

Neue globale sturmauflösende Klimamodelle

Stürmische Zeiten für die Klimaforschung

CATHY HOHENEGGER | DANIEL KLOCKE

Globale numerische Klimamodelle, wie der Weltklimarat IPCC sie einsetzt, müssen bislang mit einem groben Gitter von etwa 150 km Maschenweite auskommen. Feinere Details der Topographie fallen dabei ebenso durch das Raster wie Konvektion, die etwa zu Sommergewittern führt. Fortschritte in der Leistungsfähigkeit von Computern und bessere Modelle ermöglichen nun viel feinere numerische Gitter im Bereich von Kilometern. Globale Klimamodelle können endlich Gewitter darstellen.

Die Sonne ist hinter der dicken Kumulonimbuswolke verschwunden. Es donnert, und das einzige Licht kommt von den vielen Blitzen. Strömender Regen prasselt vom Himmel, Windböen lassen Äste brechen, Bäume stürzen um, die ersten Keller sind überflutet, und die Feuerwehr muss ausrücken. Vor dem Gewitter war es noch ein schöner, warmer Sommertag gewesen.

Gewitter, im Fachjargon der Meteorologie unter dem allgemeinen Begriff Konvektion zusammengefasst, sind das Ergebnis von erhitzter und deshalb leichter bodennaher Luft, die in der Atmosphäre aufsteigt. In früheren Zeiten hatten viele Menschen Angst vor Gewittern. Heutzutage versetzen diese immer noch zumindest Klimamodellierer in Angst, da sie sich in konventionellen Klimamodellen nicht direkt abbilden lassen. Klimamodelle werden benutzt, um das Klimasystem besser zu verstehen und müssen dementsprechend die sich im Klimasystem abspielenden Prozesse nachbilden. Dies betrifft auch die Konvektion.

Während der Sommermonate in den mittleren Breiten ist Konvektion der wichtigste Prozess, der in dieser warmen Jahreszeit für Niederschlag sorgt. Neben den großen Niederschlagsmengen spielt Konvektion auch eine bedeutende Rolle im Klimasystem, da sie Wärme, Feuchte und andere Partikel vom Boden bis in hohe Schichten der Atmosphäre transportiert. Konvektion trägt zu der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre bei und hilft, die auf der Erdoberfläche ungleichmäßige Verteilung von Wasser und Wärme auszugleichen. Konvektive Wolken reflektieren die Sonneneinstrahlung und absorbieren die Wärmeabstrahlung der

Erdoberfläche. Dadurch beeinflussen sie direkt den Energiehaushalt unseres Planeten und die resultierende Erdoberflächentemperatur.

Die Darstellung der Konvektion bereitet aber Klimamodellierern besondere Kopfschmerzen, da sie sozusagen durch die Maschen des Modellgitters fällt. Das heißt, die Konvektion findet auf kleineren Skalen statt, als von den konventionellen Klimamodellen aufgelöst werden können. Mit der Entwicklung neuartiger Klimamodelle, sogenannter hochauflösender – oder besser gesagt sturmauflösender – Klimamodelle, lässt sich das Problem lösen. Damit hat eine neue Ära in der Klimamodellierung begonnen (Abbildung 1).

Autopsie eines Klimamodells

Die Prozesse, die sich im Klimasystem abspielen, folgen physikalischen, biologischen und chemischen Prinzipien. Ein Klimamodell bildet diese in entsprechenden Gleichungen ab. Die physikalischen Vorgänge in der Atmosphäre beschreiben Erhaltungsgleichungen für Masse, Wärme und Impuls sowie die Zustandsgleichungen. Der resultierende Satz an gekoppelten Differentialgleichungen kann jedoch nur numerisch mit Hilfe von Hochleistungsrechnern gelöst werden. Dafür werden die Gleichungen auf einem dreidimensionalen globalen Gitter diskretisiert, an dessen Gitterpunkten der Zustand des Klimasystems in gewählten Abständen durch die Integration der Gleichungen berechnet wird. Die zeitliche Entwicklung wird dabei ebenfalls in Zeitschritten diskretisiert.

Beim Simulieren des Klimas mit Klimamodellen entstehen jedoch einige Probleme. Eine bedeutende Herausforderung ist die Vielfalt an involvierten Skalen (Abbildung 2). Ein Regentropfen misst gerade ein paar Millimeter, einzelne Kumulonimbuswolken haben einen typischen Durchmesser von einigen Kilometern, können sich aber zu größeren Strukturen von mehreren Tausenden von Kilometern verbinden. Um alle diese Prozesse in einem Klimamodell explizit darzustellen, müsste es einen Gitterabstand haben, der so fein ist wie ein Regentropfen – oder sogar feiner.

An so vielen Punkten den Zustand des Klimasystems dreidimensional zu errechnen, ist schier unmöglich, auch mit den leistungsfähigsten Hochleistungsrechnern. Um dies ins Verhältnis zu setzen: Der typische horizontale Gitter-

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



Abb. 1 Diese Montage zeigt links das mit dem Klima- und Wettermodell ICON mit 80 km Gitterweite simulierte globale Wetter, in der Mitte eine mit 2,5 km hochauflösende Simulation mit ICON und rechts das reale Wetter zu diesem Zeitpunkt (Visualisierung: N. Röber, DKRZ).

abstand der globalen Klimamodelle, die für die Beurteilung der Lage des Klimas beim aktuellen Weltklimarat (IPCC) eingesetzt werden, beträgt nur etwa 150 km. Mit so einem groben Gitterabstand kann Konvektion definitiv nicht explizit durch die Lösung der physikalischen Gleichungen repräsentiert werden, da sie sich auf kleineren Skalen als der Modellauflösung abspielt. Es sind halbempirische physikalische Näherungen – sogenannte Parametrisierungen – nötig, um den Effekt der Prozesse, die sich unterhalb der Gitterelemente abspielen, anzunähern.

Dies betrifft viele Vorgänge wie Aufwind, Kondensation, Eisbildung, Regenbildung, Verdunstung, Absinken abgekühlter Luft, Böen, turbulentes Mischen zwischen Wolken und Umgebung usw. Basierend auf dem gegebenen mittleren Zustand der Atmosphäre in einer großen Gitterzelle – sprich mittlere Temperatur, Feuchte und Wind – müssen alle diese Vorgänge erraten werden. Offensichtlich ist diese Vorgehensweise viel fehleranfälliger, als die physikalischen Gleichungen direkt zu lösen (Abbildung 3).

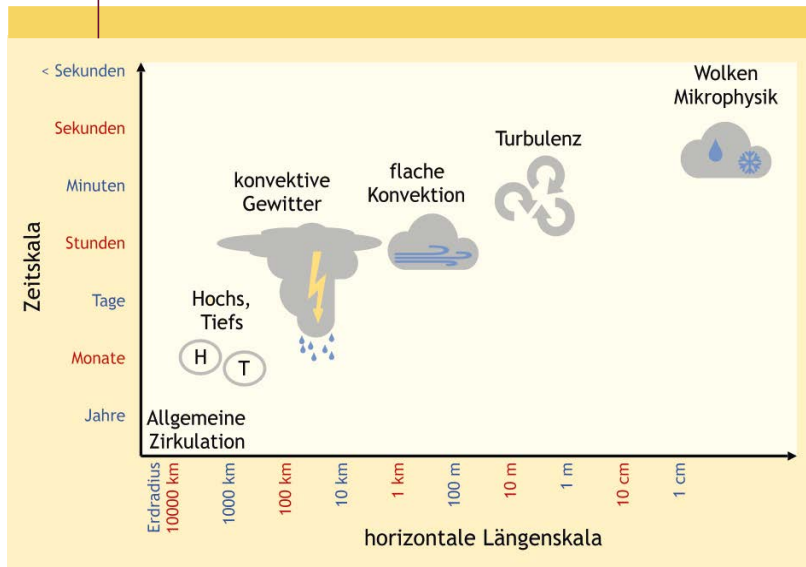
Der Weg zu sturmauflösenden Klimamodellen

Im Gegensatz zu den konventionellen Klimamodellen, die mit einem grobmaschigen Gitter arbeiten und daher eine Parametrisierung der Konvektion benötigen, nutzen sturmauflösende Modelle einen Gitterabstand zwischen 1 und 5 km, sodass sie Prozesse oberhalb dieser Skala explizit darstellen können. Der begrenzende Faktor für den Einsatz sturmauflösender Klimamodelle ist jedoch der enorme Rechenaufwand: Eine Verfeinerung der Gitterabstände bedeutet eine Zunahme an Gitterpunkten und eine Verkürzung des Zeitschrittes – letzteres auch, weil kleinräumigere Pro-

zesse schneller ablaufen. Zusammen entspricht dies einem Faktor 8 an Rechenaufwand pro Verdopplung der Auflösung. Falls die verfügbaren Ressourcen nicht genügen, muss man Kompromisse treffen, indem man kleinere Regionen oder kürzere Zeitperioden simuliert. Da die Rechenleistung über die letzten fünfzig Jahre stark zugenommen hat, wurden mit der Zeit immer aufwendigere Simulationen möglich. Dieser Fortschritt erlaubte die Entwicklung sturmauflösender Klimamodelle.

Obwohl Norman Phillips bereits 1955 am Institute for Advanced Study in Princeton (New Jersey) die erste Klimasimulation mit einem ganz einfachen Klimamodell durchführte, gelang die erste sturmauflösende Klimasimulation erst im Jahr 2000. Diese überspannte vierzehn Monate mit einer Auflösung von 1 km, aber die Simulationsdomäne umfasste nur das Loisachtal in den bayerischen Alpen [1]. Erst um 2008 gelang es der Autorin, zu dieser Zeit noch an der ETH in Zürich, eine Simulation für eine größere Region, in diesem Fall die Alpen für einen Monat mit 501×301 Gitterpunkten und einem Gitterabstand von 2,2 km [2].

In den folgenden Jahren wurden entweder simulierte Regionen vergrößert oder die Simulationsperioden verlängert. 2011 folgte das erste sturmauflösende Klimaszenario [3], 2012 die erste multidekadische, also mehrere Jahrzehnte umfassende, Simulation über 20 Jahre [4] und 2017 die erste kontinentale Simulation [5]. Parallel zu diesen regionalen sturmauflösenden Klimamodellen wurden auch globale sturmauflösende Klimamodelle entwickelt. Die erste globale Simulation mit einem Gitterabstand von 3,5 km wurde 2007 durchgeführt, aber für nur eine Woche [6].

ABB. 2 | SKALEN**Längen- und Zeitskalen von atmosphärischen Prozessen.**

Die Entwicklung dieses ersten globalen sturmauflösenden Klimamodells ermöglichte in Japan ab 2002 der „Earth Simulator“, der damals leistungsfähigste Rechner der Welt. Für viele Jahre war nur diese eine Modellierungsgruppe in Japan um Masaki Satoh in der Lage, solche globalen sturmauflösenden Simulationen durchzuführen. In den letzten Jahren haben andere Modellierungsgruppen in Europa und Amerika aufgeschlossen, und 2019 erschien die erste Vergleichsstudie mit globalen sturmauflösenden Modellen. An dieser Studie nahmen neun Modellierungsgruppen teil, darunter auch unsere am MPI für Meteorologie. Das Klimasystem wurde für 40 Tage simuliert [7]. Im Alten Testament entsprechen 40 Tage einer Ewigkeit, und das ist auch die bis jetzt längste simulierte Periode mit globalen sturmauflösenden Modellen.

Ein wichtiges Merkmal, um die Machbarkeit einer Simulation zu beurteilen, ist die Anzahl der Jahre, die pro realen Tag Rechenzeit simuliert werden können (Simulated Years Per Day, SYPD). Eine Klimasimulation über eine dreißigjährige Referenzklimaperiode ist mit einem SYPD von 0,2 bis 0,3 machbar, das würde bis fünf Monate Rechenzeit benötigen. ICON, das neue Wetter- und Klimamodell, welches das Max-Planck-Institut für Meteorologie und der Deutsche Wetterdienst gemeinsam entwickelt haben, schafft allerdings mit einem Gitterabstand von 2,5 km global gerechnet „nur“ 0,016 SYPD, wenn 20% des Hochleistungsrechners am Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) genutzt werden. Der SYPD-Wert ist so gering wegen der vielen Gitterpunkte.

Um schnellere Simulationen zu ermöglichen, haben verschiedene Modellierungsgruppen begonnen, ihre Klimamodelle neu zu programmieren, um die Vorteile neuartiger Großrechner besser nutzen zu können. Zum Beispiel sind Grafikprozessor (GPU)-Beschleuniger, die für die Computer-

spielindustrie entwickelt wurden, schneller als die traditionellen Zentralprozessoren (CPU), die von konventionellen Klimamodellen benutzt werden. Die erste fast globale Simulation mit einem auf GPU-Beschleuniger arbeitenden atmosphärischen Modell schaffte tatsächlich mit einem Gitterabstand von 1,9 km ein SYPD von 0,23 [8]. Bei einem solchen Fortschritt sind globale sturmauflösende Klimasimulationen über eine Referenzklimaperiode von dreißig Jahren anstatt vierzig Tagen bald keine Utopie mehr.

Vorteile sturmauflösender Klimasimulationen

Eine hohe horizontale Auflösung bringt zwei Vorteile. Erstens erlaubt sie eine explizite Darstellung von kleinskaligen physikalischen Prozessen in der Atmosphäre, darunter insbesondere der Konvektion (Abbildung 2). Zweitens kann sie die Erdoberfläche detaillierter nachbilden. Der Küstenverlauf wird genauer, kleine Inseln tauchen auf. Die Topographie stimmt besser mit der Realität überein, Heterogenitäten der Landoberflächenbedeckung, wie durch die Landwirtschaft verursacht, werden erfasst. Alle diese Einflüsse, auch wenn sie sich nur auf kleinem Raum auswirken, können das gesamte Klima beeinflussen.

Ein einfaches Beispiel hierfür ist der Einfluss der Topographie auf die Temperatur. Wegen der Energieerhaltung nimmt die Temperatur eines trockenen Luftpaketes, das aufsteigt, um 9,8 K pro Kilometer ab. Bei einem Gitterabstand von 160 km werden die Alpen allerdings nur durch ein paar höhere Gitterpunkte angedeutet (Abbildung 4a). Der höchste „Gipfel“, oder in diesem Fall eher ein virtuelles Hochplateau, ist 1394 m hoch. Die Luft dort hätte demnach eine Temperatur von 6 °C, wenn wir für die Meereshöhe eine Temperatur von 20 °C annehmen. In der Realität ist der Mont Blanc, der höchste Berg der Alpen, 4810 m hoch, und die Temperatur läge in dieser Höhe bei -27 °C. Mit einer sturmauflösenden Auflösung von 2,5 km (Abbildung 4b) ist der Mont Blanc immerhin schon 4018 m hoch, mit einer Lufttemperatur am „Gipfel“ von -19 °C.

Vor diesem Hintergrund wird erwartet, dass sturmauflösende Klimamodelle die beobachtete Welt besser widerspiegeln. Ist es tatsächlich so? Vergleiche zwischen regionalen sturmauflösenden Klimamodellen und regionalen konventionellen Klimamodellen, die einen Gitterabstand von 10–50 km besitzen und Konvektion parametrisierten, haben gezeigt, dass Verbesserungen vor allem über Regionen mit ausgeprägter Topographie oder im Sommer zu sehen sind [9]. Das ist wegen der detaillierteren Darstellung der Topographie und der expliziten Simulation der Konvektion auch zu erwarten.

Besonders auffällig sind Verbesserungen der Niederschlagscharakteristiken im Tagesverlauf. In konventionellen Klimamodellen erreicht konvektiver Niederschlag über Land sein Maximum um die Mittagszeit. Das mag plausibel erscheinen, da um diese Zeit die Sonneneinstrahlung und somit der Energieeintrag am größten ist. Die Energiemenge wird in Parametrisierungen der Konvektion als Maß für die Stärke der Konvektion eingesetzt. In der Realität und aus

eigener Erfahrung weiß man, dass Gewitter eher am späten Nachmittag auftreten und damit der konvektive Niederschlag zu dieser Tageszeit sein Maximum erreicht. Sturmauflösende Klimamodelle machen dies richtig, unabhängig von der simulierten Region.

Dieser Versatz zwischen maximalem Energieeintrag und maximaler Niederschlagsmenge ist nicht restlos erklärt. Eine Erklärung ist, dass der meiste Niederschlag fällt, wenn sich einzelne konvektive Zellen zu einem großen Gewitter verbinden, das ergiebig Niederschlag produziert und über große Entfernungen ziehen kann. Dieser Prozess der Organisation und der Propagation wird von Parametrisierungen der Konvektion nicht berücksichtigt, geschieht jedoch in sturmauflösenden Klimamodellen automatisch. Klassische Beispiele dafür sind die Zugbahn von Gewitterzellen, ausgehend von den Rocky Mountains Richtung Osten über die Great Plains in den USA, oder die westlichen Zugbahnen von Sturmfronten über dem Sahel, die nur in sturmauflösenden Modellen und in Beobachtungen zu sehen sind.

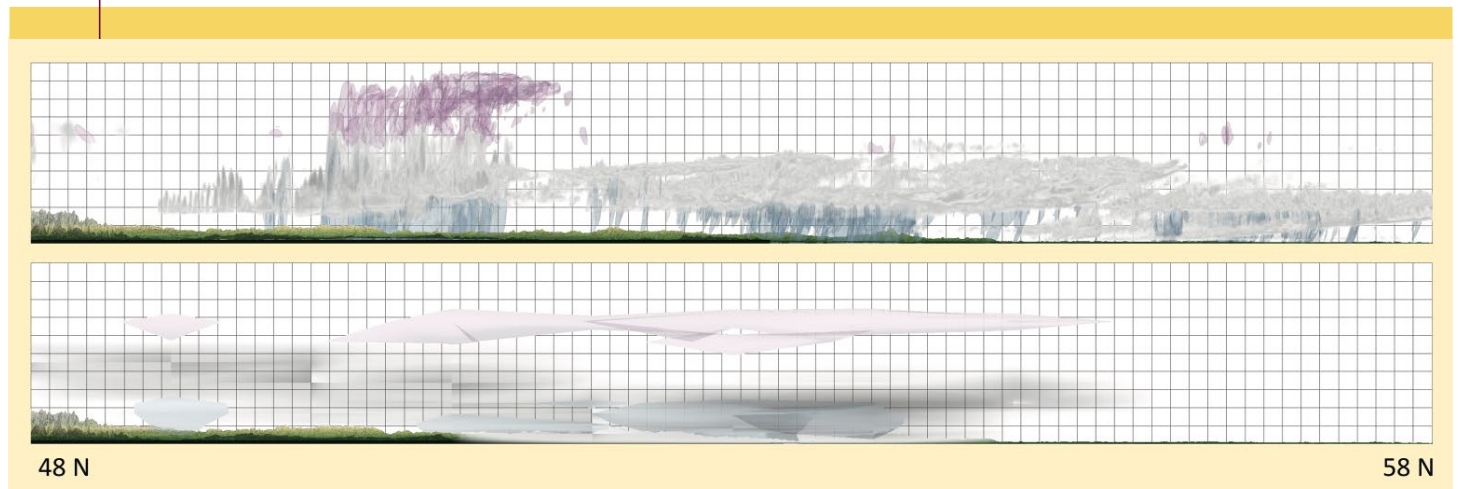
Nicht nur der Tagesgang, sondern auch die Häufigkeitsverteilung von stündlichen Niederschlagswerten passt in sturmauflösenden Klimamodellen besser mit der Realität zusammen. Konventionelle Klimamodelle überschätzen leichte und unterschätzen starke Niederschlagsmengen: Es nieselt quasi die ganze Zeit. Dies mag Hamburgern nicht komisch vorkommen, ist aber nicht überall auf der Welt so und hat Implikationen für das Klima, da die Böden zu feucht bleiben. Das Nieselproblem ist verständlich, da eine Parametrisierung der Konvektion nur auf Basis der mittleren Temperatur und der mittleren Feuchte einer im besten Fall $10 \times 10 \text{ km}^2$ großen Gitterzelle entscheiden muss, ob irgendwo in dieser Gitterzelle Konvektion ausgelöst wird. In der Realität sind Temperatur und Feuchte auf so einem Gebiet nicht homogen verteilt. Es existieren wärmere und feuchtere Bereiche, wo Konvektion sich bevorzugt bildet.

In Parametrisierungen der Konvektion werden die Kriterien für das Auslösen der Konvektion nicht zu strikt angewandt, damit genug Niederschlag produziert wird, auf Kosten der Häufigkeitsverteilung. Das heißt, es regnet öfter, aber nicht so heftig. Dagegen ist die Häufigkeitsverteilung von stündlichen Niederschlagswerten in sturmauflösenden Klimamodellen besser wiedergegeben. Es nieselt nicht die ganze Zeit, aber extreme Niederschlagswerte sind im Vergleich zu Beobachtungen tendenziell überschätzt. Dies lässt sich mit dem teilweise noch zu groben Gitterabstand für eine richtige Auslösung der Konvektion erklären. Eine $2,5 \times 2,5 \text{ km}^2$ -Gitterzelle kann im Gegensatz zu einer kleineren Zelle zu lange stabil bleiben, sodass sich kein Niederschlag bildet. Dadurch akkumuliert sich die konvektive Energie laufend, bis die Konvektion dann explosionsartig ausgelöst wird. Im Gegensatz dazu können sich konvektive Wolken in der Realität schon auf kleineren Skalen bilden, was früher und bei einer geringeren Akkumulation von konvektiver Energie, sprich bei schwächerer Konvektion und geringerem Niederschlag, passiert.

Auch wenn der Tagesgang des Niederschlags und die Häufigkeitsverteilung der stündlichen Niederschlagsmengen systematisch besser dargestellt sind als in herkömmlichen Klimamodellen, fallen die Verbesserungen durch regionale sturmauflösende Klimamodelle bei längerfristigen Niederschlagsstatistiken, zum Beispiel täglichen Niederschlagsmengen, nur vergleichsweise geringfügig aus. Ähnliche Schlussfolgerungen lassen sich aus Vergleichen zwischen sturmauflösenden und konventionellen regionalen Klimaprognosen herleiten [10].

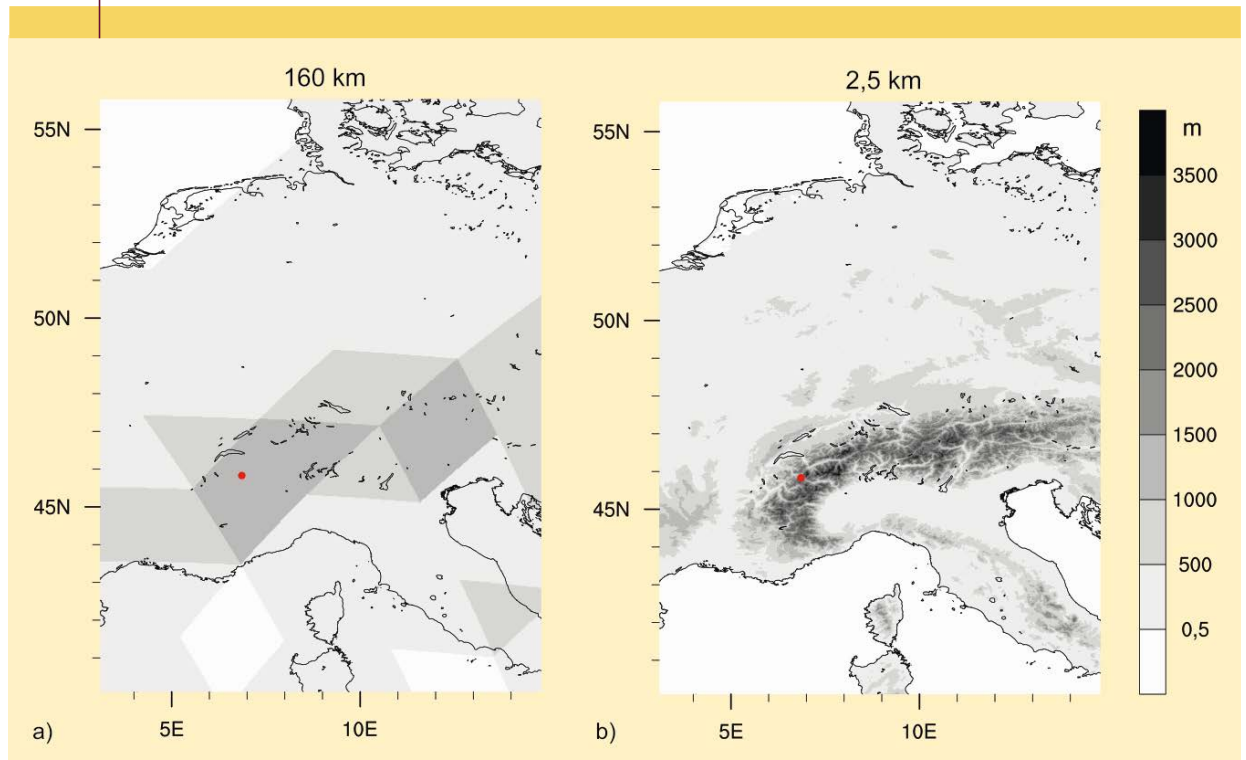
Sturmauflösende Gitterabstände sind daher vor allem wichtig, um Veränderungen in der Intensität und Dauer von Sommerniederschlag im Verlauf des Tages, sowie um Veränderungen in kurzen Niederschlagsextremwerten zu bestimmen. Den in die Zukunft projizierten Veränderungen von stündlichen Niederschlagsextremwerten wird beson-

ABB. 3 | KONVEKTIVE PROZESSE



Visualisierung konvektiver, in einem frontalen System eingebundener, Prozesse. Oben eine Simulation mit 156 m Auflösung, unten eine Simulation mit 40 km Auflösung und parametrisierter Konvektion. Rosa zeigt Wolkeneis, grau Wolkenwasser und blau Niederschlag (aus [18]).

ABB. 4 | AUFLÖSUNG UND TOPOGRAPHIE



Topographie in einer Simulation mit a) 160 und b) 2,5 km Gitterauflösung. Die Dreiecke entsprechen den Gitterzellen des Modells. Rot markiert ist der Mont Blanc.

dere Aufmerksamkeit geschenkt, weil solche Extremereignisse gesellschaftlich relevant sind. Prinzipiell gibt es keinen Grund zur Annahme, dass eine Parametrisierung der Konvektion, die per Definition den mittleren Effekt von Gewittern über einem großen Gebiet der Gitterzelle wiedergeben soll, extreme Ereignisse, die sehr lokale Phänomene sind, erfassen kann.

Sturmauflösende Klimamodelle prognostizieren tendenziell eine stärkere Intensivierung der Niederschlagsextremwerte als konventionelle Klimamodelle, auch wenn es Ausnahmen gibt. Aus Klimaprojektionen von sturmauflösenden Klimamodellen wurden Skalierungsraten von 6,5% mehr Niederschlag pro Grad Erdoberflächen-Temperaturerhöhung (über Mitteleuropa und USA) und mehr (über England und Afrika) gefunden. Ein Skalierungsrate von 6,5% pro Grad Temperaturerhöhung lässt sich rein thermodynamisch erklären. Sie entspricht genau dem, was die Clausius-Clayperon-Gleichung besagt, also die thermodynamische Beziehung zwischen Phasenübergängen und Temperatur. Andere Werte deuten darauf hin, dass dreidimensionale dynamische Effekte, nicht allein die Erdoberflächen-Temperatur, wichtig für die Niederschlagsmengen sind.

Zusammenspiel mit der Landoberfläche

Im Klimasystem spielen viele Komponenten zusammen. Diese Interaktion, zum Beispiel zwischen Atmosphäre und Landoberfläche, nennt man Kopplung. Auch wenn zwei

Modelle das gleiche mittlere Klima vorweisen, bedeutet es noch nicht, dass die Wechselwirkung zwischen einzelnen Komponenten gleich abläuft. Verschiedene Kopplungen führen aber zu unterschiedlichen Veränderungen des Klimas, wenn sich eine der Komponenten ändert, was wichtige Konsequenzen für das Klimasystem haben kann. Es ist dementsprechend wichtig, auch die Stärke von Kopplungen im Klimasystem in verschiedenen Klimamodellen zu untersuchen. Hier gibt es Anzeichen, dass sich Land-Atmosphäre-Kopplungen in sturmauflösenden und in konventionellen Klimamodellen unterscheiden.

Nehmen wir die Stärke der Kopplung zwischen Bodenfeuchte und Niederschlag als Beispiel. Regnet es an einem Ort, nimmt die Bodenfeuchte zu. Dadurch kann mehr Wasser vom Boden in die Atmosphäre verdunsten. Mehr Feuchte wird in der Atmosphäre in Niederschlag umgewandelt, und der einfallende Niederschlag führt zu einem weiteren Anstieg der Bodenfeuchte. Dies ist die einfachste Erklärung für eine positive – oder auch sich selbst verstärkende – Rückkopplung zwischen Bodenfeuchte und Niederschlag. Andere physikalische Argumente existieren, die sowohl eine positive, verstärkende als auch eine negative, dämpfende Kopplung ermöglichen.

Mit Hilfe von Sensitivitätsstudien, in denen die Bodenfeuchte in einem Klimamodell a priori verändert wird, lässt sich die Stärke der Kopplung eruieren. In einer früheren Arbeit hat die Autorin am Beispiel einer Simulation eines

Sommermonats über den Alpen herausgefunden, dass in einem sturmauflösenden Klimamodell die Kopplung negativ ist, während das gleiche Experiment mit einem konventionellen Klimamodell eine positive und überdies stärkere Kopplung offenbarte [11].

Die positive Kopplung bedeutet, dass im konventionellen Klimamodell – im Gegensatz zum sturmauflösenden Klimamodell – die Bodenfeuchte sehr wichtig für die produzierten Niederschlagsmengen ist. Daher könnte der Zustand des Bodens, wie während einer Dürreperiode, über lange Zeiträume den Niederschlag verhindern. Es stellte sich heraus, dass die Art der Kopplung, ob positiv oder negativ, in konventionellen Klimamodellen von der Konstruktion der Parametrisierung der Konvektion abhängt. Es bleibt offen, welches der beiden Klimamodelle Recht hat, aber sicherlich sollte die Kopplung nicht vom Design der Parametrisierung der Konvektion abhängen.

Ein anderer Aspekt der Kopplung zwischen Bodenfeuchte und Niederschlag betrifft die Wechselwirkung zwischen Zirkulationen, die durch feinskalige Heterogenitäten in der Bodenfeuchte auf einer mittleren (Meso-) Skala von etwa 50 km ausgelöst werden, und Gewittern [12]. Feuchtere Böden sind kälter als trockene, da ein Teil der Sonneneinstrahlung Bodenfeuchte verdunstet anstatt den Boden zu erwärmen. Horizontale Temperaturunterschiede führen zu Druckunterschieden und somit zu einer Zirkulation in der Atmosphäre. Über dem feuchten Boden entsteht eine positive Druckanomalie, da kalte Luft dichter und schwerer ist, damit weht der Wind zum trockenen Boden. Dort kann er Konvektion auslösen, da es an der Front der Zirkulation Aufwärtsbewegungen der Luft gibt. Als Ergebnis wird Konvektion bevorzugt über warmen und trockenen Böden ausgelöst.

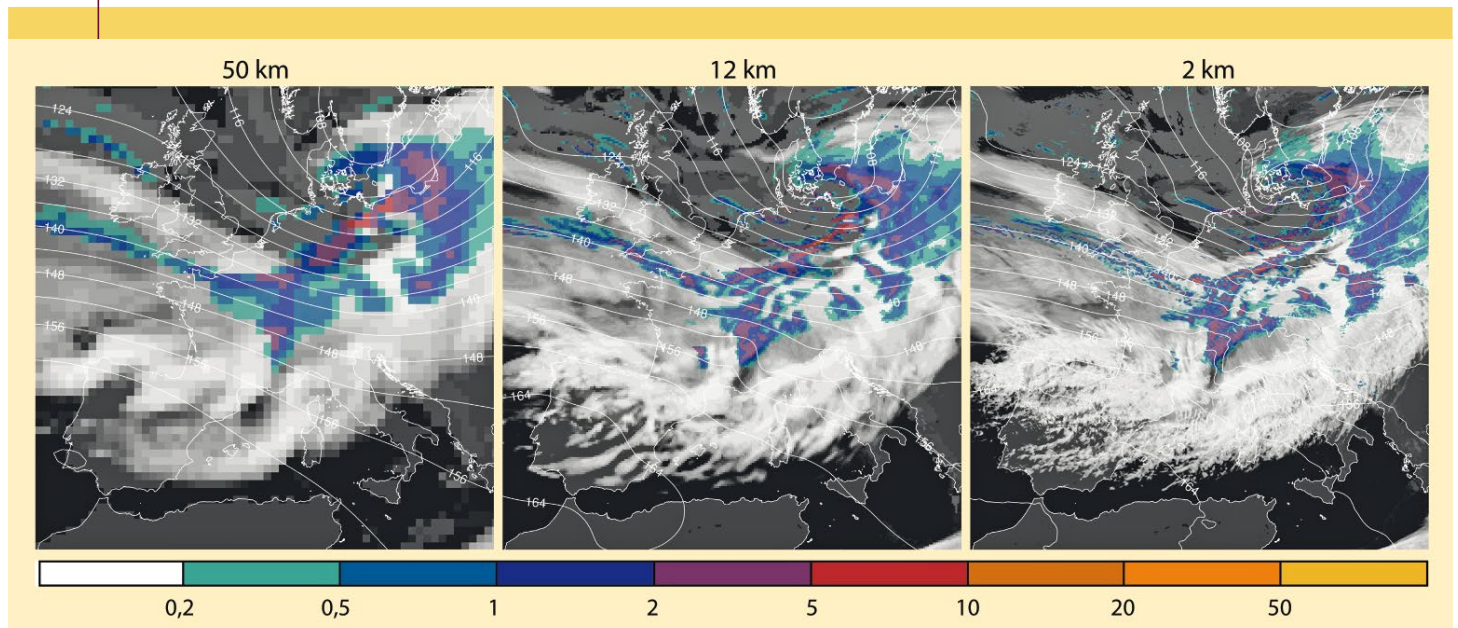
Dies wurde auch in Beobachtungen nachgewiesen, insbesondere in semiariden Regionen der Welt wie dem Sahel. Das Gleiche passiert in sturmauflösenden Klimamodellen, nicht aber in konventionellen. Bei letzteren Modellen führt der oben erwähnte falsche Tagesgang der Konvektion dazu, dass sich diese schon vor der Entstehung einer durch Bodenfeuchte-Heterogenitäten ausgelösten Zirkulation bildet und deren Entstehung unterdrückt. Darüber hinaus sind mesoskalige Bodenfeuchte-Heterogenitäten zu klein, um in vielen konventionellen Klimamodellen abgebildet zu werden.

Großräumige Zirkulation der Atmosphäre

Ein sturmauflösendes Klimamodell liefert klimatische Information auf Skalen, die direkt für die Menschen von Relevanz sind. Sogar großräumige Wetterphänomene, wie Fronten und Tiefdruckgebiete, offenbaren einen Reichtum an Details, die in Modellen mit grober Auflösung völlig abwesend sind (Abbildungen 1 und 5). Die Frage, wie wichtig solche Details für die großräumige Zirkulation der Atmosphäre im Allgemeinen sind, ob sie relevant auf der klimatischen Zeitskala sind, ist zurzeit ein heißes Forschungsthema.

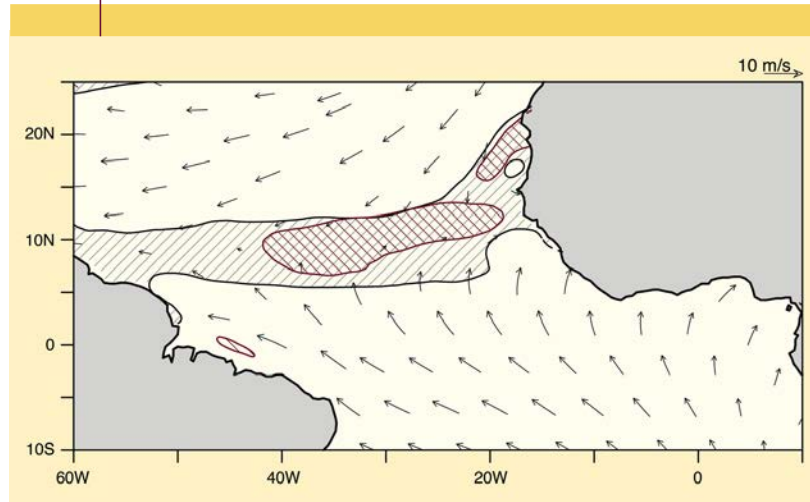
Um diese Frage zu beantworten, braucht es eine hohe Auflösung auf sehr großen, am besten auf globalen Domänen, und lange Integrationsperioden, damit die feinen Skalen – die schon eingeführten Mesoskalen – die groben Skalen beeinflussen können. Regionale sturmauflösende Klimasimulationen haben den Nachteil, dass sie Informationen über den Zustand der Atmosphäre am Rand ihres Simulationsgebietes brauchen. Diese Informationen werden von einem konventionellen, globalen Klimamodell geliefert. Das bedeutet, dass die großräumige Zirkulation der Atmosphäre

ABB. 5 | KYRILL IN VERSCHIEDENEN AUFLÖSUNGEN



Schnappschuss vom Sturm Kyrill in Modellen mit verschiedenen Auflösungen. Weiß: Wolken, Farbschattierung: Niederschlag in mm h^{-1} (aus [19]).

ABB. 6 | KALMENGÜRTEL



Wind und Lage des Kalmengürtels (schraffierter Bereich) über dem tropischen Atlantik in einer sturmauflösenden Simulation (schwarz) und einem konventionellen Klimamodell (rot) mit 80 km Gitterabstand und parametrisierter Konvektion. Die sturmauflösende Simulation stellt die Lage des Kalmengürtels realistischer dar. Diese ist definiert durch die Variabilität des Windes. Im Kalmengürtel weht der Wind weniger als 70 % der Zeit aus der gleichen Richtung, außerhalb ist er stärker und ändert seine Richtung kaum (nach [16]).

dem Regionalmodell von außen vorgegeben ist – es gibt keine Rückwirkung. Dies trifft umso mehr zu, je kleiner die Simulationsregion ist.

Die erste Studie, in der ein potenzieller Effekt der feinen Skala auf die großräumige Zirkulation der Atmosphäre gezeigt wurde, betrifft die Bewegung des Monsuns über Afrika [13]. In konventionellen Klimamodellen propagiert der Monsun nicht weit genug landeinwärts. Es wurde gezeigt, dass kleinskalige Gewitterböen, die in konventionellen Klimamodellen nicht abgebildet werden, zum meridionalen Feuchtetransport des Monsuns beitragen und so dessen Wanderung ins Land einwärts helfen. Außerdem bewirkt der falsche Tagesgang des Niederschlages in konventionellen Klimamodellen eine starke Wolkenbedeckung zur Mittagszeit, genau dann, wenn die Sonneneinstrahlung und Erwärmung am stärksten sind. Das Land erwärmt sich weniger stark, was zu einem verringerten Druckgradienten zwischen Land und Ozean und zu einem schwächeren Monsun führt. Ähnliches wurde für die Propagation des Monsuns über Indien dokumentiert [14]. Andere Beispiele der Bedeutung der feinen Skalen sind mögliche Effekte auf die Darstellung der Hadley-Zirkulation [15], die Passatwinde antreibt, und, aus unserer Arbeit, auf die Darstellung des Kalmengürtels, also der Region mit häufiger Windstille, in den Tropen [16] (Abbildung 6).

Wie fein ist fein genug?

Auch mit einer hohen Auflösung von einigen Kilometern lassen sich noch nicht alle atmosphärischen Prozesse explizit darstellen (Abbildung 2). Dies führt uns zu der Frage, wie fein bei der horizontalen Auflösung fein genug für

realistischere Klimasimulationen ist. In der numerischen Mathematik konvergieren numerische Lösungen einer Gleichung bis zu dem Punkt, wo sie sich trotz weiterer Verfeinerung des Gitterabstandes nicht mehr weiter verändern.

Für die Atmosphäre allerdings lässt sich die Frage der Konvergenz nicht so einfach beantworten. Erstens hängt es von der ausgewählten Metrik ab: Mischungsprozesse innerhalb einer Wolke konvergieren bei einigen Zentimetern; gemittelte Statistiken über größere Gebiete, wie ein über den Alpen gemittelter Niederschlag, konvergieren aber schon bei einem Gitterabstand von etwa 4 km. Hier hilft Mittelung also, den Effekt von den kleinsten, nicht berechenbaren Skalen auszufiltern.

Zweitens konvergieren nicht alle atmosphärischen Prozesse bei einer Gitterverfeinerung zu einem bekannten physikalischen Gesetz. In dieser Hinsicht erscheint es hilfreicher, zu bestimmen, wann Abweichungen von einer realistischen Klimadarstellung, die durch eine ungenügende Auflösung bedingt sind, kleiner werden als rein numerisch bedingte Unterschiede, die durch eine Veränderung der übrigen Parametrisierungen verursacht werden. In einer aktuellen Studie [17] haben wir hierzu bei einer 40-tägigen globalen Klimasimulation die Auflösung systematisch von 80 km bis zu 2,5 km halbiert, ohne andere Parameter der Auflösung anzupassen. Die daraus resultierenden Unterschiede haben wir mit der Standardabweichung eines Ensembles aus acht globalen sturmauflösenden Klimamodellen, die parallel das Klima über den gleichen Zeitraum simulierten, verglichen. So konnten wir ein Maß für den Parametrisierungsfehler bekommen.

Überraschenderweise konnte eine Gitterauflösung von 80 km schon viele der untersuchten globalen Klimastatistiken, wie Niederschlag, erfassen. Dies gilt auch für die langwellige Wärmestrahlung von Atmosphäre, Wolken und Boden. Umgekehrt fanden wir jedoch bei der auf den Boden einfallenden Sonneneinstrahlung, die um etwa 40 Wm^{-2} über der Reihe der getesteten Auflösungen variierte, sogar die größten Unterschiede. Ursache ist der starke Einfluss der Kumuli, also der flachen Konvektion (Abbildung 2), die bei größerer Auflösung schwer aufzulösen sind.

Zusammenfassend stellte sich heraus, dass ein Gitter von 5 km fein genug erscheint, um die grundlegenden Eigenschaften des Klimasystems zu erfassen. Dies sind gute Nachrichten für die Machbarkeit von globalen sturmauflösenden Klimasimulationen über eine Referenzklimaperiode von dreißig Jahren.

Zusammenfassung

Mit dem Fortschritt der Computerleistung rückt der Traum näher, globale numerische Klimasimulationen über 30 Jahre mit einem Modellgitterabstand von 5 km durchzuführen. Solche sturmauflösenden Simulationen erlauben eine bessere Darstellung der Erdoberfläche als konventionelle globale Klimamodelle, wie im IPCC-Bericht benutzt, die mit einem typischen Gitterabstand von 150 km arbeiten. Sie ermöglichen

eine explizite Darstellung der Konvektion, die sich auf feinen Skalen abspielt und durch das Gitteraster konventioneller Klimamodelle fällt. Studien für kleinere Gebiete oder kürzere Zeitperioden haben gezeigt, dass sturmauflösende Klimamodelle den Tagesgang von konvektivem Niederschlag und die Häufigkeitsverteilung von stündlichen Niederschlagswerten besser widerspiegeln als konventionelle Klimamodelle. Es gibt auch Anzeichen, dass die Wechselwirkungen im Klimasystem, etwa zwischen Land und Atmosphäre, in den neuen Modellen anders funktionieren. Zudem deutet sich an, dass feinskalige Aspekte die großräumige Zirkulation der Atmosphäre verändern können. Damit könnten sturmauflösende Klimasimulationen für große Gebiete und lange Zeitperioden Überraschungen bringen.

Stichwörter

Sturmauflösendes Klimamodell, dekadische Klimasimulation, Parametrisierung, Skalen, Konvektion, Niederschlag, Gewitter, Monsun, Topographie, großräumige Zirkulation, Land-Atmosphäre-Interaktion, Weltklimarat, IPCC.

Danksagung

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Literatur

- [1] G. A. Grell et al., J. Geophys. Res. **2000**, 105 (D24), 29595.
- [2] C. Hohenegger, P. Brockhaus, C. Schär, Meteorol. Z. **2008**, 17(4), 383.
- [3] L.-L. Pan et al., Clim. Dyn. **2011**, 37, 2005.
- [4] E. J. Kendon et al., J. Climate **2012**, 25(17), 5791.
- [5] C. Liu et al., Clim. Dyn. **2017**, 49, 71.
- [6] H. Miura et al., Geophys. Res. Lett. **2007**, 34, L02804.
- [7] B. Stevens et al., Prog. Earth Planet. Sci. **2019**, 6, 61.
- [8] O. Fuhrer et al., Geosci. Model Dev. **2018**, 11, 1665.
- [9] S. Berthou et al., Clim. Dyn. **2018**,
<https://doi.org/10.1007/s00382-018-4114-6>
- [10] E. Kendon et al., Bull. amer. Meteor. Soc. **2017**, 98, 79.
- [11] C. Hohenegger et al., J. Climate **2009**, 22, 5003.
- [12] C. Taylor et al., Geophys. Res. Lett. **2013**, 40(23), 6213.
- [13] J. H. Marsham et al., Geophys. Res. Lett. **2013**, 40(9), 1843.

- [14] P. D. Willets et al., Q. J. R. Meteorol. Soc. **2017**, 143(703), 1073.
- [15] N. C. G. Hart, R. Washington, R. A. Stratton, Geophys. Res. Lett. **2018**, 45, 11334.
- [16] D. Klocke et al., Nat. Geosci. **2017**,
<https://doi.org/10.1038/s41561-017-0005-4>
- [17] C. Hohenegger et al., J. Meteor. Soc. Japan **2020**, 98, 73.
- [18] B. Stevens et al., J. Meteor. Soc. Japan **2020**, 98, 395.
- [19] D. Leutwyler et al., Geosci. Model Dev. **2016**,
<https://doi.org/10.5194/gmd-9-3393-2016>

Die Autoren



Cathy Hohenegger studierte und promovierte an der ETH Zürich. Anschließend war sie Postdoc an der U. Washington (Seattle), bevor sie zum Max-Planck-Institut für Meteorologie wechselte. Dort leitet sie seit 2011 eine der MPI-Forschungsgruppen und gemeinsam mit Daniel Klocke am Hans-Ertel-Zentrum-für Wetterforschung ein Projekt zum Thema Wolken und Konvektion. **Daniel Klocke** leitet seit 2015 als Mitarbeiter des Deutschen Wetterdienstes gemeinsam mit Cathy Hohenegger am Hans-Ertel-Zentrum für Wetterforschung ein Projekt zum Thema Wolken und Konvektion. Er promovierte am MPI für Meteorologie in Hamburg, und forschte anschließend am Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage in Reading, Großbritannien.

Anschrift

Dr. Cathy Hohenegger, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Bundesstr. 53, 20146 Hamburg. Cathy.Hohenegger@mpimet.mpg.de

Dr. Daniel Klocke, Hans-Ertel-Zentrum für Wetterforschung, Deutscher Wetterdienst, Frankfurter Straße 135, 63067 Offenbach. Daniel.Klocke@dwd.de