichtreflexion durch den Schnee begrenzt ist. Außerdem tauscht der Gletscher sogenannte fühlbare Wärme sowie Infrarotstrahlung mit der Atmosphäre und der umgebenden Landoberfläche aus. Dabei kann er auch Energie verlieren – etwa in Form der »latenten« Wärme, die zum Tauen oder Sublimieren des Eises benötigt wird.

**Prekäres Gleichgewicht**

Normale Gebirgsgletscher akkumulieren Schnee in großen Höhen, fließen bergab und schmelzen während der warmen Jahreszeit in tieferen Lagen. Im oberen Bereich übertrifft die Akkumulation die Ablation, weiter unter gilt das Umgekehrte. Die Grenze zwischen dem Nähr- und dem Zehrgebiet legt die Höhe der Gleichgewichtslinie eines Gletschers fest, an der die Massenbilanz ausgeglichen ist.

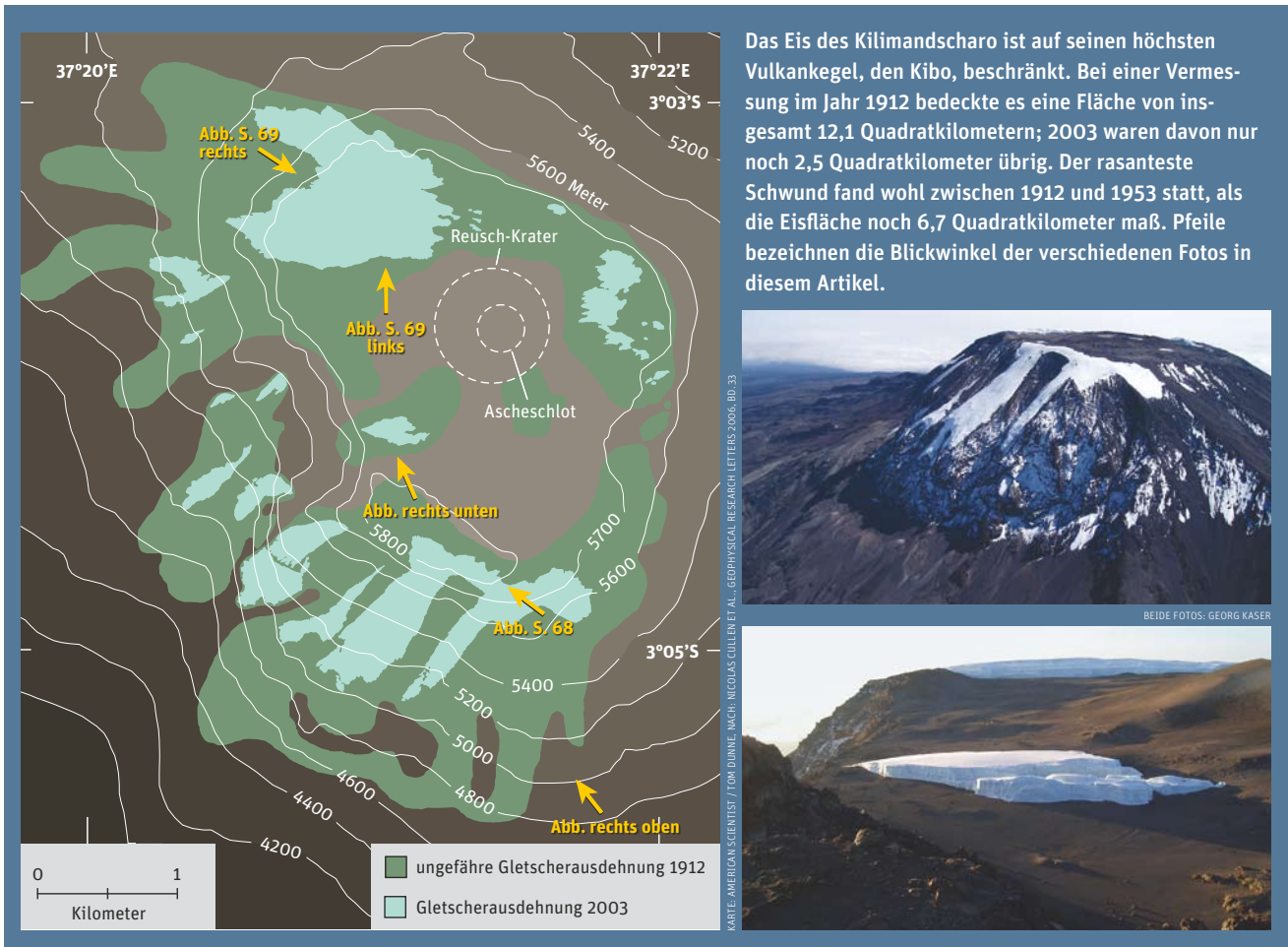
Bei steigenden Lufttemperaturen nimmt der Wärmeübergang von der Luft auf das Eis zu – desgleichen die Infrarotstrahlung aus der Atmosphäre. Infolgedessen beschleunigt sich das Schmelzen, und die Gleichgewichtslinie verschiebt sich nach oben. Dadurch vergrößert sich der Bereich, in dem das Eis taut.

Für tropische Gletscher gelten etwas andere Bedingungen. Dort sind die Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht größer als zwischen dem kältesten und dem wärmsten Monat. Die bedeutsamste jahreszeitliche Veränderung in den Tropen besteht im Auftreten von ein oder zwei Regenzeiten. Dann erhalten die hohen Bereiche der Gletscher Nahrung.

Auf tropischen Eisflächen variieren die Bedingungen, die zum Abtauen führen, somit nicht saisonal, sondern treten fast täglich auf. Das hat zur Folge, dass die Gleichgewichtslinie kaum im Jahresverlauf schwankt und ein viel kleinerer Teil des Eises unterhalb dieser Linie liegt als in mittleren Breiten. Zugleich reagieren die Eiszungen tendenziell rascher auf Veränderungen im Massenhaushalt.

Wichtig für das Verhalten tropischer Gletscher ist, ob sie einem vorwiegend feuchten oder trockenem Klima ausgesetzt sind. In humiden Klimazonen und während der Feuchtzeiten beeinflusst eine Temperaturänderung die Massenbilanz merklich. Unter vorwiegend trockenen Bedingungen halten sich Gletscher dagegen nur in sehr großer Höhe, wo es entsprechend kalt ist. Wenn ihre Ausdehnung schwankt, dann hauptsächlich wegen einer Änderung der Luftfeuchtigkeit. Auf diese wirkt sich der steigende Gehalt der Atmosphäre an Treibhausgasen allerdings nur indirekt aus.

Längerfristige Änderungen bei der saisonalen Verteilung der Luftfeuchtigkeit hängen in



erster Linie von der Oberflächentemperatur der tropischen Ozeane ab – und vom globalen Klima nur insoweit, als es diese Temperatur beeinflusst. Bei vielen tropischen Gletschern ist daher weniger die globale Erwärmung selbst als deren indirekter und ferngesteuerter Einfluss auf die Luftfeuchtigkeit für den beobachteten Substanzverlust verantwortlich. Allerdings lässt sich ohne genaue Beobachtungen und Messungen nur schwer zwischen den zwei Ursachen unterscheiden.

### Unbewegliches Plateaueis

Wie verhält es sich nun mit dem Kilimandscharo? Seine Eisbedeckung nimmt auch unter den Tropengletschern noch einmal eine Sonderstellung ein. Sie besteht aus den bis zu vierzig Meter dicken Resten einer Eistafel auf dem relativ flachen Gipfelplateau des Vulkankegels Kibo in 5700 bis 5800 Meter Höhe sowie aus einer Reihe von Hanggletschern. Diese erstrecken sich vom Plateaurand bis etwa 5200 Meter Höhe hinab, einer in einer schattigen Rinne sogar bis 4800 Meter.

Das Plateaueis liegt unbeweglich an Ort und Stelle; denn es ist zu dünn, um wie ein Kuchenteig unter dem Eigengewicht ausei-

nerzulaufen. Daher und wegen des fast ebenen Untergrunds ist seine Oberfläche annähernd horizontal. Die Ränder bilden fast senkrechte Wände.

Auch die Hanggletscher bewegen sich trotz der durchschnittlich 35 Grad steilen Flanken des Vulkankegels wenig im Vergleich zu ihren Gegenstücken in gemäßigten Breiten. Das deutet auf kalte Eistemperaturen hin.

Was verursacht nun den Schwund des Kilimandscharo-Eises? Bei anderen Gletschern weltweit lässt sich der Rückgang hauptsächlich auf steigende Lufttemperaturen und das dadurch verstärkte Tauen zurückführen. Das zeigen Korrelationen zwischen der Längenänderung von Eiszungen und Temperaturkurven sowie vereinzelte detaillierte Untersuchungen der Massenbilanz. In einem Fachartikel aus dem Jahr 2000 brachten Lonnie G. Thompson von der Ohio State University in Columbus und Kollegen auch das Schwinden der Eiskappe des Kilimandscharo mit dem globalen Temperaturanstieg in Verbindung. Allerdings konnte das nicht bestätigt werden.

Als alternative Ursachen des Gletscherrückzugs kommen eine geringere Akkumulation von Schnee, starke Sublimation und intensive



ILLUSTRATION: DAVE SCHNEIDER UND STEPHANIE FRIESE

Sonnenstrahlung in Frage – alle drei verursacht durch niedrige Luftfeuchtigkeit. Das vermuteten Forscher vielfach schon im 19. und frühen 20. Jahrhundert. Gestützt wird diese Annahme nun durch Geländeuntersuchungen und Modellsimulationen, die einer von uns (Kaser) mit seiner Arbeitsgruppe an der Universität Innsbruck, Douglas R. Hardy vom Climate System Research Center der Universität von Massachusetts in Amherst sowie Tharsis Hyera und Juliana Adosi vom Tansanischen Wetterdienst durchgeführt haben.

### Rückgang der Eisfläche um fast neunzig Prozent

Hardy lud Kaser 2001 dazu ein, an einem Dokumentarfilm zweier Fernsehjournalisten über den Eisrückgang am Kilimandscharo mitzuwirken. Seit 18 Monaten sammelten seine Instrumente auf dem Gipfelplateau des Kibo damals schon Wetterdaten. Kaser hatte fast eineinhalb Jahrzehnte lang tropische Gletscher erforscht. Die Gruppe kampierte direkt unter einem der eindrucksvollen Eiskliffs am Südrand des Nördlichen Eisfelds. Fünf volle Tage und Nächte lang beobachteten die Forscher das Plateaueis und diskutierten, angeregt von den hartnäckigen Fragen der beiden Journalisten, die Gründe für seinen Rückgang. Mit dem Skistock zeichneten sie Diagramme in die Vulkanasche, während das Bild vom Gletscherregime auf dem Kibo immer klarere Formen annahm. Darin spielen die lokale Lufttemperatur und ihre Änderung nur eine untergeordnete Rolle.

Beobachtungen am Kilimandscharo zwischen etwa 1880 und 2003 liefern Daten zum Flächenverlust des Eises am Kibo. Der Afrikaforscher Hans Meyer und der Bergsteiger Ludwig Purtscheller erreichten 1889 als Erste den Gipfel. Auf der Basis ihrer Beobachtungen und Skizzen, hauptsächlich aber anhand von Moränen, die in Luftbildern erkennbar sind, rekonstruierte Henry Osmaston 1989 für die Zeit um 1880 eine Eisfläche von 20 Quadratkilometern. Drei Jahrzehnte später war sie schon deutlich auf 12,1 Quadratkilometer zurückgegangen. Das zeigt eine genaue Karte im Maßstab 1:50000, die sich auf eine von Eduard Öhler und Fritz Klute 1912 durchgeführte fotogrammetrische Geländeaufnahme stützt. 2003 waren schließlich nur noch 2,5 Quadratkilometer übrig – ein Schwund von fast 90 Prozent in 123 Jahren.

Ein großer Teil dieser Schrumpfung fand jedoch schon vor 1953 statt, als sich die Hanggletscher stark verkleinert hatten und die Gesamtgletscherfläche nur noch 6,7 Quadratkilometer betrug; das sind 66 Prozent weniger als 1880. Während der gesamten Zeit

war die Flächenabnahme der Plateaugletscher konstant – bis heute.

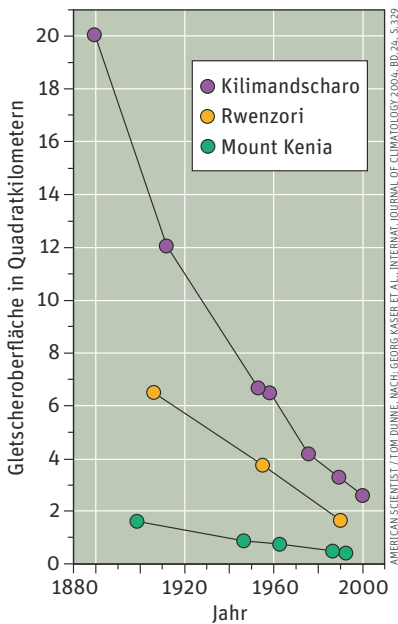
Dieser Verlauf des Rückzugs stimmt nicht mit dem Gang der globalen Mitteltemperatur überein, die nach einer Phase der Stagnation seit den 1970er Jahren steil anstieg. Weltweit verhielten sich die meisten Gletscher dazu konform. Viele hatten nach einer Schrumpfung Anfang bis Mitte des 20. Jahrhunderts in den 1970er Jahren ein Gleichgewicht erreicht oder waren sogar vorgerückt, bevor ein rasanter Rückgang einsetzte.

Der Temperaturverlauf am Gipfel des Kilimandscharo ist zwar wegen der geringen Zahl verwertbarer Messungen schwierig zu beurteilen, doch ergibt sich aus den Daten, die der jüngste Bericht des UN-Klimarats enthält, nur eine geringe lokale Erwärmung. Zwar ist demnach im ostafrikanischen Hochland, das wesentlich tiefer als der Kibo liegt, die mittlere Lufttemperatur zwischen 1901 und 2005 um 0,5 bis 0,8 Grad Celsius gestiegen. Die nicht direkt von der Erdoberfläche beeinflusste »freie Troposphäre«, in die der Berg hineinragt, hat sich im Bereich zwischen dem 20. Breitengrad Nord und Süd von 1979 bis 2004 aber um nicht einmal 0,1 Grad pro Jahrzehnt erwärmt. Das ist statistisch nicht von null unterscheidbar.

Eine schon etwas ältere Auswertung von Temperaturmessungen durch Wetterballons im Luftdruckbereich von 500 Millibar – also in rund 5500 Meter Höhe – ergab für die Tropen von 1950 bis 1979 eine Erwärmungsphase, gefolgt von einer Abkühlung zwischen 1979 und 1997. Aus den letzten zehn Jahren fehlen leider Informationen.

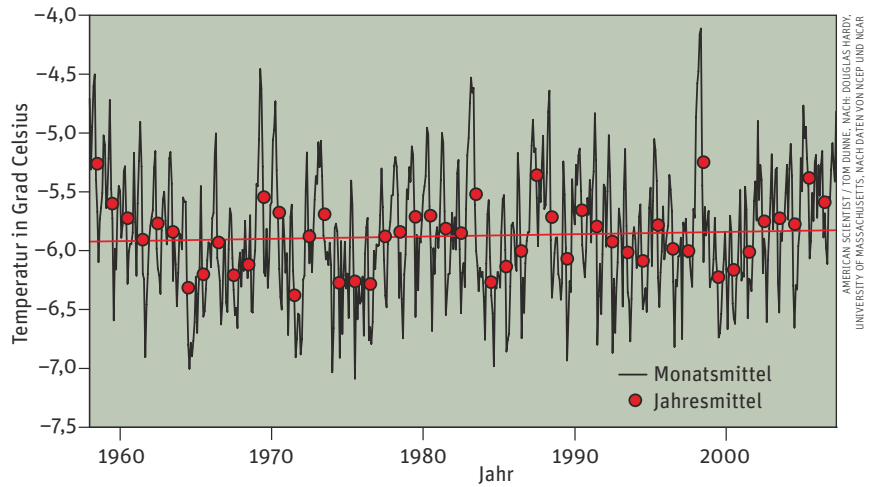
Die verfügbaren Durchschnittstemperaturwerte für die Tropen beruhen teilweise auf einer so genannten Reanalyse. Dabei werden alle vorliegenden Messdaten in ein weltumspannendes dynamisches Computermodell eingegeben. Dieses berechnet daraus Temperaturen, Windverhältnisse und andere atmosphärische Größen auch für Gebiete, wo keine direkten Messungen vorliegen. Am Reanalyse-Punkt, der dem Gipfel des Kilimandscharo am nächsten liegt, scheint es seit Ende der 1950er Jahre keinerlei Veränderungen gegeben zu haben.

Zwar ist jede dieser Abschätzungen mit Unsicherheiten behaftet und möglicherweise zu grob, um den Trend am Kilimandscharo richtig zu erfassen. Zusammengenommen deuten die verschiedenartigen Rekonstruktionen aber schon darauf hin, dass die Erwärmung am Gipfel des Kilimandscharo, sofern sie überhaupt stattfand, nicht ausreichte, um den Schwund eines Großteils seiner Eiskappe zu erklären – weder über das gesamte 20.



**Alle größeren Gletscher im tropischen Ostafrika schrumpfen – allerdings nicht parallel zur globalen Erwärmung wie viele andere Gletscher, die jetzt rasch zurückgehen, während sie sich um die 1970er Jahre im Gleichgewicht oder sogar auf dem Vorstoß befanden. Der Eischwund am Kilimandscharo dürfte in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts am größten gewesen sein.**

Für die Gipfelregion des Kilimandscharo liegen kaum Temperaturdaten vor. Inzwischen gibt es jedoch eine Serie von Wetterballonmessungen in Gipfelhöhe. Sie wurden durch eine so genannte »Reanalyse« erweitert, wobei ein globales dynamisches Atmosphärenmodell auch für Gebiete ohne Beobachtungsdaten stimmige Werte liefert. Demnach schwankten die mittleren Monatstemperaturen auf dem Gipfel des Kilimandscharo seit 1958 zwischen  $-4$  und  $-7$  Grad Celsius; eine Gerade durch die Punkte lässt keinen statistisch bedeutsamen Erwärmungstrend erkennen.



Jahrhundert hinweg noch innerhalb der letzten 25 Jahre, dem am besten durch Messwerte dokumentierten Zeitraum.

Von Bedeutung ist außerdem die Beobachtung, dass die am Gipfelplateau des Kilimandscharo seit mehr als sieben Jahren gemessenen Lufttemperaturen selten  $-3$  Grad übersteigen und somit fast immer deutlich im Frostbereich liegen. Deshalb kann die Luft das Eis nicht bis zum Schmelzpunkt erwärmen, weder durch Wärmeabgabe noch durch Infrarotstrahlung. Wenn es gelegentlich taut, ist Sonnenschein bei sehr schwachem Wind dafür verantwortlich. Dann bildet sich, auch in kalter Umgebung, direkt über dem Eis eine warme Luftschicht.

### Imposante senkrechte Eiswände

Eine weitere wichtige Besonderheit des Kilimandscharo betrifft die Form und Entwicklung der Eisdecke. Beeindruckende senkrechte Wände türmen sich am Kibo-Gipfel teils mehr als vierzig Meter hoch auf. Weil sich an diesen Abbrüchen keine Schneedecke ansammeln kann, haben die Eistafeln auch bei starkem Niederschlag keine Möglichkeit, sich horizontal auszudehnen. Stattdessen weichen die Wände durch Sublimation ständig zurück – phasenweise, bei Sonnenschein und Windstille, auch durch Tauen. Haben sich die fast vertikalen Kanten einmal gebildet, können sie sich also nur noch zurückziehen, bis das Eis verschwunden ist.

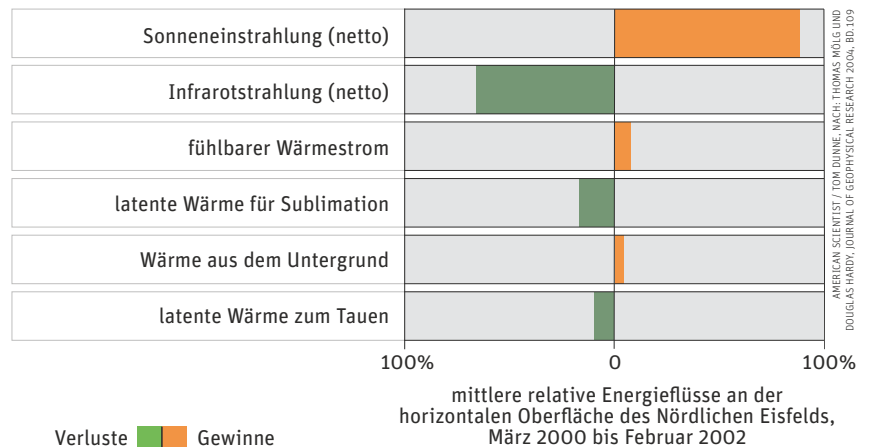
Bei genauer Beobachtung fällt auf, dass diese Wände überwiegend in Ost-West-Richtung orientiert sind. Das spricht für einen Zusammenhang mit der Sonneneinstrahlung, deren Einfallsrichtung und Intensität sich im Jahresverlauf ändert. Um die Zeit der Tag-und-Nacht-Gleichen, wenn die Sonne senkrecht über dem Äquator steht, ist der Himmel meist den ganzen Tag bedeckt. In unserem Sommer und Winter herrscht in Ostafrika dagegen in der Regel Trockenzeit mit wenig Bewölkung.

Dann aber steht die Sonne ein gutes Stück nördlich oder südlich des Äquators und damit des Kilimandscharo, sodass sie die nach Süden und Norden schauenden Eiswände bescheint. Dieser Zusammenhang dürfte auch bei der Entstehung der Eiswände Regie geführt haben.

Die Rolle des Sonnenlichts bei ihrem Rückzug zeigt sich in einer weiteren Eigenheit. Wenn eine Eistafel horizontal zurückweicht, hinterlässt sie manchmal wie ein Sägeblatt aufragende Kämme, die schließlich so schmal werden, dass sie umkippen und zerfallen. Immer wieder treten auch so genannte Penitentes (»Büßer«) auf. Diese spitzen Säulen entstehen, wenn sich auf der zunächst ebenen Schneefläche in kleinen Vertiefungen dunkler Staub ansammelt. Weil dieser die Sonnenstrahlung besonders stark absorbiert, beschleunigt sich an den betreffenden Stellen der Tautvorgang. In den Vertiefungen zwischen den Penitentes kann sich die Wärme zudem besser halten, weil sie vor dem Wind geschützt sind, der die oberen Enden der sich entwickelnden Spitzen kühlt.

Wo Infrarotstrahlung und fühlbare Wärme aus wärmerer Umgebungsluft dominieren, glätten sie die Oberfläche des Eises, weil sie gleichmäßig von allen Seiten einwirken. Wä-

Mit Instrumenten wurden die Energieflüsse zu und von der Oberfläche des Kibo-Gipfelgletschers aufgezeichnet. Den größten Beitrag leisten Strahlungsflüsse. Die Infrarotstrahlung hat eine deutlich negative Bilanz, weil sie durch die Temperatur bestimmt wird und die Atmosphäre viel kälter ist als die Gletscheroberfläche. Den drittgrößten Fluss bildet die latente Wärme, die bei der Sublimation abgeführt wird. Die Schmelzwärme ist weniger als halb so groß. Außerdem sickert das Schmelzwasser in tiefere Eisschichten und gefriert dort wieder. Andere Energieflüsse haben kaum Bedeutung.



Fingerförmige »Penitentes« (»Büßer«) sind ein auffälliges Merkmal der Schnee- und Eisdecke des Kibo. Sie sprechen dagegen, dass die globale Erwärmung den Gletscherschwund am Kilimandscharo verursacht. Sonnenstrahlung und Sublimation neigen dazu, solche Formen zu schaffen; Infrarotstrahlung und fühlbare Wärme aus der Atmosphäre würden sie hingegen glätten. Der Wissenschaftler auf dem Eis ist Nicolas Cullen von der Universität Otago (Neuseeland).

FOTOS DIESER REIHE: GEORG KASER



ren sie am Kibo die bestimmenden Faktoren, blieben die Eiswände und Penitentes nicht lange erhalten oder entstünden erst gar nicht.

Wie steht es mit der Massenbilanz an den horizontalen Oberflächen und damit der Dicke der Plateaugletscher auf dem Kilimandscharo? Offenbar wird sie primär vom Schneefall bestimmt. Das ergaben genaue Untersuchungen der Massen- und Energieströme. Hardy hat die jährliche Ablagerung und den Abtrag von Schnee auf der Oberfläche des nördlichen Eisfelds seit 2000 mit ins Eis eingebohrten Stangen gemessen. Demnach war die Massenbilanz dort in zwei Jahren praktisch ausgeglichen und 2006 sogar positiv. Anomalien der Oberflächentemperatur des Indischen Ozeans hatten gegen Ende 2006 und Anfang 2007 für außergewöhnlich viele und ergiebige Regenfälle über Ostafrika gesorgt. Monatelang lag dann ein großer Teil der Gipfelregion des Berges unter einem weißen Laken.

## Bedeutung von Neuschnee

Nur Schneefall auf die horizontale Oberfläche kann dem Plateaueis Masse zuführen. Er greift aber auch in die Energiebilanz ein – und zwar vor allem durch seine Häufigkeit. Neuschnee wirft wegen seines hohen Reflexionsvermögens nämlich einen großen Teil der Solarstrahlung, die am Kilimandscharo ja die Hauptenergiequelle ist, ungenutzt in das Weltall zurück. Die Oberfläche von gealtertem oder verschmutztem Schnee ist dunkler und absorbiert deutlich mehr Sonnenlicht. Das fördert die Sublimation, erhöht aber auch die Möglichkeit zum Schmelzen bei Windstille. Allerdings gefriert eventuelles Schmelzwasser großenteils wieder, wenn es in tiefere Eisschichten sickert. Insgesamt geht dadurch nicht unbedingt Masse verloren. Diese Prozesse dominieren auch den Massenhaushalt der Hanggletscher und in der Tat tritt aus deren Zunge sowie am Fuß der Eiswände selten mehr als ein dünnes Rinnsal von Schmelzwasser aus.

Ein Vergleich mit historischen Fotografien zeigt, dass das Plateaueis des Kibo im Verlauf des 20. Jahrhunderts höchstens zehn Meter dünner geworden ist. Dieser Massenverlust lässt sich mit einer zu geringen Schneezufuhr erklären. Das beobachtete Schrumpfen der Flächenausdehnung des Plateauaises hat dagegen praktisch ausschließlich an den vertikalen Rändern stattgefunden und beruht, wie oben erklärt, nicht auf geänderten Niederschlags- oder Temperaturbedingungen.

Aber auch bei den Hanggletschern unterscheidet sich die Massenbilanz von derjenigen anderer Gebirgsgletscher. Letztere verlieren in der Regel die meiste Substanz auf den Zungen und wenig oder gar keine darüber. Die Hanggletscher des Kibo schrumpfen dagegen sowohl von oben als auch von unten. Ihre Geschichte lässt vermuten, dass sie schon um 1900 viel zu trocken und weit von einem Gleichgewicht entfernt waren. Derzeit scheint sich ihr Rückgang allerdings zu verlangsamen. Dies und die gewölbte Form der Gletscher deuten an, dass sie in einem kleineren Eisvolumen endlich ein Gleichgewicht mit der trockenen Umgebung finden könnten.

Verantwortlich für den seit 123 Jahren zu beobachtenden Gletscherschwund auf dem Kilimandscharo ist also nicht eine stetige Erwärmung der Atmosphäre, sondern eine anhaltende Trockenheit. Die Hanggletscher scheinen in dieser Situation jetzt nach vielen Jahrzehnten ein Gleichgewicht zu finden, die Plateaugletscher mit den vertikalen Wänden können das allerdings nicht.

Die Prozesse, die den Eisverlust auf dem Kilimandscharo verursachen, sind weitgehend unabhängig von der Temperatur und somit von der globalen Erwärmung. Sollten die Lufttemperaturen allerdings irgendwann über den Gefrierpunkt steigen, gewinnen der Zustrom fühlbarer Wärme und die langwellige Ausstrahlung aus der Atmosphäre gegenüber dem Sonnenlicht und der Sublimation die

## Literatur

Kilimanjaro Glaciers: Recent areal extent from satellite data and new interpretation of observed 20th century retreat rates. Von N. J. Cullen et al. in: *Geophysical Research Letters*, Bd. 33, L16502, 2006

Extracting a climate signal from 169 glacier records. Von J. Oerlemans in: *Science*, Bd. 308, S. 675, 29. 4. 2005

Modern glacier retreat on Kilimanjaro as evidence of climate change: observations and facts. Von G. Kaser et al. in: *International Journal of Climatology*, Bd. 24, S. 329, 2004

Ablation and associated energy balance of a horizontal glacier surface on Kilimanjaro. Von T. Mölg und D. R. Hardy in: *Journal of Geophysical Research*, Bd. 109, D16104, 2004

Solar-radiation-maintained glacier recession on Kilimanjaro drawn from combined ice-radiation geometry modeling. Von T. Mölg et al. in: *Journal of Geophysical Research*, Bd. 108(D23), S. 4731, 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter [www.spektrum.de/artikel/912780](http://www.spektrum.de/artikel/912780)



Oberhand. Dann würden alle scharfkantigen Formen wie die vertikalen Ränder des Plateueises bald abgerundet. Die Eiswände existierten laut Bericht der Erstbesteiger aber schon 1889. Damals war die bis heute andauernde und nicht mehr aufzuhaltende Schrumpfung des Plateueises also bereits vorprogrammiert.

### Rettung durch die Erderwärmung?

Seespiegelstände des nahe gelegenen Victoria-sees und andere Indikatoren weisen darauf hin, dass die Niederschläge in Ostafrika nach einigen ziemlich regenreichen Jahrzehnten gegen Ende des 19. Jahrhunderts stark zurückgingen. Demnach war der große Eiskörper am Kilimandscharo, den die Forscher damals beschrieben, sehr wahrscheinlich mehr das Produkt einer ungewöhnlich feuchten und damit schneereichen Periode als eines kühleren Klimas. Mit dem Einsetzen von trockeneren Bedingungen, die bis heute anhalten, begann die Entwicklung der steilen Eiswände – und damit der kontinuierliche Rückzug der Plateaugletscher. Wenn überhaupt, hat eine lokale Erwärmung der Atmosphäre erst sehr spät und in einem in den Schrumpfraten nicht erkennbaren Maß dazu beigetragen.

Das schließt einen indirekten Zusammenhang zwischen dem Massenverlust der Gletscher am Kibo und der globalen Erwärmung allerdings nicht prinzipiell aus. Es gibt für die letzten 200 Jahre deutliche Hinweise auf eine Korrelation zwischen der Oberflächentemperatur des Indischen Ozeans und den atmosphärischen Zirkulations- und Niederschlagsmustern über Ostafrika, die das Eis auf dem Kilimandscharo entweder aufbauen oder aushungern.

Diese Muster haben sich freilich das letzte Mal schon Ende des 19. Jahrhunderts umgestellt – von üppig auf karg. Der massive Ausstoß von Treibhausgasen durch den Menschen begann erst später und kommt als Ursache der Umstellung deshalb nicht in Frage. Er kann

das veränderte Zirkulationsmuster erst in den letzten Jahrzehnten beeinflusst und somit höchstens teilweise zum jüngsten Eisrückgang am Kibo und nur minimal zum gesamten Schwund beigetragen haben.

Ist die weiße Haube des Kilimandscharo dem Untergang geweiht? Sehr wahrscheinlich ja. Auch eine mäßige Zunahme des Niederschlags brächte keine Abhilfe. Auf dem Eis kann sich Neuschnee zwar über Monate oder Jahre hinweg ansammeln, auf dem umliegenden felsigen Plateau aber sublimiert oder schmilzt er in der Regel innerhalb weniger Tage (mit der erwähnten Ausnahme Ende 2006/Anfang 2007). Das Sonnenlicht durchdringt die dünne Schneedecke, erwärmt den Boden darunter und schmilzt den Schnee. Kommt dann an exponierten Stellen der dunkle Fels zum Vorschein zehrt ein sich selbst verstärkender Prozess schnell die gesamte Schneedecke auf.

Rettung könnte paradoxerweise vielleicht sogar die globale Erwärmung bringen. Sollten die Lufttemperaturen am Kilimandscharo zeitweise über den Gefrierpunkt steigen, würden fühlbare Wärme und Infrarotstrahlung aus der Atmosphäre die Eiskanten glätten und aus den Steilwänden schräge Hänge machen. Nähme zugleich die Niederschlagsmenge zu, könnte Schnee, der sich dort anhäuft, dem Plateaugletscher zum seitlichen Wachstum verhelfen.

Auch denkbar und realistischer ist ein anderes Szenarium: Die dunkle Ascheoberfläche des Kilimandscharo wird durch außergewöhnlich starken Schneefall, wie er Ende 2006/Anfang 2007 auftrat, so dick zugedeckt, dass bis zur nächsten feuchten Jahreszeit eine geschlossene Schneedecke bestehen bleibt. Darauf könnte sich jeder weitere Schneefall gut halten. Dann bestünde plötzlich die Chance für den Aufbau einer neuen, großflächigen Eisschicht. Ein solches »Wunder« geschähe, wie uns die Glaziologie lehrt, weder zum ersten noch zum letzten Mal. ◀

**Bis zu 40 Meter hohe Eiswände erheben sich am Gipfel des Kilimandscharo. Im Vergleich dazu erscheint der Wissenschaftler, der vor dem Südrand des Nördlichen Eisfelds gerade Instrumente abliest, als Zwerg (links). Die zurückweichenden Eiswände hinterlassen oft schmale, isolierte Kämme (rechts), die schließlich so dünn werden, dass sie umkippen.**



**Georg Kaser** (rechts) ist Außerordentlicher Professor am Institut für Geographie der Universität Innsbruck. Er hat Gletscher rund um den Erdball untersucht – speziell solche in den Tropen. Derzeit ist er Präsident der International Association of Cryospheric Sciences in der Internationalen Union für Geodäsie und Geophysik. Von ihm und Henry Osmaston ist 2002 das Buch »Tropical Glaciers« erschienen.

**Philip W. Mote** (links) ist Professor für Atmosphärenforschung an der Universität von Washington in Seattle. Er hat 2000 ein Buch über Klimasimulationen publiziert. Zusammen mit Kaser war er Hauptautor für den vierten Bericht des UN-Klimarats IPCC.

© American Scientist