

TITEL

Die Zukunft des Wetters



INHALT

- Hurrikane an der Leine S. 31
- Tornados in Deutschland S. 38
- Scharfe Augen im All S. 40
- Wie wird der nächste Sommer? S. 48

... ist heute so zuverlässig vorhersagbar wie nie. Einen wichtigen Beitrag dazu leisten moderne Wettersatelliten, indem sie die Datenbasis für Vorhersagemodelle erheblich erweitern. Aber die Meteorologen streben nach mehr. Schon gibt es für Europa erste Prognosen, wie die kommende Jahreszeit ausfallen wird. Auch der Schritt von der bloßen Vorhersage des Wetters zu seiner Beeinflussung scheint nicht mehr utopisch: Der Computer zeigt, wie es geht – jedenfalls im Prinzip.

Diesen Hurrikan mit einem gut entwickelten Auge fotografierten Astronauten an Bord der Raumfähre Atlantis im November 1994.

Hurrikane an der Leine

Im Computer gelingt es schon, tropische Wirbelstürme abzuschwächen oder ihre Zugbahn zu ändern. Die Simulationen zeigen, welche Eingriffe auch in der Realität Erfolg versprechen könnten.

Von Ross N. Hoffman

Gewaltige Wirbelstürme mit Windgeschwindigkeiten von mehr als 120 Kilometer pro Stunde fegen jedes Jahr über die tropischen Meere hinweg. Über dem Atlantik und dem östlichen Teil des Pazifischen Ozeans heißen sie Hurrikane, über dem westlichen Pazifik Taifune und über dem Indischen Ozean Zyklone. Stoßen sie auf die Küste, verwüsten sie häufig weite Landstriche. Wenn die betroffene Region dicht bevölkert ist, können sie Tausende von Menschenleben fordern und Sachschäden in Milliardenhöhe verursachen. Und nichts, absolut nichts vermag sie aufzuhalten.

Aber muss das so bleiben? Werden wir diesen Furcht erregenden Naturgewalten auf ewig hilflos ausgeliefert sein? Meine Forscherkollegen und ich meinen »nein«. Unser Team untersucht derzeit Möglichkeiten, Hurrikane auf weniger schädliche Zugbahnen zu dirigieren oder zu entschärfen. Zwar dürfte es noch einige Jahrzehnte dauern, bis dieses hoch gesteckte Ziel in greifbare Nähe rückt. Doch zeigen die von uns erzielten Ergebnisse, dass es nicht aussichtslos ist, danach zu streben.

Zunächst allerdings müssen wir lernen, den Verlauf eines Sturms absolut präzise vorherzusagen und jene Veränderungen in den physikalischen Bedingungen – wie der Lufttemperatur – zu erkennen, die sein Verhalten beeinflussen. Erst dann können wir nach Wegen suchen, solche Veränderungen künstlich herbeizuführen. Die entsprechenden Untersuchungen stecken noch in den Anfängen, aber erfolgreiche Computersimulationen von Hurrikanen in den letzten Jahren wecken berechtigte Hoffnungen, dass die Einflussnahme eines Tages gelingen könnte. Dabei erweist sich genau das, was Wettervorhersagen so schwierig macht – die extreme Empfindlichkeit der Atmosphäre

gegenüber kleinsten Störungen – als Schlüssel zur Beherrschung schwerer tropischer Wirbelstürme. So verlief unser erster Versuch, den Verlauf eines simulierten Hurrikans durch geringfügiges Abändern des Anfangszustands zu beeinflussen, bereits erfolgreich, und auch die weiteren Ergebnisse kann man nur als viel versprechend bezeichnen.

Um zu verstehen, warum und wie es gelingen könnte schwere tropische Stürme zu beeinflussen, muss man sich zunächst einige grundlegende Fakten klar machen. Die Ozeane in den Tropen geben kontinuierlich Wärme und Feuchtigkeit an die Atmosphäre ab, wodurch sich über ihrer Oberfläche eine feuchtwarme Luftmasse ansammelt. Steigt diese auf, kondensiert der enthaltene Wasserdampf: Tröpfchen scheiden sich aus und bilden Wolken, aus denen Niederschlag fällt.

Erste Impfversuche per Flugzeug

Bei der Kondensation wird zugleich Wärme frei. Sie entspricht genau der Energie, die zuvor bei der Verdunstung des Wassers an der Meeresoberfläche aufgenommen wurde. Diese so genannte latente Kondensationswärme verleiht der Luft zusätzlichen Auftrieb und lässt sie in einem sich selbst verstärkenden Rückkopplungsprozess weiter emporsteigen. Die entstehenden Gewitterzellen vereinigen sich schließlich und organisieren sich zu einem riesigen Tiefdruckwirbel mit dem berühmten Auge: der stillen, klaren Nabe im Rad der rotierenden Wolkenmassen.

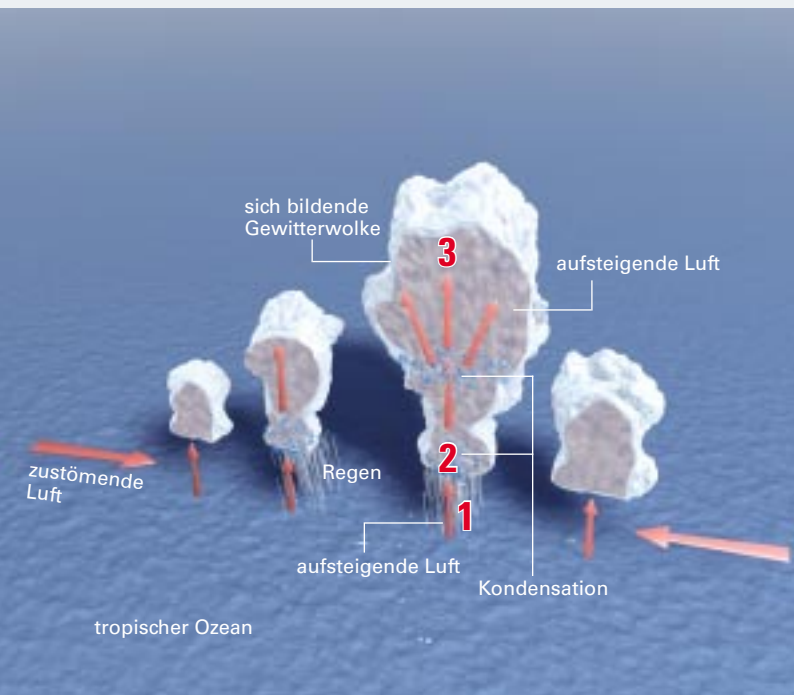
Da Hurrikane ihre Energie hauptsächlich aus der Wärme beziehen, die bei der Kondensation von Wasserdampf zu Wolken und Regen freigesetzt wird, konzentrierten sich die ersten Versuche zur Zähmung der Wirbel auf das Eingreifen in den Kondensationsprozess. Dazu gab es damals nur ein praktikables Verfahren: ►



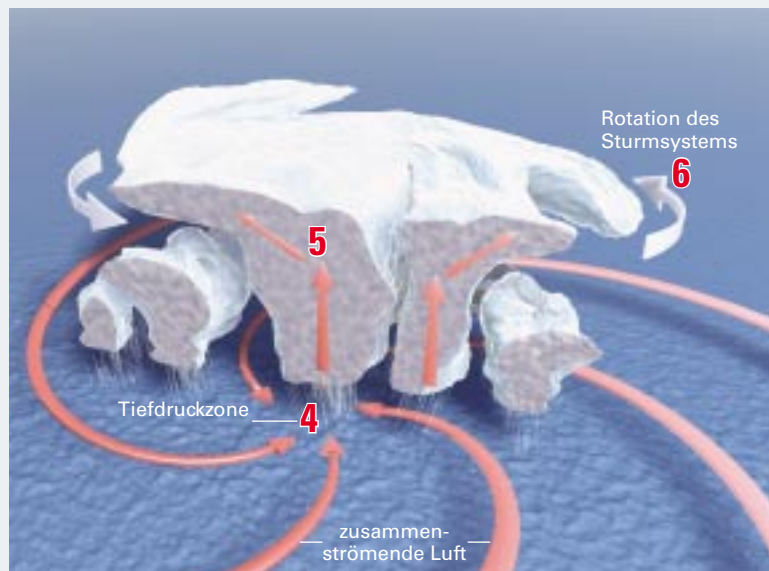
Anatomie eines Hurrikans

Will man im Stande sein, einen Hurrikan abzuschwächen oder abzulenken, muss man zunächst einmal seine Entwicklung präzise und detailliert vorhersagen können. Dies setzt eine genaue

Kenntnis der Mechanismen voraus, die einen Wirbelsturm entstehen und wachsen lassen. Hier ist der Vorgang in groben Zügen umrissen.



Hurrikane bilden sich über erhitzten tropischen Meeren, die Wärme und Wasserdampf an die Atmosphäre abgeben, sodass sich große Mengen feuchtwarmer Luft über der Wasseroberfläche sammeln (1). Warme Luft steigt auf, wobei der enthaltene Wasserdampf kondensiert und Wolken bildet, aus denen Niederschlag fällt (2). Bei der Kondensation wird Wärme freigesetzt, was den Luftmassen in den sich auftürmenden Gewitterwolken noch mehr Auftrieb verleiht (3).



Diese Aufwärtsbewegung erzeugt einen Sog, der über der Oberfläche des tropischen Meers eine Tiefdruckzone entstehen lässt, in die von außen weitere feuchtwarmer Luft hineinströmt (4). Auch sie wird im Zentrum emporgesaugt und führt dem sich aufbauenden Sturmsystem große Mengen an Wärme und Wasserdampf zu (5). Das Tief verstärkt sich und noch mehr Luft strömt nach innen, wobei sie durch die Erddrehung spiralförmig abgelenkt wird: Das Wolkensystem beginnt sich um die eigene Achse zu drehen (6). Dieser sich selbst verstärkende Prozess schreitet schnell voran. Der Sturm gewinnt an Intensität, während das Wolkensystem durch Selbstorganisation eine komplexe großräumige Struktur annimmt.

▷ die Wolkenimpfung. Anfang der 1960er Jahre testete ein wissenschaftliches Beratungsgremium der US-Regierung im Rahmen des Projekts »Sturmwut« (»Stormfury«) mit einer Reihe mutiger, wenn nicht tollkühner Experimente die Machbarkeit dieses Ansatzes.

Die Absicht war, den Niederschlag im ersten Regenband außerhalb des Auges zu verstärken und dadurch die Entwicklung des Hurrikans zu bremsen. Als Mittel dazu impften die Forscher die Wolken mit Silberiodidkristallen, die sie aus Flugzeugen abwarfen. Die ausgestreuten Feststoffe sollten als Kondensationskeime in dem unterkühlten Wasserdampf, der in die höchsten, kältesten Regionen des Wirbels aufgestiegen war,

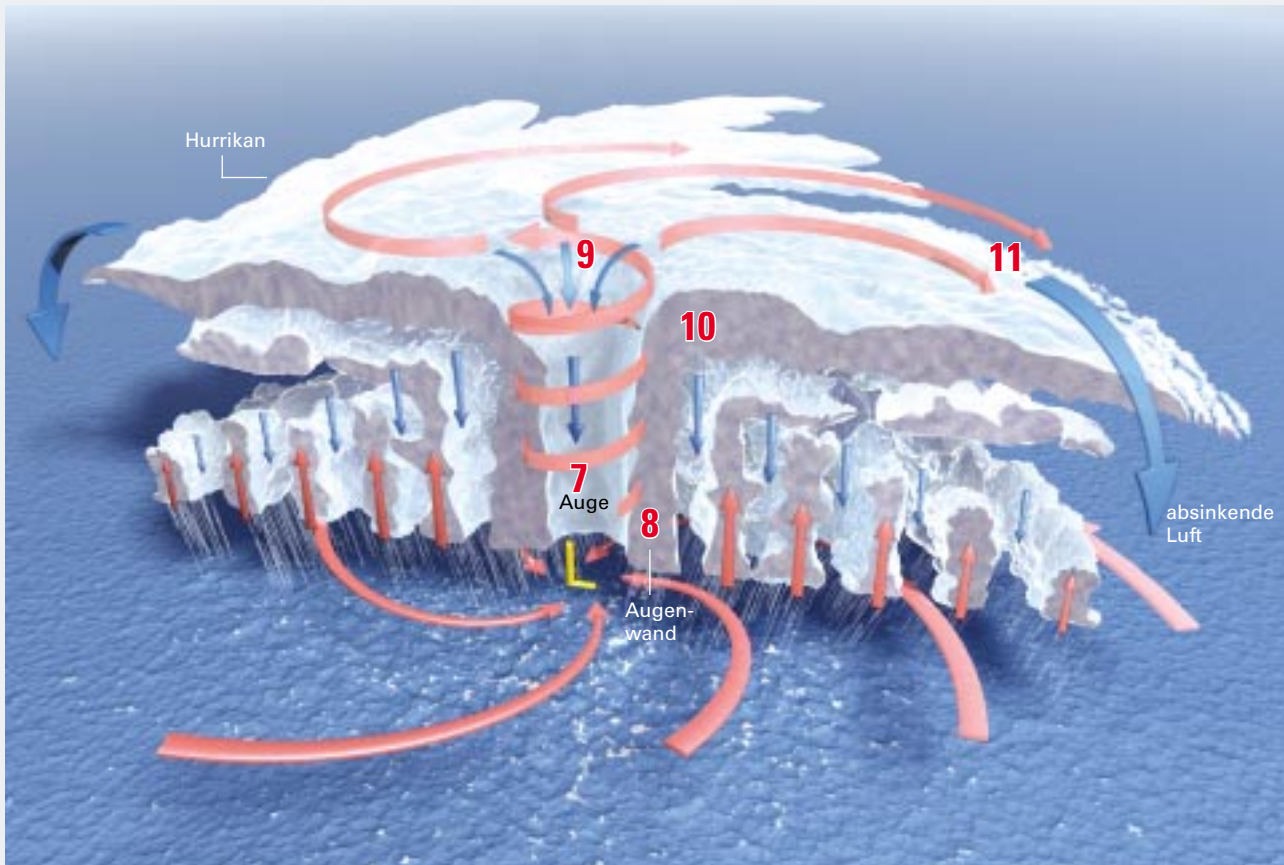
Eispartikel entstehen lassen, sodass die Wolken schneller anwachsen und die Vorräte an feuchtwarmer Luft über der Meeresoberfläche aufbrauchen, die andernfalls die anwachsende Augenwand füttern würden. Auf diese Weise nähme, so die Theorie, der Radius des Auges zu und die Stärke des Hurrikans entsprechend ab – wie bei einer Eisläuferin, die bei einer Pirouette die Arme ausbreitet, um langsamer zu werden.

Chaotische Wetterküche

Die Ergebnisse waren im besten Fall gemischt. Heute halten Meteorologen das Impfen von Hurrikanwolken mit Kondenskeimen für wenig wirksam, weil die Luft im Wirbel entgegen früheren An-

nahmen kaum unterkühlten Wasserdampf enthält.

Unsere aktuellen Untersuchungen sind aus einer Idee heraus geboren, die ich vor dreißig Jahren als graduierter Student bei der Beschäftigung mit der Chaostheorie hatte. Als chaotisch bezeichnet man ein System, das vom Zufall bestimmt scheint, tatsächlich aber präzisen Regeln gehorcht. Das entscheidende Merkmal ist eine hohe Empfindlichkeit gegenüber den Anfangsbedingungen, wodurch minimale, scheinbar unbedeutende Störungen in der Regel tief greifende Auswirkungen haben, die in kurzer Zeit unvorhersehbare Folgen nach sich ziehen. Im Fall der Hurrikane etwa können winzige Variationen bei Fakto-



ALLE GRAFIKEN DIESER DOPPELSEITE: DAVID FIERSTEIN

Dabei entwickelt sich in der Regel ein Auge: ein windstilles, klares Gebiet im Zentrum des Tiefdrucksystems (7). Es ist umgeben von einem Ring aus Wolken, der so genannten Augenwand (8). Damit hat sich der Sturm zum Hurrikan entwickelt. Schließlich stößt die erhitzte Luft, nachdem sie fast all ihre Feuchtigkeit verloren hat, an die Stratosphäre, die wie ein Deckel wirkt. Deshalb

kann sie nicht noch weiter aufsteigen. Ein Teil von ihr wird zurück in das Auge (9) und zwischen die Wolkenbänder (10) gedrückt. Der Rest bewegt sich spiralförmig nach außen und sinkt am Rand des Hurrikans ab (11). Das gesamte Sturmsystem wandert weit gehend passiv mit großräumigen Luftströmungen wie dem Strahlstrom mit.

ren wie der Meerestemperatur, der Lage großräumiger atmosphärischer Strömungssysteme wie des Strahlstroms oder sogar der Form der um das Auge rotierenden Regenwolken die Zugbahn und Intensität des Sturms stark beeinflussen.

Für Meteorologen ist die enorme Empfindlichkeit der Atmosphäre gegenüber winzigen Einflüssen, durch die sich kleine Fehler in den Wettervorhersagemodellen rasch potenzieren, ein Ärgernis, das langfristige Vorhersagen so schwierig macht. Ich dagegen fragte mich, ob geringfügige, künstlich verursachte Störungen in einem Hurrikan ähnlich gravierende Folgen hätten und ob es auf diese Art gelingen könnte, den Sturm zu beeinflussen – ihn also zum Beispiel von dicht ▷

IN KÜRZE

- Das Team des Autors hat mit **hoch entwickelten Wettervorhersagemodellen** frühere Hurrikane simuliert. Dabei konnte es die komplexen internen Prozesse reproduzieren, die für die Entstehung und Entwicklung schwerer tropischer Stürme verantwortlich sind.
- Die Simulation bestätigte, dass **Hurrikane chaotische Systeme** sind, die empfindlich auf geringfügige Veränderungen physikalischer Bedingungen wie der Lufttemperatur und -feuchtigkeit im Sturmzentrum sowie in den umliegenden Regionen reagieren.
- Mit raffinierten numerischen Optimierungsverfahren konnten die Forscher ermitteln, welche der aktuellen Parameter eines Hurrikans man ändern müsste, um die **Winde abzuschwächen** oder den Sturm von bewohnten Gebieten wegzudirigieren.
- Sollten sich diese theoretischen Ergebnisse in die Praxis umsetzen lassen, böten sie erstmals die Möglichkeit, zum Schutz von Leben und Eigentum **in den Verlauf eines Hurrikans** einzugreifen.

▷ bevölkerten Regionen wegzulenken oder die Windgeschwindigkeit zu drosseln.

Damals war ich nicht in der Lage, diese Ideen weiterzuverfolgen, aber im vergangenen Jahrzehnt sind die Methoden der Computersimulation und Fernerkundung so weit vorangeschritten, dass mein Interesse an einer großräumigen Beeinflussung des Wetters wieder auflebte. Mit finanzieller Unterstützung durch das Nasa-Institut für fortschrittliche Konzepte modellieren meine Mitarbeiter und ich bei der Firma Atmospheric and Environmental Research (AER) – einem Dienstleister im Bereich Forschung und Entwicklung – Hurrikane im Rechner und suchen nach Erfolg versprechenden Steuerungsmöglichkeiten, die dann in realen Versuchen ausprobiert werden könnten. Im Besonderen simulieren wir das Verhalten früherer Wirbelstürme und testen die Auswirkungen verschiedener Eingriffe, indem wir schauen, welche Änderungen sie bei den modellierten Stürmen hervorrufen.

Manipulation im Modell

Die besten heutigen Computermodelle zur Wettervorhersage taugen mit einiger Anstrengung auch dazu, Hurrikane nachzubilden. Sie simulieren die Entwicklung des Wetters – oder eben auch eines Wirbelsturms –, indem sie den wechselnden Zustand der Atmosphäre in kurzen, aufeinander folgenden Zeitschritten berechnen. Dabei lautet eine Grundannahme, dass innerhalb der Luft-hülle keinerlei Masse, Energie, Impuls und Feuchtigkeit entsteht oder vernichtet wird. Ein wanderndes System wie ein Hurrikan führt diese Größen, deren Gesamtbetrag jeweils unveränderlich bleibt, in der Strömung mit sich. An seinen Rändern oder Grenzen aber verhält es sich anders. An der Meeresoberfläche

zum Beispiel können sich die Gesamtbe-träge für die vier Größen innerhalb der Atmosphäre erhöhen oder erniedrigen.

Für Meteorologen ist der Zustand der Atmosphäre durch einen vollständigen Satz physikalischer Variablen wie Druck, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und -richtung bestimmt. Sie entsprechen den Größen, die bei der Computersimulation erhalten bleiben. In den meisten Wettermodellen sind diese beobachtbaren Messwerte auf einem dreidimensionalen Gitter definiert, das die Atmosphäre verkörpert. So lässt sich der Verlauf jeder Eigenschaft in einem Höhengniveau als Karte darstellen. Die Gesamtheit der Werte aller Variablen auf dem Gitter heißt Modellzustand.

Um eine Vorhersage zu erstellen, erzeugt das Computerprogramm aus einem solchen Modellzustand denjenigen, der wenig später eintritt, und dann den jeweils nächsten, wobei es diese Prozedur zigfach wiederholt. Die Zeitabstände liegen dabei zwischen einigen Sekunden bis Minuten – je nach der Auflösung oder Genauigkeit, mit der die Wetterentwicklung simuliert werden soll. Letztlich berechnet der Computer für jeden Zeitschritt die Auswirkungen der Winde, welche die verschiedenen Erhaltungsgrößen mitführen, sowie von Prozessen wie solarer Aufheizung, Verdunstung, Niederschlag, Oberflächenreibung und Wärmeabstrahlung, die in dem interessierenden Gebiet auftreten.

Meteorologische Vorhersagen sind zwangsläufig unvollkommen. Das liegt unter anderem daran, dass bereits der Modellzustand zu Beginn immer unvollständig und ungenau ist. Bei einem Hurrikan lassen sich die Anfangsbedingungen besonders schwer ermitteln, weil direkte Beobachtungsdaten spärlich und nur mühsam zu bekommen sind. Das ist

umso fataler, als gerade Hurrikane, wie wir aus Satellitenbildern der Wolken wissen, ungewöhnlich komplexe, detailreiche Strukturen haben. Leider liefern die Wolkenbilder, auch wenn sie potenziell nützlich sind, nicht annähernd genug Informationen.

Rückwärtskorrektur des Anfangszustands

Aber auch bei perfektem Ausgangszustand des Modells bliebe die Simulation schwerer tropischer Stürme fehlerhaft. Der Grund sind Unzulänglichkeiten der Computermodelle, in denen sich zum Beispiel Vorgänge auf Skalen unterhalb des Abstands benachbarter Gitterpunkte nicht darstellen lassen. Deshalb werden die Strukturen des Hurrikans in der Nähe der Augenwand, seinem bedeutendsten Element, geglättet und die Details verwischt. Zudem verhalten sich die Modelle – ebenso wie die Atmosphäre, die sie simulieren – chaotisch, wodurch sich Fehler der genannten Art im Verlauf der Berechnungen schnell aufschaukeln.

Trotz dieser Probleme bleibt die Computersimulation wertvoll für unsere Zwecke. Um die Beeinflussbarkeit von Hurrikanen zu prüfen, modifizierten wir eine hoch entwickelte Methode zur Festlegung des Ausgangszustands einer Wettervorhersage, das so genannte vierdimensionale variationelle Datenassimilationsverfahren (4dVar). Die im Namen erwähnte vierte Dimension ist die Zeit. Forscher am Europäischen Zentrum für Mittelfristige Wettervorhersage in Shinfield Park (England), einem der weltweit führenden Zentren für Meteorologie, verwenden dieses Verfahren für die tägliche Wettervorhersage.

Um das Beste aus den Messwerten zu machen, die Satelliten, Schiffe, Wetterstationen und Ballons vor Beginn der Vorhersage geliefert haben, verknüpfen die Meteorologen diese Beobachtungsdaten mit einer fundierten ersten Näherung des aktuellen Zustands der Atmosphäre. Dieser Vorgang heißt Datenassimilation. Als erste Näherung dient gewöhnlich die sechs Stunden zuvor erstellte Vorhersage für den Zeitpunkt der Datennahme. Das Ergebnis der Verknüpfung der echten Daten und der ersten Näherung dient dazu, die nächste Sechs-Stunden-Vorhersage zu starten.

In der Theorie approximiert die Datenassimilation das reale Wetter optimal,



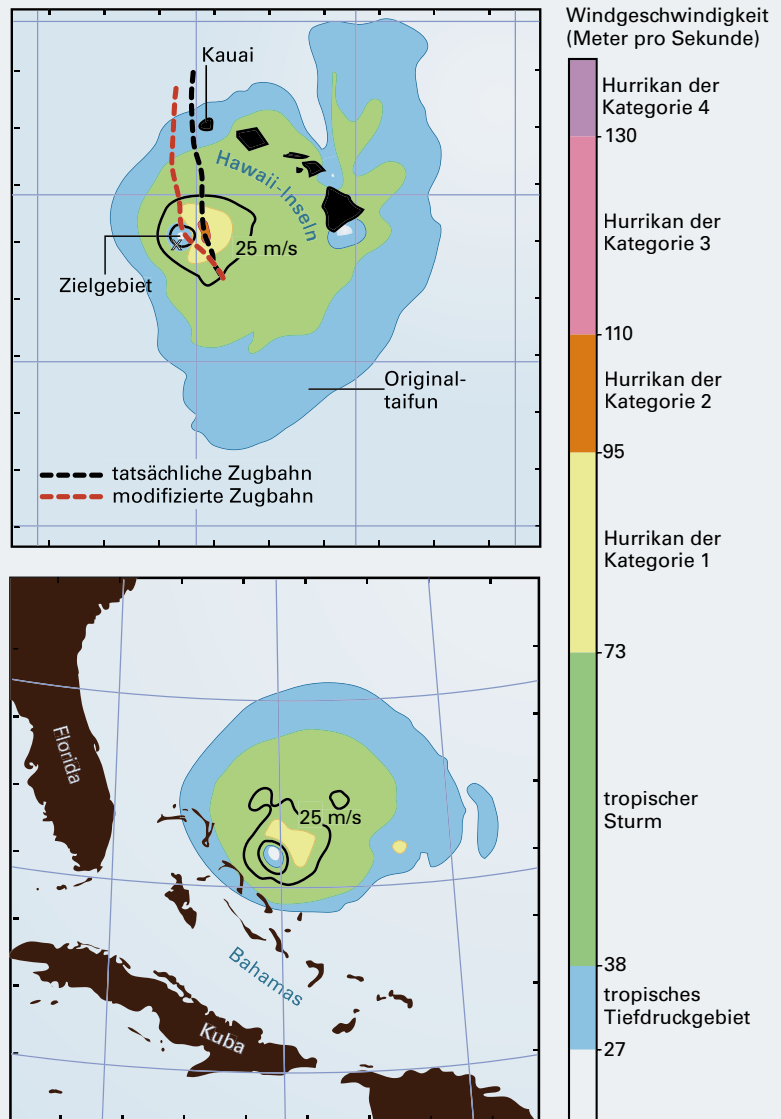
Die Steuerung simulierter Stürme

Anhand von **Computern** simulierten die Autoren zwei verheerende Wirbelstürme von 1992: Iniki und Andrew. Die Farben repräsentieren Sturmstärken nach dem Klassifikations-

system für Hurrikane. Bei den schwarzen Höhenlinien erreicht die Windgeschwindigkeit 25 Meter pro Sekunde – den kritischen Wert, ab dem Schäden auftreten.

Wenn bei den Simulationen von Iniki (rechts) die Originaldaten verwendet wurden, verlief die Zugbahn (schwarze gepunktete Linie) wie in der Realität dicht an Kauai vorbei. Bei leicht veränderten Anfangsbedingungen, insbesondere einer höheren Temperatur und Feuchtigkeit an verschiedenen Punkten, machte die simulierte Zugbahn des Wirbels (rote gepunktete Linie) einen Schwenk zu einem vorher festgelegten Zielgebiet etwa hundert Kilometer weiter westlich und damit einen Bogen um Kauai.

Die unteren Karten zeigen Simulationen von Hurrikan Andrew im Original (links) und in einer künstlich abgewandelten Form (rechts). Zwar gibt es auch im manipulierten Sturm einen großen Bereich mit Winden oberhalb der Grenze, ab der Schäden auftreten. Aber die Höchstgeschwindigkeiten haben sich stark verringert, sodass sich der Hurrikan der Kategorie 3 in einen viel harmloseren der Kategorie 1 verwandelte.



da sie den Modellzustand sowohl an die direkten Beobachtungen als auch an die Sechs-Stunden-Vorhersage anpasst und somit beide austariert. Obwohl die statistische Grundlage der Methode eindeutig ist, erfordert ihre konkrete Umsetzung allerdings zusätzliche Annahmen und Informationen, die sich nur schätzen lassen. In der Praxis der Datenassimilation steckt deshalb ein gerüttelt Maß an Erfahrung und Fingerspitzengefühl.

Das 4dVar-Verfahren ermittelt einen Atmosphärenzustand, der den Modell-

gleichungen genügt und zugleich der ersten Näherung wie auch den Beobachtungsdaten sehr nahe kommt. Es löst diese schwierige Aufgabe, indem es den Modellzustand, welcher der vor sechs Stunden gemachten Vorhersage zu Grunde lag, nachträglich anhand der Abweichungen zwischen dieser Vorhersage und den neuen Beobachtungsdaten korrigiert. Dazu berechnet es aus den Abweichungen die Empfindlichkeit des Modells, das heißt den Grad, in dem sich kleine Änderungen bei jedem einzelnen Parameter

auf die Güte der Anpassung an die realen Messwerte auswirken.

Diese Berechnung, die ein so genanntes adjungiertes Modell benutzt, durchläuft das sechsstündige Vorhersageintervall rückwärts in der Zeit. Ein Optimierungsprogramm ermittelt schließlich die Korrekturen an dem ursprünglichen Modellzustand, die dafür sorgen, dass ein neuerlicher Simulationslauf die tatsächliche Entwicklung des Wetters – oder eines Wirbelsturms – während der sechs Stunden möglichst genau nachbildet. ▷



▷ Weil die nachträgliche Korrektur anhand approximierter Modellgleichungen erfolgt, muss der gesamte Vorgang – die Simulation, die Ermittlung der Abweichungen, das Aufstellen des adjungierten Modells und die Optimierung – zur Feinabstimmung der Ergebnisse viele Male wiederholt werden. Das Endresultat all dieser Durchgänge dient dann als erste Näherung für die nächste Sechsstunden-Vorhersage.

Mit diesem Verfahren lassen sich auch nachträglich frühere Hurrikane simulieren. Anschließend kann man einen oder mehrere Parameter zu verschiedenen Zeitpunkten variieren und nachschauen, wie sich diese Störungen auswirken. Dabei zeigt sich, dass sich der anfängliche Effekt meist nach kurzer Zeit verflüchtigt. Nur Eingriffe mit speziellen Eigenheiten – einem Muster oder einer besonderen Struktur, die zu einer Selbstverstärkung führt – wachsen sich so weit aus, dass sie den Verlauf des Sturms merklich beeinflussen.

Zur Veranschaulichung kann man sich zwei Stimmgabeln vorstellen, von denen die eine angeschlagen wird. Ist die andere nicht auf den gleichen Ton gestimmt, schwingt sie nicht mit, obwohl die akustischen Wellen, die von der ersten Gabel ausgehen, an ihr rütteln. Nur wenn sie dieselbe Eigenfrequenz hat, gerät sie in Resonanz und beginnt auch zu vibrieren. Analog gilt es bei einem Hurrikan genau den richtigen Stimulus – Änderungen der Parameter – zu finden, damit eine dauerhafte Reaktion in der gewünschten Richtung auftritt.

Den Sturm besänftigen

Unsere Forschungsgruppe bei AER hat Simulationsversuche zu zwei schweren Wirbelstürmen von 1992 durchgeführt. Als damals im September der Taifun Iniki direkt über die Hawaii-Insel Kauai hinwegzog, forderte er etliche Menschenleben und verursachte erhebliche Sachschäden. So waltete er ganze Wälder platt. Auch Hurrikan Andrew, der einen Monat vorher knapp südlich von Miami über Florida hereingebrochen war, hinterließ eine Spur der Verwüstung.

Trotz all der Unzulänglichkeiten auch modernster Vorhersagemethoden war unser erster Simulationsversuch überraschenderweise gleich ein Erfolg. Wir versuchten, den Modellzustand von Iniki dreißig Stunden vor dem Landfall

auf Kauai so zu verändern, dass sich der Taifun sechs Stunden später hundert Kilometer westlich seiner tatsächlichen Zugbahn befände. Entsprechend erzeugten wir künstliche Messdaten, die zu diesem angestrebten Zielort passten, und fütterten damit das 4dVar-System. Dann ließen wir den Computer die kleinste Änderung am ursprünglichen Datensatz berechnen, welche die veränderte Zugbahn liefern würde. Dabei ließen wir zunächst einmal jede künstliche Veränderung des Sturmsystems zu – unabhängig davon, ob sie auch real machbar wäre.

Wie sich zeigte, betrafen die wichtigsten Veränderungen die Anfangstemperaturen und -winde. An den meisten Punkten im Gitternetz waren die Anpassungen minimal und lagen im Bereich von zehntel Grad. Die größte Modifikation ergab sich für die unterste Modellschicht westlich des Sturmzentrums, wo die Temperatur beim manipulierten Hurrikan um fast zwei Grad Celsius höher lag. Auch die Windgeschwindigkeiten änderten sich im Allgemeinen nur wenig: um drei bis fünf Kilometer pro Stunde. Wiederum aber gab es Ausnahmen an einigen wenigen Stellen. So divergierten in der Nähe des Sturmzentrums wegen geringfügiger Änderungen der Windrichtung die Geschwindigkeiten um bis zu dreißig Kilometer pro Stunde.

Obwohl beide Computerversionen von Iniki, die ursprüngliche und die abgewandelte, fast die gleiche Struktur zeigten, reichten die Unterschiede bei den Schlüsselvariablen aus, den manipulierten Taifun in den nächsten sechs Stunden nach Westen abdriften zu lassen, bevor er in Richtung Norden weiterzog. Kauai blieb dadurch vor dem Schlimmsten bewahrt. Die relativ kleinen künstlichen Eingriffe in die Anfangsbedingungen pflanzten sich durch den komplexen Satz nichtlinearer Gleichungen hindurch fort und ließen den simulierten Sturm nach sechs Stunden an dem gewünschten Ort ankommen.

Dieser erste Versuch bestärkte uns in dem Gefühl, auf dem richtigen Weg zu sein. Herauszufinden, an welchen Schrauben man drehen musste, um schließlich auch echte Hurrikane zu beeinflussen, schien kein Ding der Unmöglichkeit. Bei den nächsten Simulationen verwendeten wir dann engmaschigere Gitter und stellten das 4dVar-System auf das Ziel ein, die Sachschäden zu minimieren.

Bei einem Versuch mit dem so abgewandelten Programm berechneten wir die Temperaturänderungen, die nötig gewesen wären, um die Stärke der Bodwinde von Hurrikan Andrew beim Landfall in Florida zu begrenzen. Unser Ziel lautete, mit der kleinstmöglichen Abwandlung des anfänglichen Temperaturmusters (um die Eingriffe bei einem echten Sturm so einfach wie möglich zu halten) die schlimmsten Sturmböen während der letzten beiden Stunden des Sechsstunden-Intervalls zu drosseln. In diesem Fall ergab das 4dVar-Verfahren, dass zur Begrenzung der Sturmschäden vor allem die Anfangstemperaturen in der Nähe des Sturmages zu erhöhen wären – an einigen Stellen um immerhin zwei bis drei Grad Celsius. Im weiteren Umkreis – bis in Entfernungen von 800 bis 1000 Kilometern – wären nur noch kleinere Temperaturänderungen (um weniger als ein halbes Grad) nötig. Diese Störungen bilden ein wellenartiges Muster aus abwechselnd wärmeren und kälteren Ringen um das Zentrum des Hurrikans.

Von der Theorie zur Praxis

Obwohl die künstlichen Eingriffe nur die Temperatur betrafen, schlugen sie nach kurzer Zeit auf alle Schlüsselvariablen durch. Bei der Simulation des Originalhurrikans stiegen die Windgeschwindigkeiten am Ende des Sechsstunden-Intervalls im gesamten Süden Floridas auf über achtzig Kilometer pro Stunde; in dem veränderten Modelllauf wurde diese kritische Grenze für Schäden an Gebäuden und Einrichtungen dagegen nirgendwo erreicht.

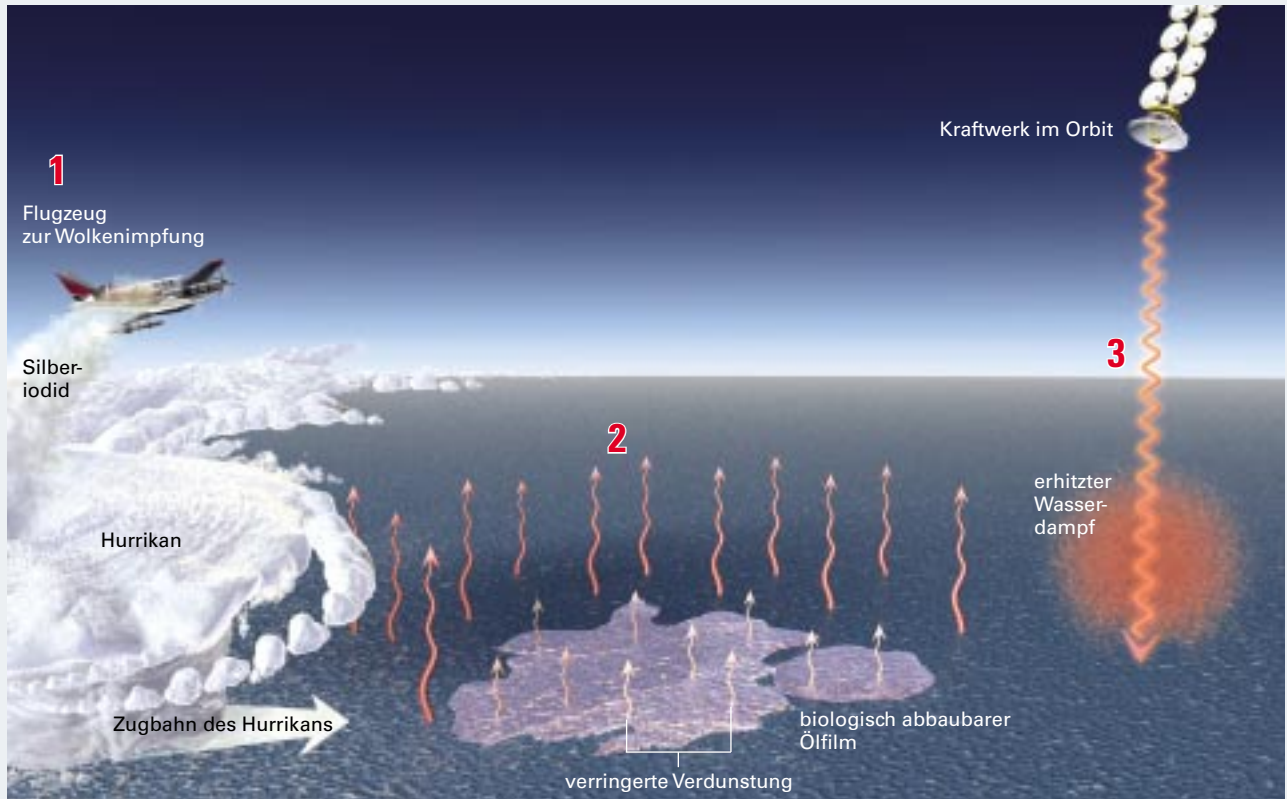
Als Test auf die Verlässlichkeit dieser Ergebnisse brachten wir dieselbe Störung in einem noch feinmaschigeren Gitter mit entsprechend höherer Auflösung an. Das Resultat war sehr ähnlich. Demnach hing der Ausgang unserer Experimente nicht von einem bestimmten Modell oder seiner Konfiguration ab. Allerdings tauchten auch in der veränderten Simulation nach weiteren sechs Stunden wieder Winde mit Geschwindigkeiten oberhalb der Schadensgrenze auf, sodass es weiterer Interventionen bedurft hätte, Südflovida zu schützen. Tatsächlich scheint eine Serie gezielter Eingriffe erforderlich zu sein, will man einen Hurrikan über längere Zeit unter Kontrolle halten.

Wenn sich also ein Hurrikan, wie unsere Ergebnisse andeuten, durch kleine

Möglichkeiten zum Eingriff

Wie Computersimulationen von Wirbelstürmen ergaben, könnten Änderungen von Niederschlag, Verdunstung und Lufttemperatur die Zugbahn beeinflussen oder die Winde drosseln. Dabei gibt es mehrere Eingriffsmöglichkeiten. Ein gezieltes Beimpfen der Wolken aus der Luft mit Silberiodid oder anderen Stoffen, die den Niederschlag fördern, könnte der Augenwand die zum Wachsen und Sichverstärken benötigte Feuchtigkeit entziehen (1). Denkbar wäre auch, das Meer entlang der Zugbahn eines Hurrikans mit einem biologisch abbaubaren Öl zu überziehen, um die Verdunstung zu hemmen, die dem Sturm als Energie-

quelle dient (2). Künftige erdumlaufende Solarkraftwerke, die mit großen Spiegeln Sonnenlicht auf fotovoltaische Zellen bündeln und die aufgefangene Energie mit Mikrowellen zu Empfängern am Erdboden übertragen sollen, könnten bei leicht geänderter Sendefrequenz mit Wasserdampf im Sturmsystem oder in dessen Umgebung wechselwirken (3). Dieser würde dabei aufgeheizt, sodass sich die umgebende Luft erwärmt. Den Simulationen zufolge sollte es mit einem solchen gezielten Wärmepuls gelingen, den Hurrikan abzuschwächen oder in eine gewünschte Richtung zu lenken.



Änderungen der Temperatur auf vorher-sagbare Weise ablenken oder abschwächen lässt, stellt sich als Nächstes die Frage: Wie kann man solche Störungen erreichen? Natürlich ist das nicht einfach.

Die benötigte Energiemenge wäre gewaltig, aber eine ohnehin geplante Serie von Solarkraftwerken im Weltall könnte sie eines Tages liefern. Diese Strom erzeugenden Satelliten würden mit riesigen Spiegeln das Sonnenlicht auf Solarzellen fokussieren, welche die aufgefangene Energie zu Mikrowellenempfängern am Boden senden. Damit keine Energie verloren geht, soll die zur Erde geschickte Strahlung zwar eine Frequenz haben, bei der sie die Atmosphäre ungehindert passiert und die Luft nicht durch Absorp-

tion erwärmt. Für die Beeinflussung des Wetters könnte man jedoch auf Frequenzen überwechseln, bei denen die Mikrowellen von Wasserdampf teilweise oder ganz verschluckt werden. So ließen sich gezielt Bereiche der Atmosphäre in einer gewünschten Höhe aufheizen.

Dabei blieben allerdings, da Mikrowellen Regentropfen praktisch nicht durchdringen, große Gebiete in Inneren des Hurrikans und darunter unzugänglich. Ausgerechnet dort, wo 4dVar in den geschilderten Experimenten die größten Temperaturänderungen ergab, würde die Fernheizung aus dem All somit nicht funktionieren. Deshalb machten wir eine weitere Simulation, bei der wir die Temperatur im Zentrum des

Hurrikans konstant hielten, während der Computer den optimalen Satz an Störungen suchte. Auch unter dieser Einschränkung gelang es, den Hurrikan in der gewünschten Weise zu beeinflussen: Zum Ausgleich für die gleich bleibende Anfangstemperatur im Sturmzentrum mussten eben nur die Temperaturänderungen außerhalb größer ausfallen. Wie sich zeigte, erwärmte sich während der Simulation dann das Auge des Hurrikans binnen Kurzem von selbst.

Eine andere potenzielle Methode zur Beeinflussung schwerer tropischer Stürme wäre die direkte Einschränkung der Energiezufuhr durch Überziehen der Meeresoberfläche mit einem dünnen Film aus biologisch abbaubarem Öl, das



▷ die Verdunstung verlangsamt. Denkbar wäre auch, schon Tage vor dem Herannahen eines Hurrikans und Tausende von Kilometern von der Küste entfernt schrittweise Eingriffe vorzunehmen. Indem diese sich auf den Luftdruck auswirken, könnten sie Veränderungen in den großräumigen Windmustern im Bereich des Strahlstroms hervorrufen, was einen bedeutenden Einfluss auf Intensität und Zugbahn des Wirbelsturms hätte. Vielleicht ließen sich die geeigneten Veränderungen am Anfangszustand sogar durch relativ kleine Modifikationen bei normalen menschlichen Aktivitäten herbeiführen. So könnte man Flugzeiten und -routen so anpassen, dass die Flugzeuge gezielt an bestimmten Stellen zu einer bestimmten Zeit Kondensstreifen erzeugen und so die Wolkenbildung fördern, oder die Feldbewässerung dazu einsetzen, die Verdunstungsrate regional gezielt zu steigern oder zu drosseln.

Sollte es irgendwann in der Zukunft tatsächlich gelingen, das Wetter zu steuern, ergeben sich allerdings schwierige politische Probleme. Was wäre, wenn ein manipulierter Hurrikan zwar ein Land

verschont, sich dafür aber über einem anderen austobt? Und obwohl ein UN-Beschluss den Eingriff in das Wetter als Waffe seit den späten 1970er Jahren verbietet, könnten manche Nationen in Versuchung geraten, wenn die vorerst rein theoretische Möglichkeit in den Bereich des Machbaren rückt.

Doch bis dahin ist es noch weit. Ohnehin sollte man unsere Methoden nicht gleich auf Hurrikane anwenden, sondern erst im kleinen Maßstab testen. So könnte man zunächst versuchen, in einem eng begrenzten Gebiet, wo sich leicht per Flugzeug oder vom Boden aus Störungen einbringen ließen, die Niederschläge zu verstärken. Mit einer dichten Anordnung von Sensoren ließe sich dann die Gültigkeit unserer Konzepte prüfen. Wenn das Verständnis der Wolkenphysik, die digitale Wolkensimulation und die Verfahren zur Datenassimilation so schnelle Fortschritte machen, wie wir hoffen, könnte man vielleicht in zehn bis zwanzig Jahren mit diesen bescheidenen Experimenten beginnen. Sollten sie erfolgreich verlaufen, müssten die Politiker die Situation neu überdenken. Vielleicht erschiene die

großräumige Steuerung des Wettergeschehens durch Eingriffe aus dem All dann weniger als Bedrohung denn als sinnvolles Ziel, auf das sich die Menschheit einigen könnte.



Ross N. Hoffman ist Vizepräsident für Forschung und Entwicklung bei der US-Firma Atmospheric and Environmental Research (AER) in Lexington (Massachusetts). Davor war er

beim Nationalen Forschungsrat der USA Mitglied im Komitee für den Stand und die zukünftigen Richtungen von Forschung und Maßnahmen zur Wettermodifikation.

Critical issues in weather modification research. Von Michael Garstang et al. National Academy Press, Washington 2003

Controlling the global weather. Von Ross N. Hoffman in: Bulletin of the American Meteorological Society, Bd. 83, S. 241, Februar 2002

The rise and fall of weather modification: changes in american attitudes toward technology, nature, and society. Von Chunglin Kwan in: Changing the Atmosphere. Von Clark Miller und Paul Edwards (Hg.). MIT Press, 2001

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Tornados in Deutschland



Diesen Artikel finden Sie als Audiodatei unter: www.spektrum.de/audio

Immer häufiger werden die verheerenden Windhosen auch hier zu Lande entdeckt.

Von Sven Titz

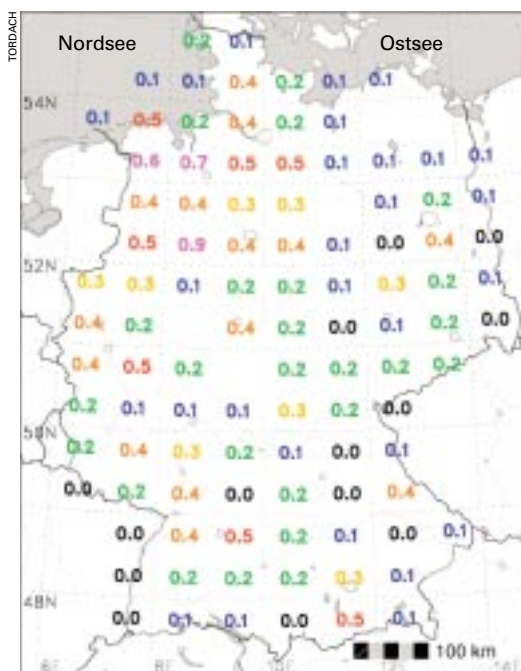
Gottlob Burchard Genzmer berichtete im Jahr 1764 dem Minister im Herzogtum Mecklenburg wahrhaft Spektakuläres: Eine Windhose war über mehrere Gemeinden nahe der Stadt Neubrandenburg gefegt und hatte unerhörte Schäden angerichtet. Genzmer fand nicht bloß zerstörte Scheunen und Forste vor. Die Gewalt der Windhose zeigte sich besonders an Baumstümpfen, die »mit ihren Wurzeln aus der Erde gerissen« worden waren. Man hatte dort vor

mehreren Jahren Eichen abgeschlagen, zu denen die »Stümmeln« gehörten. Die schweren Baumstümpfe seien durch den Wind »zehen, zwanzig und mehrere Schritte weggewälzt« worden.

Es muss sich um einen Tornado der Maximalstärke 5 auf der Fujita-Skala gehandelt haben, wie man heute anhand der Schilderung rekonstruieren kann. Das bedeutet Windstärken um die 500 Kilometer pro Stunde – schneller als jede andere natürliche Luftströmung auf der Erde und mehr als doppelt so schnell wie der ICE zwischen Hamburg und Berlin.

»Nur zwei Tornados dieser heftigsten Stufe sind für Deutschland bislang dokumentiert«, sagt Nikolai Dotzek, Gründer des Tornado-Netzwerks TorDACH. Schwache Luftwirbel mit Geschwindigkeiten zwischen 70 und 200 Kilometer pro Stunde seien am häufigsten. Über den deutschen Begriff »Windhose« ist der

Die Tornadodichte in Deutschland von 1950 bis heute ist in jährlichen Ereignissen pro 10000 Quadratkilometer angegeben. Am stärksten betroffen war der Westen der norddeutschen Tiefebene.



Meteorologe übrigens nicht besonders glücklich; denn er klingt eher harmlos und suggeriert einen Unterschied zu den amerikanischen Tornados, den es aber nicht gibt. Obendrein wird er oft fälschlich verwendet.

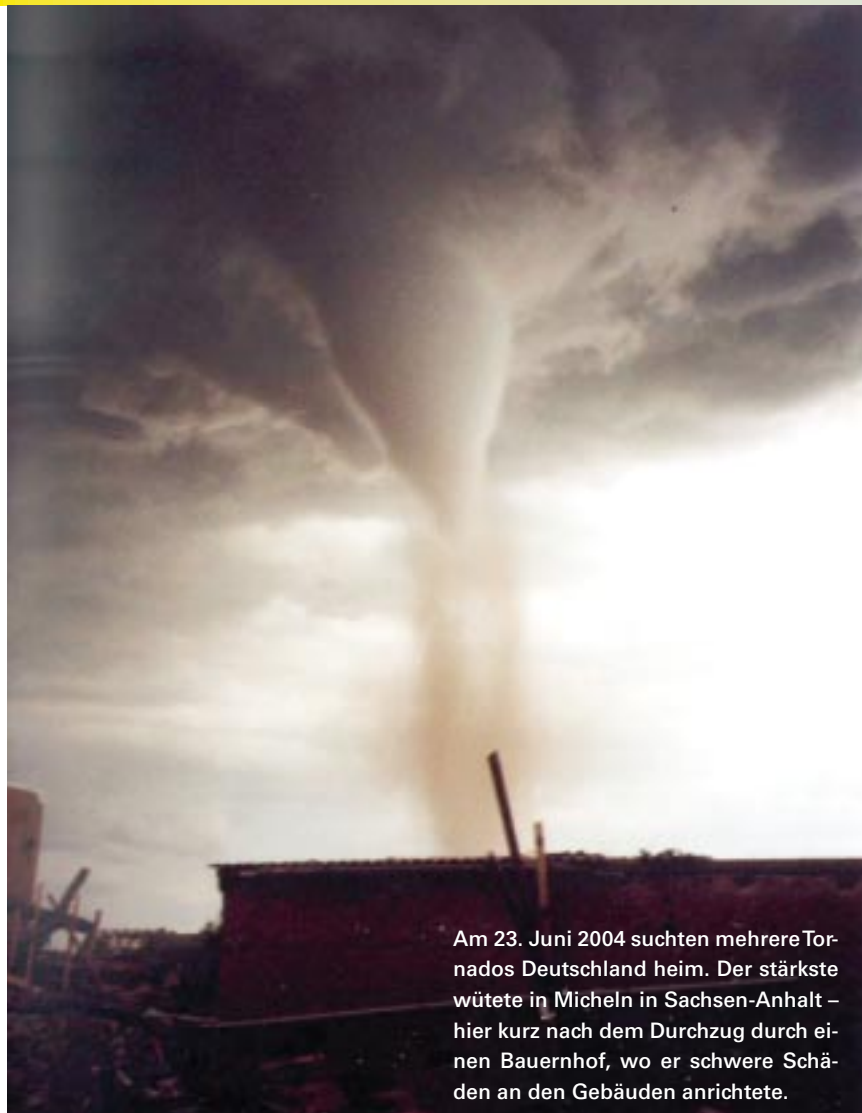
In den vergangenen Jahren haben Tornados in Deutschland mehr und mehr Aufsehen erregt. So sorgte 2004 ein F3-Exemplar – mit Windgeschwindigkeiten von mehr als 250 Kilometer pro Stunde – in Micheln bei Dessau (Sachsen-Anhalt) für Schlagzeilen. Ein Trend zu mehr Tornados ist in unseren Landen dennoch nicht auszumachen. Nur die Meldungshäufigkeit nimmt zu, weil die Menschen – so Dotzeks Vermutung – aufmerksamer geworden sind.

Vorwarnung mit Radar

In den USA gibt es im Jahr 1200 Tornados – Europa liegt mit 300 Fällen deutlich darunter. Durch Deutschland wirbelten in den vergangenen fünf Jahren zwischen 20 und 30 Exemplare jährlich. Todesopfer haben die strudelnden Winde bei uns bisher nur wenige gefordert. In den USA dagegen kosten sie jährlich 25 bis 50 Menschen das Leben. In den 1950er Jahren waren es noch zehnmal so viele. Dank Warnsystem und Infrastruktur (Schutzräume) ist die Zahl der Todesfälle erheblich gesunken.

Damit nicht eines Tages auch in Deutschland einmal viele Opfer zu beklagen sind, entwickelt nun der Deutsche Wetterdienst (DWD) ein Computerwarnsystem. Er kooperiert dabei mit dem Dänischen Meteorologischen Institut, dem Wetterdienst der Schweiz (MeteoSchweiz), dem Meteorological Service Canada und dem Geophysikalischen Beratungsdienst der Bundeswehr. Das System soll ein paar Minuten im Voraus Alarm schlagen können. Viel eher sind präzise Warnungen vor dem kleinräumigen Phänomen nicht möglich.

Besonders zwischen Mai und August, der Hauptsaison für Tornados hier zu Lande, werden demnächst Meteorologen des DWD auf ihren Computerbildschirmen nicht nur die Aufnahmen der bundesweit 16 Radaranlagen überwachen, sondern auch Spezialbilder, auf denen Gewitter gekennzeichnet sind, welche die gefürchteten Windrüssel hervorbringen könnten. Eine besonders wichtige Rolle spielt dabei das Dopplerradar. Es nutzt den nach dem österreichischen Physiker Christian Doppler benannten



Am 23. Juni 2004 suchten mehrere Tornados Deutschland heim. Der stärkste wütete in Micheln in Sachsen-Anhalt – hier kurz nach dem Durchzug durch einen Bauernhof, wo er schwere Schäden an den Gebäuden anrichtete.

ALEXANDER HILDEBRANDT, MICHELN

Effekt, um horizontale Windgeschwindigkeiten zu erfassen. Eine Software zur Mustererkennung warnt frühzeitig, sobald Gewitter auftauchen, die von oben wie ein Komma aussehen oder horizontale Luftwirbel mit Durchmesser von wenigen Kilometern aufweisen. Diese so genannte Mesozyklone ist ein deutliches Vorzeichen von Tornados. Auf einer Übersichtskarte sind die gefährlichen Gewitter mit Kreisen markiert, und der Meteorologe kann an die Wolkenstrukturen heranzoomen.

Der Ernstfall wird in Deutschland am häufigsten im Westen der Norddeutschen Tiefebene eintreten. Dort sind, wie TorDACH ermittelt hat, Tornados ungefähr doppelt so häufig wie im Süden. Das liegt besonders an der »vertikalen Windschereung«: Die horizontalen Winde nehmen mit der Höhe zu, während ihre Richtung dreht – das ist eine wichtige meteorologische Voraussetzung für explosive Gewitterstürme. Die entwickeln auch ohne Tor-

nado oft sehr gefährliche Eigenschaften. Lokale Fallböen (Downbursts) gefährden den Flugverkehr, und es kommt zu heftigen Niederschlägen bis hin zu Hagel mit taubeneigroßen Schloßen.

Wird vor einem Tornado gewarnt, so ist man im Innern von Häusern und im Keller am sichersten. Ein Auto mag vor einem Gewitter schützen – einer Windhose ist aber zuzutrauen, dass sie den Wagen umwirft oder Gegenstände aufwirbelt, die seine Fenster zerschmettern. Der Tornadoexperte Charles Doswell (Oklahoma) berichtet aus den USA, dass dort bei besonders heftigen Windhosen inmitten der Trümmer manchmal nur die Badezimmer der Gebäude stehen bleiben – die Rohrleitungen stabilisieren die Wände. Hier zu Lande werden Häuser solider gebaut und Tornados sind relativ selten. Wenn bald das Warnsystem eingerichtet ist, sollte die Gefahr für Leib und Leben, die von ihnen ausgeht, noch geringer werden.